



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

AMANDA GOMES BARBOZA

**ESTUDO DE ANTENAS DE MICROFITAS UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE
MATERIAIS COMO SUBSTRATO**

CARAÚBAS – RN
2015

AMANDA GOMES BARBOZA

**ESTUDO DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE
MATERIAIS COMO SUBSTRATO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Universidade Federal Rural
do Semi-Árido (UFERSA), como exigência
final para obtenção do título de Bacharel
em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. MsC. Valdemir Praxedes da Silva Neto – UFERSA

CARAÚBAS – RN

2015

© Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Campus Caraúbas (BCC)

Setor de Informação e Referência

B238e Barboza, Amanda Gomes.

Estudo de antenas de microfita utilizando diferentes tipos de materiais como substrato/ Amanda Gomes Barboza -- Caraúbas, 2015.

50f.: il.

Orientador: Prof. Me. Valdemir Praxedes da Silva Neto

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

1. Linhas de transmissão. 2. Metamateriais. 3. Microfita -
antena. I. Título.

RN/UFERSA/BCC

CDD: 621.319

Bibliotecário: Eugênio Pacelli Ferreira da Costa

CRB-15/658

AMANDA GOMES BARBOZA

**ESTUDO DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS
DE MATERIAIS COMO SUBSTRATO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

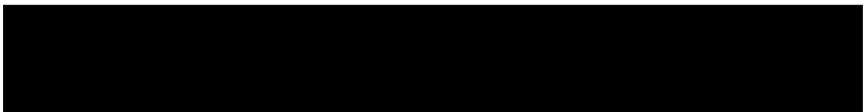
APROVADO EM 03/02/15

BANCA EXAMINADORA


Prof M. Sc. Valdemir Praxedes da Silva Neto
Orientador


Prof. M. Sc. Francisco Carlos G. da Silva Segundo
1º Membro


Profª. M. Sc. Sâmia Lorena de Medeiros Confessor
2º Membro


Profª. M. Sc. Antônio Alisson Alencar Freitas
3º Membro

“O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, mas a ilusão do conhecimento”.

(Stephen Hawking)

A Deus que me ilumina e me permite
atingir meus objetivos e aos meus pais,
Almi e Aurinete, que são a razão dessa
conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela minha família, amigos, pela saúde e sabedoria, pelos momentos de alegrias e tristezas, que mesmo sem merecer e muitas vezes indo contra a sua vontade, me perdoou e concedeu tantas coisas boas na minha vida.

Aos meus pais, Almi e Aurinete, pelo amor e afeto. Obrigado por sempre terem me ensinado os caminhos certos a seguir e por me proporcionarem a capacidade de tomar minhas próprias escolhas, vocês são as pessoas mais importantes da minha vida.

Ao meu alicerce, minha mãe, que me incentiva e não me permite desistir. Obrigado pelo apoio na elaboração desse trabalho, por sempre me acalmar e me dar coragem para atingir meus objetivos, te amo muito.

Ao meu orientador, Valdemir Praxedes, que me orientou da melhor forma possível, sempre me incentivando, me ensinando e servindo de inspiração para minha vida acadêmica. Obrigado pela confiança depositada em mim, por sua paciência, amizade, disponibilidade e colaboração para realização deste trabalho;

Aos meus irmãos, em especial Aline e Arnaldo, pela amizade e companheirismo, vocês são fundamentais.

Aos meus amigos, Marília, Ray e Alex, que estiveram comigo em todos os momentos e escutaram minhas alegrias, angústias e reclamações. Obrigado pela amizade sincera, amo muito vocês.

Aos meus irmãos de coração, Alef e Saulo, que além de colegas de graduação se tornaram essenciais na minha vida. Obrigado Alef, pelos incentivos nos estudos, e acima de tudo pelo respeito e carinho que sempre teve comigo.

A Ricardo e Patrícia, amigos que quando era preciso me ajudavam e muitas vezes se fizeram de meus monitores e tiraram minhas dúvidas, obrigado pela paciência.

Aos meus colegas de graduação, Mychael, Jorgen e Giovanni, por proporcionarem um ambiente agradável de estudo, vocês são os melhores.

Aos meus vizinhos, em especial Carlos Junior e Larissa, que são minhas companhias e sempre posso contar uns com os outros.

Aos demais mestres, colegas e amigos, que estiveram comigo durante a graduação.

RESUMO

A influência do tipo de material utilizado como substrato de antenas de microfita é investigada nesse trabalho. São analisados os parâmetros de frequência de ressonância, largura de banda e perda de retorno de antenas em *patch* retangular e em fractal de Koch em diferentes meio materiais. As características de propagação de dielétricos isotrópicos, anisotrópicos e metamateriais são estudadas. Para o caso de metamateriais, são estudas duas situações típicas: caso do material homogêneo e o metamaterial não-homogêneo, com inserção de Split Ring Resonator (SRR) como elementos alteração na resposta eletromagnética do substrato. Os resultados apresentados foram obtidos por simulações utilizando o Ansoft HFSSTM e comprovam a capacidade de miniaturização das antenas com o uso de materiais que apresentam características anisotrópicas e bianistrópicas.

Palavras-Chave: Antena de Microfita. Anistropia. Metamateriais.

ABSTRACT

The influence of the type of material used as microstrip antenna substrate is investigated in this work. Parameters are analyzed such as resonance frequency, bandwidth and return loss of the antenna rectangular patch and Koch fractal in different materials medium. The propagation characteristics of isotropic dielectric, anisotropic dielectric and metamaterials are studied. In the case of metamaterials, two typical situations are studied: the case of homogeneous material and the non-homogeneous metamaterial with Split Ring Resonator insertion (SRR) such elements that change the electromagnetic response of the substrate. The results were obtained by simulations using the Ansoft HFSSTM and demonstrate the miniaturization capability of the antennas with the use of materials that exhibit anisotropic and bianisotropic features.

Keywords: Microstrip Antenna. Anisotropic. Metamaterials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Antena de microfita.....	18
Figura 2.2	Formas geométricas do <i>patch</i>	19
Figura 2.3	Alimentação por linha de microfita.....	21
Figura 2.4	Alimentação por prova coaxial.....	22
Figura 2.5	Alimentação por acoplamento.....	23
Figura 2.6	Diagrama de radiação para uma antena diretiva.....	24
Figura 2.7	Diagramas de radiação.....	25
Figura 2.8	Largura de banda.....	26
Figura 3.1	Diagrama de permissividade e permeabilidade para os quatro meios.....	30
Figura 3.2	Arranjo de fios condutores.....	31
Figura 3.3	SRR (Ressonador em anel dividido).....	31
Figura 3.4	Arranjo de fios condutores e SRR.....	32
Figura 4.1	Antena de microfita.....	34
Figura 4.2	Perda de retorno para antena impressa em substratos dielétricos iso/anisotrópicos.....	36
Figura 4.3	Perda de retorno para antena impressa em substratos metamateriais.....	37
Figura 4.4	Diagrama de radiação para antena impressa no substrato metamaterial Caso 2.....	38
Figura 4.5	Antena Fractal de koch.....	38
Figura 4.6	Células que compoe a SRR.....	39
Figura 4.7	Caracterização da SRR Quadrada.....	41
Figura 4.8	Caracterização da SRR Circular.....	41
Figura 4.9	Estrutura em Metamaterial.....	42
Figura 4.10	Estrutura com substrato metamaterial: arranjo de SRR quadrada.....	43
Figura 4.11	Estrutura com substrato metamaterial: arranjo de SRR quadrada.....	43
Figura 4.12	Perda de retorno da antena fractal de koch em meio metamaterial.....	44
Figura 4.13	Fotografia da antena proposta.....	45
Figura 4.14	Perda de retorno para antena simulada em comparação com o resultado obtido na medição.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Perda de retorno, largura de banda, frequência de ressonância e fator de compressão para antena com <i>patch</i> retangular em meios anisotrópicos.....	36
Tabela 4.2 – Perda de retorno, largura de banda, frequência de ressonância e fator de compressão para antena com <i>patch</i> retangular em meios materiais.....	39
Tabela 4.3 – Parametros da Antena.....	42
Tabela 4.4 – Perda de retorno para antena com <i>patch</i> fractal de koch em meio metamaterial.....	45
Tabela 4.5 – Resultados para antena em meio metamaterial não homogêneo.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS

SRR – *Split Ring Resonator*

BW – *Bandwidth* (Largura de Banda)

LISTA DE SÍMBOLOS

ε – Permissividade elétrica;

μ – Permeabilidade magnética;

μ_r – Permissividade elétrica relativa;

ε_r – Permeabilidade magnética relativa;

ε_o – Permissividade elétrica no vácuo;

μ_o – Permeabilidade magnética no vácuo.

SUMÁRIO

Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xii
1. Introdução	16
2. Antenas de microfita	18
2.1. <i>Patch</i>	19
2.2. Plano de terra	20
2.3. Métodos de alimentação	20
2.3.1. Alimentação por linha de microfita	20
2.3.2. Alimentação por prova coaxial	21
2.3.3. Alimentação por acoplamento por linha de microfita	22
2.4. Critérios de desempenho	23
2.4.1. Diretividade	23
2.4.2. Diagrama de radiação	24
2.4.3. Largura de banda	25
3. Materiais utilizados como substrato de antenas planares	27
3.1. Dielétricos isotrópicos	27
3.2. Anisotrópicos	27
3.3. Ferrimagnéticos	28
3.4. Metamateriais	28
3.4.1. Características e particularidades da nova classe de materiais	29
3.4.2. Estruturas não homogênea de substratos metamateriais: srr	30
3.4.3. Estruturas homogêneas de substratos metamateriais	32
4. Resultados numéricos	34
4.1. Antena com patch retangular em diferentes meios materiais	34
4.1.1. Caracterização do substrato	35
4.2. Antena com <i>patch</i> fractal de koch em substrato metamaterial não homogêneo	39
4.2.1. Caracterização do substrato metamaterial	40
5. Conclusões	47
6. Referências	48

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos observados na sociedade são aliados ao crescimento, constante, na área de telecomunicações. Devido à velocidade com que essas mudanças ocorrem, necessita-se do desenvolvimento de equipamentos e dispositivos cada vez mais modernos e que sejam capazes de atender as exigências do mercado e de aprimorar o funcionamento das tecnologias já existentes.

O aumento no número de celulares, tablets, computadores, usuários de internet, bem como o crescimento da TV Digital, tem impulsionado a demanda por tecnologias cada vez mais eficientes para os sistemas de comunicação sem fio, possibilitando o acesso de qualidade, para garantir o melhor desempenho e a integridade da informação que esta sendo transmitida.

Consequentemente, as antenas são dispositivos essenciais para o sistema de comunicação sem fio, sendo responsáveis por receber e transmitir ondas eletromagnéticas (BALANIS, 1938) e assim como os demais dispositivos, devem acompanhar tal crescimento tecnológico, tornando-se mais eficientes e compactas.

Nesse contexto, a utilização das antenas de microfita se destaca dentre as demais antenas devido a sua facilidade de fabricação, baixo custo e perfil, compatibilidade com circuitos planares de rádio frequência e capacidade de radiação unidirecional, além de atender ao requisito de miniaturização atendendo a demanda por dispositivos cada vez mais compactos. No entanto, apesar de atraentes, as antenas de microfita apresentam características limitantes para algumas aplicações, como o ganho reduzido e largura de banda estreita (SUSAN et al, 2013).

