



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



Estudo da Interferência de uma Metasuperfície no Desempenho das Antenas de Microfita

RAFAEL CELESTINO DOS SANTOS

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

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

Número de Ordem PPgEEC: M477
Natal, RN, dezembro de 2016

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Santos, Rafael Celestino Dos.

Estudo da interferência de uma metasuperfície no desempenho das antenas de microfita / Rafael Celestino Dos Santos. - 2016.
76 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e da Computação. Natal, RN, 2016.

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

1. Antenas de microfita - Dissertação. 2. Metamaterial - Dissertação. 3. Metasuperfície - Dissertação. I. CAMPOS, ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.396.67



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

ATA Nº 477

Aos dezesseis dias do mês de dezembro do ano de dois mil e dezesseis, foi realizada a 477ª sessão de defesa de dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN, na qual o mestrando Rafael Celestino dos Santos apresentou o trabalho que tem como título: Estudo da Interferência de uma Metassuperfície no desempenho das Antenas de Microfita. A sessão teve início às 09h00min, tendo a banca examinadora sido constituída pelos seguintes participantes: Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos (Dr. UFRN, Orientador), Ronaldo de Andrade Martins (Dr. UFRN, Examinador Externo ao Programa) e Erico Cadineli Braz (Dr. IFRN, Examinador Externo à Instituição). Após a apresentação do trabalho e o exame pela banca, o mestrando foi considerado aprovado, tendo sido lavrada a presente ata, que vai assinada pelos examinadores e pelo mestrando. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo máximo de 60 dias, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o Artigo 49 da Resolução 197/2013 - CONSEPE, o candidato não terá o título se não cumprir as exigências acima.


Dr. ERICO CADINELI BRAZ, IFRN

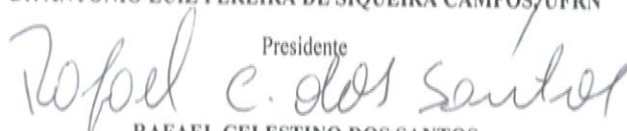
Examinador Externo à Instituição


Dr. RONALDO DE ANDRADE MARTINS, UFRN

Examinador Externo ao Programa


Dr. ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, UFRN

Presidente


RAFAEL CELESTINO DOS SANTOS

Mestrando

Aos meus familiares pelo apoio,
incentivo e paciência que tiveram
comigo durante o árduo período desse
trabalho.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar com saúde, sabedoria, força e muita fé para chegar a esse objetivo tão esperado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, pela oportunidade e boa vontade de me orientar, passando conhecimentos e determinação. E sempre paciente durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Sandro Gonçalves, pela amizade e orientação durante parte do trabalho, que por motivo de força maior não pode dar continuidade.

Aos meus familiares, que sempre me deram apoio, incentivo, conselhos e força durante esse árduo período.

Aos amigos de laboratório, que de forma direta ou indireta contribuíram para o sucesso desse trabalho.

A todo quadro docente do PPGEEC pelos ensinamentos e disponibilidade em ajudar.

À Marinha do Brasil, pela oportunidade e autorização para a realização do mestrado.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar a influência de uma metasuperfície, um tipo especial dos metamateriais, no desempenho das antenas de microfita. As metasuperfícies são materiais artificiais que não são encontrados em sua forma convencional na natureza e apresentam características eletromagnéticas não convencionais, como o índice de refração e os coeficientes de permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativos o que provocam efeitos eletromagnéticos atrativos para diversas aplicações, como por exemplo: melhorar a performance de uma antena de microfita como será mostrado nesse trabalho.

Iniciaremos o trabalho mostrando um breve histórico, definições e propriedades eletromagnéticas das antenas, antenas de microfita, metamateriais e das metasuperfícies. Em seguida, iremos projetar e confeccionar uma antena de microfita com e sem a utilização de uma metasuperfície onde simularemos através do software HFSS Ansoft Designer e testaremos em laboratório através do equipamento E5071C ENA Network Analyzer. Por fim, realizaremos uma análise comparativa, mostrando o quanto a metasuperfície melhora a performance de uma antena de microfita através de uma análise dos diversos parâmetros da antena, como: perda de retorno, ganho de potência, diretividade e impedância de entrada.

Palavras-chaves: Antenas, Antenas de Microfita, Metamaterial, Metasuperfície e HFSS Ansoft Designer.

Abstract

This paper aims to present the influence of a metasurface, a special type of metamaterials, in the performance of microstrip antennas. The metasurface are artificial materials that are not found in a conventional manner in nature and do not have conventional electromagnetic characteristics such as refractive index and coefficient of permittivity and negative magnetic permeability which causes attractive electromagnetic effects for various applications, such as: improving the performance of a microstrip antenna as will be shown in this work.

We started the work showing a brief history, definitions and electromagnetic properties of the antennas, microstrip antennas, metamaterials and metasurfaces. Next, we will design and manufacture a microstrip antenna with and without the use of a metasurface where we will simulate through HFSS Ansoft Designer software and test in the laboratory with the E5071C ENA Network Analyzer. Finally, we will perform a comparative analysis, showing how the metasurface improves the performance of a microstrip antenna by analysis of the various parameters antenna, such as: return loss, power gain, directivity and input impedance.

Keywords: Antennas, Microstrip Antennas, Metamaterials, Metasurface and HFSS Ansoft Designer.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos e Abreviaturas	vii
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Organização do Trabalho	02
2. Antenas	04
2.1. Histórico	04
2.2. Definição	05
2.3. Parâmetros Fundamentais	09
2.3.1. Diagrama de Radiação	09
2.3.2. Potência Radiada	10
2.3.3. Intensidade de Radiação	10
2.3.4. Largura de Feixe	11
2.3.5. Diretividade	11
2.3.6. Eficiência	11
2.3.7. Ganho	12
2.3.8. Largura de Banda	12
2.3.9. Polarização	13
3. Antenas de Microfita	15
3.1. Histórico	15
3.2. Definição	16
3.3. Métodos de Alimentação	18
3.3.1. Alimentação por Linha de Microfita	18
3.3.2. Alimentação Coaxial	20
3.3.3. Acoplamento por Abertura	20
3.3.4. Acoplamento por Proximidade	21

3.4. Métodos de Análise	22
3.5. Substrato	24
4. Metamaterial	28
4.1. Histórico	28
4.2. Definição	29
4.3. Fundamentos Físicos	30
4.3.1. Dielétricos Artificiais	33
4.3.2. Materiais Magnéticos Artificiais	33
4.3.3. Materiais Magneto-dielétricos Artificiais	34
4.3.3.1. Permissividade Elétrica Negativa	35
4.3.3.2. Pemeabilidade Magnética Negativa	36
5. Metasuperfície	40
5.1. Histórico	41
5.2. Definição e Propriedades	41
5.3. Aplicações com Antenas de Microfitas	42
6. Resultados	50
6.1 Problema Proposto	50
6.2 Análise Paramétrica do efeito do Substrato	51
6.3 Modelagem	55
6.4 Resultados Simulados	58
6.4.1 Antena de Microfitas Sem a Metasuperfície (AMSM)	58
6.4.2 Antena de Microfitas Com a Metasuperfície (AMCM)	60
6.5 Resultados Experimentais	65
6.5.1 Antena de Microfitas Sem a Metasuperfície (AMSM)	65
6.5.2 Antena de Microfitas Com a Metasuperfície (AMCM)	67
7. Conclusão	70
Referências Bibliográficas	73

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Alguns ramos industriais que utilizam as antenas de microfita em suas tecnologias.	01
Figura 2.1 - Configuração de Antenas Transmissora e Receptora.	06
Figura 2.2 - Diagrama de um sistema de comunicação utilizando a antena como um dispositivo de transição.	06
Figura 2.3 - Circuito equivalente de Thevenin para uma antena no modo de transmissão.	07
Figura 2.4 - Configurações de Antenas Filamentares.	07
Figura 2.5 - Configurações de Antenas Abertura.	08
Figura 2.6 - Antena de Microfita com Patch Retangular.	08
Figura 2.7 - Exemplos de Conjunto de Antenas.	09
Figura 2.8 - Lóbulos de Radiação.	10
Figura 2.9 - Larguras de Feixe mostradas em um diagrama de radiação.	11
Figura 2.10 - Largura de Banda	13
Figura 3.1 - Antenas de Microfita com Patch Retangular.	15
Figura 3.2 - Aplicações de antenas de microfita nos ramos de telecomunicações e eletrônica. .	15
Figura 3.3 - Antena de Microfita Convencional.	16
Figura 3.4 - Formas mais comuns para o Patch de uma Antena de Microfitas.	17
Figura 3.5 Distribuição do Campo Elétrico em uma Antena de Microfitas com Patch Retangular.	17
Figura 3.6 - Alimentação por Linha de Microfita.	18
Figura 3.7 - (a) Linha de alimentação indentada de Microfita e (b) Resistência de entrada normalizada.	19
Figura 3.8 Antena de Microfita Retangular com Alimentação Coaxial.	20
Figura 3.9 Antena de Microfita com Patch Retangular utilizando a Alimentação de Acoplamento por Abertura.	21
Figura 3.10 - Antena de Microfita com Patch Retangular utilizando a Alimentação de Acoplamento por Proximidade.	21
Figura 3.11 - Distribuição do Campo Elétrico numa Antena de Microfita com patch Retangular utilizando o Método de Análise LT.	22
3.12 - Geometria de uma plaqueta retangular de microfita em uma análise pelo método da cavidade.	24
Figura 3.13 - Principais substratos utilizados nas antenas de microfita: (a) Duroid, (b) Fibra de Vidro, (c) PTFE e (d) Alumina.	27
Figura 4.1 - Células Unitárias de Metamaterial.	29
Figura - 4.2 a) Estrutura composta por fios milimétricos (Thin Wire - TW) e b) estrutura composta pelos ressoadores de anel partido (Split - Ring Resonator - SRR).	30
Figura 4.3 - Diagrama de permissividade e permeabilidade para os quatro tipos de meios.	31

Figura 4.4 - Ilustração da propagação em um meio com Índice de Refração Positivo (RHM) e Índice de Refração Negativa (LHM).	32
Figura 4.5 - Ilustração das direções dos Campo Elétrico, Campo Magnético, Vetor de Poynting e do Vetor de Onda.	32
Figura 4.6 - Exemplos das geometrias para os Anéis de Ressonâncias.	34
Figura 4.7 - Estrutura composta por fios milimétricos (Thin Wire - TW).	35
Figura 4.8 - Estrutura composta por elementos ressoadores SRR.	37
Figura 4.9 - Modelos de circuito equivalente do SRR: (a) SRR com configuração Dupla e (b) configuração Simples.	38
Figura 4.10 - Modelo de circuito equivalente do SRR genérico: (a) com quatro anéis ressoadores e (b) circuito equivalente.	38
Figura 5.1 - Exemplo genérico de conjunto de células unitárias efetivas, homogêneas e bidimensionais.	41
Figura 5.2 - Exemplo de metasuperfície.	42
Figura 5.3 - Geometrias do (a) patch da antena; (b) metasuperfície e (c) unidade de célula da metasuperfície.	43
Figura 5.4 Protótipos do (a) patch da antena e da metasuperfície; (b) Antena de Microfitas com Frequência Reconfigurável.	43
Figura 5.5 - Gráficos da Permeabilidade Magnética Relativa e Permissividade Elétrica da antena para os ângulos de rotação 10°, 35°, 55° e 80° da Metasuperfície.	44
Figura 5.6 Configuração da Antena de Microfitas com a Metasuperfície proposta.	45
Figura 5.7 - Gráficos dos parâmetros S, permissividade elétrica e índice de refração da antena utilizando metasuperfície.	46
Figura 5.8 - Gráficos da perda de retorno para a antena de microfita com e sem a utilização da metasuperfície.	46
Figura 5.9 - Gráficos do ganho para a antena de microfita com e sem a utilização da metasuperfície.	47
Figura 5.10 - Configuração da antena de microfita utilizando Metasuperfície com 7x6 células.	47
Figura 5.11 - Gráficos da permissividade elétrica e permeabilidade magnética da antena utilizando metasuperfície.	48
Figura 5.12 - Gráficos do coeficiente de reflexão da antena utilizando metasuperfície.	48
Figura 5.13 - Gráficos do ganho e da diretividade para a antena de microfita com e sem a utilização da metasuperfície.	49
Figura 6.1 - Antena de Microfita projetada e simulada.	50
Figura 6.2 - Modelo da metasuperfície projetada.	51
Figura 6.3 - Antena de Microfita com a Metasuperfície Projetada e Simulada.	51
Figura 6.4 - Comprimento do Patch x Permissividade Elétrica Relativa do Substrato.	52
Figura 6.5 - Largura do Patch x Permissividade Elétrica Relativa do Substrato.	53

Figura 6.6 - Largura de Banda x Espessura do Substrato	54
Figura 6.7 - Frequência de Ressonância x Espessura do Substrato	54
Figura 6.8 - Largura de Banda x Permissividade Elétrica do Substrato	54
Figura 6.9 - Frequência de Ressonância x Permissividade Elétrica do Substrato	55
Figura 6.10 - Antena de microfita com patch retangular alimentada por uma linha de microfita.	57
Figura 6.11 - Gráfico da Perda de Retorno da antena de microfita projetada	58
Figura 6.12 - Gráfico do Ganho da antena de microfita projetada	59
Figura 6.13 - Gráfico da Carta de Smith para a antena de microfita projetada.	59
Figura 6.14 - Gráfico da Impedância de Entrada para a antena de microfita projetada	60
Figura 6.15 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada	60
Figura 6.16 - Gráfico do Ganho da AMCM projetada	61
Figura 6.17 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 0,5\text{mm}$	62
Figura 6.18 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 1,5\text{ mm}$	62
Figura 6.19 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 2,5\text{ mm}$	63
Figura 6.20 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 5,0\text{ mm}$	64
Figura 6.21 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 10,0\text{ mm}$	64
Figura 6.22- AMSM confeccionada e testada no laboratório da UFRN através do equipamento EC5071C ENA Network Analyzer	66
Figura 6.23- Resultado obtido em laboratório para a Perda de Retorno da AMSM	66
Figura 6.24- AMCM confeccionada e testada no laboratório da UFRN através do equipamento EC5071C ENA Network Analyzer	67
Figura 6.25-Resultado obtido em laboratório para Perda de Retorno AMCM para $d_m=2,5\text{mm}$. .	67
Figura 6.26- Resultado obtido em laboratório para Perda de Retorno da AMCM para $d_m=5\text{mm}$. .	68
Figura 6.27- Resultado obtido em laboratório para Perda de Retorno AMCM para $d_m=10\text{mm}$. .	69

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Alguns materiais e seus respectivos valores de constante dielétrica relativa.	26
Tabela 5.1 Dimensões da antena de microfita com frequência reconfigurável proposta.	43
Tabela 5.2 - Valores calculado e simulado para antena de microfita com metasuperfície com frequência reconfigurável.	45
Tabela 6.1 - Valores das dimensões do patch x permissividade elétrica relativa do substrato para $f_r = 2,45\text{GHz}$	51
Tabela 6.2 - Valores das dimensões do patch x permissividade elétrica relativa do substrato para $f_r = 5\text{GHz}$	52
Tabela 6.3 - Valores das dimensões do patch x permissividade elétrica relativa do substrato para $f_r = 10\text{GHz}$	52
Tabela 6.4 - Parâmetros das antena projetadas.	57
Tabela 6.5 - Resultados compilados da simulação	65
Tabela 6.5 - Resultados compilados dos testes realizados em laboratório	69

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A	Ampere
AMCM	Antena de Microfita com Metsuperfície
AMSM	Antena de Microfita sem Metasuperfície
B	Largura de Banda
c	Velocidade da luz
C_{MSRR}	Capacitância do <i>Multiple Split - Ring Resonators</i> (Múltiplos Anéis Ressonantes)
D	Diretividade
D_{max}	Diretividade máxima
da	Elemento de área
d_m	Distância entre a metasuperfície e antena de microfita
$\vec{E}$	Vetor campo Elétrico
e_c	Eficiência condutiva
e_d	Eficiência dielétrica
e_o	Eficiência total
e_r	Eficiência da reflexão
f_r	Frequência de ressonância
f_{ci}	Frequência central inferior
f_{cs}	Frequência central superior
G	Ganho
G_{abs}	Ganho absoluto
G_1	Condutância da fenda
h	Espessura
$\vec{H}$	Vetor campo magnético
K	Integral elíptica completa de primeira espécie
L	Comprimento
L_{ef}	Comprimento efetivo
LT	Linha de Transmissão
L_{MSRR}	Indutância do <i>Multiple Split - Ring Resonators</i> (Múltiplos Anéis Ressonantes)

L_{MSRR}	Indutância do <i>Multiple Split - Ring Resonators</i> (Múltiplos Anéis Ressonantes)
L_{FEN}	Largura do Feixe entre Nulos
LHM	<i>Left Handed Materials</i> (Materiais da Regra da Mão Direita)
LPMP	Largura do Feixe de Meia Potência
m	metro
MS	Metasuperfície
MSRR	<i>Multiple Split - Ring Resonators</i> (Múltiplos Anéis Ressonantes)
n	Índice de refração
$\vec{n}$	Vetor unitário normal à superfície
P	Potência
P_r	Potência radiada
P_{total}	Potência total
p	Polarização
$\vec{p}_a$	Vetor unitário de polarização da antena
$\vec{p}_w$	Vetor unitário de polarização da onda incidente
PLF	Fator de polarização
r	raio
R	Resistência
RHM	<i>Right Handed Materials</i> (Materiais da Regra da Mão Direita)
R_L	Resistência de carga
R_r	Resistência de radiação
R_x	Receptor
SRR	<i>Split - Ring Resonators</i> (Anéis de Ressonância)
t	Tempo
T_x	Transmissor
TW	<i>Thin Wire</i> (Fio Fino)
U	Intensidade de radiação
V	Volts
V_f	Velocidade de fase
V_g	Velocidade de grupo
w	Largura do Patch

W	Watt
W_0	Largura da linha de Microfita
W_{om}	Frequência magnética
W_{pe}	Frequência plasmática elétrica
W_{rad}	Densidade de radiação
$\overrightarrow{W}$	Vetor de poynting
X_A	Reatância da Antena
Z	Impedância
Z_A	Impedância da antena
Z_C	Impedância Característica
ΔL	Variação do comprimento
β	Constante de fase
ε	Permissividade elétrica
ε_{ef}	Permissividade elétrica efetiva
ε_o	Permissividade elétrica do Vácuo
μ	Permeabilidade Magnética
μ_{ef}	Permeabilidade Magnética efetiva
μ_o	Permeabilidade Magnética do Vácuo
ξ	Fator de perdas
λ	Comprimento de onda
λ_g	Comprimento de onda guiada
σ	Condutividade
ψ_P	Ângulo entre as direções de polarização da onda incidente e da antena receptora

Capítulo 1

Introdução

Com o rápido desenvolvimento tecnológico em diversos ramos, como na telecomunicação, tecnologia aeroespacial, indústria eletrônica, informática, automação e entre outros, como mostrado na Figura 1.1. Pesquisadores e a indústria mundial vêm buscando soluções técnicas que atenda aos requisitos de novos e melhores serviços exigidos pelas novas tecnologias dos equipamentos, como: tamanho reduzido, baixo custo, compatibilidade com os circuitos integrados, versatilidade das frequências de ressonâncias, facilidade de instalação e simplicidade dos projetos. Diante desse cenário as antenas de microfitas são introduzidas como alternativa viável de transmissão e recepção de informações por atender aos requisitos supracitados.



Figura 1.1 - Alguns ramos industriais que utilizam as antenas de microfitas em suas tecnologias:

(a) Aeroespacial e (b) Telefonia.

Fonte: Google Imagens.

Essas antenas são discretas, moldáveis a superfícies planas, de construção simples e de baixo custo. Elas são muito versáteis em termos de frequência de ressonância, polarização, diagrama e impedância. No entanto, possuem as desvantagens de possuir baixa eficiência, baixa potência, fraco desempenho de varredura e radiação de alimentação indesejáveis. Diante dessas desvantagens, nos últimos anos, diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas, visando melhorar o desempenho das antenas de microfitas, como: estudos sobre a espessura e os materiais utilizados como substratos, as formas do patch, utilização de alimentação múltiplas e não conectadas e a utilização dos metamateriais e metasuperfície (GIORDANO, 2005). Os Metamateriais são estruturas

eletromagnéticas efetivas, homogêneas e artificiais que não são encontradas em materiais na natureza. No entanto, sua estrutura é formada por elementos convencionais encontrados na natureza. Esses elementos são inseridos em pequenos blocos de construção, conhecidos como células unitárias, dispostos em arranjos uni, bi e tridimensionais. E sua principal característica é possuir valores de índice de refração, permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativos. Gerando assim efeitos atrativos em diversas áreas, como na propagação das ondas eletromagnéticas, ótica, biomedicina, processamento de sinais e entre outras (BARRO, 2005). Já as metasuperfícies tratam-se de metamateriais bidimensionais, que vem ganhando significativa atenção dos pesquisadores por possuir menor espaço físico. Assim, As metasuperfícies vem sendo tratadas pelos pesquisadores como uma das tecnologias mais promissoras da atualidade. Em especial, em aplicações com antenas de microfita por melhorar o desempenho das antenas (HOLLOWAY et al., 2012).

Diante desse cenário, esse trabalho tem como objetivo apresentar a influência de uma metasuperfície no desempenho de uma antena de microfita de patch retangular. Dessa forma, será projetada e confeccionada uma antena de microfita com patch retangular através do método de análise de linha de transmissão e alimentada por linha de microfita. Em seguida, será projetada e confeccionada uma metasuperfície onde simularemos através do software HFSS Ansoft Designer e testaremos em laboratório através do equipamento E5071C ENA Network Analyzer. E por fim, mostraremos através de uma análise comparativa dos resultados obtidos que a metasuperfície melhora os parâmetros da antena, interferindo de forma positiva no desempenho da antena de microfita, principalmente, com uma melhoria na eficiência espectral da antena através da característica multibanda gerada.

1.1 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em 7 (sete) capítulos. Inicialmente, será realizada uma breve revisão sobre antenas, Capítulo 2, mostrando uma breve evolução das antenas, sua definição e seus principais parâmetros de desempenho.

No Capítulo 3, apresentaremos as antenas de microfita através de um breve histórico, definição, seus principais métodos de alimentação e análise e a caracterização dos substratos utilizados em seus projetos.

No Capítulo 4, mostraremos os metamateriais através de um breve histórico, definição e seus fundamentos físicos. No capítulo 5, trataremos das metasuperfícies mostrando sua definição e aplicações em antenas de microfita.

No Capítulo 6, apresentaremos o problema proposto, a modelagem e os resultados obtidos nesse trabalho.

Por fim, no Capítulo 7, mostraremos na conclusão uma análise comparativa dos resultados obtidos, mostrando a melhoria no desempenho da antena de microfita em virtude da inserção da metasuperfície.

Capítulo 2

Antenas

2.1 Histórico

A história das antenas data dos tempos de James Clerk Maxwell, que unificou as teorias de eletricidade e magnetismo e representou suas relações através de um conjunto de significativas equações, conhecidas como Equações de Maxwell, trabalho publicado em 1873. Em 1886, o professor Heinrich Rudolph Hertz demonstrou o primeiro sistema eletromagnético sem fio. Em 1901, Guglielmo Marconi realizou a primeira transmissão transatlântica, de Poldhu na Inglaterra a Newfoundland no Canadá. Sua antena transmissora consistia em 50 fios verticais, na forma de um leque, conectados à terra através de um transmissor centelhador. No entanto, só a partir da segunda Guerra Mundial a moderna tecnologia de antenas teve início, e novos tipos de elementos radiantes foram introduzidos, como: aberturas guiadas de onda, cornetas e refletores.

Enquanto a segunda Guerra Mundial inaugurava uma nova era para as antenas, avanços na engenharia e na arquitetura de computadores durante os anos de 1960 até 1990 tiveram um enorme impacto no desenvolvimento da moderna tecnologia de antenas, e devem ter uma influência ainda maior sobre a engenharia de antenas ao longo do século XXI. No início da década de 1960 métodos numéricos foram introduzidos e permitiram que complexas configurações de sistemas de antenas, até então intratáveis, pudessem ser analisadas e projetadas com bastante precisão. Assim, enquanto na primeira metade do século passado a tecnologia da antena poderia ser considerada como uma operação de "tentativa e erro", hoje em dia é uma verdadeira arte de engenharia (ANTONIO et al., 2003).

