



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS PAU DOS FERROS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ANDRÉ LOPES DE LIMA

ANÁLISE DE CAMPOS EM SUBSTRATOS DE ANTENAS DE MICROFITA

PAU DOS FERROS - RN
2018

ANDRÉ LOPES DE LIMA

ANÁLISE DE CAMPOS EM SUBSTRATOS DE ANTENAS DE MICROFITA

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Pau dos Ferros para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Profº. Dr. Otávio Paulino Lavor - UFERSA

PAU DOS FERROS - RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a 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 tomar-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.

L732a Lima, André Lopes de.
Análise de Campos em Substratos de Antenas de
Microfita / André Lopes de Lima. - 2018.
33 f. : il.

Orientador: Otávio Paulino Lavor.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. Antenas de Microfita. 2. Campo
Eletromagnético. 3. Substrato. I. Lavor, Otávio
Paulino, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANDRÉ LOPES DE LIMA

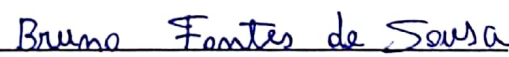
ANÁLISE DE CAMPOS EM SUBSTRATOS DE ANTENAS DE MICROFITA

Monografia apresentada no Campus Pau dos Ferros para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

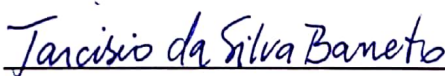
Aprovado em: 20 de Agosto de 2018:



Profº. Dr. Otávio Paulino Lavor - UFERSA
Orientador



Profº. Me. Bruno Fontes de Sousa - UFERSA
Membro da Banca



Profº. Me. Tarcísio da Silva Barreto - UFERSA
Membro da Banca

PAU DOS FERROS - RN
2018

Dedico esse trabalho a meus pais João Paulino e Antonia Amaltania, a meus irmãos Andressa e Anderson.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço ao meu orientador cujo voto de confiança depositado foi o incentivo constante para a concretização desse trabalho, agradeço ao meus pais por todo apoio que me deram e por me bancarem durante a graduação, agradeço a UFERSA pelos auxilio, agradecemos a todos professores que me ensinaram ao longo da minha graduação. Agradeço a Shirlene por me introduzir no caminho da pesquisa científica. Agradeço a Gleydson e a Wagner por me introduzirem no caminho da engenharia elétrica. Agradeço a Bruno Fontes e a João Victor por me ajudarem com o LaTeX. Agradeço a Cecílio, Pedro e Otavio por ofertarem disciplinas optativas para engenharia elétrica. Agradeço aos meus amigos por estarem sempre me apoiando. Agradeço a meu amigo João Vitor por me ajudar nos momentos difíceis, agradeço a minha amiga Daiara pelos seus incentivos, agradeço a José Victor por me indicar o curso de CeT. Agradeço a Etienne a Carlos Italo e a Bruno José por me ajudarem nessa minha estadia em Pau dos Ferros. Agradeço aos motoristas dos ônibus por me trazerem em segurança para a aula.

*Nada pode ser obtido sem uma espécie de sacrifício. É preciso oferecer algo de valor
equivalente*
(Edward Elric)

RESUMO

Neste trabalho é feito um estudo sobre os campos no substrato das antenas de microfitas e, em seguida, é abordado o estudo da propagação das ondas eletromagnéticas tendo em vista melhorar a qualidade de sua transmissão. Os materiais usados para o substrato foram o Ferrite e o fibra de vidro (FR4), onde o ferrite possui uma permissividade relativa maior que a permissividade relativa da fibra de vidro. Como o tamanho da antena de microfita está relacionado diretamente com as propriedades desses materiais, dependendo do material, pode existir um aumento ou uma redução no tamanho da antena. Os cálculos para determinar o tamanho das antenas foram feitos numericamente usando o software scilab e a frequência adotada para estudo foi 2,5GHz. As antenas foram simuladas e modeladas através de softwares. A antena com substrato ferrite teve uma redução significativa de tamanho e seus resultados de perda de retorno foram melhorados em comparação com a antena de FR4.

Palavras-chaves: Antena de Microfita, Campo Eletromagnético , Substrato.

ABSTRACT

In this work a study on fields in the substrate of the microfita antennas is approached then the study of the propagation of electromagnetic waves is approached in order to improve the quality of its transmission, some materials used for the substrate were the Ferrite and the fiber material of glass (FR4), where the ferrite has a relative permittivity greater than the relative permittivity of the glass fiber, since the size of the microfine antenna is directly related to the properties of these materials. Depending on the material there may be an increase or decrease in antenna size, calculations to determine antenna sizes were done numerically using the scilab software and the frequency adopted for study was 2.5GHz, the antennas were simulated and modeled through software. The ferrite antenna had a significant reduction in size and their return loss were greatly reduced compared to the FR4 antenna.