A fim de superar essas limitações, uma das alternativas é a utilização de substratos com características diferenciadas capazes de melhorar o desempenho da resposta em frequência apresentada por essa antena. Em geral, os materiais utilizados são dielétricos isotrópicos, dielétricos anisotrópicos e ferrimagnéticos (SILVA NETO et al., 2013).

Vários trabalhos também estão sendo desenvolvidos utilizando materiais com características bianisotrópicas, contendo parâmetros de permissividade elétrica e permeabilidade magnética tensoriais. (VASCONCELOS, 2013). Também chamados de metamateriais, são considerados bastante atraentes por possuírem características diferenciadas dos materiais tradicionais, na qual a partir dos seus parâmetros negativos de permissividade e permeabilidade produzem um índice de refração negativo que

resulta na inversão de alguns fenômenos eletromagnéticos, como no efeito Doppler (MARTINS, 2007).

A escolha de materiais anisotrópicos, ferritas e metamateriais como objetos de estudos, vêm das suas atraentes características e pelo bom desempenho apresentado quando aplicado a estruturas planares como as de microfita, sendo possível através deles a fabricação de substratos capazes de proporcionar a miniaturização e melhor ganho desses dispositivos.

O principal objetivo desse trabalho é estudar a influência do material, usado no substrato, na resposta em frequência das antenas de microfita e observar quais desses materiais seriam capazes de melhorar o desempenho e ainda atender aos requisitos de portabilidade e compatibilidade necessários para eliminar e ou reduzir as características limitantes desses dispositivos planares empregados em sistemas modernos de comunicação sem fio.

É de grande interesse científico o estudo do desenvolvimento e análise de métodos e técnicas capazes de modelar eficientemente os fenômenos eletromagnéticos desses materiais, como também o modelamento de componentes de micro-ondas utilizando os mesmos.

Através de simulações numéricas, são observados o efeito produzido pela variação do tipo de substrato, considerando as diferentes configurações e materiais, sobre as características de propagação da antena de microfita com *patch* retangular e de geometria fractal. Para validar a teoria proposta, um protótipo foi construído.

O Capítulo 2 apresenta revisão bibliográfica a respeito da teoria de antenas planares, no caso as antenas de microfita, e sua evolução ao longo do tempo, expondo suas principais características e aplicações.

O Capítulo 3 apresenta um estudo sobre os substratos constituídos por materiais dielétricos isotrópicos, dielétricos anisotrópicos, ferrimagnéticos e metamateriais, de tal forma a compreender e analisar as propriedades desses componentes do sistema de comunicação sem fio.

O Capítulo 4 apresenta os resultados para a perda de retorno, largura de banda, frequência de ressonância e diagrama de radiação da antena gerado por cada substrato, analisando-os e comparando-os entre si e com a literatura especializada.

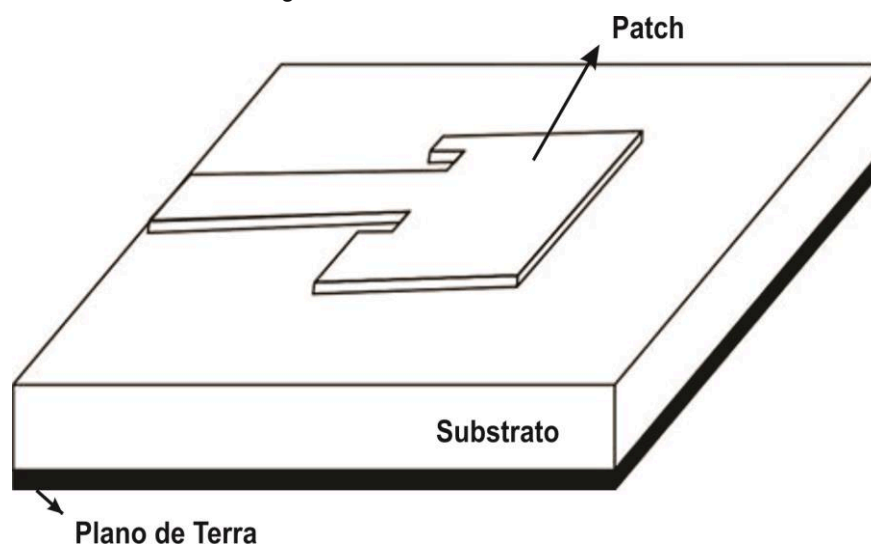
O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas no decorrer deste trabalho, frisando os principais resultados obtidos, além de fornecer sugestões para realização de futuros trabalhos seguindo a mesma linha de pesquisa.

2. ANTENAS DE MICROFITA

O desenvolvimento dos sistemas de comunicação sem fio tem proporcionado a crescente utilização de estruturas planares, em especial as antenas de microfita, que se destacam em diversas aplicações no sistema de telecomunicações por apresentarem dimensões e custos reduzidos, além de oferecer um excelente desempenho e uma vasta aplicabilidade.

Na sua forma mais comum, a antena de microfita é constituída por um elemento radiador, o *patch*, impresso sobre um substrato de material dielétrico, ferrimagnético e metamaterial, apoiado em um plano de terra, como apresenta a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Antena de microfita



Fonte: Própria autoria

Dentre as características que diferenciam as antenas de microfita das demais antenas, pode-se citar: baixo custo, leveza, tamanho reduzido, adaptabilidade a superfícies curvas, largura de banda estreita, ganho reduzido, compatibilidade com circuitos integrados, além de serem de fácil fabricação e possuírem capacidade de radiação unidirecional (VASCONCELOS, 2010).

É importante ressaltar que as características e particularidades dessas estruturas não devem ser definidas como vantagens ou desvantagens, esses termos só devem ser atribuídos de acordo com a aplicação desejada.

Como mencionado anteriormente, diversas são as aplicações das antenas de microfita, dentre elas podem ser citadas aplicações de radares, filtros, telefonia celular, GPS, equipamentos de redes sem fio, computadores, entre outros (VASCONCELOS,

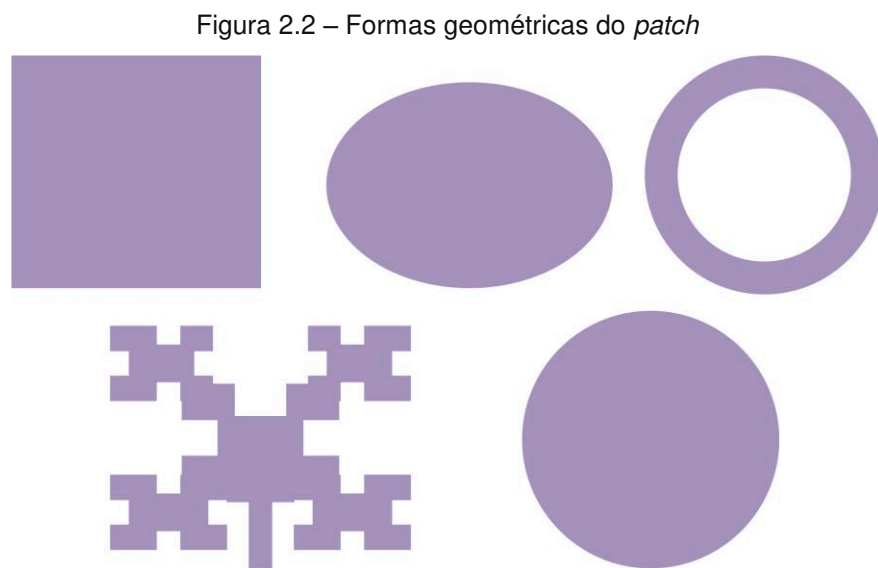
2013).

A versatilidade dessas estruturas possibilita a obtenção de resultados eficientes em diversas aplicações, minimizando e/ou eliminando as possíveis limitações através da utilização de técnicas de fabricação e adequação no modelo dos projetos.

2.1. **PATCH**

O *patch* ou também denominado elemento radiador é formado por uma lâmina metálica geralmente condutora, sendo possível ainda atuar como supercondutora. Ele possui uma espessura muito pequena quando comparada ao comprimento de onda no espaço livre e geralmente o material usado na sua composição é o cobre (MEDEIROS, 2013).

Quanto a sua forma, o *patch* pode ser classificado em regular, com geometria retangular, quadrada, triangular, elíptica, circular ou anel circular, e irregular, como no caso dos fractais. Na Figura 2.2 podemos observar as formas geométricas mais utilizadas.



Fonte: Própria autoria

No entanto, essas geometrias ainda podem ser combinadas gerando novas formas, denominadas arranjos de microfita, resultando na formação de novas características, como na diretividade e o aumento na largura de banda e, conseqüentemente aumentando ainda mais a aplicabilidade dessas estruturas.

Sendo que, de acordo com a sua geometria, o *patch* influencia na distribuição de corrente e, conseqüentemente, no perfil do campo da superfície da antena.

2.2. PLANO DE TERRA

É constituído por uma fita metálica situada abaixo do substrato, conforme visto na Figura 2.1. Ele influencia na impedância e principalmente no ângulo de irradiação da antena. Além de servir de mecanismo de aterramento, como sugere o nome, o plano de terra tem uma função refletora, evitando a formação de um lóbulo traseiro mais forte (MEDEIROS, 2013).

Através de modificações na estrutura e no posicionamento do plano de terra é possível modificar algumas características da antena de microfitas gerando resultados satisfatórios, como o aumento na largura de banda (MEDEIROS, 2013). No entanto, para utilizar essa técnica deve-se ficar atento para não produzir um aumento de descontinuidades na microfita.

2.3. MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO

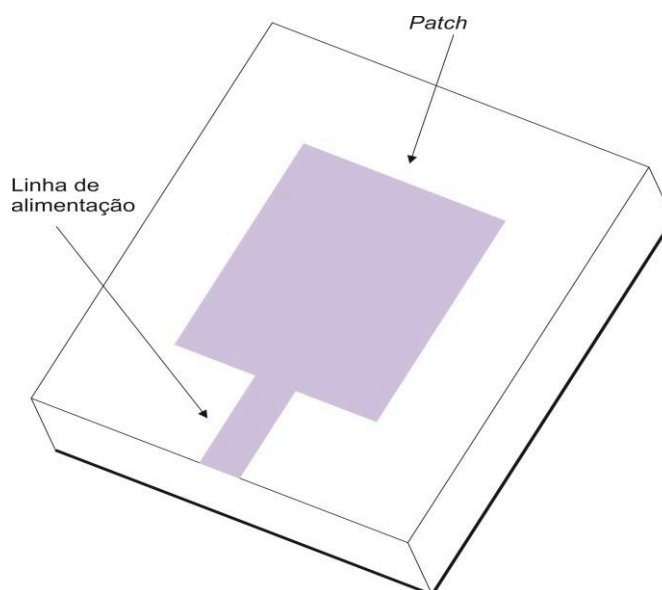
Existem diferentes técnicas para alimentação de uma antena de microfita, em seguida serão apresentadas as principais técnicas utilizadas de acordo com a literatura estudada (BALANIS, 1997).

2.3.1. ALIMENTAÇÃO POR LINHA DE MICROFITAS

A alimentação por linha de microfita foi o primeiro método utilizado para a excitação prática de uma antena. Consiste na conexão de uma fita condutora na extremidade do elemento radiador, ambos impressos no substrato, permitindo que a estrutura permaneça totalmente planar, como na Figura 2.3.