Nos últimos anos, diversos estudos sobre antenas vêm sendo desenvolvidos com o intuito de atender a demanda das novas tecnologias que requerem equipamentos cada vez menores, de baixo custo, versáteis, de fácil projeto, alto desempenho, compatibilidade com diversos sistemas, como por exemplo sem fio, e entre outras características atrativas.

A atual condição da sociedade da Era Digital fez com que todos dependessem cada vez mais de aplicações sem fio. Após algum tempo, com a intensificação do uso

desses aparelhos (celulares, internet sem fio, rádios e entre outros), a comunicação começa a apresentar falhas e redução na qualidade da transmissão. A interferência que passava a incomodar levou à pesquisa de formas alternativas para se transmitir dados, diminuindo a interferência entre canais de comunicação diferentes. Dessa procura por novas formas de transmissão surgiu, dentre outros, o conceito de antenas inteligentes.

As antenas inteligentes que consistem em um sistema que engloba múltiplos elementos de antena e um processador de sinal, na maior parte das vezes, digital. Os elementos de antena são materiais especificamente configurados para a obtenção de maiores ganhos de qualidade na comunicação, dado uma certa frequência ou uma faixa de frequência. O processador é responsável por ajustar e calibrar a radiação e/ou os elementos da antena. Os métodos de análise e projeto atingiram tal grau de sofisticação que o desempenho de um sistema de antenas pode ser previsto com certa precisão.

A utilização de algoritmos mais eficientes, aliada a melhorias significantes no hardware, fez com que o uso de antenas inteligentes aumentasse consideravelmente na última década. As comunicações sem fio acabaram se tornando a área mais promissora para a aplicação das antenas, devido à qualidade das pesquisas que vêm sendo feitas, e à demanda daquele serviço por parte da população.

Mais recentemente, as antenas de microfita surgiram em razão ao desenvolvimento de novas tecnologias envolvendo circuitos integrados, bem como a necessidade por miniaturização de dispositivos e elevado desempenho.

2.2 Definição

As antenas são dispositivos destinados a transmitir ou receber ondas de rádio. Quando ligadas a um transmissor convertem os sinais elétricos em ondas eletromagnéticas. Quando ligadas a um receptor, captam essas ondas e as convertem em sinais elétricos que são amplificados e decodificados pelo aparelho receptor. A Figura 2.1 mostra um sistema de comunicação simplificado para as antenas transmissoras e receptoras (SHADIKU, 2004).

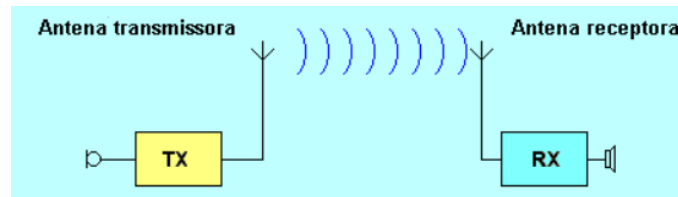


Figura 2.1 - Configuração de Antenas Transmissora e Receptora.

Fonte: Google Imagens.

Uma antena é a estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento ou linha de transmissão, como mostrado na Figura 2.2, esse dispositivo tem a finalidade de transportar a energia eletromagnética da fonte de transmissão à antena ou da antena ao receptor.

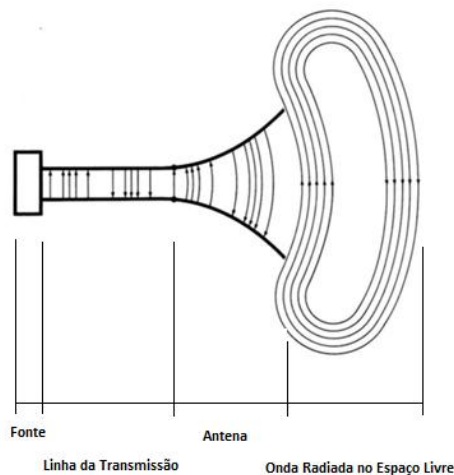


Figura 2.2 - Diagrama de um sistema de comunicação utilizando a antena como um dispositivo de transição.

Fonte: BALANIS, 2009.

Na Figura 2.3, podemos observar um circuito equivalente para um sistema da antena. No circuito, a fonte é representada por um gerador ideal, a linha de transmissão é representada por uma linha de impedância característica Z_C e a antena é representada por uma carga $Z_A = [(R_L + R_r) + jX_A]$, em que: R_L é a resistência de carga, usada para representar as perdas de condução e dielétrica associadas a estrutura da antena; R_r é a resistência de radiação, usada para representar a radiação da antena. A reatância X_A é usada para representar a parte imaginária da impedância associada à radiação da antena (BALANIS, 2009).

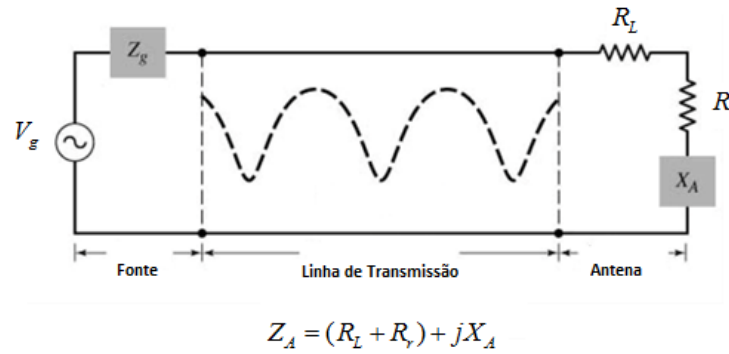


Figura 2.3 - Circuito equivalente de Thevenin para uma antena no modo de transmissão.

Fonte: BALANIS, 2009.

Além de receber ou transmitir energia, uma antena deve também atuar como um dispositivo direcional, ou seja, otimizando ou reforçando a energia de radiação em determinadas direções e suprimindo em outras. Logo, as antenas devem assumir diferentes formas para atender a uma particular necessidade.

Os principais tipos de antenas são: Antenas Filamentares (Dipolo, Quadro Circular e Hélice) ilustradas na Figura 2.4; Antenas de Abertura (Corneta Piramidal, Corneta Cônica e Guia de Onda Retangular), ilustradas na Figura 2.5, e Antenas de Microfita, ilustradas na Figura 2.6.

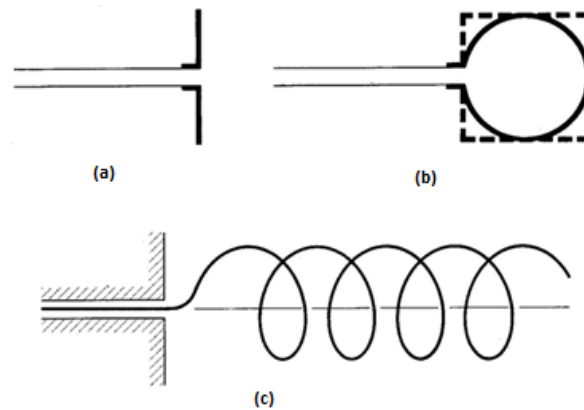


Figura 2.4 - Configurações de Antenas Filamentares: (a) Dipolo ; (b) Quadro Circular e (c) Hélice.

Fonte: BALANIS, 2009.

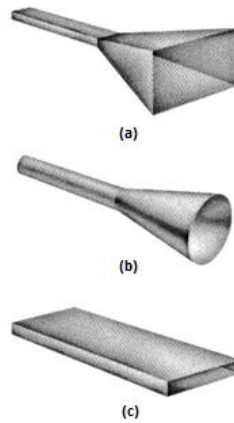


Figura 2.5 - Configurações de Antenas de Abertura: (a) Corneta Piramidal; (b) Corneta Cônica e (c) Guia de Onda Retangular.

Fonte: A. BALANIS, 2009, Vol.1.

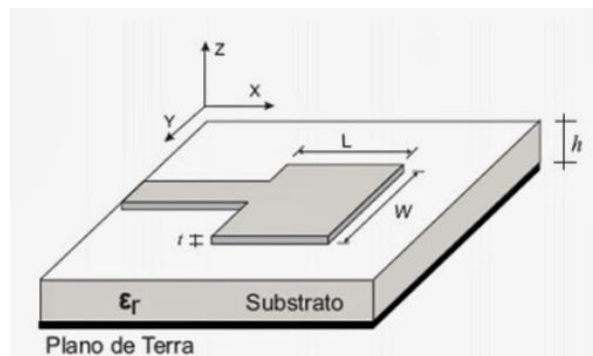


Figura 2.6 - Antena de Microfita com Patch Retangular.

Fonte: BALANIS, 2009.

Diversas aplicações exigem características de radiação que não podem ser obtidas com um único elemento. No entanto, é possível que vários elementos radiantes agrupados em um arranjo elétrico e geométrico apresentem as desejadas características de radiação. A configuração do conjunto pode ser tal que as radiações dos elementos se somem e maximizem a radiação total em uma particular direção ou direções, minimizem a radiação em outras direções, ou como for necessário. Na Figura 2.7 é mostrado alguns exemplos de conjuntos de antenas.

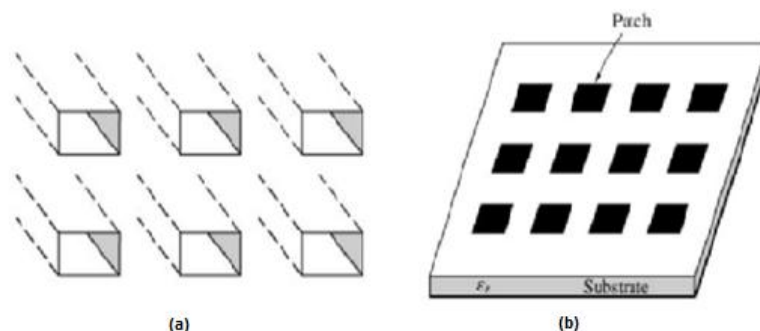


Figura 2.7 - Exemplos de Conjunto de Antenas: (a) Conjunto de Antenas de Abertura e (b) Conjunto de Plaquetas de Microfitas.

Fonte: BALANIS, 2009.

Uma antena ideal é aquela que radia, em uma direção ou direções desejadas, toda a potência a ela fornecida pelo transmissor. Na prática, entretanto, esse desempenho ideal jamais pode ser obtido, mas um desempenho próximo desse pode ser alcançado. Existem diversos tipos de antenas, e cada um tem uma forma diferente de modo a atingir as desejadas características de radiação para a aplicação pretendida.

2.3 Parâmetros Fundamentais

Alguns parâmetros são importantes para se analisar uma antena. Nessa seção, iremos apresentar os principais.

2.3.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação de uma antena é definido como uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais.

As propriedades de radiação incluem densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização.

O diagrama de radiação é dividido em lóbulos, que podem ser classificados como lóbulos principal, secundário, lateral e posterior, como mostrado na Figura 2.8. Um lóbulo de radiação é uma porção do diagrama de radiação limitada por regiões de intensidade de radiação relativamente fraca. O lóbulo principal é o que contém a direção de máxima radiação. Um lóbulo secundário é qualquer outro lóbulo de radiação que não o principal. Um lóbulo lateral é um lóbulo de radiação em qualquer direção que não seja a do lóbulo desejado. Um lóbulo posterior é um lóbulo de radiação cujo eixo faz um ângulo de aproximadamente 180° com o feixe da antena.

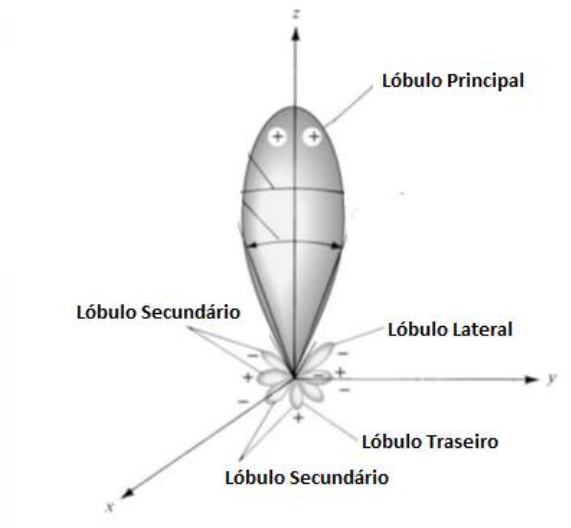


Figura - 2.8 Lóbulos de Radiação.

Fonte: BALANIS, 2009.

2.3.2 Potência Radiada

A potência média radiada por uma antena pode ser escrita como:

$$P_{rad} = P_{med} = \oint_S (\vec{W}_{rad} \cdot \vec{n}) da = \oint_S (\vec{W}_{med} \cdot \vec{n}) da = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\vec{s} \quad (2.1)$$

em que:

$\vec{E}$ = Intensidade de campo elétrico instantâneo (V/m);

$\vec{H}$ = Intensidade de campo magnético instantâneo (A/m);

$\vec{n}$ = Vetor unitário normal à superfície;

da = Elemento de área da superfície fechada (m²); e

$\vec{W}_{rad}$ = Densidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido).

2.3.3 Intensidade de Radiação

É a potência média radiada pela antena por unidade de ângulo sólido.

$$U = r^2 \cdot W_{rad} \quad (2.2)$$

U = Intensidade de radiação (W/ unidade de ângulo sólido).

2.3.4 Largura de Feixe

A largura de feixe é a separação angular entre dois pontos idênticos e em lados opostos do máximo do diagrama. Em um diagrama de antena, há inúmeras larguras de feixe. As mais utilizadas são a Largura de Feixe de Meia Potência (LFMP) que é o ângulo entre as duas direções nas quais a intensidade de radiação é a metade do valor máximo e a Largura de Feixe entre Nulos (LFEN) que é a separação angular entre os primeiros nulos do diagrama, como mostrado na Figura 2.9.

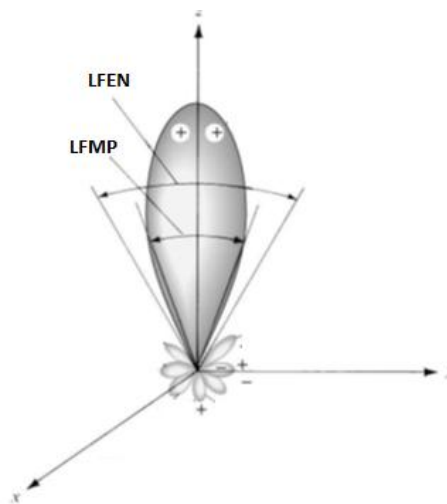


Figura 2.9 - Larguras de Feixe mostradas em um diagrama de radiação.

Fonte: BALANIS, 2009.

2.3.5 Diretividade

É a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção da antena e a intensidade de radiação média.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.3)$$

A máxima diretividade é dada por:

$$D_{max} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

2.3.6 Eficiência

A eficiência total de uma antena leva em consideração as perdas nos terminais de entrada e no interior da estrutura da antena, como: as perdas por reflexões devido ao

descasamento de impedância entre a linha de transmissão e antena; e as perdas elétricas devido aos condutores e dielétricos. A eficiência total de uma antena é dada por:

$$e_0 = e_r \cdot e_c \cdot e_d \quad (2.5)$$

Em que:

e_0 = Eficiência total;

e_r = Eficiência de reflexão;

e_c = Eficiência condutiva; e

e_d = Eficiência dielétrica.

2.3.7 Ganho

O ganho de uma antena é a razão entre a intensidade de radiação, em uma dada direção, e a intensidade de radiação para uma antena isotrópica. A expressão matemática do ganho é:

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{isotrópica}} \quad (2.6)$$

Levando em consideração as perdas por condução e reflexão, podemos considerar um ganho absoluto, dado por:

$$G_{abs} = e_0 \cdot D(\theta, \phi) \quad (2.7)$$

2.3.8 Largura de Banda

A largura de banda de uma antena é o intervalo de frequência a qual a antena deve funcionar satisfatoriamente, dentro das normas técnicas vigentes e suas aplicações. A largura de banda pode ser considerada a faixa de frequência, nos dois lados de uma frequência central, na qual as características da antena (impedância de entrada, diagrama de radiação, largura de feixe, polarização, ganho, diretividade e eficiência) tenham valores aceitáveis.

Na prática, a largura de banda é expressa de duas formas:

a) **Antenas banda estreita:** neste caso, em que a largura de banda é bem menor que a frequência central de operação, a largura de banda é expressa sob forma percentual.

b) **Antenas banda larga:** quando a frequência superior for igual ou maior que o dobro da frequência inferior, a largura de banda é expressa pela razão entre estas frequências.

Na Figura 2.10, temos um exemplo de um gráfico que representa a largura de banda de uma antena, onde foi considerado -10dB como limite aceitável para funcionamento da antena.

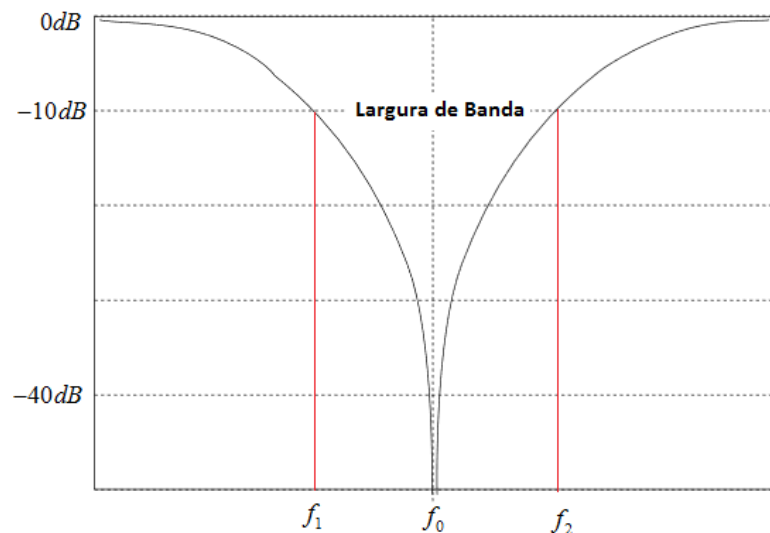


Figura 2.10 - Largura de Banda.

Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.9 Polarização

A polarização de uma antena é definida como "a polarização da onda radiada pela antena". A polarização indica a direção do campo elétrico da onda radiada, geralmente na direção de máxima radiação.

A polarização da antena receptora não será igual à polarização da onda incidente devido ao descasamento de polarização. A quantidade de potência extraída pela antena do sinal incidente não será máxima devido à perda de polarização. Admitindo que o campo elétrico da onda incidente possa ser escrito como:

$$\vec{E}_i = \vec{p}_w \cdot E_i \quad (2.8)$$

$\vec{p}_w$ é o vetor unitário de polarização da onda incidente.

O campo elétrico da antena receptora é dada por:

$$\vec{E}_a = \vec{p}_a \cdot E_a \quad (2.9)$$

$\vec{p}_a$ é o vetor unitário de polarização da antena.

A perda de polarização pode ser considerada introduzindo o fator de polarização PLF, que é dado por:

$$PLF = |\vec{p}_w \cdot \vec{p}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (2.10)$$

Em que, ψ_p é o ângulo entre os dois vetores unitários de polarização incidente e da antena.

Capítulo 3

Antenas de Microfita

3.1 Histórico

A antena de microfita foi proposta pela primeira vez em 1953 por Deschamps, nos Estados Unidos. Entretanto, apenas a partir da década de 1970, estudos envolvendo antenas planares ganharam força, o que fizeram intensificar as pesquisas sobre antenas de microfita. Na Figura 3.1 temos um exemplo de antenas de microfita com patch retangular (BAHL *et al.*, 1980).



Figura 3.1 - Antenas de Microfita com Patch Retangular.

Fonte: SOUSA NETO, 2014.

As antenas planares de microfita e seus arranjos têm encontrado numerosas aplicações, tais como em radares, filtros, telefonia celular, GPS, equipamentos de rede sem fio e computadores. Grande parte dessas aplicações se deve pela sua simplicidade de fabricação, compatibilidade com circuito planar de rádio frequência, baixo custo e capacidade de radiação unidirecional, como mostrado na Figura 3.2 (SOUSA NETO, 2014).

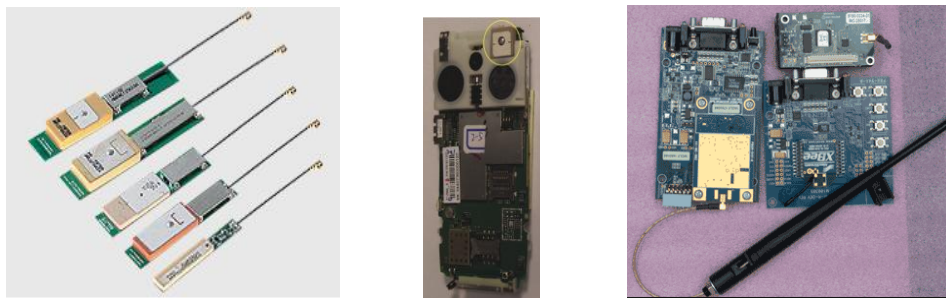


Figura 3.2 - Aplicações de antenas de microfita nos ramos de telecomunicações e eletrônica.

Fonte: Google Imagens.

Em contrapartida, as antenas de microfita possuem baixa eficiência e potência, fraco desempenho de varredura e pequena largura de banda. No entanto, com a utilização de alguns métodos consegue-se melhorar esses parâmetros em níveis aceitáveis. Como por exemplo, aumentar a espessura do substrato de forma a aumentar a eficiência e a largura de banda.

3.2 Definição

Antena de microfita na sua forma mais simples é composta de um elemento metálico (*patch*) depositado sobre um substrato (dielétrico) que por sua vez está sobre um plano de terra (uma fina camada metálica), conforme ilustrado na Figura 3.3.

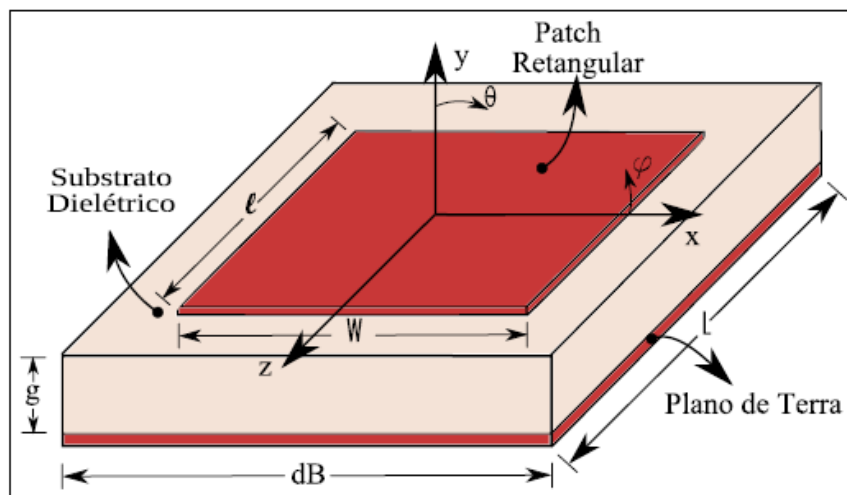


Figura 3.3 - Antena de Microfita Convencional.

Fonte: AQUINO, 2008.

O substrato tem papel importante no desempenho da estrutura. Diferentes materiais podem ser usados como substrato no projeto de antenas de microfita. Em geral, a constante dielétrica desses materiais tem valores de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Os substratos mais adequados para antenas de bom desempenho são espessos e têm constante dielétrica de valor baixo, pois permite maior eficiência, maior largura de banda e campos mais desprendidos, facilitando a radiação no espaço. Mas essas propriedades têm o custo de necessitar de elementos com maiores dimensões. Sendo assim, substratos delgados com altos valores de constante dielétrica são desejáveis para circuitos de microondas, que exigem campos mais confinados, para minimizar radiação e

acoplamentos indesejáveis, e elementos de pequenas dimensões; entretanto, devido às maiores perdas esses substratos são menos eficientes e resultam em larguras de banda relativamente menores. Como antenas de microfitas são geralmente integradas com outros circuitos de microondas, um equilíbrio deve ser encontrado entre bom desempenho da antena e bom projeto do circuito (BALANIS, 2009).

O patch pode ter várias geometrias tais como: quadrado, retangular, circular, elíptica, triangular ou qualquer outra configuração de acordo com as características desejadas do projeto, como mostrado na Figura 3.4.

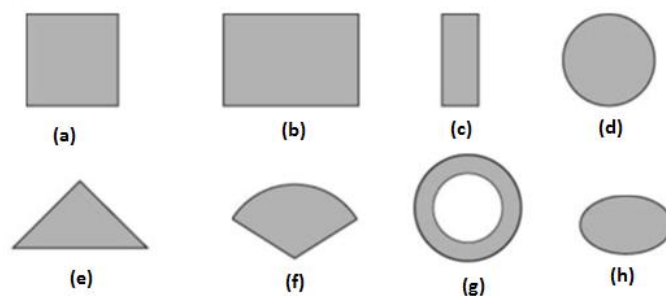


Figura 3.4 - Formas mais comuns para o Patch: (a) Quadrada, (b) Retangular, (c) Dipolo, (d) Circular, (e) Triangular, (f) Setor Circular, (g) Anel Circular e (h) Elíptica.

Fonte: BALANIS, 2009.

A forma do elemento metálico influencia na distribuição de corrente e por consequência na distribuição dos campos na superfície da antena. Logo, a irradiação pode ser determinada através da distribuição de campo entre o patch metálico e o plano de terra, bem como, em termos de distribuição de corrente de superfície no patch, como mostrado na Figura 3.5. Plaquetas quadradas, retangulares, dipolos e circulares são as mais utilizadas, devido à facilidade de análise e fabricação, assim como às suas atraentes características de radiação, especialmente baixa radiação cruzada.

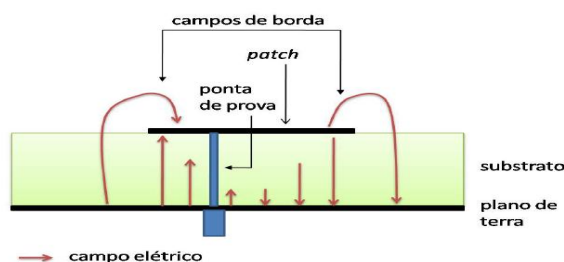


Figura 3.5 Distribuição do Campo Elétrico em uma Antena de Microfitas com Patch Retangular.

Fonte: Google Imagens.

3.3 Métodos de Alimentação

Antenas de microfita podem ser alimentadas por uma variedade de métodos. Esses podem ser classificados em conectados e não conectados. Nas técnicas por contato, a fonte de RF é ligada fisicamente ao *patch* usando linhas de microfita ou conector coaxial. Enquanto que, nas técnicas não conectadas, a ligação é feita por acoplamento eletromagnético. As quatro formas mais comuns são: linha de microfita, sonda coaxial, acoplamento por abertura e proximidade (AQUINO, 2008).

3.3.1 Alimentação por Linha de Microfita

A linha de alimentação de microfita consiste em uma fita condutora que conecta o patch à extremidade da antena, em geral, tem largura muito menor que a da plaqueta, como mostrado na Figura 3.6. A linha de alimentação é de fácil fabricação e de simples casamento de impedância e modelagem. No entanto, à medida que a espessura do substrato aumenta, ondas de superfície e radiação espúria gerada pela alimentação aumentam, o que, na prática, limita a largura de banda, tipicamente de 2 a 5% (BALANIS, 2009).

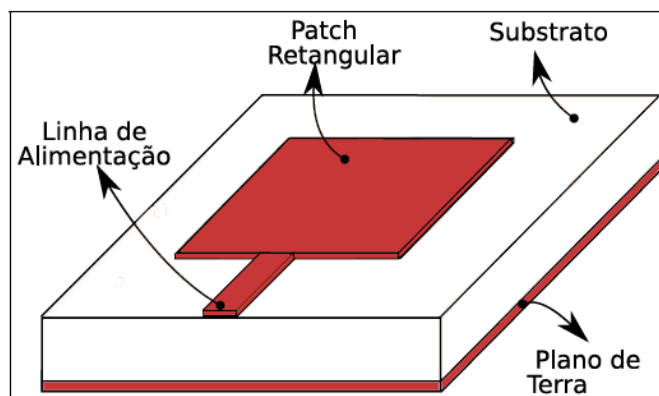


Figura 3.6 - Alimentação por Linha de Microfita.

Fonte: B. L. Manoel, 2008.

Para esse tipo de alimentação é importante ressaltar que o casamento de impedância, entre a linha de microfita (linha de transmissão) e a antena (carga), é obtida através de uma alteração no patch, conhecida como alimentação indentada, penetrando a

linha de microfita de y_o na direção da borda ao centro do patch, como mostrada na Figura 3.7.

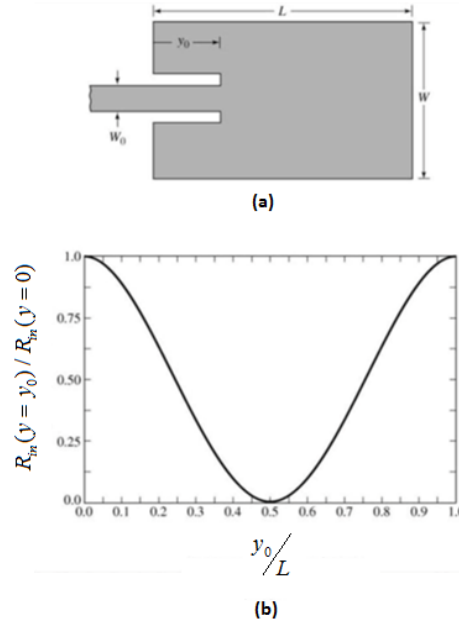


Figura 3.7 - (a) Linha de alimentação indentada de Microfita e (b) Resistência de entrada normalizada.

Fonte: BALANIS, 2009.

Os valores da resistência de entrada (R_{in}) e impedância características são:

$$R_{in}(y = y_o) = \frac{1}{2G_1} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_o\right) = R_{in}(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_o\right). \quad (3.1)$$

$$Z_C = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \ln\left[\frac{8h}{W_o} + \frac{W_o}{4h}\right] \text{ para } \frac{W_o}{h} \leq 1. \quad (3.2)$$

$$Z_C = \sqrt{\epsilon_{ref}} \left[\frac{W_o}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W_o}{h} + 1,444\right) \right] \text{ para } \frac{W_o}{h} > 1. \quad (3.3)$$

Em que:

ϵ_{ref} é a permissividade elétrica efetiva da antena;

W_o é a largura da fita de microfita (Inset Gap);

y_o é a distância da alimentação indentada;

h é a espessura do substrato; e

G_1 é condutância da fenda, dado por:

$$G_1 = \frac{1}{90} \left(\frac{W_o}{\lambda_0} \right)^2 \text{ para } W_o \ll \lambda_0. \quad (3.4)$$

$$G_1 = \frac{1}{120} \left(\frac{W_o}{\lambda_0} \right) \text{ para } W_o \gg \lambda_0 \quad (3.5)$$

3.3.2 Alimentação Coaxial

Nessa técnica, o condutor interno do conector coaxial transpõe o dielétrico e é soldado ao patch, enquanto o condutor externo é soldado diretamente ao plano terra como mostra a Figura 3.8. A alimentação coaxial é muito comum em estruturas de microfita pela sua fácil fabricação e casamento. Contudo, tem pequena largura de banda e é mais difícil de modelar, especialmente no caso de substratos espessos.

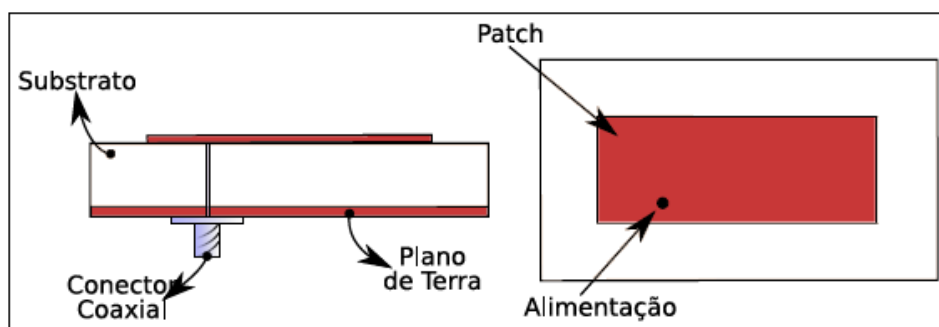


Figura 3.8 Antena de Microfita Retangular com Alimentação Coaxial.

Fonte: AQUINO, 2008.

3.3.3 Acoplamento por Abertura

Essa forma de acoplamento consiste em dois substratos separados por um plano terra. Na parte inferior do substrato de baixo existe uma linha de microfita, cuja energia é acoplada à plaqueta através de uma abertura (fenda) no plano de terra que separa os dois substratos. Essa disposição permite otimização independente do mecanismo de alimentação e do elemento radiante. Tipicamente, o substrato inferior consiste em um material de alta constante dielétrica e o substrato superior de uma espessa camada de material de baixa constante dielétrica. O plano de terra entre os dois substratos também isola a alimentação do elemento radiante, minimizando, assim, a interferência da radiação espúria na formação do diagrama e na pureza de polarização (AQUINO, 2008). Esse tipo de alimentação é ilustrado na Figura 3.9.

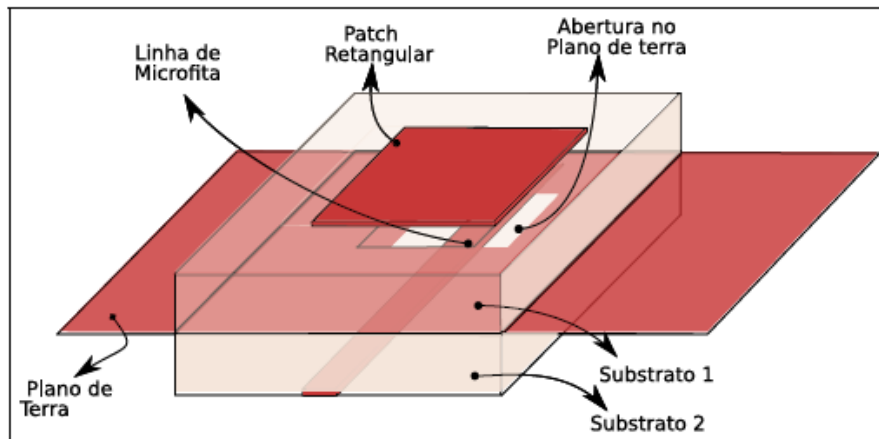


Figura 3.9 Antena de Microfita com Patch Retangular utilizando a Alimentação de Acoplamento por Abertura.

Fonte: AQUINO, 2008.

3.3.4 Acoplamento por Proximidade

Essa técnica de alimentação consiste em uma linha de alimentação colocada entre dois substratos elétricos (Figura 3.10), o patch é colocado sobre o substrato superior, enquanto que o plano de terra é colocado sob o substrato inferior. Dentre as quatro configurações de alimentação descritas, essa apresenta a maior largura de banda, em torno de 13%, além de uma modelagem relativamente simples e uma baixa radiação espúria. No entanto, sua fabricação é difícil projeto e o casamento de impedância é atingindo variando-se a largura da linha de transmissão e espessura do substrato.

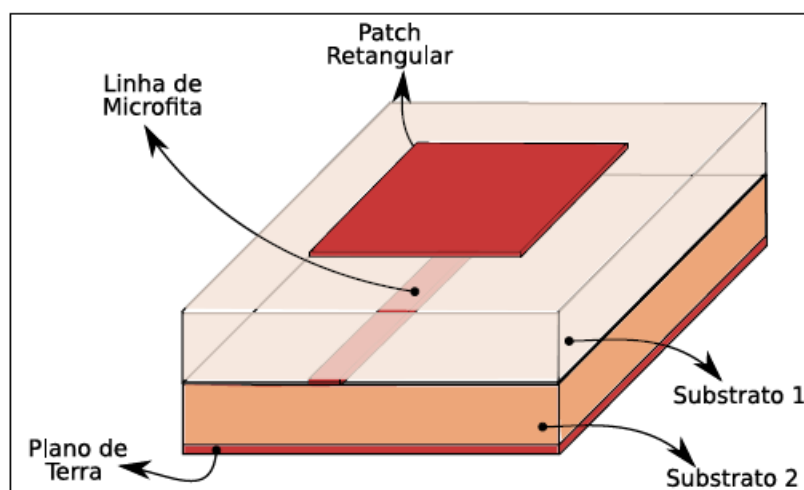


Figura 3.10 - Antena de Microfita com Patch Retangular utilizando a Alimentação de Acoplamento por Proximidade.

Fonte: AQUINO, 2008.

3.4 Métodos de Análise

Os principais métodos de análise de antenas de microfita são: linha de transmissão, modelo de cavidade e onda completa. O método da linha de transmissão é o mais simples de todos e provê uma boa aproximação física, porém a modelagem é menos precisa. O modelo da cavidade é mais preciso, mas ao mesmo tempo, mais complexo. No entanto, este modelo também provê boa percepção física. O método de onda completa compreende o método da linha de transmissão equivalente, o método dos potenciais vetoriais de Hertz e o método da linha de transmissão transversal. Estes são os modelos mais precisos e versáteis. Porém, são complexos e provêem pouca percepção física.

No método da Linha de Transmissão (LT), o patch e a linha de alimentação são modelados por seções de LT. A antena é então representada por uma seção ressonante, onde a impedância característica Z_0 e a constante de fase de propagação β são determinadas pelos parâmetros do substrato e dimensões da antena planar (OLIVEIRA, 1996).

Considerando um patch retangular alimentado por uma linha de microfita conforme Figura 3.11, quando os campos eletromagnéticos que se propagam ao longo da linha encontram uma descontinuidade, início do patch, são gerados campos de fuga ou franjeamento nas bordas do patch devido à mudança de largura W da microfita. Esses efeitos de franja têm como característica armazenar energia, logo é modelado por susceptâncias B . Por outro lado, uma parte desses campos irradia potência no espaço o que é representado por condutâncias G . O processo descrito acima causa um acréscimo elétrico nas dimensões do patch e é modelado acrescentando-se ao comprimento L o fator ΔL em ambos os lados do patch, dessa forma tem-se o comprimento efetivo da plaqueta L_{ef} .

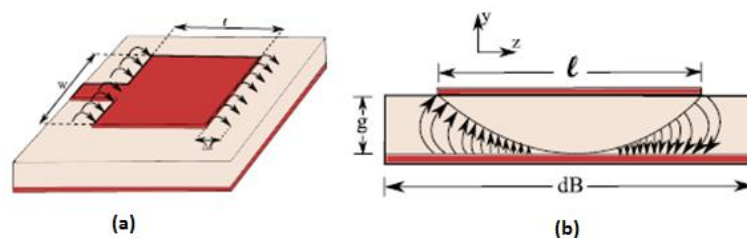


Figura 3.11 - Distribuição do Campo Elétrico numa Antena de Microfita com patch Retangular utilizando o Método de Análise LT: (a) Efeito de borda e (b) Linhas de campo elétrico.

Fonte: AQUINO, 2008.

O fator ΔL ocasionado pelo franjeamento das bordas é dado por :

$$\Delta L = h \cdot \left[0,412 \frac{(\varepsilon_{ref} + 0,3) \cdot (\frac{W}{h} + 0,264)}{(\varepsilon_{ref} - 0,258) \cdot (\frac{W}{h} + 0,8)} \right] \quad (3.6)$$

Em que:

ε_{ref} = Constante dielétrica efetiva entre o substrato e o ar;

w = Largura do Patch; e

h = Espessura do substrato.

A constante dielétrica efetiva entre o substrato e o ar é dada por:

$$\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1/2} \quad (3.7)$$

Em que, ε_r é a constante elétrica relativa do substrato.

O comprimento efetivo da plaqueta é dado por:

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (3.8)$$

Em que, L é o comprimento do Patch.

$$L = \frac{1}{2 \cdot f_r \sqrt{\varepsilon_{ref}} \cdot \sqrt{\mu_o \cdot \varepsilon_o}} - 2\Delta L \quad (3.9)$$

A largura do Patch é dada por:

$$w = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\frac{(\varepsilon_r + 1)}{2}}} \quad (3.10)$$

Em que f_r é a frequência de ressonância desejada:

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.11)$$

O modelo da cavidade pode manipular qualquer geometria do *patch*, tratando a antena como sendo uma cavidade com paredes ressonantes, onde na base e no topo há paredes elétricas e nas laterais paredes magnéticas (Figura 3.12). Os campos na antena são considerados como sendo os campos na cavidade, dessa forma serão expandidos em

termos de modos ressonantes na cavidade, na qual cada modo tem a sua frequência de ressonância dada pela equação:

$$f_{rmp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (3.12)$$

Embora esse modelo seja relativamente simples de implementar e de se aplicar a diversos formatos de antenas, há algumas limitações em seu uso, principalmente devido às aproximações iniciais. Dessa forma, esse modelo não oferece um resultado satisfatório para antenas com substratos mais espessos, com *patches* empilhados e arranjos de antenas (FERNANDES, 1996).

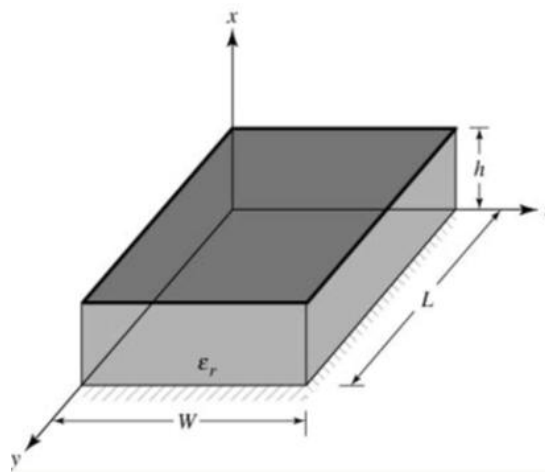


Figura 3.12 - Geometria de uma plaqueta retangular de microfita em uma análise pelo método da cavidade.

Fonte: BALANIS, 2009.

No método de Onda Completa, as formulações matemáticas são rigorosas. Em geral, estes modelos exigem um maior esforço computacional e analítico. No entanto, fornecem resultados mais precisos e são válidos para frequências mais elevadas. Uma das formas de aplicação dos modelos de onda completa é a análise no domínio espectral. Nesta modalidade, os parâmetros da antena são obtidos resolvendo inicialmente a equação de onda com as condições de contorno apropriadas. Dessa forma, os componentes de campo são obtidos em função dos componentes da densidade de corrente no *patch*. A solução para os componentes desconhecidos da densidade de corrente é então obtida utilizando o método dos momentos (SILVA, 2010).

3.5 Substrato

O substrato desempenha um papel importante para as antenas de microfita, seus parâmetros constitutivos: permissividade elétrica e permeabilidade magnética são fundamentais para definir o desempenho das antenas (GIORDANO, 2005).

Cada material tem um conjunto único de características que dependem das suas propriedades elétricas ou magnéticas. Medições precisas destas propriedades podem fornecer informações valiosas para incorporar adequadamente o material em sua aplicação pretendida em projetos de alta complexidade ou monitorar um processo de fabricação, visando melhorar o controle de qualidade.

A caracterização de propriedade elétricas e magnéticas dos materiais é fundamental para componentes a serem usados em aplicações de alta frequência e sistemas de comunicações. Uma forma eficaz de se avaliar o material é através das medições de permissividade elétrica e permeabilidade magnética, que é o quanto o material é afetado pelo campo elétrico e campo magnético que limitam a frequência de operação dos componentes (CAETANO, 2010).

Substrato é um dos componentes fundamentais das antenas de microfita. Ele normalmente é encontrado como uma camada entre o *patch* e o plano de terra, entretanto às vezes pode ser substituído por uma camada de ar (antena com substrato suspenso). Existem, também, estudos sobre o uso de várias camadas de substrato em uma mesma antena de microfita (antenas de multicamadas).

Diversos materiais podem ser utilizados com substratos dielétricos nos projetos de antenas de microfita. A seleção deles não depende apenas de suas propriedades mecânicas e térmicas, como também e mais importante ainda, do tipo de comportamento eletromagnético que se deseja obter. Nesse sentido, existem dois critérios importantes a se avaliar em um material: seus valores relativos de permeabilidade magnética e permissividade elétrica que não são constantes, elas variam com a frequência, temperatura, pressão e a estrutural molecular do material (BARRO, 2005).

A permeabilidade magnética é o quanto um material é capaz de dar suporte à formação de um campo magnético em seu interior. Em outras palavras, é o grau de magnetização que um material adquire em resposta à exposição a um campo magnético aplicado. Ela é representada pela letra grega μ e costuma ser citada com seu valor relativo, dado pela razão entre seu valor total e a permeabilidade magnética do vácuo, conhecida como $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Assim, a permeabilidade relativa é dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.13)$$

Seus valores são desprezíveis na maioria dos materiais encontrados na natureza. Assim, meios diamagnéticos e paramagnéticos que apresentam baixos valores de permeabilidade magnética possuem respostas magnéticas relativamente fracas e dependentes de fontes magnéticas externas. Já os materiais ferromagnéticos, por outro lado, possuem um forte magnetismo e se diferenciam dos demais por sua capacidade de magnetismo residual, mesmo na ausência de fontes externas. Além desses, são considerados atualmente também os materiais ferrimagnéticos, tais como a ferrita, possuindo propriedades semelhantes às dos ferromagnéticos, à exceção de que seus íons não são completamente alinhados, e portanto, nem todos contribuem para o crescimento da resposta magnética. Tais meios têm atraído a atenção da comunidade científica por serem capazes de apresentar naturalmente valores de permeabilidade negativos, sob certas faixas de operação (CALOZ et al., 2006).

A permissividade elétrica relativa também é conhecida como constante dielétrica e seu símbolo é ϵ_r . Ela representa o quanto um material é capaz de armazenar energia ou linhas de fluxo elétrico, ou seja, é a relação entre a quantidade de energia armazenada em um material e a contida no vácuo e pode ser calculada como:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.14)$$

em que $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m, permissividade elétrica no vácuo.

A Tabela 3.1 mostra os valores de ϵ_r de alguns materiais mais utilizados.

Materiais	ϵ_r
Água do Mar	81 (20°C)
Alumina	9,7-10,3
Ar	1,0006
Duroid 5870	2,33
Fibra de Vidro	4,4
Papel	3,85
PTFE	2,1

Tabela 3.1 - Alguns materiais e seus respectivos valores de constante dielétrica relativa.

Fonte: elaborado pelo autor.

Substratos finos com valores elevados de constante dielétrica são desejáveis em circuitos de microondas, pois ocupam menos espaços e garantem um melhor confinamento dos campos, minimizando radiação e acoplamentos indesejáveis. Por outro lado, têm perdas maiores e uma largura de banda mais estreitas.

Já os substratos espessos e de menor valor constante dielétrica são os mais adequados para antenas de bom desempenho, pois permitem uma maior eficiência, maior largura de banda e campos mais soltos, facilitando sua propagação no espaço, ao custo de elementos de maiores dimensões (CAPOLINO, 2009).

Os materiais com permissividade relativa com valores intermediários, tais como a fibra de vidro, o PTFE (Politetrafluoretileno), a alumina e o Duroid, constituem bons substratos dielétricos, sendo muito usados na fabricação de antenas, isoladamente ou mistos (Figura 3.13).

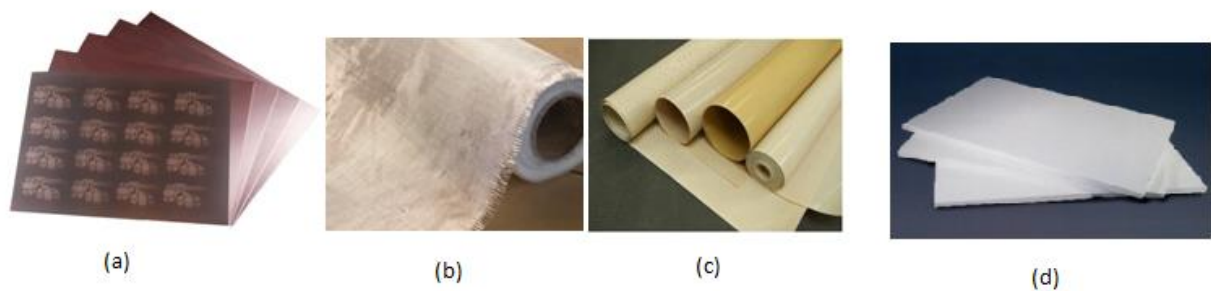


Figura 3.13 - Principais substratos utilizados nas antenas de microfita: (a) Duroid, (b) Fibra de Vidro, (c) PTFE e (d) Alumina.

Fonte: Google imagens.