Uma das principais características fornecidas pela utilização desse tipo de alimentação é a possibilidade de casar a impedância ajustando o alimentador, obtendo-se um melhor casamento de impedância. Quando esta técnica é utilizada em substratos com espessuras maiores, ocorre um aumento na largura de banda da antena, no entanto, aumentam-se as radiações indesejadas na alimentação.

Figura 2.3- Alimentação por linha de microfita



Fonte: Própria autoria

2.3.2. ALIMENTAÇÃO POR PROVA COAXIAL

A utilização de uma prova coaxial é um dos mecanismos básicos para alimentação de antenas de microfita. Uma prova geralmente é um condutor interno de um conector coaxial, como na Figura 2.4, que é ligado ao plano de terra de uma placa de circuito impresso, enquanto que o vivo da ponta de prova atravessa o substrato e é conectado ao elemento radiador.

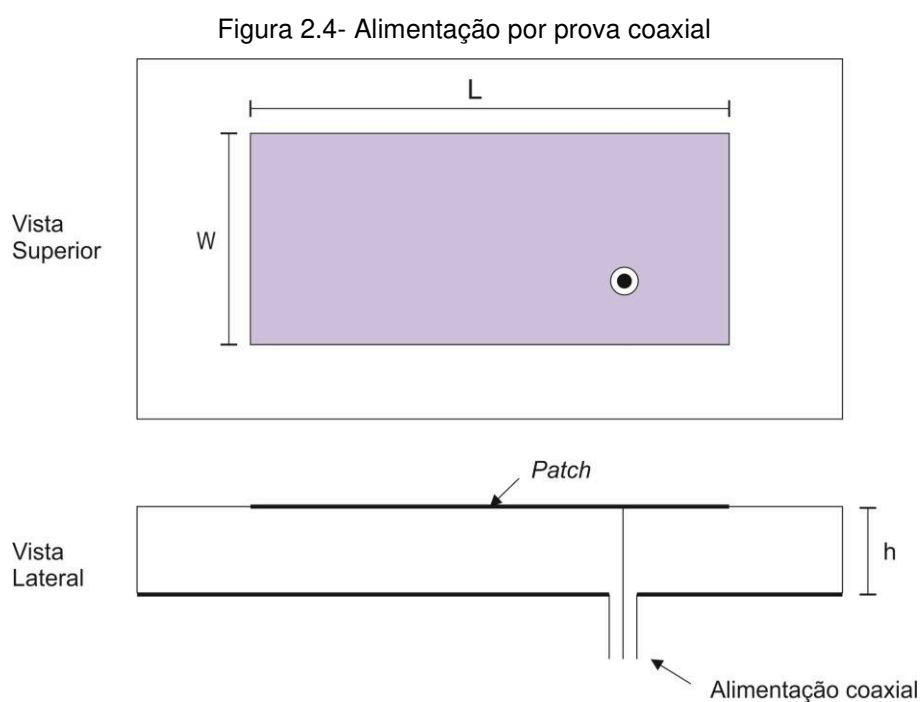


Figura 2.4- Alimentação por prova coaxial

A possibilidade de controle no casamento de impedância através do posicionamento do ponto de alimentação é uma das principais vantagens de se utilizar a prova coaxial. Além disso, podemos observar outras vantagens como a redução na área da antena, já que a alimentação fica oculta e a sua facilidade de construção.

Como desvantagem tem-se a largura de banda estreita e o surgimento de indutâncias, o que dificulta o casamento de impedância da antena, além de apresentar dificuldades para fabricação de arranjos, devido ao grande número de junções de solda. Em substratos mais grossos a prova coaxial precisa ter um comprimento maior para atravessar o substrato, resultando no aumento da produção de radiação espúria e na potência das ondas de superfície.

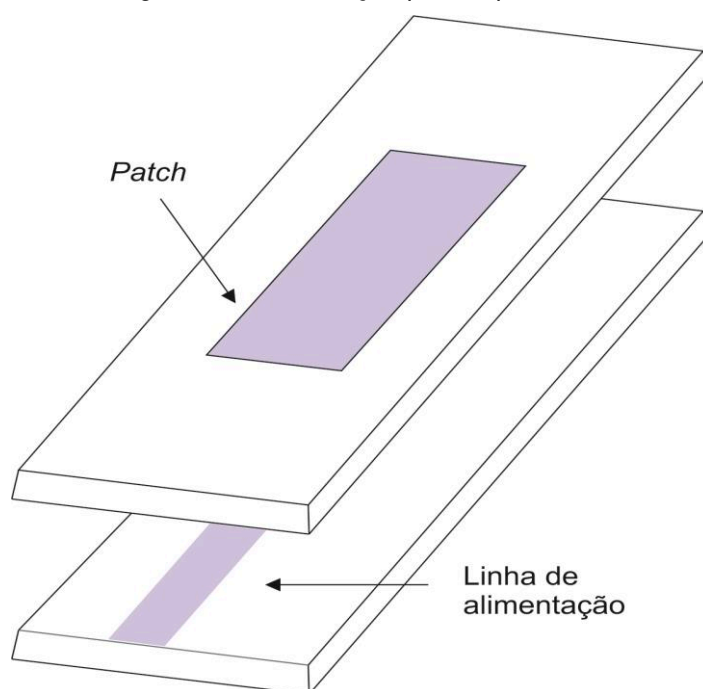
2.3.3. ALIMENTAÇÃO POR ACOPLAMENTO POR LINHA DE MICROFITA

Diferentemente das técnicas anteriores que necessitam de conexão direta entre as estruturas, os modelos de acoplamento são composto por conexões indiretas. Costuma ser utilizado quando se quer evitar a geração de modos de ordens superiores e, conseqüentemente a produção de radiação de polarização cruzada. Na Figura 2.5 pode-se observar um modelo comum de acoplamento.

Esse método é composto por um radiador e linha de transmissão localizada em camadas separadas, o que proporciona um diagrama de radiação menos perturbado e uma largura de faixa maior, além de uma integração mais fácil a dispositivos ativos (COSTA, CIVIDANES, 2013).

O isolamento entre a fonte e o radiador minimiza a radiação espúria e garante pureza de polarização. A principal desvantagem desse método está na dificuldade de fabricação.

Figura 2.5- Alimentação por acoplamento



Fonte: Própria autoria

2.4. CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

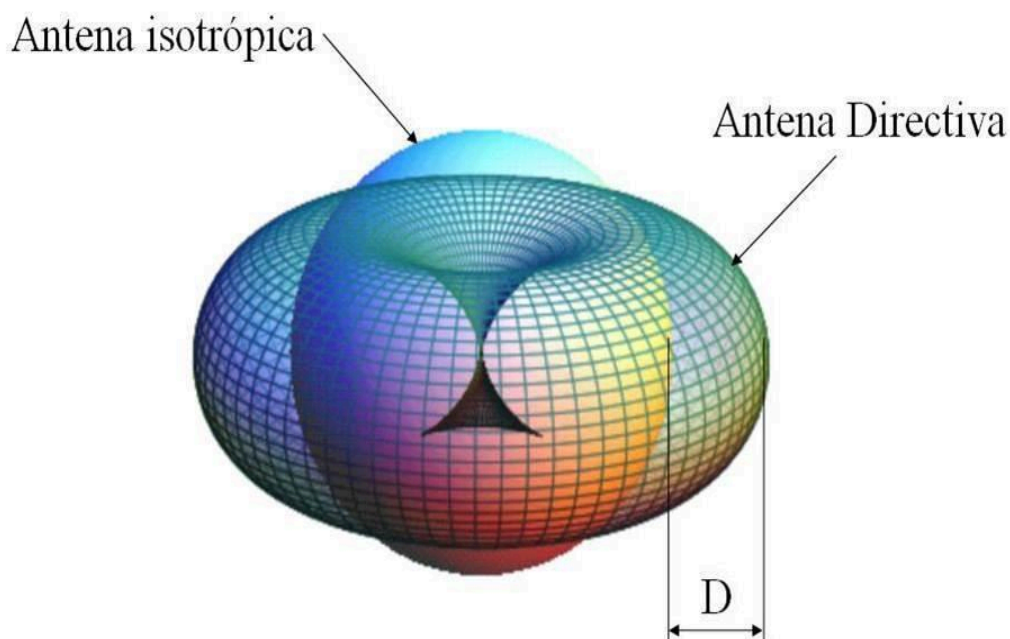
Para compreender o funcionamento e a análise de uma antena de microfita é necessário conhecer alguns critérios de desempenho que serão apresentados a seguir.

2.4.1. DIRETIVIDADE

É a medida das propriedades direcionais de uma antena, sendo geralmente determinada em comparação com uma antena Isotrópica, que possui distribuição de energia no espaço o mais uniforme possível. Porém, esse conceito é utilizado apenas para propósitos teóricos, uma vez que é um caso ideal e não realizável fisicamente.

Define-se diretividade como sendo a razão entre a densidade de potência radiada, em uma dada direção da antena, e densidade média de potência radiada. No entanto, a diretividade também pode ser baseada na forma da distribuição de potência da fonte da antena. Na Figura 2.6 pode-se observar a diferença entre o diagrama de radiação para uma antena isotrópica e uma diretiva.

Figura 2.6- Diagrama de radiação para uma antena isotrópica e diretiva



Fonte: <https://todoantenasek.wordpress.com/category//teoria-de-antenas>.

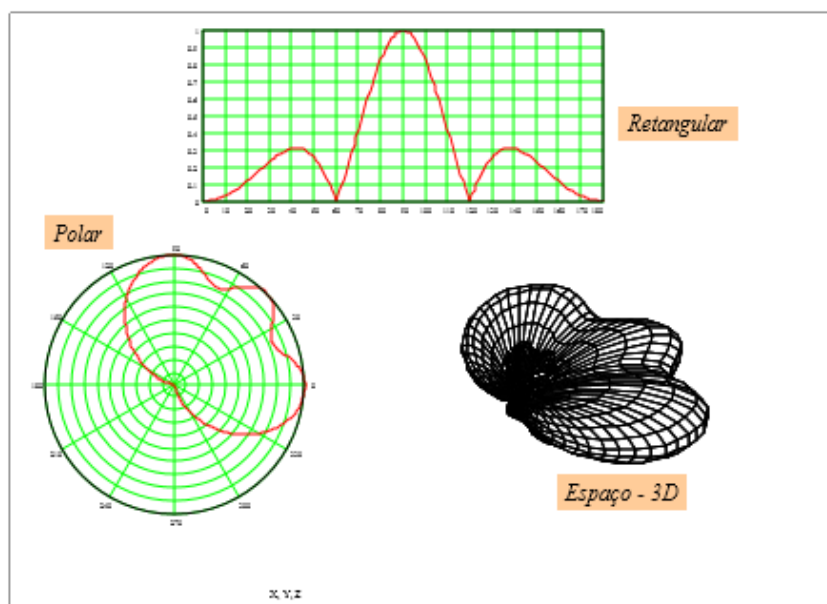
2.4.2. DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

O diagrama de radiação é um dos principais mecanismos utilizados para analisar o desempenho de uma antena. Ele é importante para determinar a maioria das características de irradiação da antena, tais como: tamanho e formato do feixe principal, nível de lóbulos secundários, diretividade, polarização, razão frente-costa e potência de irradiação (BARRA, 2007).

Apesar de geralmente serem apresentados em formato bidimensional, os padrões de radiação tem formato tridimensional. Sendo que, a utilização do sistema de coordenadas esféricas (r , θ , ϕ) é a melhor maneira de representá-lo, permitindo que o diagrama de irradiação seja expresso em termos da intensidade do campo elétrico. A Figura 2.7 expoe as diferentes formas de representar o diagrama de radiação.