Capítulo 4

Metamaterial

4.1 Histórico

Os avanços gerados pelas grandes guerras mundiais impulsionaram a demanda por materiais com características eletromagnéticas não comuns na natureza, ou seja, levaram ao desenvolvimento de materiais artificiais com características dielétricas e magnéticas desejáveis. Dentro desse panorama, surgiram os metamateriais que são materiais artificiais com índice de refração negativa (AYDIN, 2004).

O primeiro a estudar sobre os metamateriais foi o físico russo Veselago em 1967, ele sugeriu a possibilidade de um material com índice de refração negativo. Na época, era uma proposta inovadora, uma vez que a comunidade científica nunca tinha examinado de perto o conceito de refração negativa.

As ideias de Veselago ficaram esquecidas por cerca de três décadas, pois não se conheciam na natureza materiais com índice de refração negativo. Até que em meados dos anos 90 na Inglaterra, John B. Pendry, com a colaboração de cientistas da empresa britânica Marconi Materials Technology, concluiu que seria possível, a partir de uma estrutura metálica, criar um material artificial com o índice de refração negativo. Em meados de 2000, David R. Smith e colegas da Universidade da Califórnia construíram o material proposto por Pendry. As estruturas eram uma combinação de pequenos circuitos metálicos que, num certo sentido, desempenhavam o papel das moléculas do material de refração negativa. A estrutura molecular desses materiais era periódica, com dimensões menores que o comprimento de onda das ondas eletromagnéticas para as quais se desejava a refração negativa (VESELAGO, 1968).

O grande aspecto responsável por tamanho interesse nos metamateriais é seu índice de refração negativo, o que representa um grande passo em direção à compreensão de mecanismos de invisibilidade e à realização de microscópios de super-resolução (CAETANO, 2010). Isso possibilita o uso dos metamateriais em diferentes áreas do conhecimento, tais como: tecnologia da informação e comunicação, defesa e segurança aérea, medicina e telecomunicações. De modo geral, as aplicações dos

metamateriais podem ser agrupadas em três grandes categorias: ondas-guiadas, ondas-radiadas e aplicações de ondas refratadas.

Atualmente, a fabricação de metamateriais, em sua maioria, ainda é um procedimento que exige tecnologias de ponta, como por exemplo a litografia por feixes de elétrons. Essas técnicas, além de caras e demandarem muito tempo, não apresentam bons resultados para áreas largas e arranjos tridimensionais. Nesse sentido, o potencial da nanotecnologia e da ciência de materiais têm oferecido uma alternativa promissora.

Os metamateriais surgiram como a mais promissora tecnologia, capaz de atender às exigências excepcionais dos sistemas atuais e futuros de comunicações. Baseados em uma atraente e revolucionária classe de materiais que possuem novas e poderosas propriedades da propagação eletromagnética (UZUNOGLU, 1979).

4.2 Definição

Metamateriais são estruturas eletromagnéticas efetivas, homogêneas e artificiais que não são encontradas em materiais na natureza. No entanto, sua estrutura é formada por elementos convencionais encontrados na natureza. Esses elementos são inseridos em pequenos blocos de construção, conhecidos como células unitárias, dispostos em arranjos uni, bi e tridimensionais. Aliado à variedade de formas que eles podem assumir como mostrado na Figura 4.1, existe uma diversidade de comportamentos eletromagnéticos correspondentes (SILVA et al., 2015).

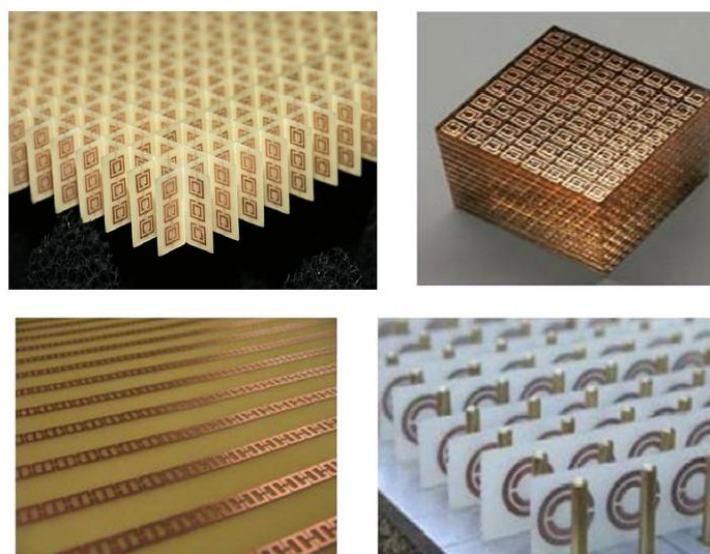


Figura 4.1 - Células Unitárias de Metamaterial.

Fonte: BARRO, 2005.

Uma estrutura efetiva homogênea é uma estrutura cuja média do comprimento estrutural de célula " p " é muito menor que um comprimento de onda guiada " λ_g ". Assim, esse comprimento médio de célula pode ser pelo menos, menor que um quarto de comprimento de onda, $p < \lambda_g/4$, para garantir que o fenômeno refrativo irá dominar em relação ao fenômeno de espalhamento/difração quando a onda se propaga dentro do meio metamaterial. A condição de referência $p = \lambda_g/4$ é denominada como o limite de homogeneidade efetiva.

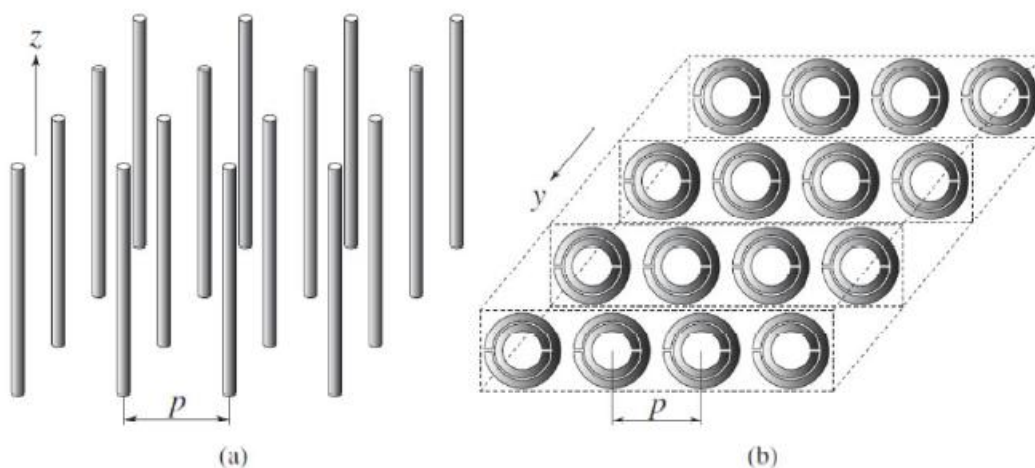


Figura - 4.2 a) Estrutura composta por fios milimétricos (Thin Wire - TW) e b) estrutura composta pelos ressonadores de anel partido (*Split Ring Resonator* - SRR).

Fonte: BARRO, 2005.

4.3 Fundamentos Físicos

As propriedades elétricas e magnéticas dos materiais podem ser determinadas por dois parâmetros constitutivos denominados permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ). Em conjunto, a permeabilidade e a permissividade determinam a resposta do material quando uma onda eletromagnética se propaga através do mesmo. Geralmente, ϵ e μ são ambos positivos em meios convencionais. Enquanto ϵ pode ser negativo, nenhum material com μ negativo é conhecido. Porém os metamateriais, chamados de materiais LHM (Left Handed Materials), possuem permissividade efetiva (ϵ_{eff}) e permeabilidade efetiva (μ_{eff}), simultaneamente com valores negativos. Em tais materiais, o índice de refração (n) é negativo, fator este que resulta na inversão de fenômenos eletromagnéticos conhecidos (BILOTTI et al., 2007).

As características desses meios artificiais vão além de sua funcionalidade, já que é permitida a combinação de sinais entre os parâmetros de permissividade e permeabilidade. Esses parâmetros são relacionados ao índice de refração n dado por:

$$n = \pm \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} \quad (4.1)$$

Em que μ_r e ϵ_r são a permeabilidade e permissividade relativas. Na equação 4.1, o sinal $\pm$ para um duplo valor da função raiz quadrada é admitido a priori para casos gerais. As quatro possibilidades de combinações de sinais para ϵ e μ são (+,+), (+,-), (-,+) e (-,-).

A Figura 4.3 ilustra uma representação gráfica de quatro diferentes possibilidades de materiais para aplicações eletromagnéticas, baseadas em suas permissividades e permeabilidades. São também ilustradas a refração e a reflexão considerando uma interface entre o ar e cada meios em questão (SOUZA, 2011).

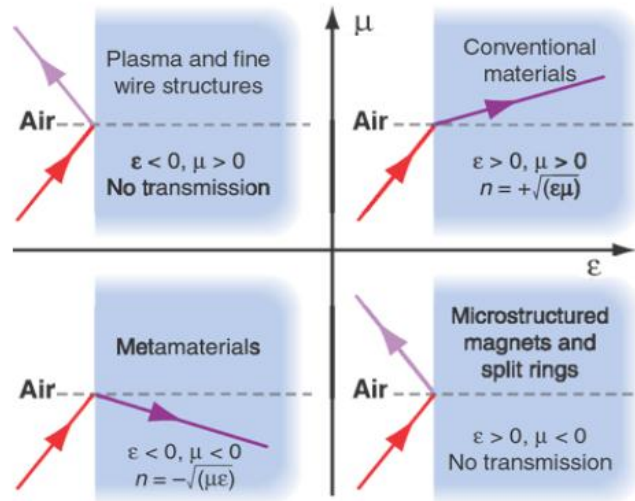


Figura 4.3 - Diagrama de permissividade e permeabilidade para os quatro tipos de meios.

Fonte: GIORDANO, 2005.

A presença de índice de refração negativo implica em uma velocidade de grupo antiparalela à velocidade de fase, causando interessantes efeitos, como por exemplo, uma inversão da direção do efeito Doppler ou uma inversão do raio refratado na lei de Snell comparado aos meios convencionais (índice de refração positivo).

A velocidade de fase é expressa pela seguinte equação:

$$V_f = \frac{\omega}{k} \quad (4.2)$$

E a velocidade de grupo por:

$$V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (4.3)$$

Em que:

ω é a frequência angular; e

k é número de onda.

O índice de refração determina como o feixe é defletido na interface de separação entre dois meios distintos. Se o índice é positivo, o feixe é defletido no lado oposto da normal à superfície em relação ao feixe incidente. Quando o índice é negativo, ele é defletido no mesmo lado da normal à superfície. Considerando um prisma RHM e LHM, na Figura 4.4, é possível observar o fenômeno da refração nos dois meios. Para um prisma RHM, o raio refratado produz um ângulo positivo com a normal, no prisma LHM, o raio refratado produz um ângulo negativo com a normal. Além disso, a velocidade de grupo, que caracteriza o fluxo de energia, e a velocidade de fase, que caracteriza o movimento das frentes de onda, aponta em direções opostas, como mostra a Figura 4.5 (SMITH, 2005).

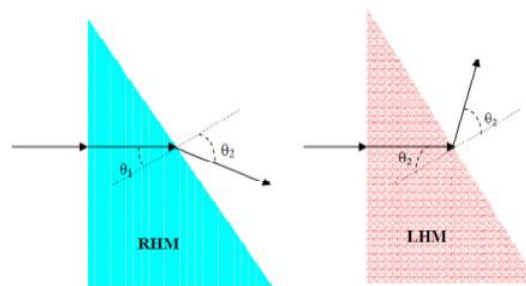


Figura 4.4 - Ilustração da propagação em um meio com Índice de Refração Positivo (RHM) e Índice de Refração Negativo (LHM).

Fonte: AQUINO, 2008.

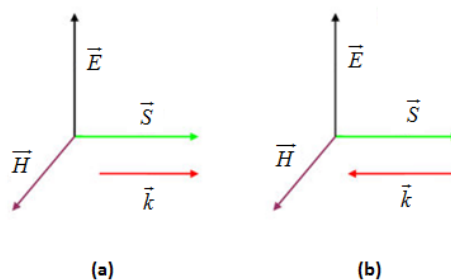


Figura 4.5 - Ilustração das direções dos Campo Elétrico, Campo Magnético, Vetor de Poynting e do Vetor de Onda: (a) Meio com Índice de Refração Positivo (RHM) e (b) Meio Índice de Refração Negativa (LHM).

Fonte: AQUINO, 2008.

Vale ressaltar que estes materiais artificiais, com índice de refração negativo, possuem os valores de ϵ e μ dependentes de frequência, ou seja, são meios dispersivos, sendo simultaneamente negativos dentro de uma estreita faixa de frequência.

4.3.1 Dielétricos artificiais

Os dielétricos artificiais surgiram como meio de substituir os materiais usados nas lentes dielétricas pesadas, de alta permissividade, por meios menores e mais leves (KUESTER et al., 2003). Trata-se de arranjos tridimensionais, metálicos ou mesmo dielétricos, dispostos em grades, semelhantes às paredes cristalinas dos materiais dielétricos convencionais. Além disso, é necessário também que os elementos desses arranjos sejam eletricamente polarizáveis, devendo, assim, haver um fluxo de elétrons livres e uma resposta sob ação de um campo elétrico aplicado.

Nos primeiros trabalhos sobre dielétricos artificiais, baseado no objetivo de se obter a amostra de um meio equivalente contínuo, buscou-se a inclusão de elementos pequenos, preferencialmente esferas, cuja periodicidade fosse muito pequena se comparada ao comprimento de onda incidente (SMITH et al., 2000).

Uma teoria sobre esses novos dielétricos foi proposta, válida para grades suficientemente dispersas, ou seja, com período estrutural muito elevado, se comparado ao tamanho máximo das partículas constituintes. No caminho oposto, a concentração das inclusões metálicas conduz as perdas maiores, e se tal nível de concentração ultrapassa determinado limite, as partículas começam a se tocar e surge um acoplamento capacitivo muito forte, levando os dielétricos artificiais de mesma faixa de frequência a se comportar como condutores de condutividade complexa.

Dessa forma, os dielétricos artificiais são construídos para criar uma concentração de campos reativos elétricos e magnéticos em regiões bem determinadas da estrutura, ou ainda no espaço ao redor das partículas, resultando em uma queda na frequência de ressonância enquanto o tamanho global das partículas permanece pequeno (SMITH, 2005).

4.3.2 Materiais Magnéticos Artificiais

A obtenção de magnetismo sem componentes magnéticas é conhecida cientificamente desde a década de 1940, graças ao trabalho de Friis, quando ele divulgou os famosos anéis de ressonância (SRR- Split Ring Resonator). Além disso, o

magnetismo artificial também pode ser encontrado em estruturas ordinárias, como em partículas de neve molhada, originando um comportamento diamagnético. De modo geral, para que haja um comportamento magnético artificial, é necessário um formato geométrico em que as correntes induzidas sejam distribuídas, de forma bastante uniforme, em espirais ou loops, produzindo, assim, um forte momento magnético (SUDHAKARAN, 2006).

Ao longo dos estudos nessa área, o uso de anéis metálicos foi estudado em conjunto com outras formas e materiais, principalmente com composto bianisotrópicos para aplicações em micro-ondas. A partir dos resultados desses trabalhos, passou-se a testar também o uso de anéis duplos para a criação de meios magnéticos artificiais, o que revelou ser o método mais apropriado para esse objetivo, dado o forte acoplamento capacitivo entre os anéis (SHELBY, 2001).

Tal acoplamento permitiu também a obtenção de ressonância magnética para baixas frequências, permitindo que o arranjo de SRR fosse considerado um meio efetivamente contínuo. De modo semelhante aos dielétricos artificiais, uma distribuição muito densa de SRR também promove efeitos na estrutura. Nesse caso, os arranjos passam a ser chamados metasolenóides e promove um fortalecimento da resposta magnética no que diz respeito à sua amplitude e largura de banda.

A Figura 4.6 exemplifica geometrias de partículas metálicas usadas na formação de meios magnéticos artificiais.

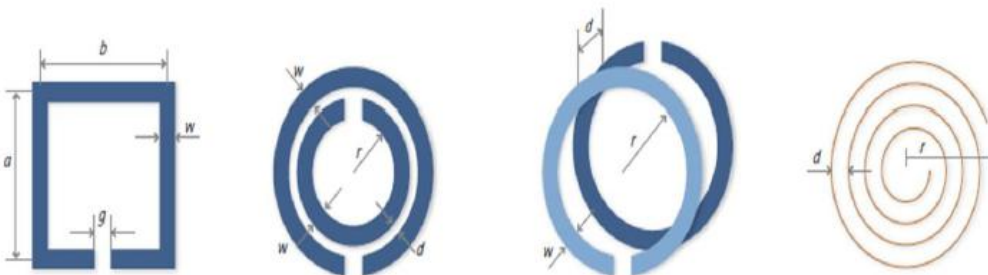


Figura 4.6 - Exemplos das geometrias para os Anéis de Ressonâncias.

Fonte: BARRO, 2005.

4.3.3 Materiais Magneto-dielétrico Artificiais

Trata-se de materiais descritos em função de sua permissividade e permeabilidade. O sinal da parte real desses parâmetros não é restringido por leis físicas e pode ser negativo. A parte real da permissividade é negativa, por exemplo, nos metais,

e isso acontece porque há elétrons livres que se movem no campo elétrico aplicado e criam uma polarização defasada do campo aplicado. A frequência de ressonância das oscilações dos elétrons livres é chamada de frequência de plasma e depende da densidade e da massa desses elétrons.

4.3.3.1 Permissividade Elétrica Negativa ($\epsilon < 0$)

Uma maneira de obter a permissividade negativa é através de um arranjo periódico de fios finos (Thin-Wire).

Uma estrutura de fios finos é um conjunto de fios paralelos ordenados na mesma direção como ilustrado na Figura 4.7. A permissividade ϵ negativa pode ser obtida para todas as frequências abaixo da frequência de plasma, desde que o campo elétrico da onda eletromagnética esteja polarizado paralelamente aos fios ($\vec{E} \perp z$). A frequência de ressonância plasmática se situa no espectro ultravioleta, o que significa que, em frequências iguais ou inferiores às de micro-ondas, a parte real da permissividade tem valores negativos e elevados. Entretanto, a condutividade dos metais é tão alta que, para essas frequências, é a parte imaginária da permissividade o parâmetro dominante (LO, 1979).

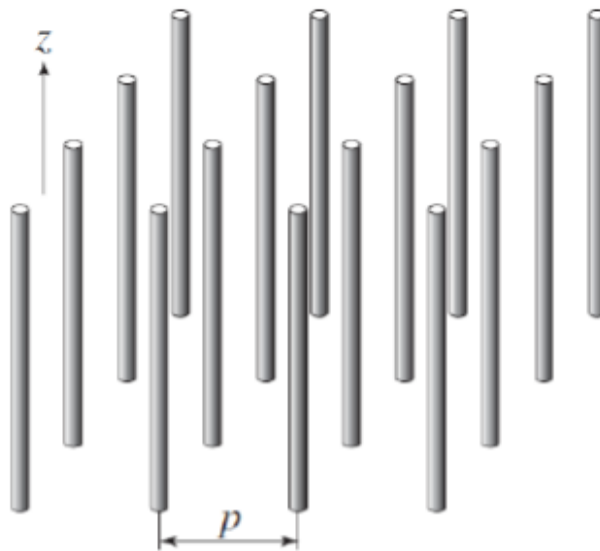


Figura 4.7 - Estrutura composta por fios milimétricos (Thin Wire - TW).

Fonte: B. L. Manoel, 2008.

Matematicamente, expressa-se a permissividade em função da frequência plasmática, da seguinte forma:

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + j\omega\xi} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \xi^2} + j \frac{\xi\omega_{pe}^2}{\omega(\omega^2 + \xi^2)} \quad (4.4)$$

Em que:

$$\omega_{pe}^2 = \sqrt{\frac{2\pi c^2}{[p^2 \ln(p/r)]}} \text{ é frequência plasmática elétrica;} \quad (4.5)$$

c é a velocidade da luz, r é raio das estruturas, p é a distâncias entre as estruturas e ε_r é a permissividade relativa do metamaterial;

$$\xi = \frac{\varepsilon_0 \left(\frac{p\omega_{pe}}{r} \right)^2}{\pi\sigma} \text{ é o fator de amortecimento;} \quad (4.6)$$

σ é condutividade do metal.

4.3.3.2 Permeabilidade Magnética Negativa ($\mu < 0$)

A carga elétrica é responsável por diversas respostas elétricas em materiais dielétricos. Devido à inexistência de cargas magnéticas análoga a uma carga elétrica, é mais difícil obter um material com permeabilidade magnética negativa. Para se obter permeabilidade negativa deve-se estender as propriedades magnéticas dos materiais. Pendry em 2001, conseguiu um aumento da resposta magnética do material artificial projetado introduzindo elementos capacitivos na estrutura. Com isso Pendry definiu um meio composto por anéis metálicos que funcionam como dipolos magnéticos macroscópicos, permitindo que o material possa ter uma resposta forte na proximidade da frequência de ressonância dessas estruturas. Ele chamou essas inclusões de “*Split Ring Ressonadores*”, ou seja, são anéis metálicos fendidos, mostrados na Figura 4.8, ou elementos ressonadores, se a excitação do campo magnético ocorrer perpendicularmente ao plano da estrutura ($\vec{H} \perp y$).

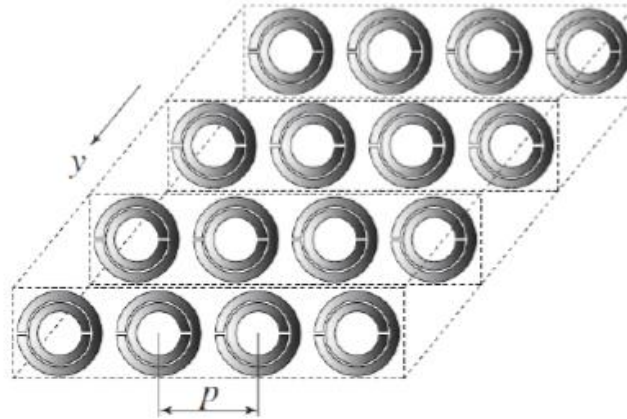


Figura 4.8 - Estrutura composta por elementos ressonadores SRR.

Fonte: M. F Giordano, 2005.

Para materiais artificiais, a manipulação de cargas magnéticas é impossível, mas a permeabilidade negativa pode ser obtida usando, conforme já explicado, anéis metálicos ressonantes eletricamente pequenos, isto é, os SRR. A frequência de ressonância plasmática estará associada com a permeabilidade magnética pela seguinte equação:

$$\mu_r = 1 - \frac{F \omega^2 (\omega^2 - \omega_{0m}^2)}{(\omega^2 - \omega_{0m}^2)^2 + (\omega \zeta)^2} + j \frac{F \omega^2 \zeta}{(\omega^2 - \omega_{0m}^2)^2 + (\omega \zeta)^2} \quad (4.7)$$

Em que:

$$F = \pi \left(\frac{r}{p} \right)^2 ; \quad (4.8)$$

r é o raio dos anéis;

p é a distâncias entre as células unitárias;

$$\omega_{0m}^2 = c \sqrt{\frac{3p}{\pi \ln(2dr^3 / s)}} \text{ é frequência magnética;} \quad (4.9)$$

d : largura dos anéis e s : espaço entre os anéis;

$$\zeta = \frac{2pR'}{r\mu_0} \text{ é o fator de perdas;} \quad (4.10)$$

R' é resistência do metal por unidade de comprimento.

Desse modo, por exemplo, a junção estrutural de anéis de ressonância, permitindo o magnetismo em materiais não magnéticos e o uso de filamentos metálicos alinhados com os SRR compõe uma rede eletromagnética artificial com parâmetros

simultâneos de permissividade e permeabilidade negativos, os metamateriais. Essa disposição espacial clássica, porém pode ser modificada. Existem diversas geometrias de combinação entre materiais magnéticos e dielétricos artificiais, que resultam nas propriedades dos metamateriais (HAND, 2009).

Apesar da estrutura com SRR não ser composta de material magnético, devido à presença de um momento de dipolo magnético artificial formado nos anéis ressonadores esta estrutura apresenta uma resposta magnética. As Figuras 4.9 e 4.10 mostra o circuito elétrico equivalente de um anel ressonador, onde é possível observar que há um acoplamento capacitivo entre os anéis.