Sabendo que a distribuição de potência radiada não ocorre de forma uniforme e existem pontos máximos e mínimos de radiação, é importante analisar o posicionamento em que a antena será fixada de maneira que promova a melhor transmissão e recepção possível.

Figura 2.7- Diagramas de radiação



Fonte: <http://www.sabereletronica.com.br/artigos/2796-antenas-diagramas-de-radiao>.

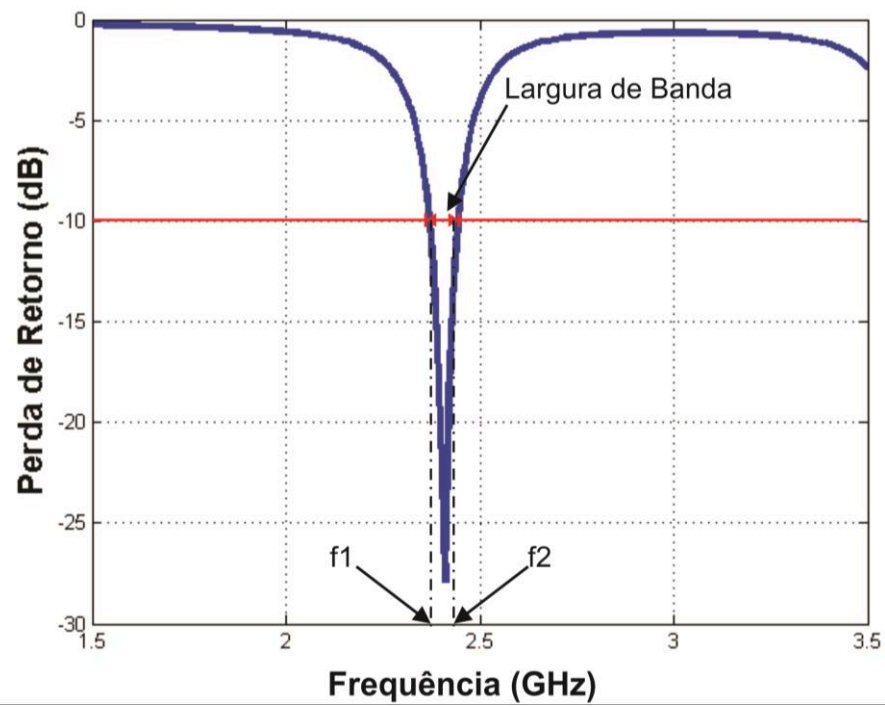
2.4.3. LARGURA DE BANDA

A largura de banda é determinada por uma faixa de frequências na qual se analisa o desempenho apresentado por uma antena em relação a alguma característica ou padrão específico. No caso das antenas de microfita, seguem-se os critérios de desempenho como impedância de entrada, padrão de irradiação, polarização, dentre outros.

Em geral, para definir a largura de banda leva-se em consideração o critério de $VSWR \leq 2$, ou seja, o módulo do coeficiente de reflexão $|\Gamma| \leq -10$ dB (BARRA, 2007), como mostra a Figura 2.8, na qual o valor absoluto da largura de banda é tido como a diferença entre a frequência máxima e mínima de acordo com os critérios estabelecidos, como mostra a Equação (01).

$$BW = f_2 - f_1 \quad (2.1)$$

Figura 2.8- Largura de Banda



Fonte: Própria autoria

3. MATERIAIS UTILIZADOS COMO SUBSTRATO DE ANTENAS PLANARES

Durante a formação do projeto de uma antena um parâmetro importante a ser considerado é a escolha do material que será utilizado em seu substrato. Para analisar as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais são utilizados parâmetros constitutivos denominados permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ), que em conjunto determinam a resposta do material quando uma onda eletromagnética se propaga através do mesmo.

No geral, são utilizados materiais dielétricos isotrópicos, dielétricos anisotrópicos, ferrimagnéticos e metamateriais.

3.1. DIELÉTRICOS ISOTRÓPICOS

Os materiais dielétricos isotrópicos são considerados os materiais mais simples e conhecidos por serem encontrados em maior abundância na natureza. São caracterizados por possuir permissividade elétrica relativa e permeabilidade magnética relativa, ambos simultaneamente na forma escalar e positivos.

Apesar do surgimento de novos materiais com características diferenciadas, ainda existe o interesse na utilização de materiais isotrópicos em projetos de antenas de microfita, principalmente quando esses materiais assumem altos valores de permissividade e assim produz a redução nas dimensões das antenas, e conseqüentemente, sua miniaturização.

3.2. ANISOTRÓPICOS

Alguns materiais dielétricos têm comportamentos anisotrópicos quando operam em altas frequências. Este tipo de material é caracterizado por possuir permissividade relativa tensorial, em que o efeito do campo elétrico é determinado de acordo com a direção considerada (SILVA NETO et al., 2013).

Substratos anisotrópicos apresentam a permeabilidade magnética igual a μ_0 e a permissividade elétrica na forma tensorial dada por:

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{\rho\rho} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\phi\phi} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Materiais com comportamento anisotrópico podem ser resultado de sua natureza cristalina ou de acordo com sua forma de produção, se ele tiver sido fabricado artificialmente.

3.3. FERRIMAGNÉTICOS

Diferente dos materiais dielétricos, os materiais ferrimagnéticos apresentam uma anisotropia relacionada a permeabilidade magnética. Além disso, devido à presença de um alto valor de permissividade elétrica é possível obter a redução nas dimensões do *patch* da antena.

A utilização de materiais ferromagnéticos, em especial as ferritas, nos substratos de antenas de microfitas, tem uma ampla aplicabilidade em dispositivos que necessitam de sintonia externa, devido a sua frequência de ressonância que pode ser sincronizada a partir da variação do campo magnético de polarização aplicado ao substrato (VASCONCELOS, 2010).

Com a permissividade elétrica escalar entre 10 e 15, as ferritas, possuem a permeabilidade magnética definida de acordo com um campo magnético aplicado nas direções x, y e z, como mostrado respectivamente abaixo em (3.2), (3.3) e (3.4).

$$\bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_r & -jk_r \\ 0 & jk_r & \mu_r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & 0 & -jk_r \\ 0 & 1 & 0 \\ jk_r & 0 & \mu_r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & -jk_r & 0 \\ jk_r & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.4. METAMATERIAIS

A partir dos estudos teóricos de Veselago (VESELAGO, 1967), que resultaram na obtenção de materiais com parâmetros de permissividade e permeabilidade efetivas, simultaneamente negativas, teve-se início a uma maior investigação sobre

esses materiais com características bianisotrópicas, também denominados metamateriais.

3.4.1. CARACTERÍSTICAS E PARTICULARIDADES DA NOVA CLASSE DE MATERIAIS

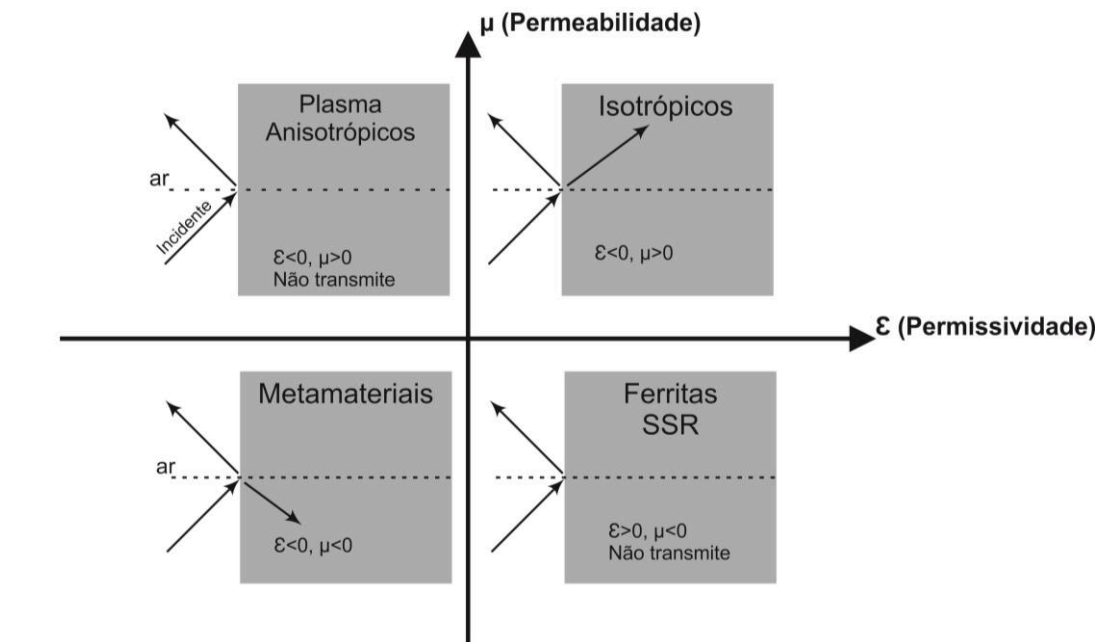
Metamateriais são elementos criados artificialmente, possuindo um conjunto de propriedades que não poderiam ser encontradas nos elementos naturais. Essa nova classe de matérias tem seduzido pesquisadores pela possível capacidade de produzir a invisibilidade (LUCENA, 2010), característica não apresentada em nenhum outro material conhecido pelo homem. O índice de refração negativo, a inversão de fase e do efeito Doppler, são os principais exemplos das particularidades desses metamateriais, sendo totalmente diferentes das características dos materiais utilizados convencionalmente.

Vários autores também apontam que materiais com comportamento bianisotrópico promovem maior miniaturização de circuitos planares, além de oferecer uma maior largura de banda se comparado aos materiais que são utilizados tradicionalmente (SUSAN et al, 2013; VASCONCELOS, 2010).

A Figura 3.1 exibe um diagrama da permissividade e permeabilidade para os quatro diferentes meios possíveis. Apresenta-se de forma complementar os índices de reflexão e de refração considerando a interface entre cada meio e o ar.

Apesar das atraentes características oferecidas em relação aos parâmetros de permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativos, os metamateriais só apresentam essas características em determinadas faixas de frequência, podendo se comportar também como os demais tipos de materiais e apresentar valores positivos elevados para esses parâmetros de ϵ e μ .

Figura 3.1 - Diagrama de permissividade e permeabilidade para os quatro meios.



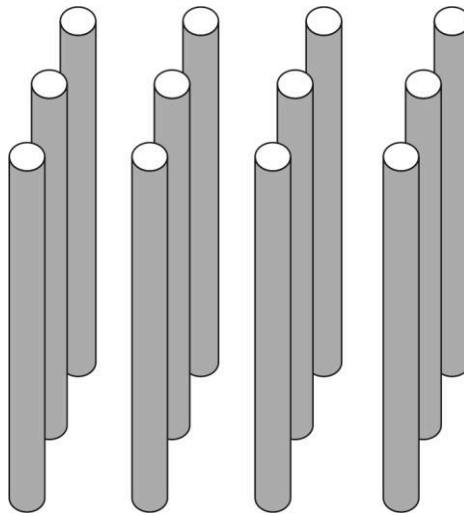
Erro! Indicador não definido. Fonte: Própria autoria

Apesar das atraentes características oferecidas em relação aos parâmetros de permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativos, os metamateriais só apresentam essas características em determinadas faixas de frequência, podendo se comportar também como os demais tipos de materiais e apresentar valores positivos elevados para esses parâmetros de ϵ e μ .

3.4.2. ESTRUTURAS NÃO HOMOGÊNEA DE SUBSTRATOS METAMATERIAIS: SRR

Inicialmente, para se obter materiais com características bianisotrópicos, foram estudados e produzidos arranjos periódicos de fios condutores alinhados ao longo da direção de propagação, que resultaram na obtenção de um material com permissividade elétrica negativa (VASCONCELOS, 2013). Analisando o fato de que os fios responderem ao campo elétrico, ao atingir uma frequência abaixo da frequência plasma, a permissividade elétrica assume valores negativos. A Fig. 3.2 apresenta um arranjo de fios condutores.

Figura 3.2-Arranjo de fios condutores



Fonte: Própria autoria

O próximo desafio seria conseguir um meio de produzir um material com permeabilidade magnética efetiva negativa. Foi Pendry, em 1999, que apresentou uma célula em formato de um anel aberto, como mostra a Fig. 3.3, chamado SRR (*Split Ring Resonator*) que apresentava valores negativos para a permeabilidade.

Figura 3.3-SRR (Ressonador em anel dividido)

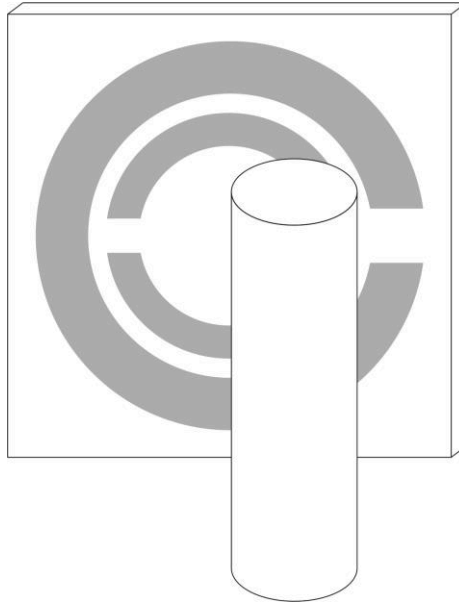


Fonte: Própria autoria

Em seguida, combinou-se o arranjo de fios condutores ao SRR, e assim foi possível obter os tão desejados materiais com características bianisotrópicos, apresentando os parâmetros negativos de permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ), como expõe a Fig. 3.4.

É importante lembrar que mesmo com estrutura não homogênea, os metamateriais são formados por materiais homogêneos com parâmetros de permissividade e permeabilidade magnética bem definidos, que após a formação correta de arranjos assumem uma nova classe de materiais.

Figura 3.4 -Arranjo de fios condutores e SRR



Fonte: Própria autoria

3.4.3. ESTRUTURAS HOMOGÊNEAS DE SUBSTRATOS METAMATERIAIS

Nesse caso o substrato metamaterial não é composto por um arranjo de SRR, mas por um material homogêneo definido por tensores, contendo valores efetivos de permeabilidade magnética e a permissividade elétrica, dados por (3.5) e (3.6) (BUELL et al., 2006):

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{\rho\rho} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\phi\phi} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{\rho\rho} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\phi\phi} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

O par de tensores metamaterial pode assumir varias configurações e obter diferentes resultados, através da variações dos valores efetivos de permeabilidade e permissividade.

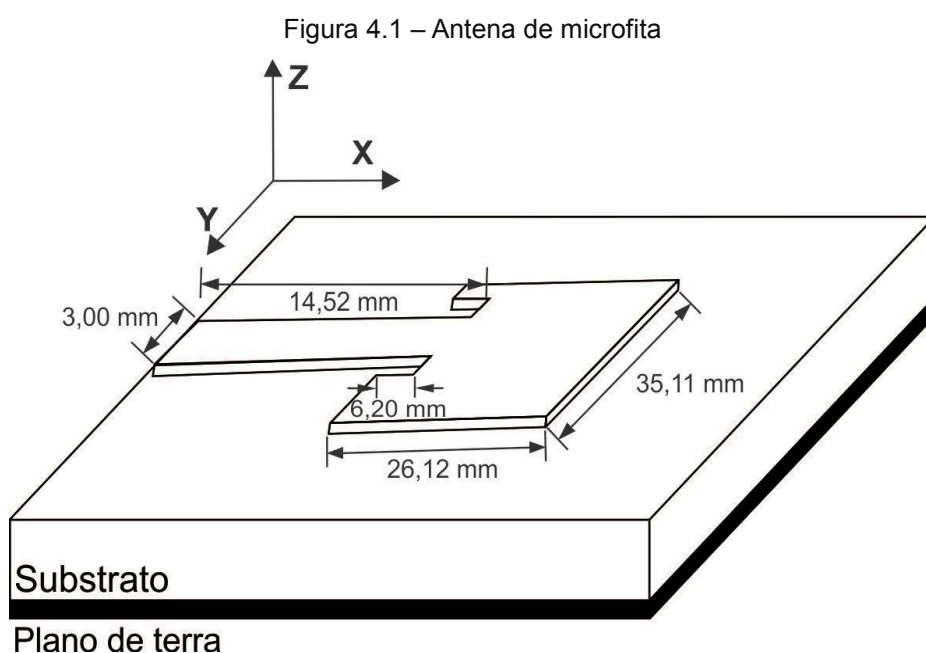
4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta sessão, serão analisados dois tipos de estruturas, uma de substratos com estrutura homogênea com uma antena com *patch* de geometria retangular impressa e outra com substratos de estrutura não homogênea para uma antena fractal de Koch.

Os resultados a serem apresentados, foram obtidos através de uma análise da influência do material utilizado como substrato, em antenas planares de *patch* retangular, na resposta em frequência da antena. São apresentados resultados numéricos para a perda de retorno, largura de banda e frequência de ressonância foram gerados por simulações utilizando o software HFSSTM e serão discutidos.

4.1. ANTENA COM PATCH RETANGULAR EM DIFERENTES MEIOS MATERIAIS

Inicialmente, a antena base proposta no trabalho é uma estrutura planar composta por um *patch* retangular com largura de 26,12 mm e comprimento de 35,11 mm, impresso em um substrato dielétrico isotrópico de FR4 com permissividade elétrica de 4,4, altura igual a 1,57 mm e tangente de perdas igual a 0,02. A antena é alimentada por meio de linha de microfitas de comprimento 14,52 mm e largura de 3 mm. A Figura 4.1 ilustra a configuração para a antena proposta.



Fonte: Própria autoria

4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

Foram utilizados materiais com a permeabilidade magnética igual a μ_0 e a permissividade elétrica na forma tensorial com $\varepsilon_{\rho\rho i} = \varepsilon_{\varphi\varphi i} \neq \varepsilon_{z z i}$ para anisotrópicos uniaxiais, com eixo óptico segundo +z. Sendo considerados substratos anisotrópicos de Safira ($\varepsilon_{\rho\rho i} = \varepsilon_{\varphi\varphi i} = 9,4$ e $\varepsilon_{z z i} = 11,6$) e Nitreto de Boro ($\varepsilon_{\rho\rho i} = \varepsilon_{\varphi\varphi i} = 5,12$ e $\varepsilon_{z z i} = 3,4$).

Em seguida, foi realizado um estudo com quatro casos de tensores, para os metamateriais, variando os valores apresentados no par de tensores, como iremos observar a seguir.

Caso 1:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_r \end{bmatrix}, \quad \bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{eff} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Caso 2:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{eff} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_r & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_r \end{bmatrix}, \quad \bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{eff} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Caso 3:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_r \end{bmatrix}, \quad \bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_r \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Caso 4:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_r \end{bmatrix}, \quad \bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{eff} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

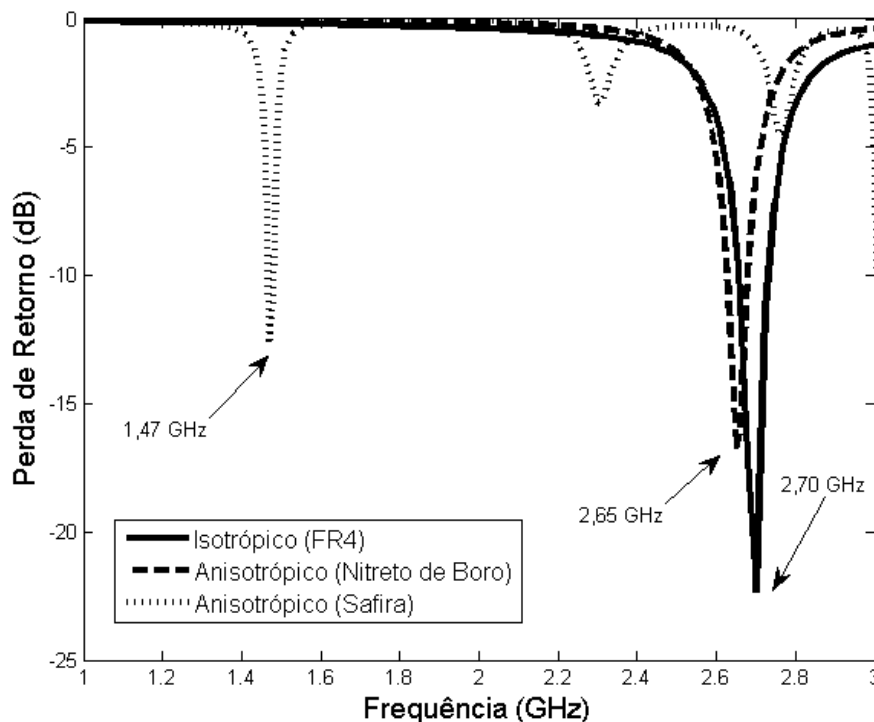
As componentes de permissividade elétrica são $\varepsilon_r = 3,38$; $\varepsilon_{eff} = 9,8$ e as componentes de permeabilidade magnética são dadas por $\mu_r = 1$; $\mu_{eff} = 3,1$. Esses valores foram determinados seguindo o metamaterial apresentado em (MOSALLEI, SARABANDI, 2007).

A Figura 4.2 apresenta os resultados comparativos para a perda de retorno em

função da frequência, para a antena impressa sobre um substrato dielétrico isotrópico e para antenas considerando diferentes substratos dielétricos anisotrópicos.

A antena, impressa em substrato de FR4, apresentou ressonância na frequência de 2,70 GHz, com um nível de perda de retorno de - 22,40 dB e uma largura de banda, a -10dB de referência, igual a 90 MHz .