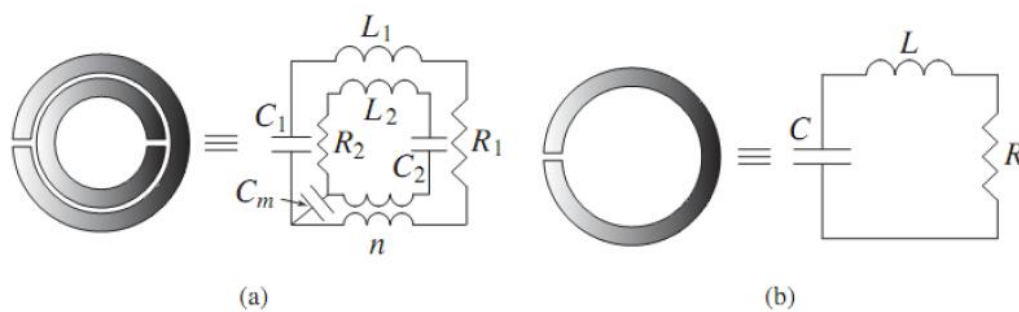


Figura 4.9 - Modelos de circuito equivalente do SRR: (a) SRR com configuração Dupla e (b) configuração Simples.

Fonte: AQUINO, 2008.

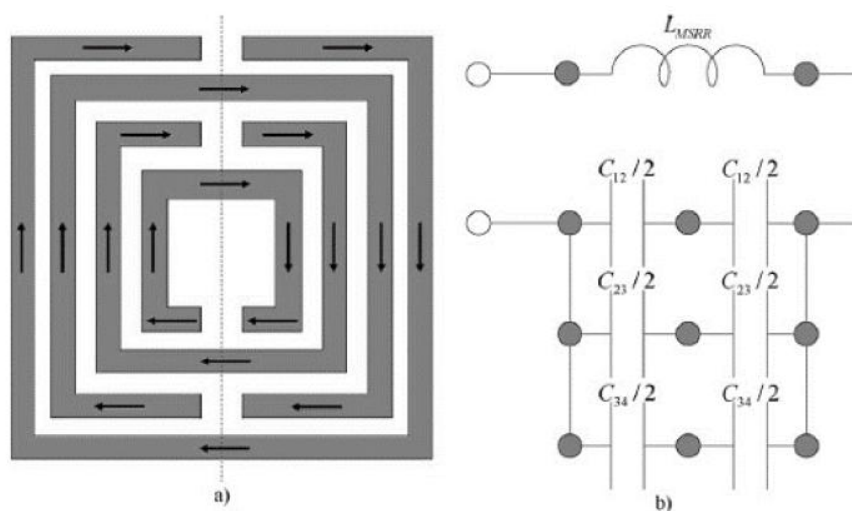


Figura 4.10 - Modelo de circuito equivalente do SRR genérico: (a) com quatro anéis ressonadores e (b) circuito equivalente.

Fonte: AQUINO, 2008.

Nos SRR's, duas grandezas importantes são a capacitância e a indutância do anel, uma vez que são elas que definem a frequência de ressonância da estrutura. Uma maneira de se obter esses parâmetros em estruturas com múltiplos SRR (Multiple Split-Ring Resonators - MSRR) foi proposta em (KITTEL, 1996).

As equações a seguir referem-se ao equacionamento para o cálculo da indutância e capacitância apresentadas na Figura 4.10:

$$L_{MSRR} = 2,43.\mu_0.[l - (N-1).(s+w)].\left[\ln\left(\frac{0,98}{\rho}\right) + 1,84.\rho\right] \quad (4.11)$$

$$C_{MSRR} = \frac{(N-1)}{2}.[2.l - ((2.N-1).(w+s))].C_0 \quad (4.12)$$

Em que:

$$\rho = \frac{(N-1)(w+s)}{l - (N-1)(w+s)} \quad (4.13)$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{h}{2.\pi.(w+s)} \right] \cdot (\varepsilon_r - 1) \right\} \cdot \frac{k(\sqrt{1-k^2})}{K(k)} \quad (4.14)$$

L_{MSRR} - Indutância do SRR;

C_{MSRR} - Capacitância do SRR;

C_0 - Capacitância por unidade comprimento;

h - Espessura de cobre SRR;

ρ - Razão de preenchimento;

N - Número de anéis;

μ_0 - Permeabilidade do vácuo;

ε_0 - Permissividade do vácuo;

ε_r - Permissividade relativa; e

K - Integral elíptica completa de primeira espécie.

Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, há provavelmente ainda uma série de características dos metamateriais por descobrir. Dentre as que já foram divulgadas na literatura, as principais são:

- Índice de refração negativo;
- Propagação de ondas backward;
- Permissividade e permeabilidade simultaneamente negativas;
- Inverso do efeito de Doppler;

- Inverso da Lei de Snell;
- Inverso da radiação;
- Inverso das condições de contorno relativas às componentes normais do campo elétrico e magnético na interface entre um meio RH e um meio LH;
- Troca entre os efeitos de convergência e divergência para lentes LH côncavas e convexas.

Capítulo 5

Metasuperfície

5.1 Histórico

As metasuperfícies vêm sendo tratadas pelos pesquisadores como uma das tecnologias mais promissoras da atualidade, por permitir o controle da luz com uma eficiência sequer imaginada há poucos anos atrás. Em 2013, a revista Science fez um levantamento sobre o estágio atual das pesquisas com metasuperfícies e concluiu que elas estariam muito perto de serem comercializadas devido ao nível de conhecimento dos pesquisadores sobre essas superfícies. Atualmente, já possuem aplicações em algumas áreas como na ótica, telecomunicações e biomedicina. Entre elas podemos destacar: processadores com comunicação por luz, nova geração de células solares, sensores e microscópios (SIVAKUMAR, 2015).

5.2 Definição e Propriedades

As metasuperfícies são estruturas eletromagnéticas efetivas, homogêneas e artificiais bidimensionais, ou seja, são um tipo específico dos metamateriais. Esses elementos são inseridos em pequenos blocos de construção, conhecidos como células unitárias, dispostos em arranjos bidimensionais. Podem ser definidas também como películas extremamente finas de metamateriais. E, também, são conhecidas como metafilmes ou metamateriais de camada única. A Figura 5.1 exemplifica uma forma genérica da metasuperfície.

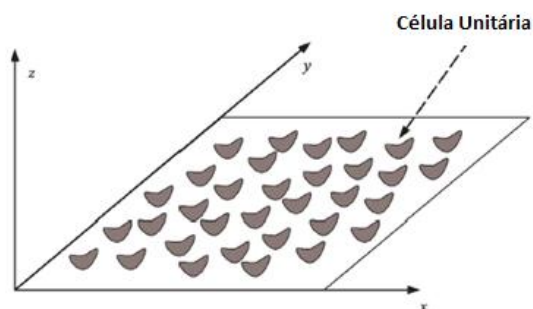


Figura 5.1 - Exemplo genérico de conjunto de células unitárias efetivas, homogêneas e bidimensionais

Fonte: Elaborado pelo autor.

As metasuperfícies não necessariamente possuem espessuras igual zero. E sim, devem ter valores de espessura muito menor do que o comprimento de onda da onda eletromagnética, para que as propriedades elétricas e magnéticas do material se comporte como um metamaterial bidimensional. E podem ter uma variedade de formas como exemplificadas na Figura 5.2.

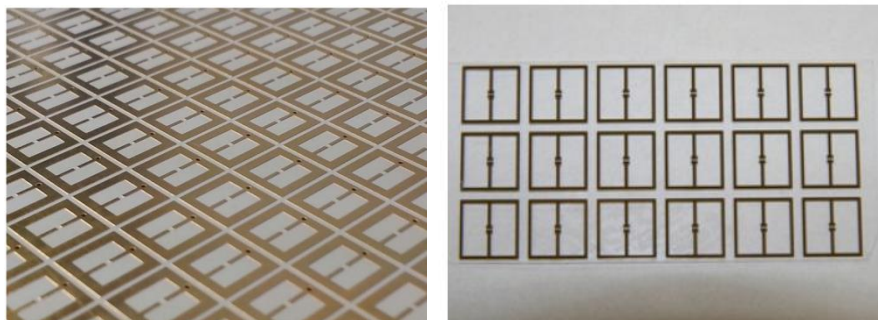


Figura 5.2 - Exemplo de metasuperfície.

Fonte: Google Imagens.

Essas superfícies vêm sendo empregadas em várias aplicações como sistema que operam com micro-ondas, ótica, para controle de superfícies inteligentes, biomedicina e outras aplicações, devido a ocupar menos espaços que os metamateriais tridimensionais.

As metasuperfícies, por se tratar de um metamaterial bidimensional, apresenta os mesmos princípios físicos apresentados no capítulo anterior para os metamateriais. Assim, possuem um comportamento eletromagnético de suas células unitárias dependentes da faixa de frequência da onda, ou seja, seus parâmetros constitutivos dependentes da frequência e caracterizadas por possuir os valores do índice de refração, permeabilidade elétrica e permissividade magnética negativos (WONG et al., 2015).

5.3 Aplicações com Antenas de Microfita

Nessa seção, iremos apresentar alguns trabalhos que pesquisamos sobre aplicações das metasuperfícies com as antenas de microfita, analisando os efeitos ocasionados nos parâmetros da antena devido à utilização das metasuperfícies.

No trabalho do Zhu et al.,(2014) foi proposto a construção de uma antena de microfita com patch circular com frequência reconfigurável, obtida através de uma metasuperfície colocada no topo da antena. A sintonização da frequência é decorrente da rotação da metasuperfície em torno do centro do patch, conforme mostrado na Figura 5.3. Nesse trabalho, foi utilizado um patch com forma circular projetada para o operar

na frequência de 5GHz. Sendo utilizado a ferramenta computacional EM simulation tool CST e, também, fabricada em laboratório uma antena, a fim de analisar os dados simulados e experimentais. A Tabela 5.1 mostra os valores das dimensões da antena e da metasuperfície.

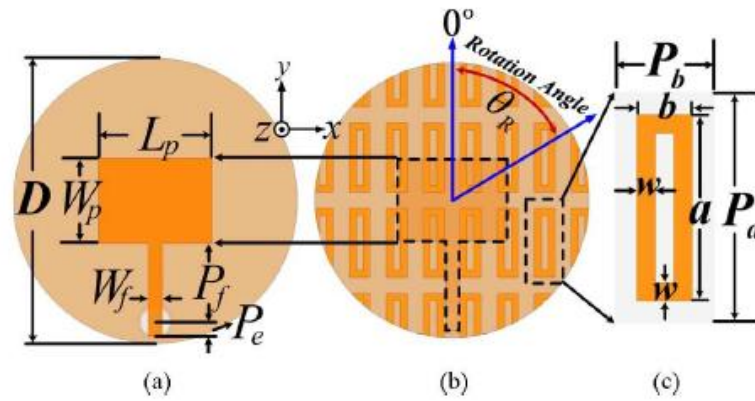


Figura 5.3 - Geometrias do (a) patch da antena; (b) metasuperfície e (c) unidade de célula da metasuperfície.

Fonte: ZHU et al., 2014.

P_a	P_b	a	b	w	L_p	W_p	W_f	P_f	P_e	D
12.4	5.4	10	3	1	16	12	2	11	2	40

Tabela 5.1 Dimensões da antena de microfitas com frequência reconfigurável proposta (dimensão dos parâmetros em mm).

Fonte: ZHU et al., 2014.

A metasuperfície foi colocada em cima do patch da antena e alimentação da antena foi feito com conector SMA, como mostrado na Figura 5.4.

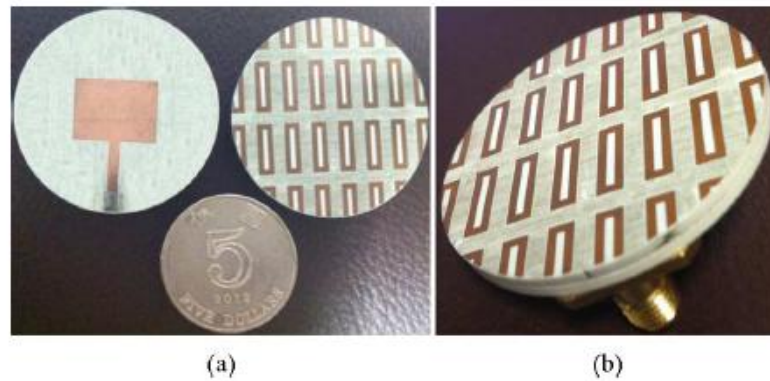


Figura 5.4 Protótipos do (a) patch da antena e da metasuperfície; (b) Antena de Microfitas com Frequência Reconfigurável.

Fonte: ZHU et al., 2014.

O procedimento inicial adotado foi rotacionar a metasuperfície ao redor do patch radiante da antena com os seguintes ângulos: 10°, 35°, 55°, 80°. E em seguida, analisar as características eletromagnéticas, como permissividade elétrica, permeabilidade magnética, índice de reflexão e impedância equivalente da antena, conforme mostrado na Figura 5.5. Pode-se perceber, que a rotação da metasuperfície provocou uma variação nas características eletromagnéticas, em especial, na permissividade elétrica, quanto maior o ângulo de rotação, menor o valor de permissividade elétrica, gerando assim, uma variação na frequência de ressonância da antena, fazendo com que a antena operasse com frequência reconfigurável.

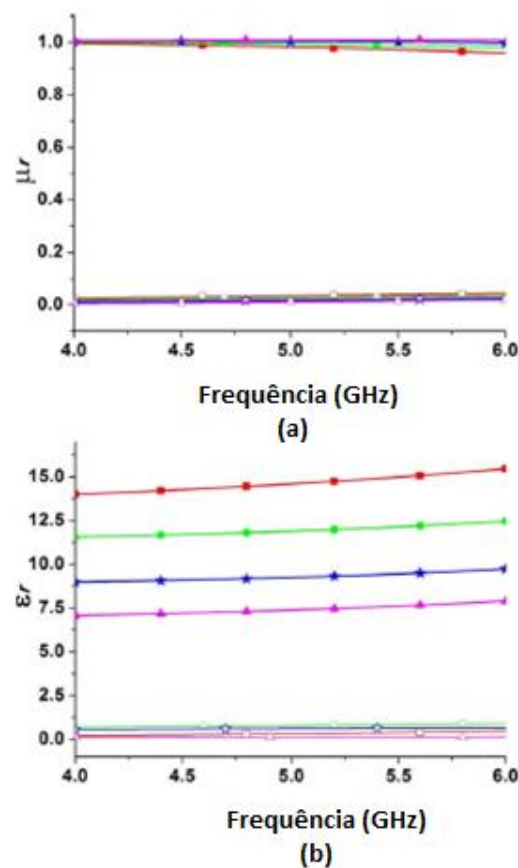


Figura 5.5 - Gráficos da Permeabilidade Magnética Relativa e Permissividade Elétrica da antena para os ângulos de rotação 10°, 35°, 55° e 80° da Metasuperfície.

Fonte: ZHU et al., 2014.

A Tabela 5.2 mostra os valores calculado e simulado para a antena para os valores dos ângulos de rotação da metasuperfície já mencionados.

de Ressonância	4.77	5.07	5.27	5.51
Ângulo de Rotação da MS	10°	35°	55°	80°
ϵ_r simulado	13	9.5	7.5	5
ϵ_r calculado	14.5	11.8	9.2	7.2

Tabela 5.2 - Valores calculado e simulado para antena de microfita com metasuperfície.

Fonte: ZHU et al., 2014.

A utilização da metasuperfície no topo da antena de microfita projetada, mudou as características eletromagnéticas da antena, tornando-a em uma antena com frequência reconfigurável. A metasuperfície quando rotacionada ao redor do patch modifica a polarização da antena, o índice de refração, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética, acarretando assim na variação da frequência de ressonância da antena.

No trabalho do Chung et al., (2011) foi proposto a construção de uma antena de microfita com patch retangular utilizando uma metasuperfície, composta por anéis quadrados distribuídos de forma periódica ao longo do Patch, como mostrado na Figura 5.6.

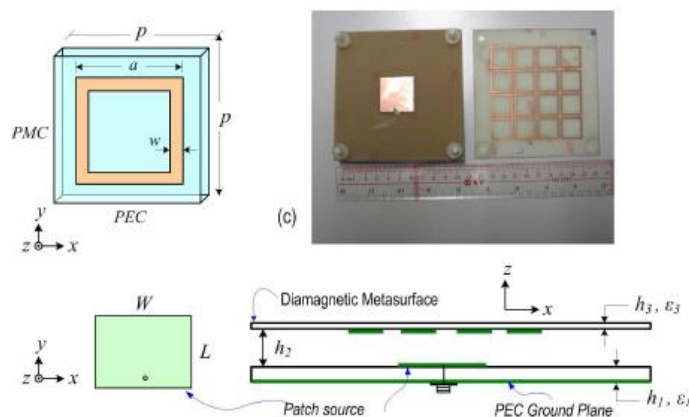


Figura 5.6 Configuração da Antena de Microfitas com a Metasuperfície Proposta.

Fonte: CHUNG et al., 2011.

A priori, foram analisados as características da antena com a introdução da metasuperfície: índice de refração, permissividade elétrica e os parâmetros S da antena, como mostrado na Figura 5.7.

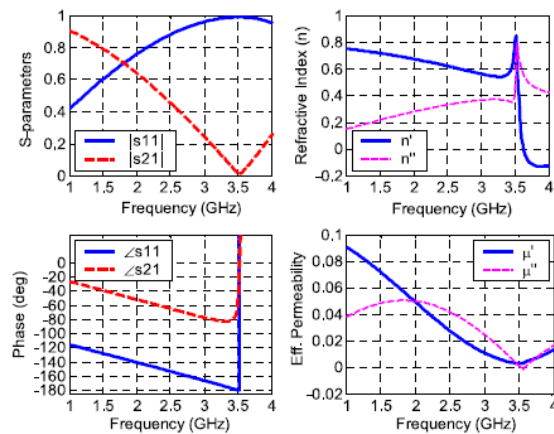


Figura 5.7 - Gráficos dos parâmetros S, permissividade elétrica e índice de refração da antena utilizando metasuperfície.

Fonte: CHUNG et al., 2011.

Em seguida, foram analisados e comparados os parâmetros de desempenho da antena de microfitas com e sem a utilização da metasuperfície, como mostrado nas Figuras 5.8 e 5.9.

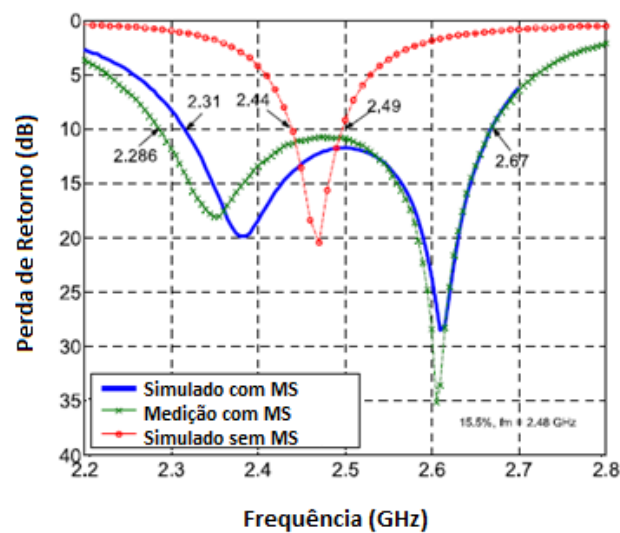


Figura 5.8 - Gráficos da perda de retorno para a antena de microfita com e sem a utilização da Metasuperfície.

Fonte: CHUNG et al., 2011.

valores negativos. Já a Figura 5.12 mostra a relação do número de células unitárias utilizadas na metasuperfície e o coeficiente de reflexão da antena.

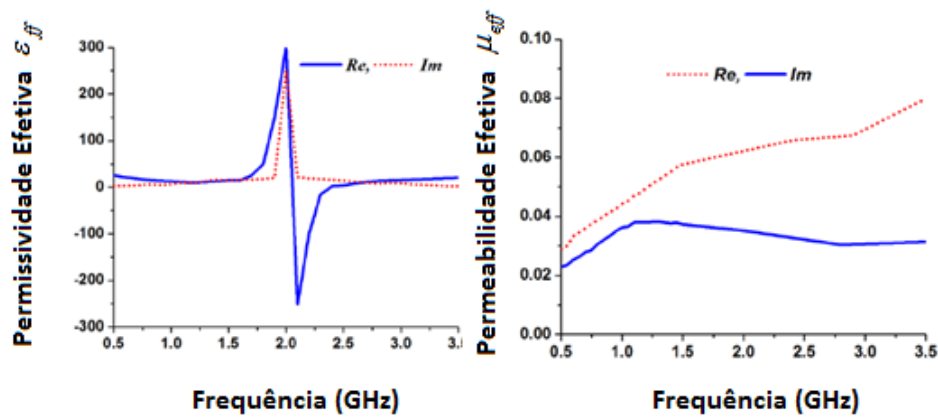


Figura 5.11 - Gráficos da permissividade elétrica e permeabilidade magnética da antena utilizando Metasuperfície.

Fonte: Islam et al., 2013.

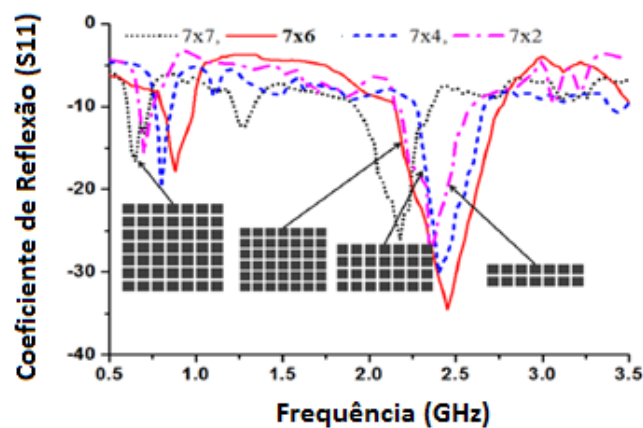


Figura 5.12 - Gráficos do coeficiente de reflexão da antena utilizando metasuperfície.

Fonte: Islam et al., 2013.

Em seguida, foram analisados e comparados os parâmetros de desempenho da antena de microfita com e sem a utilização da metasuperfície, como mostrado na Figura 5.13.

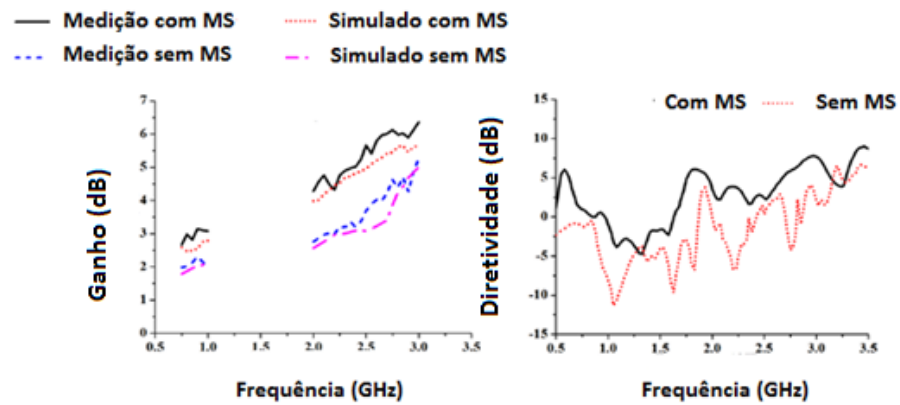


Figura 5.13 - Gráficos do ganho e da diretividade para a antena de microfita com e sem a utilização da Metasuperfície.

Fonte: Islam et al., 2013.

A utilização das metasuperfícies na antena gerou uma melhor performance em seus parâmetros: maior ganho e melhor diretividade.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Problema Proposto

Iremos projetar, simular, confeccionar e testar em laboratório uma antena de microfitas com patch retangular, utilizando o método de alimentação da linha de microfita e o método de análise da linha de transmissão, como mostrada na Figura 6.1. Em seguida, iremos projetar uma metasuperfície retangular a ser utilizada no topo da antena de microfitas, em cima do substrato e do patch, composta por anéis metálicos quadrados distribuídos periodicamente, como mostrada nas Figuras 6.2 e 6.3. Distanciaremos a metasuperfície do topo da antena gradativamente. E por fim, mostraremos a influência dessa metasuperfície no desempenho da antena de microfitas através de uma análise comparativa entre os desempenhos das antenas de microfitas: com e sem a metasuperfície.