Figura 4.2 – Perda de retorno para antena impressa em substratos dielétricos iso/anisotrópicos



Fonte: Própria autoria

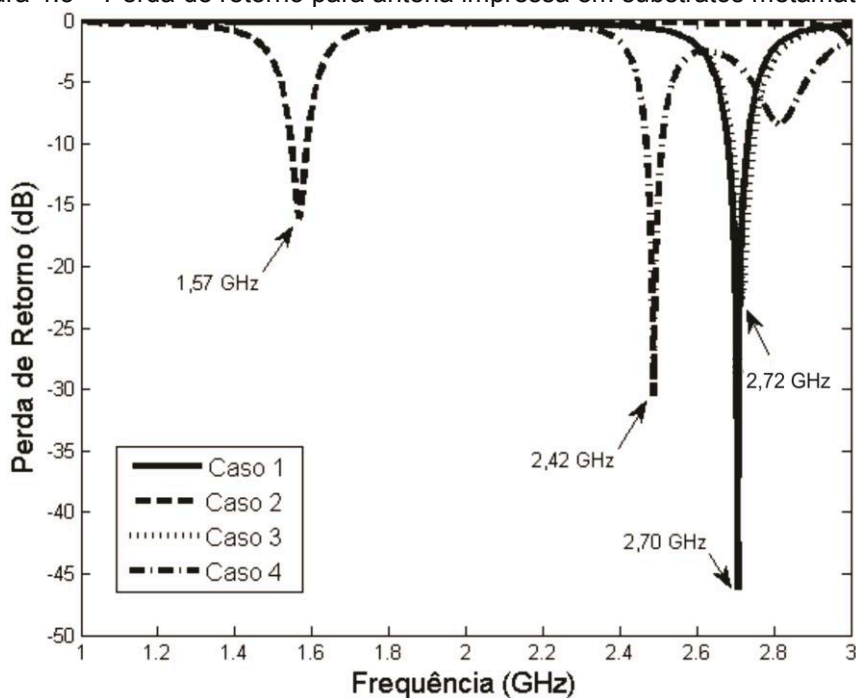
Para o caso em que a antena foi impressa no substrato de nitreto de boro, a frequência de ressonância foi de 2,65GHz, o que corresponde um fator de compressão de frequência de aproximadamente 2,5%. Essa baixo valor é explicado pelo fato de que a permissividade para um isotrópico equivalente de nitreto de boro apresentar um valor bem próximo da permissividade do FR4. Considerando-se a antena impressa em substrato de safira, a redução de frequência foi bastante superior, apresentando um fator de compressão em frequência de 45,95%. Isso é justificado pelo fato dos valores das componentes do tensor de permissividade elétrica serem bastante superiores que a 4,4. A Tabala 4.1 resume os resultados obtidos.

Tabela 4.1 – Perda de retorno, largura de banda, frequência de ressonância e fator de compressão para antena com *patch* retangular em meios anisotrópicos

Parâmetro	Antena Retangular		
	Caso base FR4	Nitreto de Boro	Safira
f_{r1}	2,70 GHz	2,65 GHz	1,47 GHz
BW_1	90 MHz	75 MHz	40 MHz
$S_{11}(f_{r1})$	-22,36 dB	-16,8 dB	-12,7 dB
Fator de compressão	-	2,5%	45,95%

O efeito das características de bianisotropia foi estudado por meio da utilização de substratos metamateriais. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Perda de retorno para antena impressa em substratos metamateriais



Fonte: Própria autoria

Comparando-se os resultados para a perda de retorno para os casos 1 e 3, observa-se que a antena apresentou respostas em frequência similares. A frequência de operação da antena foi de 2,70 GHz e 2,72 GHz, respectivamente para os dois

casos. Esses resultados são justificados pela grande semelhança entre os tensores nos casos supracitados.

O caso 2 apresentou a melhor alternativa dentre os metamateriais para a miniaturização da antena. Nesta situação, a antena apresentou uma frequência de ressonância de 1,57 GHz, equivalendo a uma redução de 42,22% se comparada com a resposta do caso isotrópico.

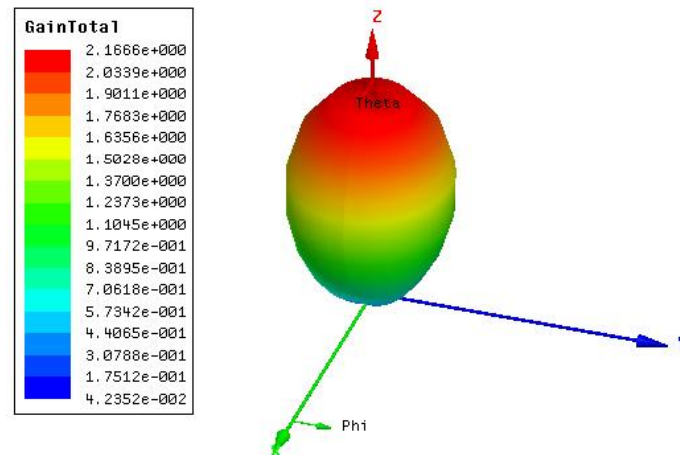
Comparando-se esses resultados com os casos 1 e 3, que apresentam o mesmo tensor de permeabilidade magnética, pode-se ver notoriamente a influência do tensor de permissividade no comportamento da antena. Quando comparamos os resultados do caso 2, com os resultados do caso 4, a influência da bianisotropia é observada. A Tabela 4.2 resume os resultados da análise da antena com *patch* retangular em substratos metamaterial homogêneo.

Tabela 4.2 – Perda de retorno, largura de banda, frequência de ressonância e fator de compressão para antena com *patch* retangular em meios metamaterial

Parâmetro	Antena Retangular			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
f_{r1}	2,70 GHz	1,57 GHz	2,72 GHz	2,42 GHz
BW_1	140 MHz	120 MHz	136 MHz	100 MHz
$S_{11}(f_{r1})$	- 46,3 dB	- 16 dB	- 22,6 dB	- 30,4 dB
Fator de Compressão	-	42,22%	- 0.7%	10,4%

A Figura 4.4 apresenta o diagrama de radiação para antena impressa em substrato metamaterial, cujo tensor é o apresentado no caso 2.

Figura 4.4 – Diagrama de radiação para antena impressa no substrato metamaterial Caso 2



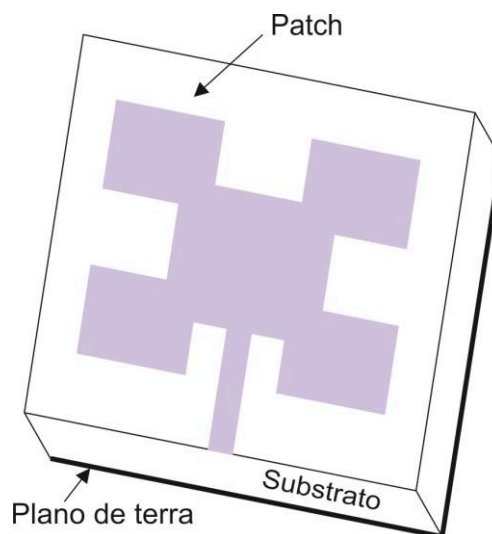
Fonte: Própria autoria

A antena apresentou-se, neste caso, como uma antena diretiva concentrando sua radiação na região de *broadside* e um ganho na máxima região de radiação de 2,16dB.

4.2. ANTENA COM *PATCH* FRACTAL DE KOCH EM SUBSTRATO METAMATERIAL NÃO HOMOGENEO

A Figura 4.5 ilustra a segunda estrutura utilizada neste trabalho, uma antena com *patch* fractal de Koch impressa sobre um substrato e apoiada por um plano de terra.

Figura 4.5 – Antena Fractal de koch



Fonte: Própria autoria

A geometria fractal tratada foi gerada a partir de uma antena de *pach* retangular de 39 mm de largura e 29 mm de comprimento, alimentadas por uma linha de microfita de impedância característica de 50Ω . O casamento de impedâncias entre a linha de alimentação e o elemento radiante foi obtido por meio de *inset-feeds*.

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO METAMATERIAL

Neste trabalho foram utilizados substratos compostos por SRR em dois formatos distintos, a primeira configuração apresenta formato quadrado e a segunda apresenta formato circular, como visto na Figura 4.5.

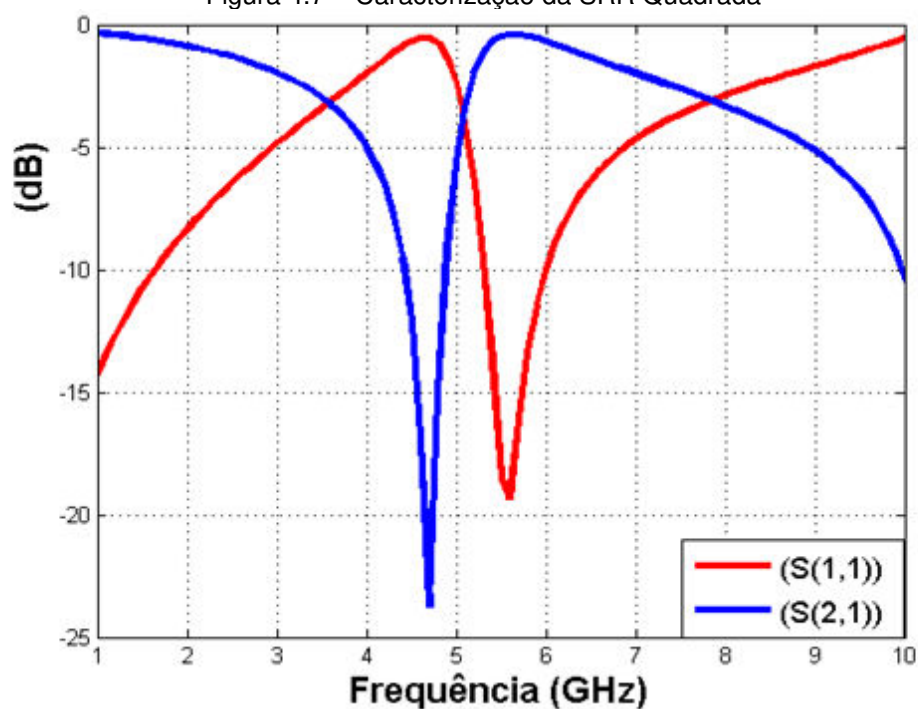
Figura 4.6 – Células que compõe a SRR



Fonte: Própria autoria

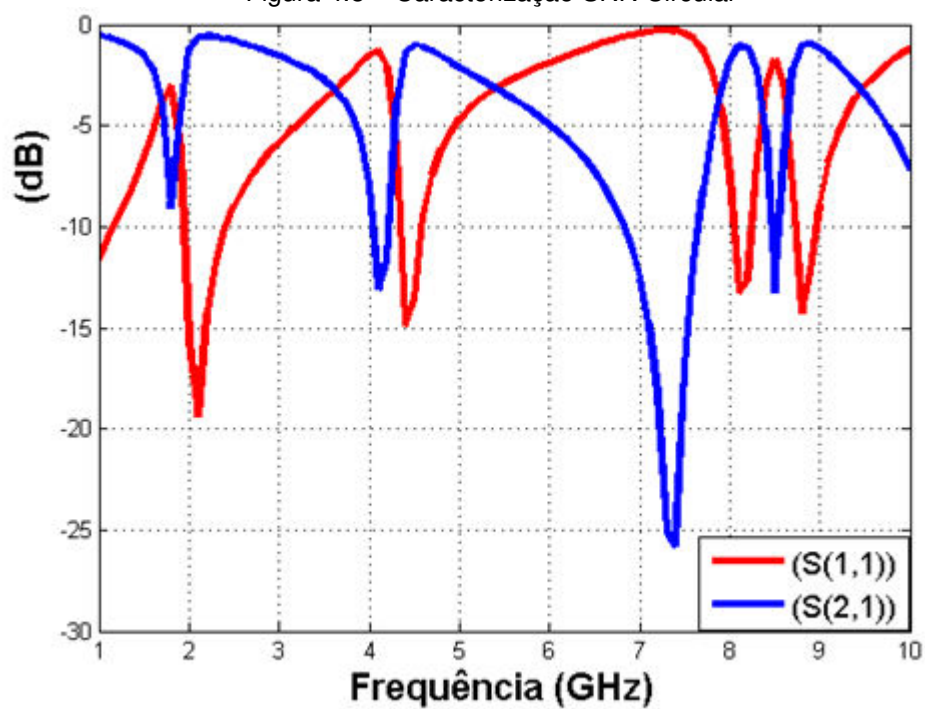
Através de simulações, utilizando o software HFSSTM, foi possível confirmar o comportamento metamaterial de cada uma das células SRR utilizadas nesse trabalho, podemos observar os resultados obtidos para a geometria quadrada e circular, respectivamente, na Figura 4.7 e Figura 4.8.

Figura 4.7 – Caracterização da SRR Quadrada



Fonte: Própria autoria

Figura 4.8 – Caracterização SRR Circular

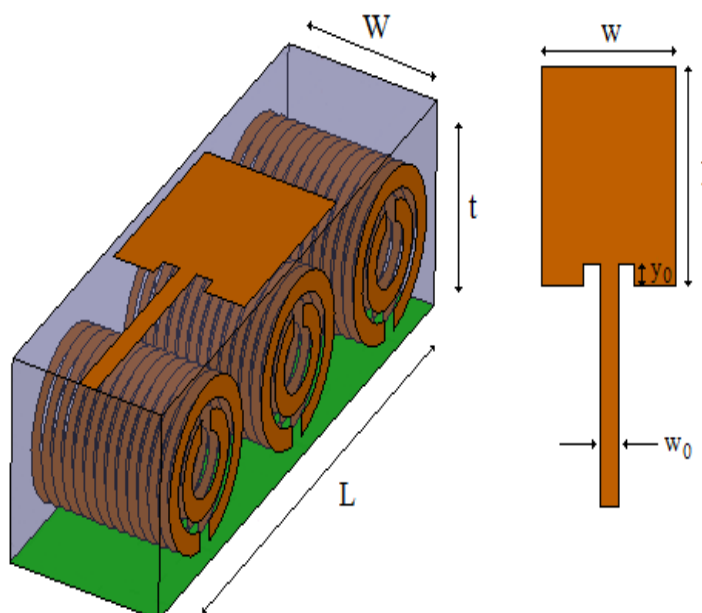


Fonte: Própria autoria

Os resultados apresentados evidenciam uma frequência de comportamento metamaterial para a célula quadrada em torno de 4,5 GHz e para a célula circular em torno de 4GHz, para a menor frequência.

Na Figura 4.9, pode-se observar o caso base composto por um *patch* retangular impresso sobre substrato metamateriali com arranjo de SRR circular, respectivamente em um substrato e estrutura. A Tabela 4.3 apresenta os parametros da antena proposta.

Figura 4.9 –Estrutura em Metamaterial



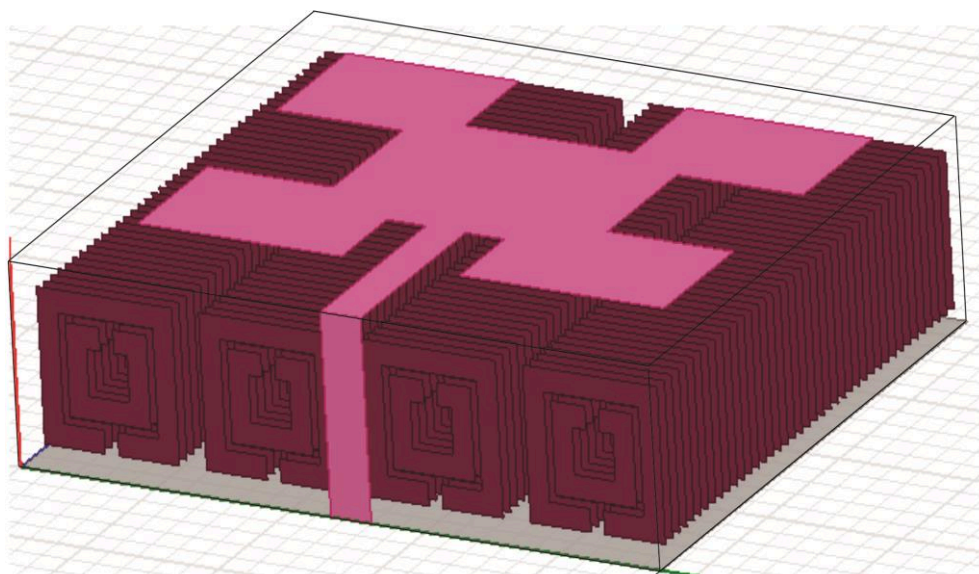
Fonte: Própria autoria.

Tabela 4.3 – Parametros da Antena

Parametros	Isotrópico	Metamaterial
L	60 mm	60 mm
W	50 mm	18.2 mm
t	1,6 mm	20 mm
l	26,12 mm	20 mm
w	35,11 mm	16 mm
w₀	2,87 mm	2.08 mm
y₀	6,2 mm	2 mm

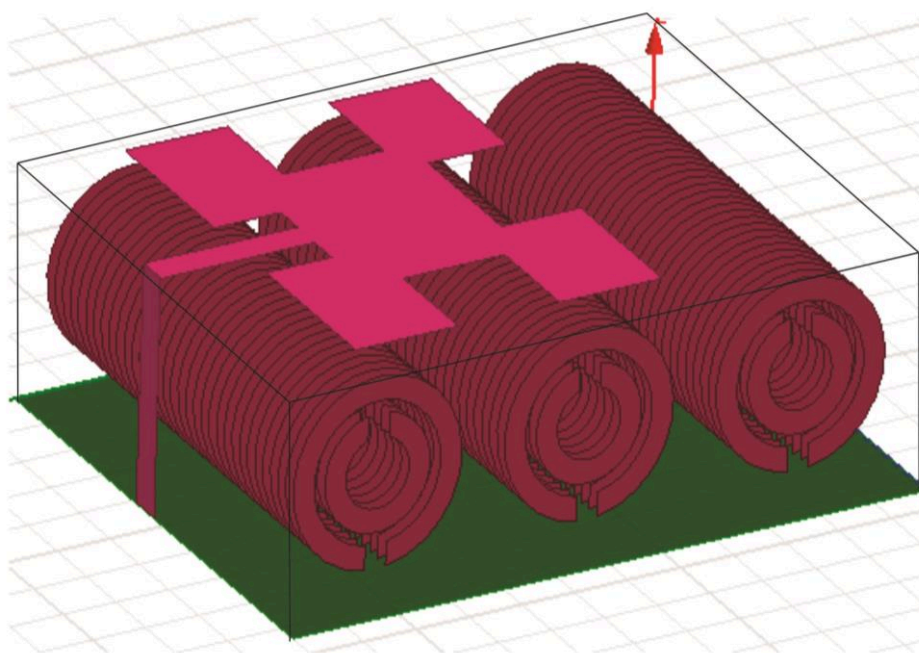
Na Figura 4.9 e Figura 4.10, pode-se observar a estrutura utilizada nesse trabalho, formada por uma antena fractal de Koch impressa sobre substratos metamateriais com arranjo de SRR quadrada e circular, respectivamente.

Figura 4.10 – Estrutura com substrato metamaterial: arranjo de SRR quadrada



Fonte: Própria autoria

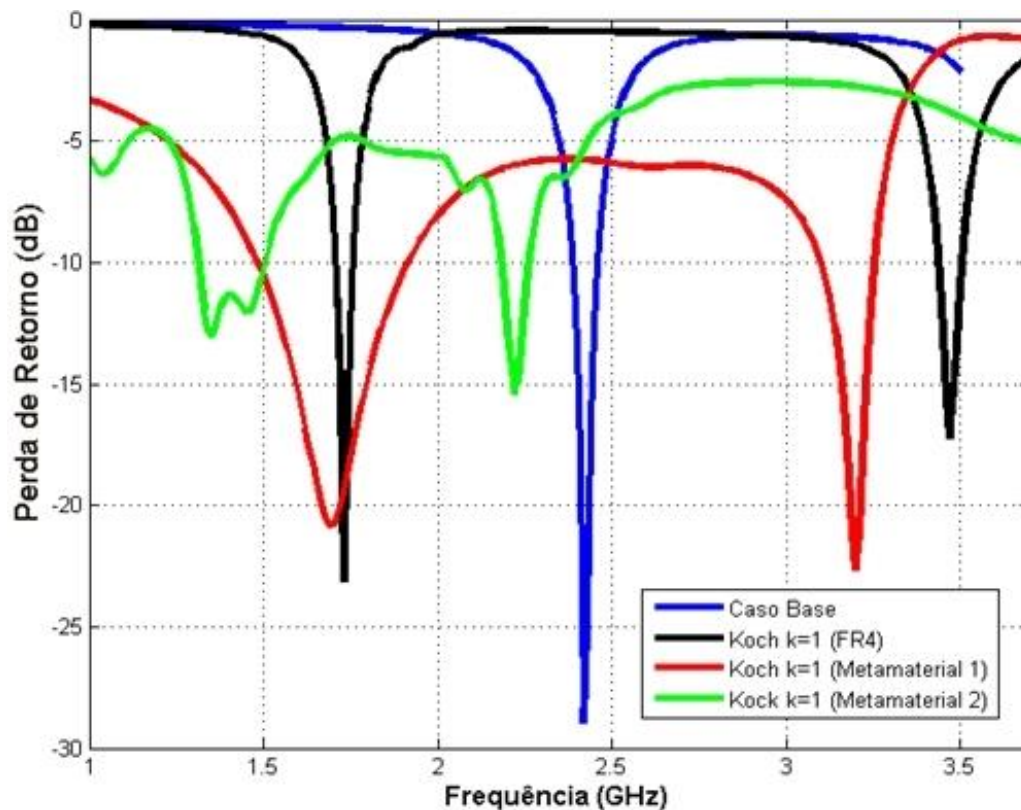
Figura 4.11 – Estrutura com substrato metamaterial: arranjo com SRR circular



Fonte: Própria autoria

A fim de estudar a influência dos metamateriais não-homogêneos, a Figura 4.12 apresenta os resultados comparativos para a perda de retorno em função da frequência, para a antena fractal de Koch impressa sobre substrato dielétrico isotrópico e metamateriais.

Figura 4.12 – Perda de retorno para antena fractal de koch em meio metamaterial



Fonte: Própria autoria

O Metamaterial 1, consiste em um metamaterial composto por um arranjo de SRR quadrada, e o Metamaterial 2, é composto por um arranjo de SRR circular. Considerando o metamaterial 1, a antena apresentou uma frequência de ressonância de 1,70 GHz, equivalendo a uma redução de 29,75% se comparado com a resposta do caso base. Além disso, apresentando um grande aumento na largura de banda. Contudo, o metamaterial 2, se destacou pelo percentual de redução na sua frequência de ressonância, cerca de 44,6%.

Na Tabela 4.4 apresenta os resultados para a frequência e largura de banda, comprando os valores obtidos para cada meio utilizado, sendo considerados 2 diferentes casos estudados de metamateriais não homogêneos.