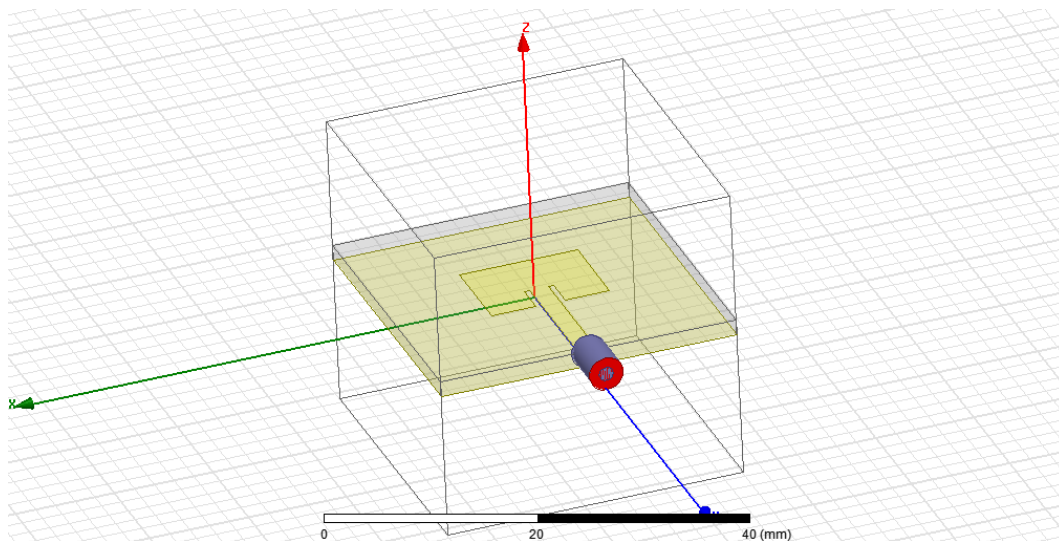


Figura 6.1 - Antena de Microfitas projetada e simulada.
Fonte: elaborada pelo autor.

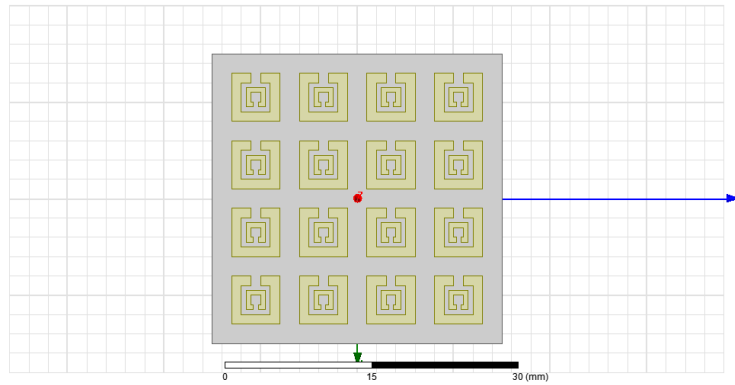


Figura 6.2 - Metasuperfície projetada.

Fonte: elaborado pelo autor.

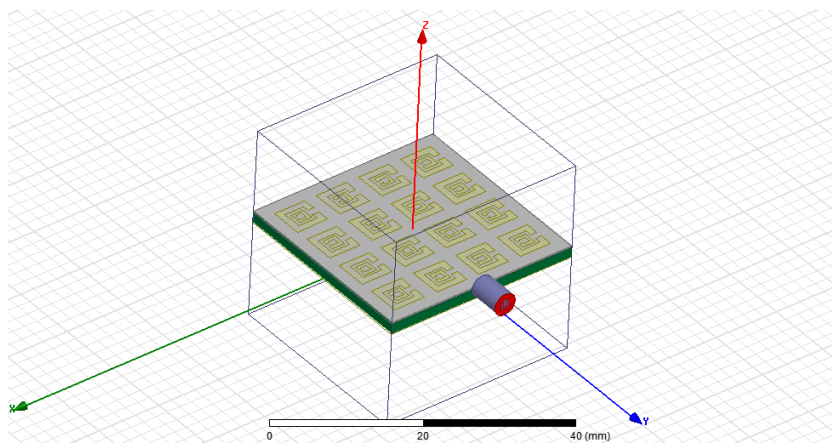


Figura 6.3 - Antena de Microfitas com a Metasuperfície projetada e simulada.

Fonte: elaborada pelo autor.

6.2 Análise Paramétrica do Efeito do Substrato

Nessa seção, iremos mostrar o efeito do substrato no desempenho de uma antena de microfita através de simulações realizadas no software HFSS para a antena da Figura 6.1 e das Equações 3.9 e 3.1. Começaremos mostrando a relação entre a permissividade elétrica do substrato e as dimensões do patch da antena, para diferentes valores de frequência de ressonância e para espessura do substrato constante e igual $h = 1,5 \text{ mm}$:

1) $f_r = 2,45 \text{ GHz}$

ϵ_r	W(mm)	L (mm)
2,2	40	48,4
4,4	28,84	37,26
6,15	24,43	32,38
10,2	18,96	25,87

Tabela 6.1 - Valores das dimensões do Patch x Permissividade Elétrica Relativa do Substrato para $f_r = 2,45$ GHz.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2) $f_r = 5$ GHz

ϵ_r	W(mm)	L (mm)
2,2	19,32	23,72
4,4	13,78	18,26
6,15	11,64	15,87
10,2	8,98	12,68

Tabela 6.2 - Valores das dimensões do Patch x Permissividade Elétrica Relativa do Substrato para $f_r = 5$ GHz.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3) $f_r = 10$ GHz

ϵ_r	W(mm)	L (mm)
2,2	9,07	11,86
4,4	6,44	9,13
6,15	5,41	7,93
10,2	4,1	6,34

Tabela 6.3 - Valores das dimensões do Patch x Permissividade Elétrica Relativa do Substrato para $f_r = 10$ GHz.

Fonte: Elaborada pelo autor.

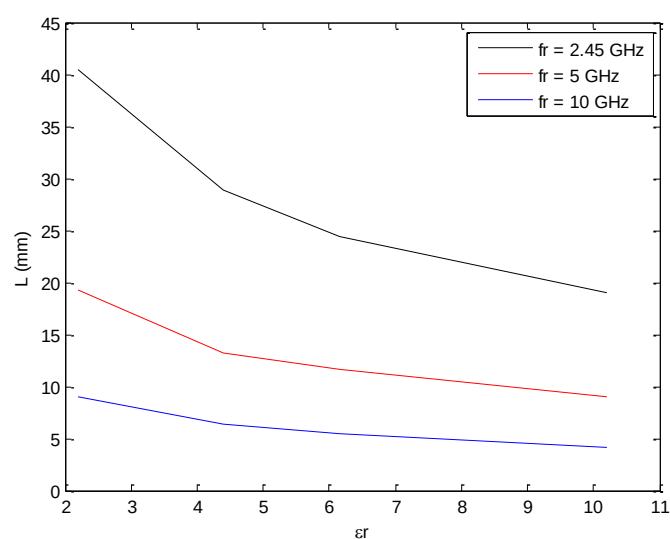


Figura 6.4 - Comprimento do Patch x Permissividade Elétrica Relativa do Substrato.

Fonte: elaborada pelo autor

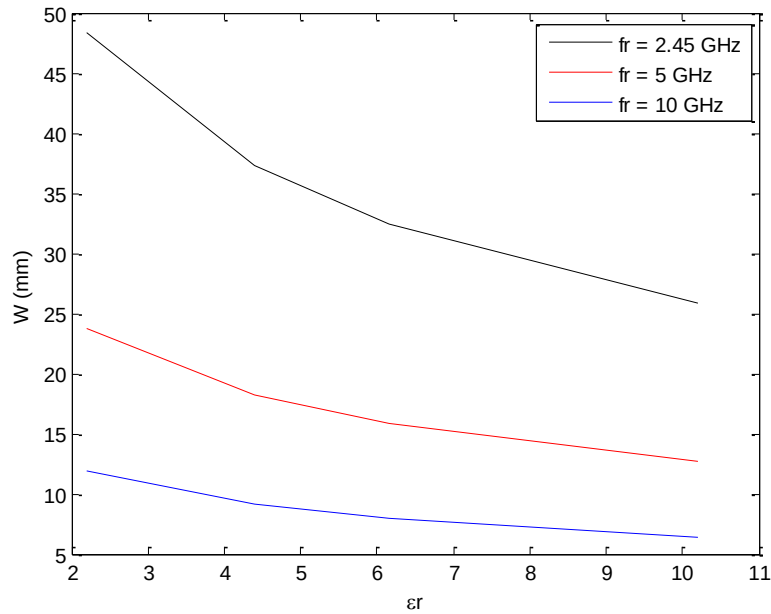


Figura 6.5 - Largura do Patch x Permissividade Elétrica Relativa do Substrato.
Fonte: elaborada pelo autor.

As Figuras 6.4 e 6.5 mostram de forma parametrizada os resultados obtidos das Tabelas 6.1 a 6.3. Percebe-se que quanto maior a permissividade elétrica de um determinado substrato, menores serão as dimensões do patch de uma antena de microfitas para operar em uma determinada frequência de ressonância.

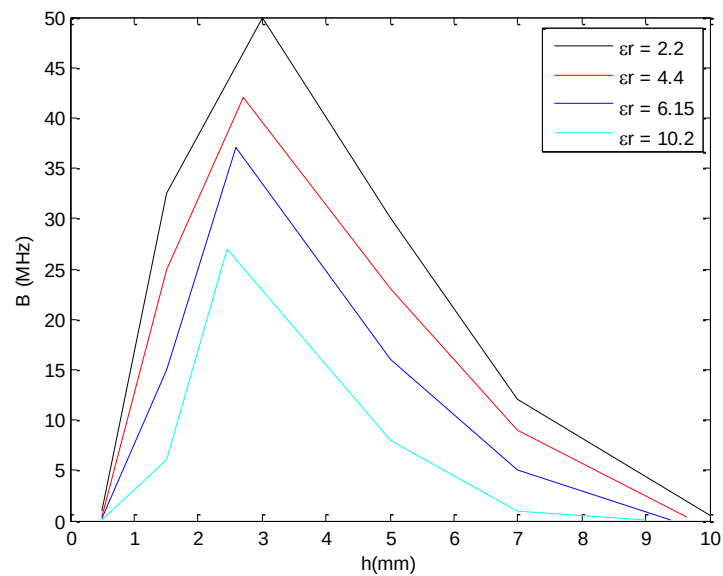


Figura 6.6 - Largura de Banda x Espessura do Substrato.
Fonte: elaborada pelo autor.

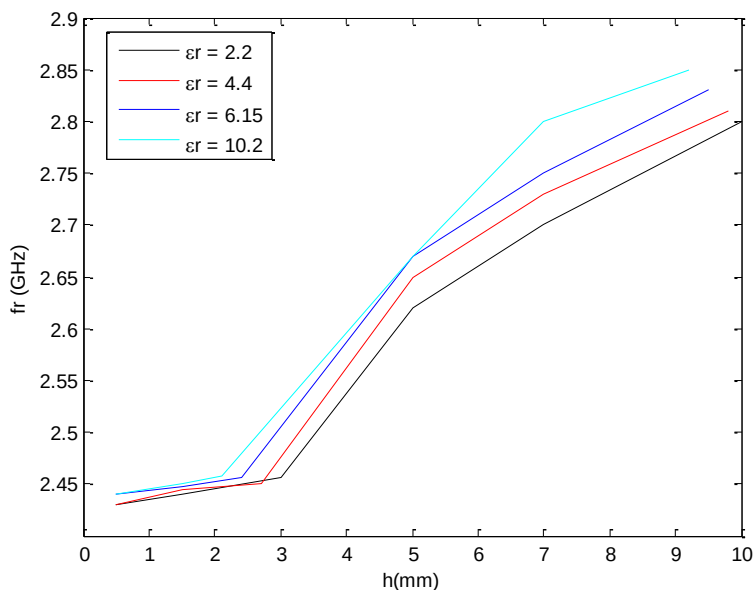


Figura 6.7 - Frequência de Ressonância x Espessura do Substrato.

Fonte: elaborada pelo autor.

As Figuras 6.6 e 6.7 mostram a relação parametrizada entre a largura de banda e frequência de ressonância da antena de microfitas pelo valor da espessura do substrato. Em que percebemos a seguinte relação: quanto maior é a espessura do substrato, maior será a largura de banda até determinado valor (da ordem de grandeza dos valores de largura e comprimento do patch), a partir deste valor a largura de banda tende a diminuir.

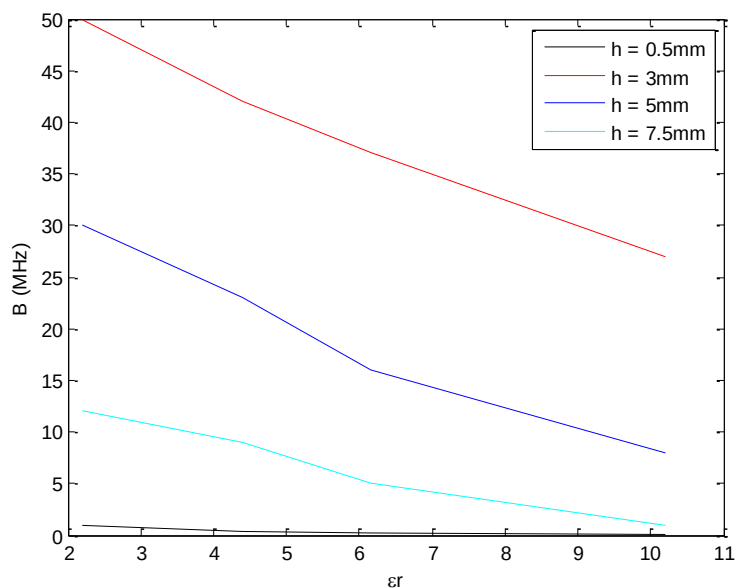


Figura 6.8 - Largura de Banda x Permissividade Elétrica do Substrato.

Fonte: elaborada pelo autor.

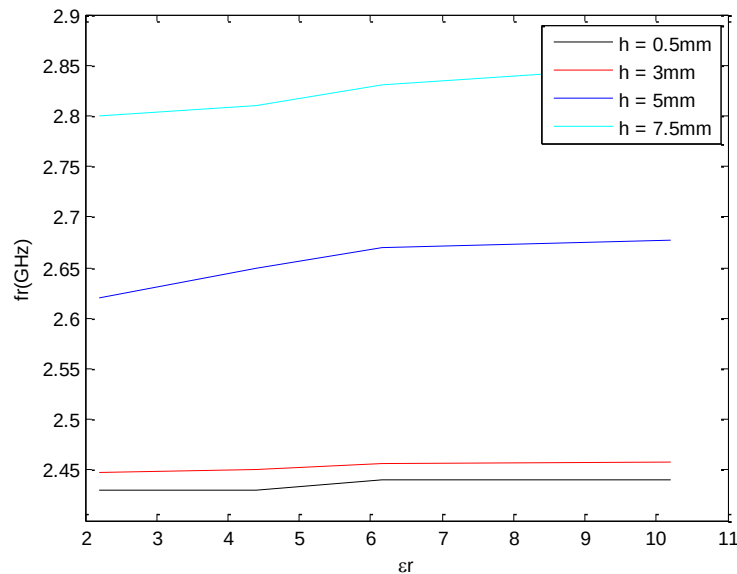


Figura 6.9 - Frequência de Ressonância x Permissividade Elétrica do Substrato.
Fonte: elaborada pelo autor.

As Figuras 6.8 e 6.9 mostram a relação parametrizada entre a largura de banda e frequência de ressonância da antena de microfita pelo valor da constante de permissividade elétrica relativa do substrato. Onde percebemos a seguinte relação: quanto maior é a permissividade elétrica relativa do substrato para uma determinada espessura, menor será a largura de banda.

6.3 Modelagem

Dimensionamento do Patch e do Substrato:

Como a maioria dos aplicativos que utilizam a tecnologia da antena de microfita possuem a frequência de operação em 2.45 GHz em suas aplicações, adotamos para o nosso projeto essa frequência de ressonância. Assim, podemos calcular os parâmetros da antena como descrito a seguir:

L - Comprimento do patch;

W - Largura do patch;

t - espessura do patch;

h - espessura do substrato;

ϵ_r - Permissividade elétrica relativa do substrato.

Através do método da Linha de transmissão, temos:

Condições:

$$1) t \ll \lambda \text{ e } t \ll h \quad (6.1)$$

Onde λ é o comprimento de onda e h é a espessura do substrato.

$$\lambda = \frac{c}{f_r} = \left(\frac{3 \times 10^8}{2,45 \times 10^9} \right) = 0,12m \approx 120mm \quad (6.2)$$

Em que "c" é a velocidade da luz e f_r é a frequência de ressonância da antena.

$$2) 0,003 \lambda \leq h \leq 0,06 \lambda \quad (6.3)$$

Logo:

$$0,36mm \leq h \leq 7,2mm \quad (6.4)$$

Diante dos resultados apresentados na Figura 6.5, foi escolhido para o projeto um substrato com permissividade elétrica $\epsilon_r = 4,4$, o FR4 de fibra de vidro. De forma a obter uma antena com melhor eficiência espectral, a espessura do substrato foi definida em:

$$h = 3,6 \text{ mm}; \quad (6.5)$$

E como a espessura do patch tem que ser muito menor que a espessura do substrato, escolhemos:

$$t = 0,1mm \quad (6.6)$$

Assim podemos calcular W, utilizando a Equação (3.10):

$$W = \frac{c}{2xf_r \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2,45 \times 10^9 \sqrt{\frac{(4,4 + 1)}{2}}} \approx 38mm \quad (6.7)$$

Para calcular L utilizaremos as Equações de (3.6) a (3.9), assim temos:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1/2} = \frac{4,4 + 1}{2} + \frac{4,4 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1,575}{48} \right]^{-1/2} \approx 3,2 \quad (6.8)$$

$$\Delta L = h \left[\frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \times \left(\frac{w}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \times \left(\frac{w}{h} + 0,8 \right)} \right] \approx 1,6mm \quad (6.9)$$

$$L = \frac{1}{2xf_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \times \sqrt{\mu_o \cdot \epsilon_o}} - 2\Delta L = \frac{3 \times 10^8 \times 10^3}{2 \times 2,45 \times 10^9 \sqrt{3,2}} - 2 \times 1,6 \approx 28mm \quad (6.10)$$

Dimensionamento da linha de microfita (alimentação):

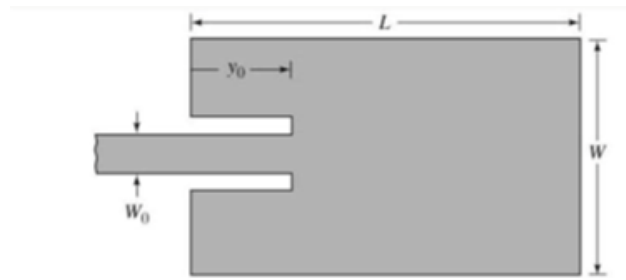


Figura 6.10 - Antena de microfita com patch retangular alimentada por uma linha de microfita.
Fonte: A. BALANIS, 2009, Vol.1.

Utilizando as Equações (3.1) a (3.4) e assumindo que o casamento de impedância da linha de microfita e da antena ocorrerá com o valor de impedância de entrada de 50Ω .

obtemos: $y_0 = 9\text{mm}$ e $W_0 = 8\text{mm}$.

Parâmetros da Antena de Microfitas:

<u>Parâmetros</u>	<u>Valores</u>
Frequência de Ressonância	2.45 GHz
Largura do Patch (W)	3.8 cm
Comprimento do patch (L)	2.8 cm
Dimensões do Substrato	10 x 10 cm
Espessura do Substrato (h)	0.36 cm
Constante Dielétrica do Substrato (ϵ_r)	4.4
Largura da Fita de Microfita (W_0)	0.8 cm
Comprimento da Alimentação Indentada (y_0)	0.9 cm

Tabela 6.4 - Parâmetros da antena de microfita com patch retangular projetada.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Dimensionamento da Metasuperfície:

A Metasuperfície será composta por uma estrutura de SRR de anéis metálicos quadrados conforme mostrado na Figura 6.2.

Conforme visto no Capítulo 4, as células unitárias do SRR deverão ter dimensões menores que um quarto do comprimento de onda ($\lambda_g = 120\text{mm}$), para que suas características eletromagnéticas sejam alcançadas.

Assim, escolhemos os seguintes valores para a estrutura de SRR da Figura 6.2:

- Anel externo: 20mm x 20mm e 15mm x 15mm, com abertura da fenda de 2,5mm; e
- Anel interno: 10mm x 10mm e 5mm x 5mm, com abertura da fenda de 2,5mm.

A espessura da metasuperfície obedece a condição de ser muito menor que a espessura do substrato da antena, uma vez que a metasuperfície trata-se de um metamaterial bidimensional. Como a espessura do substrato é 3,6 mm, a da metasuperfície será aproximadamente 5 vezes menor, logo 0,8mm. E o valor da permissividade elétrica relativa da metasuperfície que será utilizado nesse projeto será $\epsilon_r = 4,4$.

6.4 Resultados Simulados

6.4.1 Antena de Microfita Sem a Metasuperfície (AMSM)

Utilizando os parâmetros da Tabela 6.4, simulamos a antena de microfita com patch retangular através do software Ansoft HFSS, mostrada na Figura 6.1, e obtivemos os seguintes resultados:

Perda de Retorno:

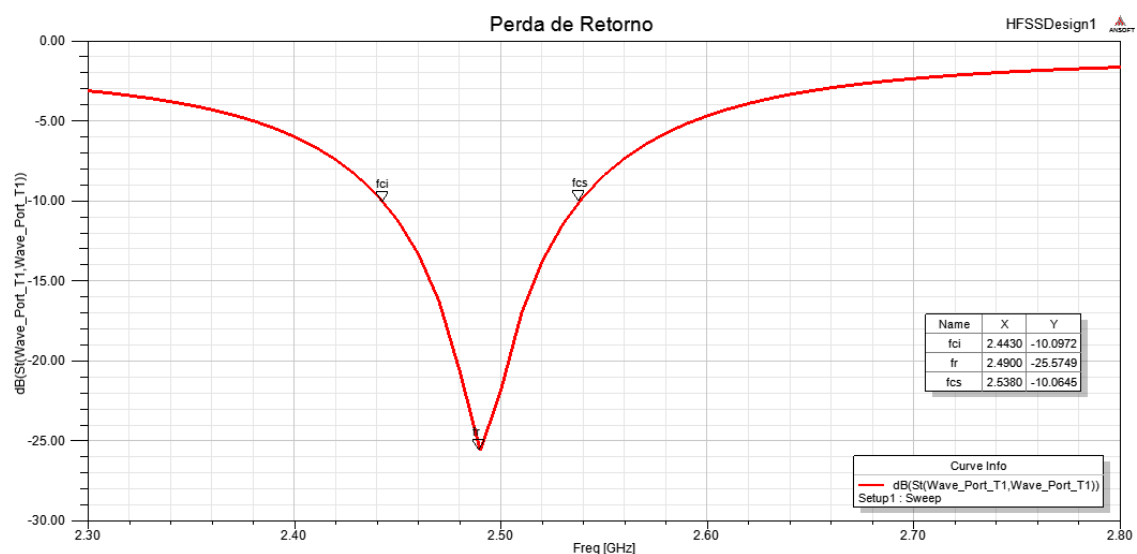


Figura 6.11 - Gráfico da Perda de Retorno da antena de microfita projetada.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 6.11, percebemos que a frequência de ressonância obtida é $f_r = 2,49$ GHz, com frequência central inferior de $f_{ci} = 2,443$ GHz e a frequência central superior de $f_{cs} = 2,5380$ GHz. Assim, a largura de banda obtida é $B = 95$ MHz, considerando -10 dB. A frequência de ressonância obtida apresentou um desvio padrão de 1,6% da frequência de ressonância desejada (2,45 GHz).

Ganho:

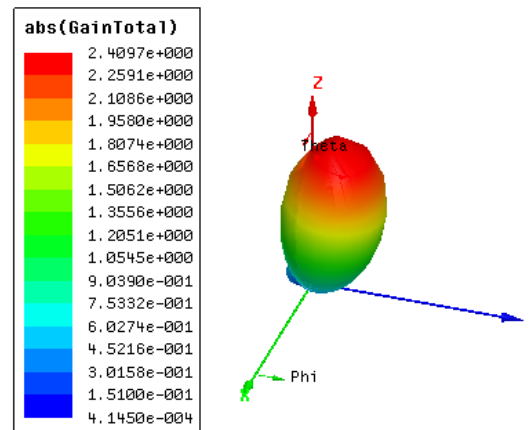


Figura 6.12 - Gráfico do Ganho da antena de microfita projetada.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 6.12, percebemos que o ganho máximo da antena é na direção radial a superfície da antena de microfita com valor de $G = 2,4$.

Impedância de entrada:

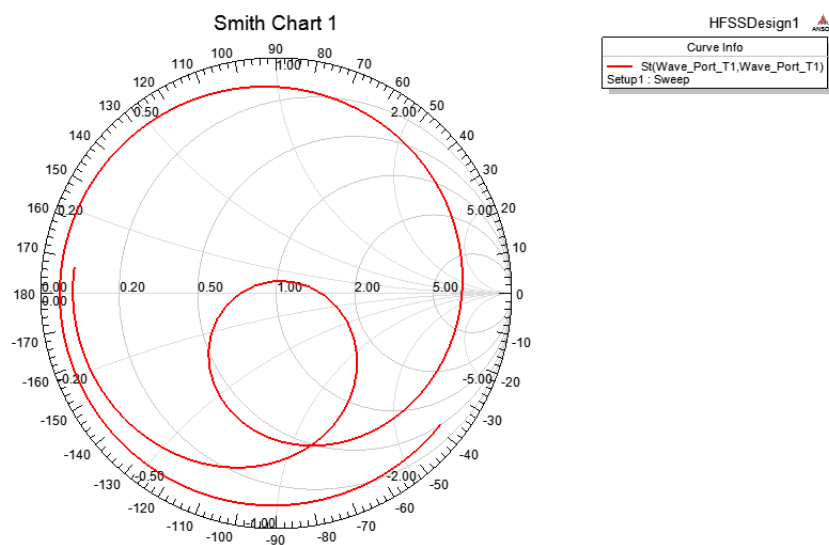


Figura 6.13 - Gráfico da Carta de Smith para a antena de microfita projetada.

Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 6.13 mostra que a impedância de entrada da antena de microfita tem uma dependência com a frequência de operação. Na simulação foi definido o intervalo de 1 a 3 GHz.

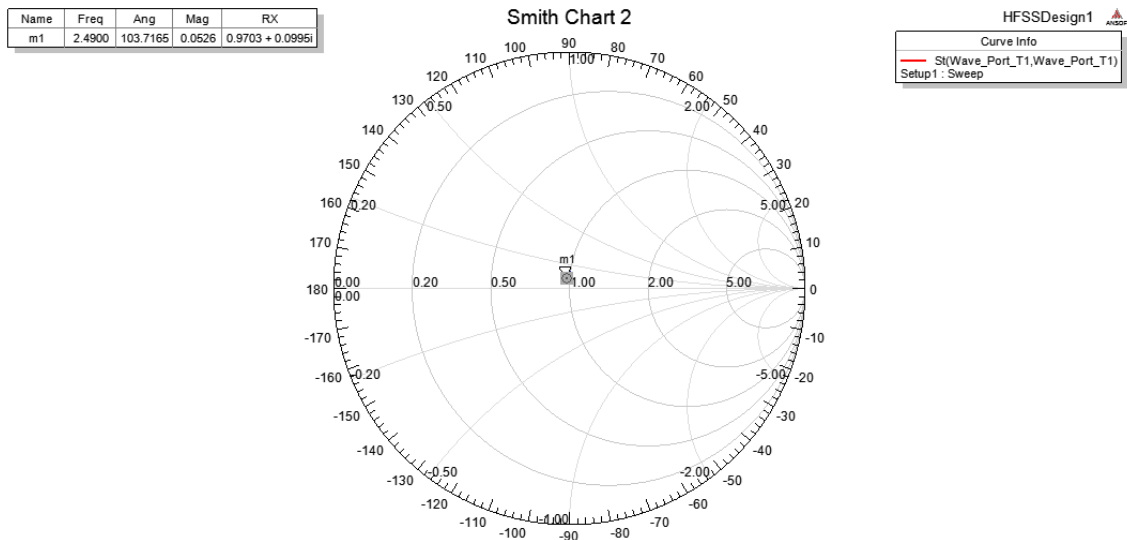


Figura 6.14 - Gráfico da Impedância de Entrada para a antena de microfita projetada.

Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 6.14 mostra a impedância de entrada normalizada da antena de microfita para a frequência de 2,49 GHz, $z_A = 0,9703 + 0,0995i$. Considerando o casamento de impedância e $Z_C = 50\Omega$, teremos $Z_A = 48,51 - 4,975i \Omega$.

6.4.2 Antena de Microfita Com a Metasuperfície (AMCM)

A seguir mostraremos os resultados obtidos da simulação da Antena de Microfitas com a inclusão da metasuperfície projetada:

Perda de Retorno:

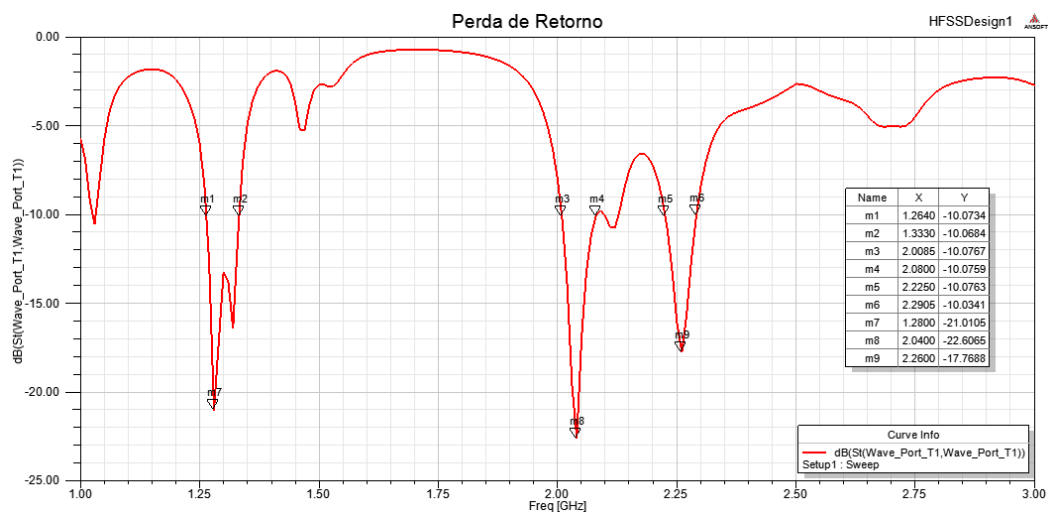


Figura 6.15 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 6.15, percebemos uma característica multibanda decorrente da inclusão da metasuperfície. As frequências de ressonâncias obtidas são $f_{r1} = 1,28$ GHz (com $f_{ci1} = 1,264$ GHz e $f_{cs1} = 1,333$ GHz), $f_{r2} = 2,04$ GHz (com $f_{ci2} = 2,008$ GHz e $f_{cs2} = 2,08$ GHz) e $f_{r3} = 2,26$ GHz (com $f_{ci3} = 2,225$ GHz e $f_{cs3} = 2,2905$ GHz). As larguras de banda obtida são $B_1 = 69$ MHz, $B_2 = 72$ MHz e $B_3 = 65,5$ MHz.

Ganho:

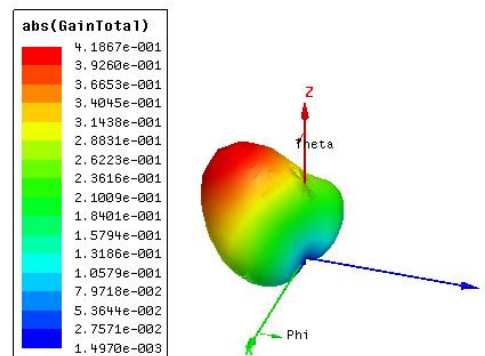


Figura 6.16 - Gráfico do Ganho da AMCM projetada.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 6.16, percebemos que o ganho máximo da antenna é na direção radial a superfície da antenna de microfita com valor de $G = 0,4187$.

A seguir mostraremos a influência da distância entre a metasuperfície e antenna de microfita no desempenho da mesma (d_m), adotaremos os seguintes valores para d_m :

1) $d_m = 0,5\text{mm}$

Perda de Retorno:

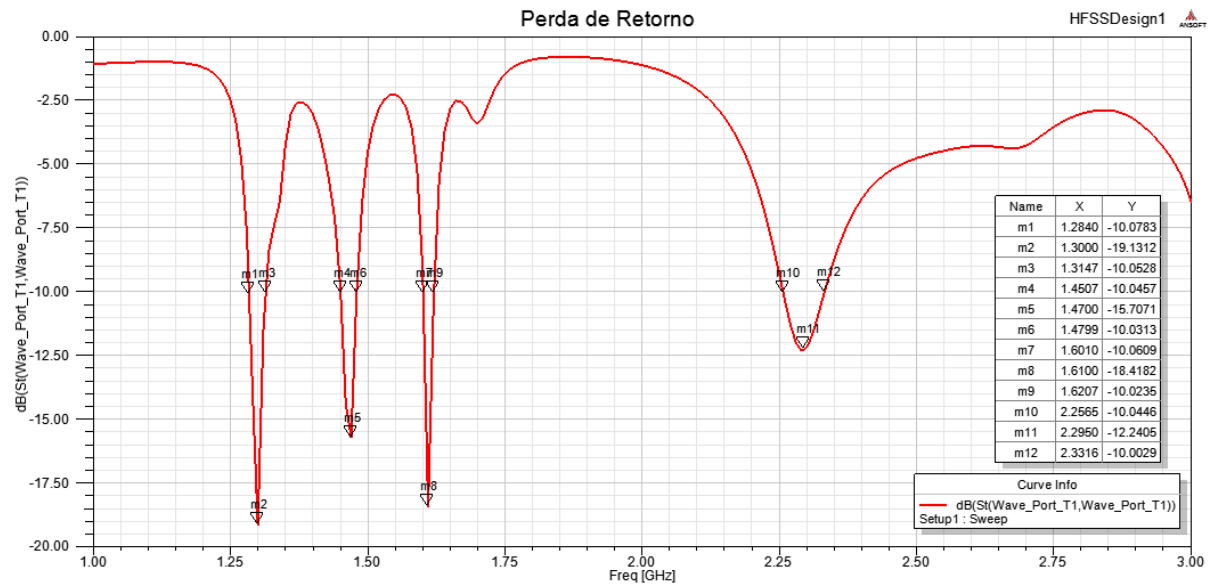


Figura 6.17 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 0.5\text{mm}$.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 6.17, percebemos que aumentou mais um ponto de frequência de ressonância. Assim, As frequências de ressonâncias obtidas são $f_{r1} = 1,3\text{ GHz}$ (com $f_{ci1} = 1,2840\text{ GHz}$ e $f_{cs1} = 1,3147\text{ GHz}$), $f_{r2} = 1,47\text{ GHz}$ (com $f_{ci2} = 1,4507\text{ GHz}$ e $f_{cs2} = 1,4799\text{ GHz}$), $f_{r3} = 1,61\text{ GHz}$ (com $f_{ci3} = 1,6010\text{ GHz}$ e $f_{cs3} = 1,6100\text{ GHz}$) e $f_{r4} = 2,295\text{ GHz}$ (com $f_{ci4} = 2,2565\text{ GHz}$ e $f_{cs4} = 2,3316\text{ GHz}$). As larguras de banda obtidas são $B_1 = 30,7\text{ MHz}$, $B_2 = 29,2\text{ MHz}$, $B_3 = 9\text{ MHz}$ e $B_4 = 75,1\text{ MHz}$.

2) $d_m = 1,5\text{ mm}$

Perda de Retorno:

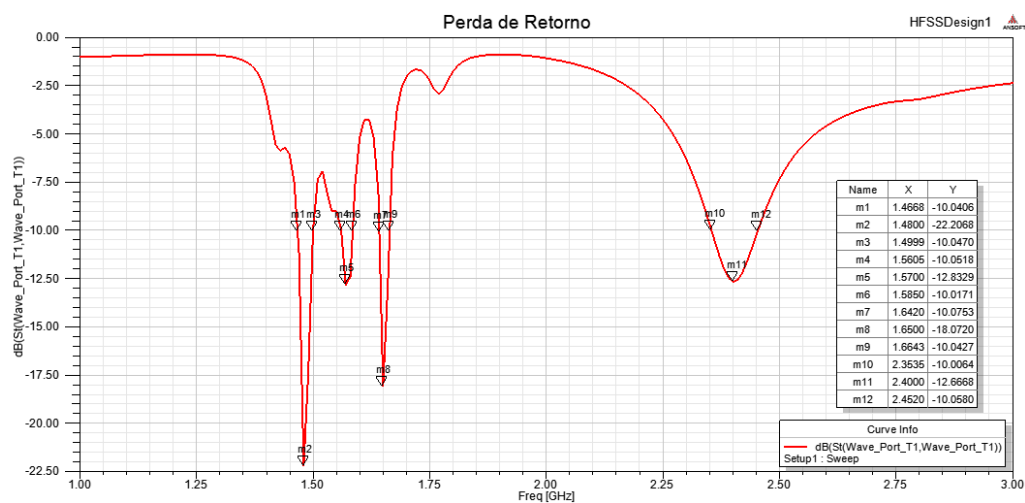


Figura 6.18 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 1,5\text{ mm}$.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 6.18, manteve-se a quantidade de frequências de ressonância comparada com a Figura 6.17. Assim, As frequências de ressonâncias obtidas são $f_{r1} = 1,48$ GHz (com $f_{ci1} = 1,4668$ GHz e $f_{cs1} = 1,4999$ GHz), $f_{r2} = 1,57$ GHz (com $f_{ci2} = 1,5605$ GHz e $f_{cs2} = 1,5850$ GHz), $f_{r3} = 1,65$ GHz (com $f_{ci3} = 1,6420$ GHz e $f_{cs3} = 1,6643$ GHz) e $f_{r4} = 2,4$ GHz (com $f_{ci4} = 2,3535$ GHz e $f_{cs4} = 2,4520$ GHz). As larguras de banda obtidas são $B_1 = 33,1$ MHz, $B_2 = 24,5$ MHz, $B_3 = 22,3$ MHz e $B_4 = 98,5$ MHz.

3) $d_m = 2,5$ mm

Perda de Retorno:

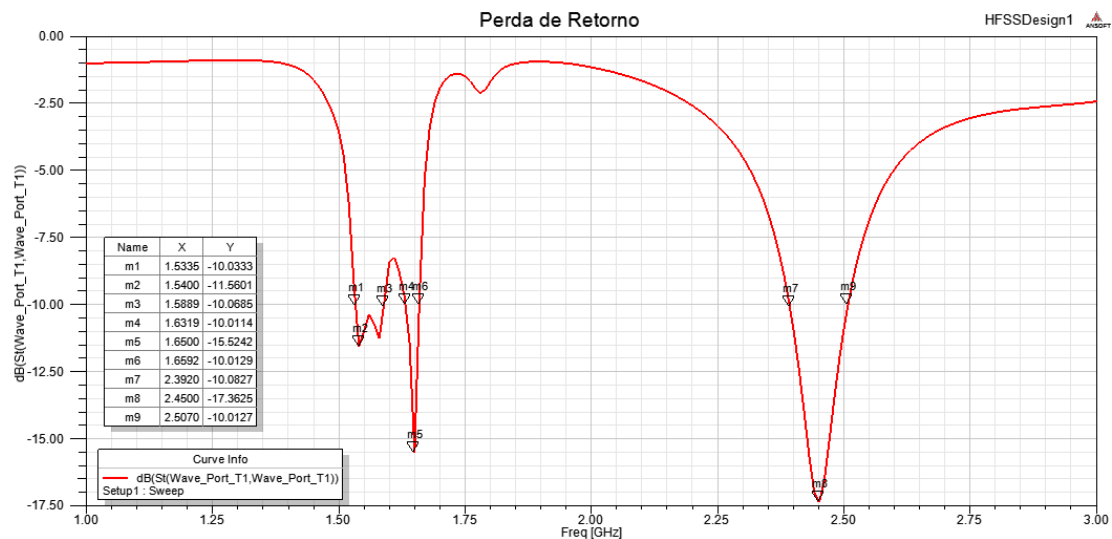


Figura 6.19 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 2,5$ mm.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 6.19, percebemos que diminuiu a quantidade de frequências de ressonância comparada com a Figura 6.18. As frequências de ressonâncias obtidas são $f_{r1} = 1,54$ GHz (com $f_{ci1} = 1,5335$ GHz e $f_{cs1} = 1,5889$ GHz), $f_{r2} = 1,65$ GHz (com $f_{ci2} = 1,6319$ GHz e $f_{cs2} = 1,6592$ GHz) e $f_{r3} = 2,45$ GHz (com $f_{ci3} = 2,3920$ GHz e $f_{cs3} = 2,5070$ GHz). As larguras de banda obtidas são $B_1 = 55,4$ MHz, $B_2 = 27,3$ MHz e $B_3 = 115$ MHz.

3) $d_m = 5,0$ mm

Perda de Retorno:

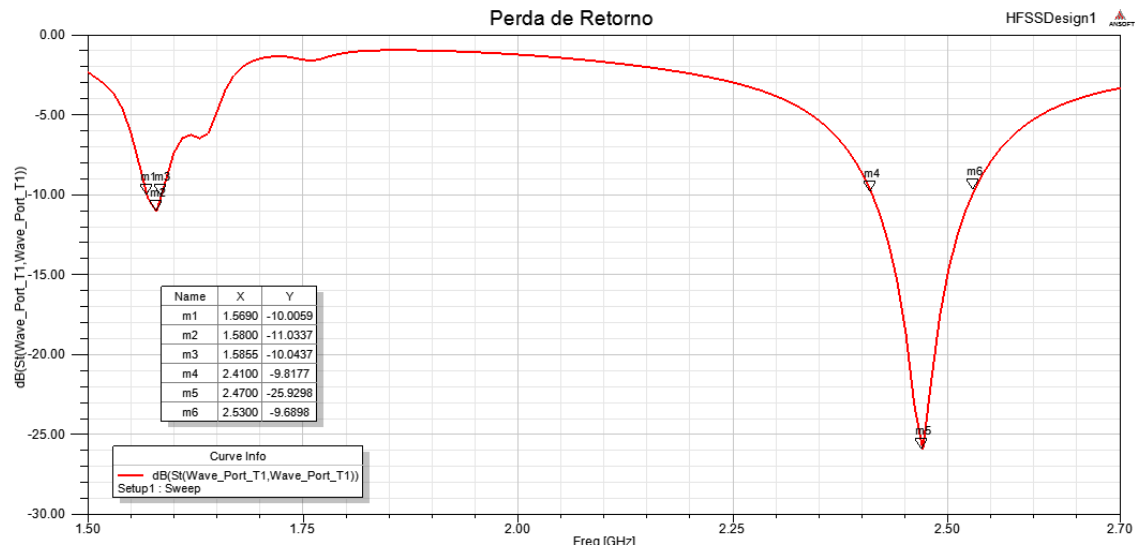


Figura 6.20 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 5,0$ mm.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 6.20, percebemos que diminuiu a quantidade de frequências de ressonância comparada com a Figura 6.19. As frequências de ressonâncias obtidas são $f_{r1} = 1,58$ GHz (com $f_{ci1} = 1,5690$ GHz e $f_{cs1} = 1,5855$ GHz) e $f_{r2} = 2,47$ GHz (com $f_{ci2} = 2,41$ GHz e $f_{cs2} = 2,53$ GHz). As larguras de banda obtidas são $B_1 = 16,5$ MHz e $B_2 = 120$ MHz.

4) $d_m = 10,0$ mm

Perda de Retorno:

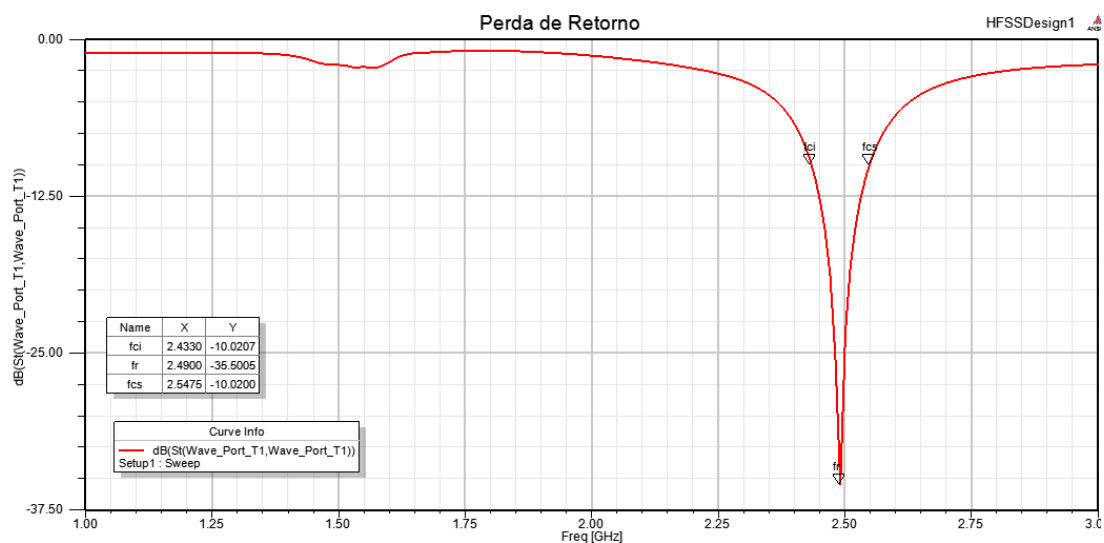


Figura 6.21 - Gráfico da Perda de Retorno da AMCM projetada para $d_m = 10,0$ mm.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando o gráfico da Figura 6.21, percebemos que a antena perdeu a característica multibanda para $d_m = 10\text{mm}$, valor esse bem maior que a espessura do substrato. A frequência de ressonância obtida é $f_r = 2,49\text{GHz}$ (com $f_{ci} = 2,443\text{ GHz}$ e $f_{cs} = 2,5475\text{ GHz}$) e $B=104,5\text{ MHz}$.

A Tabela 6.5 mostra os resultados obtidos através da simulação, de forma compilada, para a antena de microfita: com e sem a Metasuperfície.

Resultados simulados

Antena	d_m (mm)	f_r (GHz)	B (MHz)
AMSM	-	2,49	95,0
AMCM	0,0	1,28	69,0
		2,04	72,0
		2,26	65,5
	0,5	1,30	30,7
		1,47	29,2
		1,61	9,0
		2,29	75,1
	1,5	1,48	33,1
		1,57	24,5
		1,65	22,3
		2,40	98,5
	2,5	1,54	55,4
		1,65	27,3
		2,45	115
	5,0	1,58	16,5
		2,47	120,0
	10,0	2,49	104,5

Tabela 6.5 - Resultados compilados da simulação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.5 Resultados Experimentais

6.5.1 Antena de Microfita Sem a Metasuperfície (AMSM)

Utilizando os parâmetros da Tabela 6.4, foi confeccionada uma antena e testada em laboratório através do equipamento E5071C ENA Network Analyzer, conforme mostrada na Figura 6.22. E obtivemos o seguinte resultado:

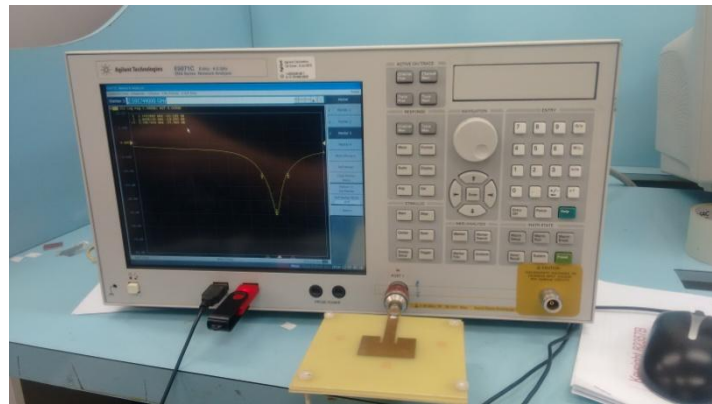


Figura 6.22 - AMSM confeccionada e testada no laboratório da UFRN através do equipamento E5071C ENA Network Analyzer .

Fonte: elaborada pelo autor.