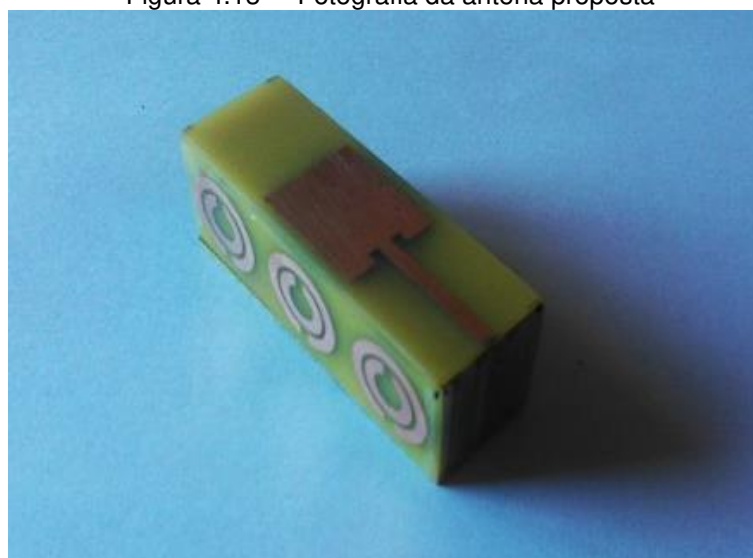
Tabela 4.4 – Perda de retorno para antena com *patch* fractal de koch em meio metamaterial

Parâmetro	Caso Base (FR4)	Antena Fractal de Koch (k=1)		
		FR4	Metamaterial 1	Metamaterial 2
f_{r1}	2,42 GHz	1,73 GHz	1,70 GHz	1,34 GHz
BW_1	100 MHz	60 MHz	480 MHz	200 MHz
$S_{11}(f_{r1})$	-28,96 dB	-23,13 dB	-20,68 dB	-12,79 dB
f_{r2}	-	3,47 GHz	3,2 GHz	2,22 GHz
BW_2	-	70 MHz	1,60 MHz	80 MHz
$S_{11}(f_{r2})$	-	-17,24 dB	-22,69 dB	-15,42 dB

Baseando-se nos resultados apresentados, pode-se inferir que o uso de metamateriais permite a miniaturização dos dispositivos planares. Além disso, verifica-se a possibilidade de obtenção de circuitos multibandas, por meio do uso de metamateriais, haja vista o surgimento de novas bandas de transmissão nas antenas planares no fractal de Koch, quando impressas em metamateriais.

Afim de validar o estudo realizado durante este trabalho, foi desenvolvido um protótipo do caso base composto por um *patch* retangular impresso sobre substrato metamaterial com arranjo de SRR circular, a Figura 4.13 ilustra a configuração da antena construída.

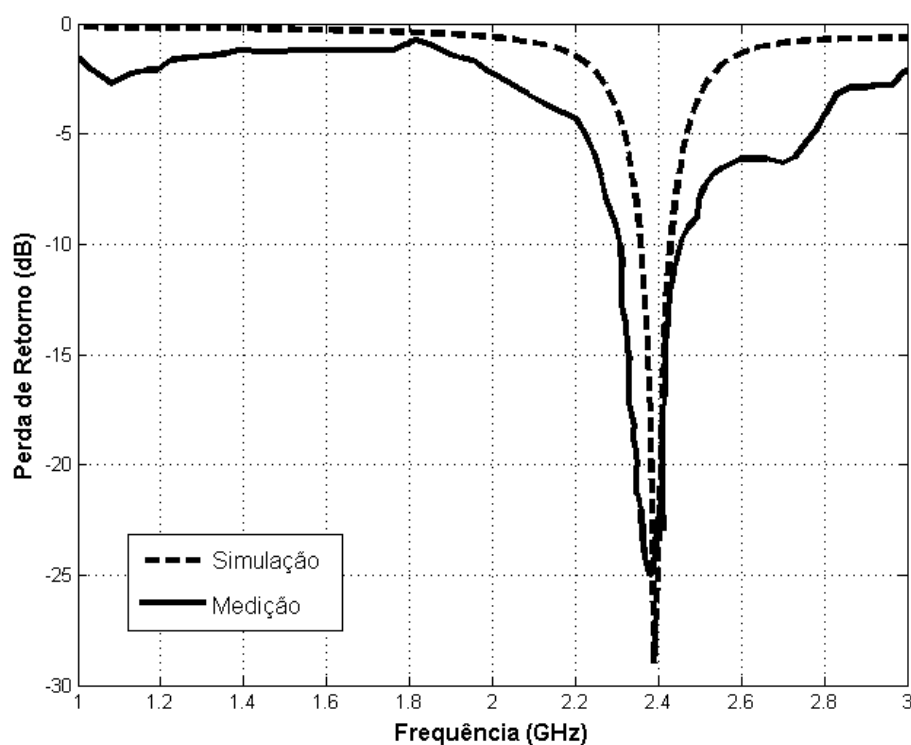
Figura 4.13 – Fotografia da antena proposta



Fonte: Própria autoria.

Os resultados para a frequência de ressonância, perda de retorno e largura de banda da antenna mostrados na Figura 4.14 foram obtidos pelo método dos elementos finitos (FEM), por meio de simulações utilizando o software comercial HFSSTM, e medições através do analisador de redes.

Figura 4.14 –Perda de retorno para antenna simulada em comparação com o resultado obtido na medição



Fonte: Própria autoria.

Considerando os resultados obtidos na medição, a antenna base impressa no substrato metamaterial apresentou um fator de compressão de aproximadamente 65,1%, em relação a antenna base impressa em substrato isotropico. A Tabala 4.5 resume os resultados obtidos.

Tabela 4.5 – Resultados para antenna em meio metamaterial não homogêneo

Parâmetro	Isotropico	Metamaterial
BW	60 MHz	45 MHZ
Área	917.07 mm ²	320 mm ²
Fator de Compressão	-	65.1 %

5. CONCLUSÕES

Uma investigação teórica e numérica foi implementada e discutida neste trabalho para determinar o efeito produzido pela variação do tipo de substrato nos parâmetros de uma antena de microfita. São apresentados o estudo para cada tipo de material utilizado no substrato, definindo suas características e propriedades. Sendo considerados três tipos de substratos homogêneos: dielétrico isotrópico, dielétrico anisotrópico e metamaterial. Em relação aos não homogêneos, são considerados arranjos de SRR com formato quadrado e circular.

Inicialmente, foi analisada uma antena de microfita com patch retangular impressa em diferentes classes de materiais. Em seguida, uma antena em fractal de Koch foi objeto de estudo deste trabalho. A partir de simulações numéricas foram obtidos resultados para a perda de retorno, largura de banda, diagrama de radiação e frequência de ressonância, considerando cada tipo de estrutura analisada.

Baseando-se nos resultados obtidos, foi possível observar que o uso de materiais não convencionais como substrato de antenas, permite a miniaturização dos dispositivos. Considerando o tensor do metamaterial homogêneo denominado como Caso 2 e do Metamaterial 2 dos substratos não homogêneos, promoveu a redução na faixa de frequência que a antena opera, produzindo a miniaturização da estrutura, de aproximadamente 42,22% e 44,6%, respectivamente.

Como propostas de continuidade desse trabalho pode-se exemplificar: determinar a influência da variação do substrato para outras características ressonantes da antena; análise com outras geometrias do *patch* impressos nos substratos utilizados neste trabalho; desenvolvimento de novas configurações para células metamateriais; caracterização da respostas óptica de metamateriais; estudar o uso de metamateriais em outros circuitos (filtros, divisores de potência, acopladores); estudar outras classes de materiais com evidência nas pesquisas da atualidade (grafeno, supercondutores, plasmas e materiais flexíveis).

6. REFERÊNCIAS

ARNOLD, E. **Introduction to Medical Electronics Applications**. Londres: PLC, 1995.

BARRA, Tiago Venturieri. **Um Ambiente Evolutivo para Apoio ao Projeto de Antenas de Microfita**. 2007. 120 f. Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2007.

Buell, K., H. Mosallaei, K. Sarabandi, "**A Substrate for Small Patch Antennas Providing Tunable Miniaturization Factors**," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 1, pp. 135 – 146, Jan. 2006

Buell, K., H. Mosallaei, and K. Sarabandi, "**Metamaterial Insulator Enabled Superdirective Array**," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 4, April 2007

CONSTANTINE, A. Balanis. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 2. ed. São Paulo: John Wiley & Sons, 1997.

CONSTANTINE, A. Balanis. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3. ed. São Paulo: Ícone Editora April 2005.

FEITOZA, G. Miranda. **Análise de Antenas de Microfita com Patches Circulares Sobre Substratos Anisotrópicos Usando o Método dos Potenciais de Hertz**. Natal: UFRN, 2005. 98p. Dissertação de Mestrado.

F. Qureshi, M. Antoniades, G.V. Eleftheriades, "A compact and lowprofile metamaterial ring antenna with vertical polarization," IEEE Antenna Wireless Propagation Lett.

LINS DE AQUINO, M. do Bonfim. **Antenas de Microfita Com Substrato Metamaterial**. Natal: UFRN, 2008. 107p. Dissertação de Mestrado.

LINS DE AQUINO, M. do Bonfim, H. C. C. Fernandes. **Antenas de Microfita com Metamateriais**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, 2012.

LUCENA, Daniel Amélio de. **Estudo de Refração Negativa e Recuperação de Parâmetros em Materiais**. 2010. 84 f. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi árido, São Carlos, 2010.

MEDEIROS, Thiago Esley de Lima. **Antenas de Microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica**. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró, 2013.

Mosallaei, H., and K. Sarabandi, “**Design and Modeling of Patch Antenna Printed on Magneto-Dielectric Embedded-Circuit Meta-Substrate,**” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 1, pp. 45-52, January 2007

NUNO MARTINS. **Propagação Guiada em Meios Metamateriais**. Lisboa: IST, 2007. 72p. Dissertação de Mestrado.

SARABANDI, K; MOSALLAEI, H. **Electro-ferromagnetic tunable permeability, bandgap, and bi-anisotropic metamaterials utilizing embedded circuits**. In: IEEE Trans. Antennas Propag., v.52, no. 6, 2004.

SILVA NETO, V. P, C. F. L. Vasconcelos, M. R. M. L. Albuquerque, , and A. G. D'Assunção. **Wave Concept Iterative Procedure Analysis of Patch Antennas on Nanostructured Ceramic Substrates**. Advanced Eletromagnetics, v.2, n.3, December 2013.

SILVA NETO, V. P. ; Vasconcelos, C. F. L. ; Assunção, Adaildo Gomes D'. Microstrip Patch **Antennas with Metamaterial Inspired Substrates and Superstrates**. In: International Microwave and Optoelectronics Conference, 2013, Rio de Janeiro. International Microwave and Optoelectronics Conference Proceeding, 2013.

VASCONCELOS, C. F. L.; Silva Neto, V. P.; Albuquerque, M. R. M. L.; D'Assunção O, A. G.. **Simulation and design of a bandpass filter on metasubstrates**. Applied Physics. A, Materials Science & Processing, v. 113, p. 1, 2013.

SILVA NETO, V. P. **Caracterização de Circuitos Planares de Micro-ondas pelo Método Iterativo das Ondas**. Natal: UFRN, 2013. 105p. Dissertação de Mestrado.

SUSAN, T. Anisha; A. K Prakash. **A Survey on Microstrip Patch Antenna using Metamaterial**. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, v. 2, Issue 12, December 2013.

VASCONCELOS, C. F. L. **Desenvolvimento de Antenas de Microfita com *Patct* em Anel Utilizando Materiais Ferrimagnéticos e Metamateriais**. Natal: UFRN, 2010. 116p. Tese de Doutorado.

VESELAGO, V. G. **The eletrodynamics of substances with simultaneously negative values of “ ϵ ” and “ μ ”**. Soviet Physics Uspekhi, v.10, n4, 1967.