Perda de Retorno:

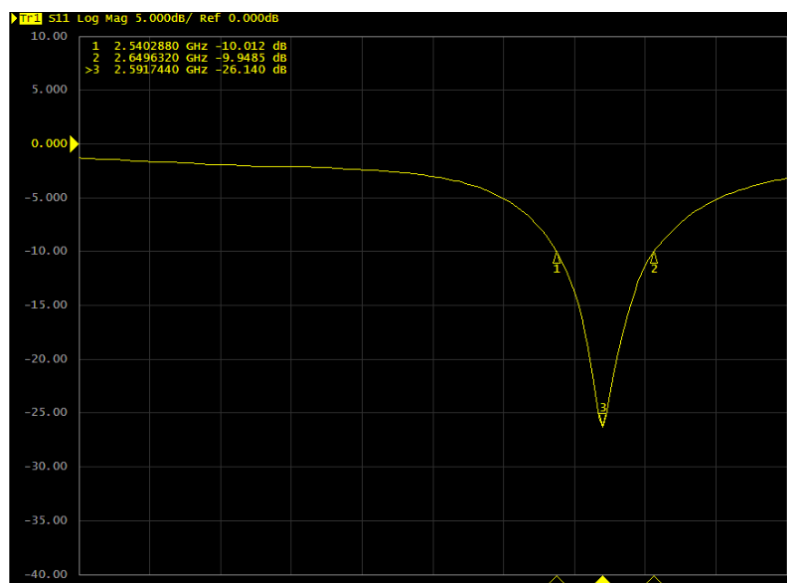


Figura 6.23 - Resultado obtido em laboratório para a Perda de Retorno da AMSM.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 6.23, percebemos que a frequência de ressonância obtida é $f_r = 2,59$ GHz, com frequência central inferior de $f_{ci} = 2,54$ GHz e a frequência central superior de $f_{cs} = 2,65$ GHz. Assim, a largura de banda obtida é $B = 110$ MHz, considerando -10 dB. A frequência de ressonância obtida apresentou um desvio padrão de 5,7% da frequência de ressonância desejada (2,45 GHz).

6.5.2 Antena de Microfita Com a Metasuperfície (AMCM)

Em seguida, foi confeccionada uma metasuperfície, utilizando os parâmetros da Tabela 6.4, e juntamente com a antena de microfita foram testadas em laboratório através do equipamento E5071C ENA Network Analyzer, conforme mostradas na Figura 6.24.

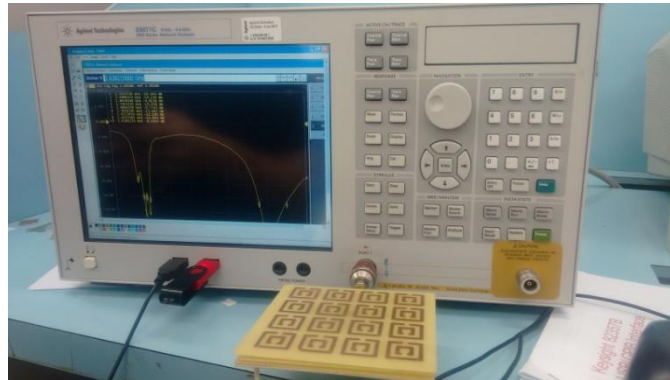


Figura 6.24 - AMCM confeccionada e testada no laboratório da UFRN através do equipamento E5071C ENA Network Analyzer.

Fonte: elaborada pelo autor.

E obtivemos os seguintes resultados:

Perda de Retorno:

Devido as limitações físicas dos materiais utilizados na confecção da antena de microfita com a metasuperfície, o menor valor obtido para d_m foi 2,5mm. Assim sendo:

1) $d_m = 2,5 \text{ mm}$

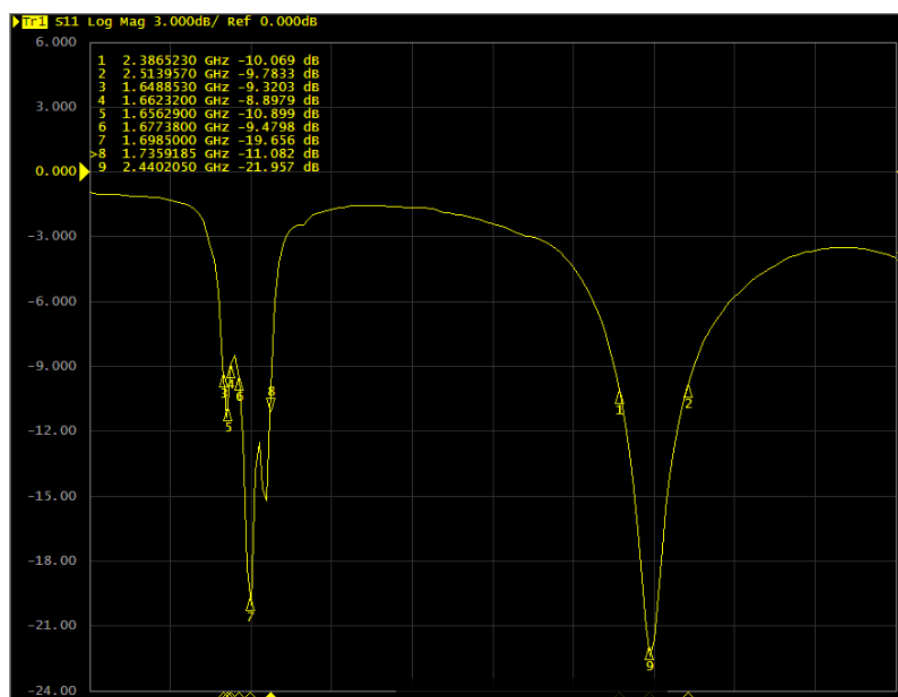


Figura 6.25 - Resultado obtido em laboratório para a Perda de Retorno da AMCM para $d_m = 2,5 \text{ mm}$.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 6.25, percebemos que as frequências de ressonâncias obtidas são $f_{r1} = 1,65$ GHz (com $f_{ci1} = 1,6488$ GHz e $f_{cs1} = 1,6623$ GHz), $f_{r2} = 1,70$ GHz (com $f_{ci2} = 1,6773$ GHz e $f_{cs2} = 1,7359$ GHz) e $f_{r3} = 2,44$ GHz (com $f_{ci3} = 2,3865$ GHz e $f_{cs3} = 2,5139$ GHz). As larguras de banda obtidas são $B_1 = 13,5$ MHz, $B_2 = 58,6$ MHz e $B_3 = 127,4$ MHz.

2) $d_m = 5$ mm

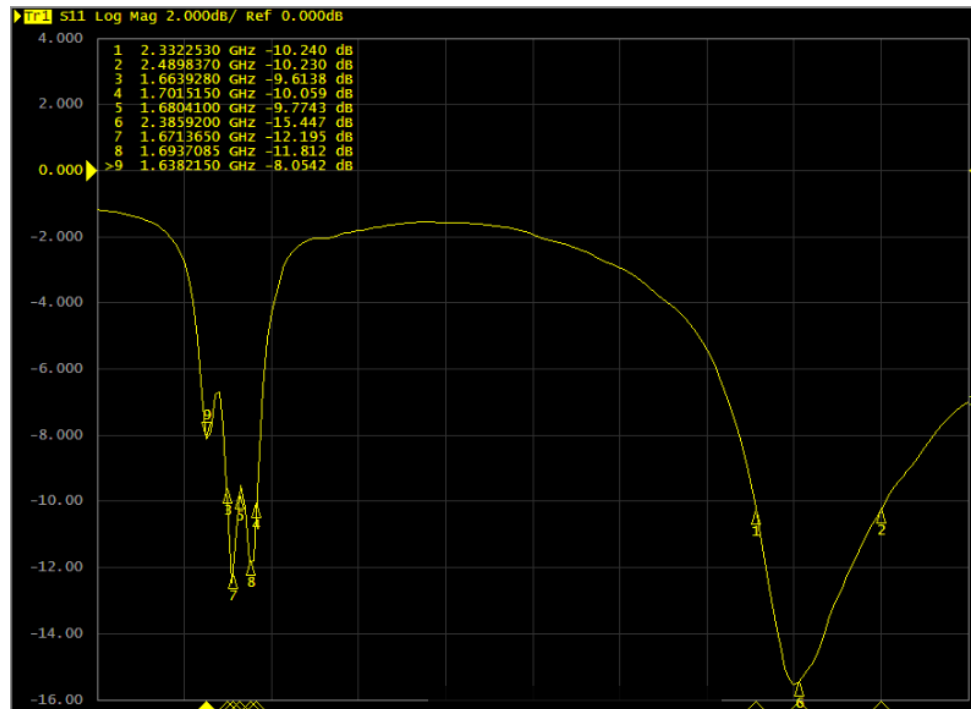


Figura 6.26 - Resultado obtido em laboratório para a Perda de Retorno da AMCM para $d_m = 5$ mm.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 6.26, percebemos que as frequências de ressonâncias obtidas são $f_{r1} = 1,67$ GHz (com $f_{ci1} = 1,6639$ GHz e $f_{cs1} = 1,7015$ GHz) e $f_{r2} = 2,38$ GHz (com $f_{ci2} = 2,3322$ GHz e $f_{cs2} = 2,4898$ GHz). As larguras de banda obtidas são $B_1 = 37,6$ MHz e $B_2 = 157,6$ MHz.

3) $d_m = 10,0$ mm

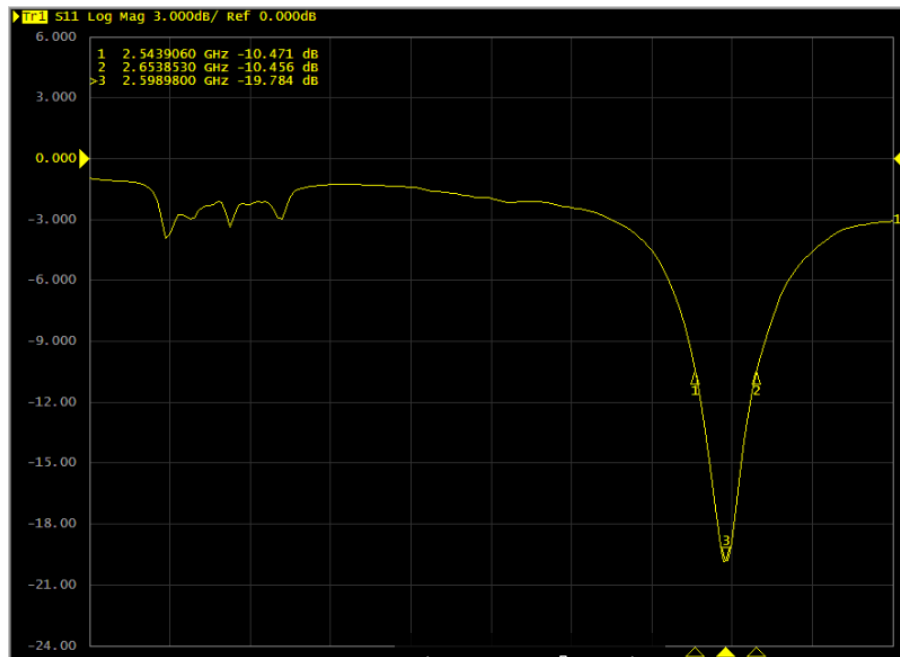


Figura 6.27 - Resultado obtido em laboratório para a Perda de Retorno da AMCM para $d_m = 10\text{mm}$.

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 6.27, percebemos que a antena perdeu a característica multibanda para $d_m = 10\text{mm}$, valor esse bem maior que a espessura do substrato. A frequência de ressonância obtida é $f_r = 2,59\text{GHz}$ (com $f_{ci} = 2,5439\text{ GHz}$ e $f_{cs} = 2,6539\text{ GHz}$) e $B=110\text{ MHz}$.

Resultados Experimentais:

Antena	d_m (mm)	f_r (GHz)	B (MHz)
AMSM	-	2,59	110
AMCM	2,5	1,65	13,5
		1,70	58,6
		2,44	127,4
	5,0	1,67	33,1
		2,38	24,5
	10,0	2,59	110,0

Tabela 6.6 - Resultados compilados dos testes realizados em laboratório.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 6.6 apresenta, de forma compilada, os resultados obtidos em laboratório para a antena de microfita com e sem a metasuperfície.

Capítulo 7

Conclusão

Este trabalho teve como objetivo apresentar a influência de uma metasuperfície no desempenho de uma antena de microfitas através de uma análise comparativa entre os desempenhos das antenas com e sem a utilização da metasuperfície, para isso as antenas foram projetadas e confeccionadas através do método de alimentação de linha de microfita e do método de análise da linha de transmissão. A simulação das antenas foram através do software comercial HFSS Ansoft e o teste em laboratório foi através do equipamento E5071C ENA Network Analyzer.

Iniciamos o trabalho apresentando as definições básicas de antenas através da caracterização de seus principais parâmetros, como: ganho, diretividade, impedância de entrada, diagrama de radiação e de potência. Em seguida, apresentamos as antenas de microfitas, os metamateriais e as metasuperfícies que são considerados como uma tecnologia inovadora e emergente no ramo das telecomunicações, óptica, biomedicina, processamento de sinais e entre outras áreas, devido a suas características de possuir seus índices de refração, permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativos. No entanto, não são encontrados na natureza, são materiais manipulados (artificiais) compostos por estruturas homogêneas e periódicas. Devido aos atrativos efeitos ocasionados por esses materiais quando utilizados em conjunto com as antenas de microfitas, despertam o interesse de muitos pesquisadores da área de telecomunicações, no tocante ao desempenho das antenas.

Essa conceituação inicial teve como objetivo ampliar o conhecimento sobre as antenas de microfitas e as metasuperfícies, de forma a melhorar a caracterização e a compreensão dos resultados desse projeto.

No Capítulo 6, nós projetamos inicialmente uma Antena de Microfita sem a Metasuperfície (AMSM) com patch retangular e escolhemos como substrato o FR4 de fibra de vidro. Através da antena projetada no HFSS, foi realizada uma análise paramétrica do efeito do substrato, onde destacamos que as dimensões do patch "L" e "W" (comprimento e largura, respectivamente) apresentaram uma relação inversa com

a permissividade elétrica do substrato, frequência de ressonância e com a largura de banda da antena.

Além disso, simulamos e testamos em laboratório a antena e obtivemos os seguintes resultados, em simulação: Ganho igual 2,4, frequência de ressonância de 2,49GHz e uma largura de banda de 95MHz, considerando a perda de retorno da antena em -10dB; e em laboratório: uma frequência de ressonância de 2,59GHz e uma largura de banda de 110MHz.

Em seguida, projetamos e confeccionamos uma metasuperfície composta por uma estrutura de SRR de anéis metálicos quadrados depositados periodicamente em um substrato, FR4 de fibra de vidro, com espessura muito menor do que a espessura do substrato da antena, em torno de 5 vezes menor. Colocamos a metasuperfície no topo da AMSM, tornando-a em uma Antena de Microfita com Metasuperfície (AMCM) e obtivemos uma característica multibanda tanto na simulação quanto nos testes realizados em laboratório. Essa característica foi decorrente do fato da metasuperfície possuir seus parâmetros constitutivos (permissividade elétrica e permeabilidade magnética) com valores negativos.

E por fim, realizamos uma análise no desempenho da AMCM com a metasuperfície sendo separada e distanciada do topo da antena. Através dos resultados apresentados, percebemos que a medida que aumentávamos a distância, a característica multibanda melhorava até determinada distância, gerando mais frequências de ressonância. Na simulação ficou limitada a quatro frequências de ressonâncias, como podemos observar para uma distância de 1,5mm, com frequências de ressonância de 1,48GHz , 1,57GHz , 1,65GHz e 2,4GHz. A medida que a distância ficou próxima da espessura do substrato, a antena começou a diminuir sua quantidade de frequência de ressonância e quando a distância se tornou bem maior que a espessura do substrato, como por exemplo para a distância igual a 10mm, a antena perdeu sua característica multibanda e apresentou uma característica igual a AMSM.

Assim, podemos perceber tanto através da simulação quanto do teste realizado em laboratório que a principal influência da utilização de uma metasuperfície em conjunto com uma antena de microfita é proporcionar uma característica multibanda no desempenho da antena, tornando-a bastante versátil para as diversas aplicações no mundo das comunicações, como por exemplo: nas comunicações aeroespaciais, da indústria eletrônica, informática, automação e entre outras. Vale ressaltar que o desempenho da característica multibanda da antena pode ser melhorado através da

manipulação da distância da metasuperfície com o topo da antena, essa distância no entanto tem um valor limite que em consonância com os resultados obtidos é da ordem da espessura do substrato utilizado.

Referências Bibliográficas

AQUINO, Manoel do Bonfim Lins de. **Antenas de microfita com substrato metamaterial**. 2008. 90 f.. Dissertação de mestrado (Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ANTONIO, J.; FRANKLIN, C.. **Antenas e Propagação**, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica, Agosto de 2003.

AYDIN, K.. **Negative refraction using true left-handed metamaterials**. Ankara: Dissertação (Mestrado em Ciências), 2004.

BAHL, I. J.; BHARTIA, P.. **Microstrip Antennas**. Artech House, 1980.

BALANIS, Constantine A.. **Teoria de Antenas**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2009.

BARRO, Vitor Fernandes. **Estudo do Efeito de Substrato Metamateriais em Parâmetros de Antenas de Microfita**. 2005. 80 f.. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

BILOTTI, F.; TOSCANO, A.; VEGNI L.. **Design of spiral and multiple split-ring resonators for the realization of miniaturized metamaterial samples**. IEEE transactions on antennas and propagation. Vol. 55, 8. 2007.

BURGOS, S. P.; WAELE, R.; POLMAN, A.; ATWATER, H. A.. **A single-layer wide-angle negative-index metamaterial at visible frequencies**. Nature Materials. Vol.: 9, pp. 407-412, 18 de abril de 2010.

HOLLOWAY, C. L.; KUESTER, E. F.; GORDON, J. A.; O'HARA, J.; BOOTH, J.; SMITH, D. R.. **An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials**. IEEE Antennas Propagat. Mag. 54, 10–35, 2012.

CAETANO, Leonardo Martins. **Aplicações de arranjos de antenas de microfita com patch supercondutor**. 2010. 52 f.. Dissertação de mestrado (Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

CALOZ, Christophe; ITOH, Tatsuo. **Eletrromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications**. United States of America: John Wiley & Sons. p. 365, 2006.

CAPOLINO, F.. **Theory and Phenomena of Metamaterials**. CRC press, 2009.

CHEN, X.; GRZEGORCZYK, T. M. ; WU, B. ; PACHECO, J; KONG, J. A.. **Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials**. Physical Review e 70, 2004.

CHUNG, K. L.; CHAIMOOL, Sarawuth.. **Diamagnetic Metasurfaces for Performance Enhancement of Microstrip Patch Antennas**. IEEE ICCSP, 2011, conference.

DING, X; ZAHNG, K.; FU, G. Y; MENG, F.; WU, Q.. **Planar Metamaterial Realization: from 3D metamaterial to 2D Metasurface**. 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation.

FERNANDES, H. C. C. **Método da Linha de Transmissão Transversa – LTT**. Relatório Técnico, out. 1986.

GIORDANO, M. Feitosa. **Análise de antenas de microfita com patches circulares sobre substratos anisotrópicos usando o método dos potenciais de Hertz**. 2005. 79 f..Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

HAND, T. H.. **Design and applications of frequency tunable and reconfigurable metamaterials**. Duke: Dissertação (Doutorado em Filosofia), 2009.

HONGNARA, T.; CHAIMOOL, S.; AKKARAEKTHALIN, P.. **Investigation of Metasurface using Fishnet and Closed Ring Structures on Microstrip - Fed Slot Antenna**. 2014, Asia Pacific Microwave conference, 711 -713.

ISLAM, M. T.; ULLAH, M. H.; SINGH, M. J.; FARUQUE, M. R. I.. **A New Metasurface Superstrate Structure for Antenna Performance Enhancement**. Materials, 2013.

WONG J.; SELVANAYAGAM M.; ELEFThERIADES, G. V.. **A Thin Printed Metasurface for Microwave Refraction**. IEEE ICCSP, 2015, Conference.

KITTEL, C.. **Introduction to Solid State Physics**. New York, NY : John Wiley and Sons, 1996.

KOCK, W. E.. **Metalic Delay Lenses**. **Bell System Technical Journal**. 1948, pp. 58-82.

KUESTER, E. F.; MOHAMED, M. A. ; MAY, M. P. ; HOLLOWAY, C. L. . **Averaged Transition Conditions for Electromagnetic Fields at a Metafilm**. IEEE Transactions on Antennas and propagation, VOL. 51, NO. 10, october 2003.

LIBERAL, I.; EDERRA, I.; GONZALO, R.. **High-Directive Aperture-Coupled Microstrip Patch Antenna based on Planar Meta-Sufarce**. Electronics Letters, 2007.

LO, Y. T.; et al. **Theory and Experiment on Microstrip Antennas**, **IEEE Transactions Antennas Propagation**. vol. AP-27, No. 2, p. 137–145, mar. 1979.

LUQUE, T.. **Analysis, design and implementation of a reconfigurable fractal volumetric left-handed metamaterial**. Albuquerque, New Mexico : Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), 2008.

OLIVEIRA, J.R.S.. **Antenas de Microfita sobre Substratos Dielétricos Anisotrópico e Ferrimagnéticos Magnetizados**. 1996. 213 f.. Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica) Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Abril 1996.

ROTMAN, W.. **Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-Plate Media**. 82, Janeiro de 1962, IRE Trans. Antennas Propag., Vol. AP.10, pp. 82-95.

SHADIKU, M. N. O. **Elements of Electromagnetics**. 3º ed., Bookman, 2004.

SHELBY, R. A.; SMITH, D. R.; SCHULTZ S.. **Experimental verification of a negative index of refraction**. Science, vol. 292, no. 5514, pp. 77-79, 6 April 2001.

SILVA, I. B. T.; ANDRADE, H. D.; SILVA, J. L.; FERNANDES, H. C. C.; PEREIRA, J. P. P.. **Design of microstrip patch antenna with complementary split ring resonator device for wideband systems application**. Microwave and Optical Technology Letters (Print), v. 57, p. 1326-1330, 2015.

SILVA, I. B. T.; ANDRADE, H. D.; SILVA, J. L.; FERNANDES, H. C. C.; PEREIRA, J. P. P.. **Design of microstrip patch antenna with complementary split ring resonator device for wideband systems application**. Microwave and Optical Technology Letters (Print), v. 57, p. 1326-1330, 2015.

SILVA, José Lucas da.. **Estudo do comportamento de antena de microfita com substrato metamaterial**. 2010. 80 f.. Dissertação de Mestrado (Sistemas de Comunicação), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2010.

SIVAKUMAR; E.; RAMACHANDRAN, B.. **Metasurface Antenna With Switchable Polarization**. IEEE ICCSP, 2015, Conference.

SMITH, D. R.; PADILHA W. J.; VIER D. C.; NEMAT-NASSER S. C.; SCHULTZ S.. **Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity**. Phys. Rev. Lett., vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, 1 May 2000.

SMITH, D. R.; VIER, D. C.; KOSCHNY, Th.; SOUKOULIS, C. M. . **Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials**. Physical Review E 71, 2005.

SMITH, D. R.; VIER, D.C.; KOSCHNY, TH.; SOUKOULIS, C. M.. **Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials**. The American Physical Society. 2005.

SOUSA NETO, Marinaldo Pinheiro de. **Um estudo de metamaterial em antenas de microfita**. 2014. 101 f.. Tese de doutorado (Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SOUZA, Pedro Victor Brondino Duarte de. **Modelagem e simulação de meios metamateriais com permissividade elétrica e permeabilidade magnética próximas de zero**. 2011. 37 f.. Monografia (Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia São Carlos - Universidade de São Paulo, 2011.

SUDHAKARAN, S.. **Negative refraction from electromagnetic periodic structures and its applications**. Tese de Doutorado, University of London, 2006, p. 226.

TRETYAKOV, Sergei; BAROIS, Philippe; SCHARF, Toralf; KRUGLYAK, Volodymyr; BERGMAIR, Iris; BAAS, Anne F. de. **Nanostructured Metamaterials**. European Comission, 2010.

UZUNOGLU, N. K. et al. **Radiation Properties of Microstrip Dipoles**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. vol 27, n. 6, p. 853-858. nov. 1979.

VASCONCELOS, Cristhianne de Fátima Linhares de. **Desenvolvimento de antenas de microfita com Patch em anel utilizando materiais ferrimagnéticos e metamateriais**. 2010. 137 f. Tese (Doutorado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

VESELAGO, V.G.. **The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ** . Sovietic Physics Uspekhi, vol.10, N°4, pp. 509-514, 1968.

ZHU, H. L; LIU, S.W.; CHEUNG; YUK, T.I.. **Frequency - Reconfigurable Antenna Using Metasurface**. IEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 62, No. 1, January 2014.