Keywords: Microfite Antennas,Electromagnetic Field,Substrate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Antena de microfita com <i>patch</i> retangular	19
Figura 2 - Geometrias utilizadas em <i>patch</i> de antenas de microfita	20
Figura 3 - Alimentação Por linha de Microfita	21
Figura 4 - Linha de Microfita	22
Figura 5 - Linhas de Campos	23
Figura 6 - Vista do Topo da Antena	24
Figura 7 - Vista lateral da antena	24
Figura 8 - <i>Patch</i> da Antena	25
Figura 9 - Plano de Terra	26
Figura 10 - Perda de Retorno e Largura de Banda	27
Figura 11 - Campo Elétrico no Substrato FR4	28
Figura 12 - Campo Magnético no Substrato FR4	28
Figura 13 - Vetor Campo Magnético no Substrato FR4	29
Figura 14 - Vetor Campo Elétrico no Substrato FR4	29
Figura 15 - Campo Elétrico no Substrato Ferrite	30
Figura 16 - Vetor Campo Elétrico no Substrato Ferrite	30
Figura 17 - Campo Magnético no Substrato Ferrite	31
Figura 18 - Vetor Campo Magnético no Substrato Ferrite	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	EQUAÇÕES DE MAXWELL	13
2.1	EQUAÇÕES DE MAXWELL EM MEIOS MATERIAIS	14
2.2	ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	15
2.3	PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM MEIOS MATERIAIS	16
3	ANTENAS DE MICROFITA	19
3.1	SUBSTRATO PARA ANTENA DE MICROFITA	20
3.2	MÉTODO DE ANÁLISE	21
4	RESULTADOS	25
4.1	PROJETO DAS ANTENAS	25
4.2	CAMPOS NAS ANTENAS	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A comunicação entre as pessoas tem sido muito importante na troca de informações, sendo o espectro eletromagnético um dos meios naturais para a comunicação, as antenas têm sido de grande importância para o aproveitamento desse recurso. Existe um grande tráfego de informações entre computadores, celulares e aparelho de rádios. Nessas estruturas são utilizados dispositivos projetados para emissão e recepção de ondas de rádio, e seu princípio de funcionamento é converter a energia eletromagnética guiada pela linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada no espaço a sua volta, o efeito contrário também acontece. Com o avanço da eletrônica digital e da tecnologia de comunicação móvel a engenharia de telecomunicação a fim de acompanhar essa evolução vem desenvolvendo a miniaturização do sistema de comunicação móvel, sendo a possibilidade de diminuir as dimensões em estruturas planares, devido a suas propriedades: baixo custo, facilidade de acomodação em pequenos espaços e apresenta estruturas finas em perfil Junio (2008).

O tipo bastante utilizado para comunicação são as microfita, elas em sua forma mais simples são compostas de um plano de terra e um substrato dielétrico, que sustenta a fita condutora chamada de *Patch*, esse tipo pode ser moldado facilmente a superfície e possui construção simples, além de várias limitações de seu uso já foram superadas. Com a finalidade de superar algumas limitações Dmitriev (2006) fez um estudo sobre a influência de espiras retangulares parasitas. Freitas (2018) para superar certas limitações e atender exigências da tecnologia e aplicações, fez modificações tanto no *Patch* quanto no plano de terra, a fim de aumentar a diretividade, com arranjos circulares projetados para a frequência de 2.5 GHz. Andrade (2013) que projetou um ressonador retangular de fenda com múltiplas camadas de substrato, Souza (2011) com seus estudos sobre modelagem para meios materiais e Zaidi et al. (2016) com seu design para antenas circulares, todos com contribuições importantes para o desenvolvimento dessa tecnologia. Essas antenas de pequenas dimensões são usadas em aplicações de alta frequências, as aplicações mais comuns são: nas comunicações de aeronaves, espaçonaves, satélites e mísseis onde seu tamanho e peso facilita na sua instalação, além de ser possível adaptá-la a aerodinâmica, elas também são muito versáteis quando se trata de sua frequência ressonante, polarização e impedâncias, e podem ser facilmente produzidas com a tecnologia de circuito impressos Silveira (2016).

De acordo com Balanis (2005), os principais métodos de análise de antenas de microfita são: o da linha de transmissão, o modelo da cavidade, o método das linhas de transmissão equivalentes ou método da imitância, o método dos potenciais vetoriais de Hertz, o método da linha de transmissão transversa e o método dos elementos finitos. De acordo com Lavor (2015), análise de antenas de microfita feita com *patches* retangulares são feitas pelo método da linha de transmissão, no caso dos *patch* circulares as análises são feitas pelo método da cavidade. Elas podem ser construídas com Materiais anisotrópicos, esses materiais são usados nas aplicações por serem compostos por ferrimagnéticos, nessa classe existe materiais que possuem isotropia dielétrica e magnética os chamados de metamateriais. Os metamateriais podem ser definidos

como estruturas eletromagnéticas efetivas homogêneas artificiais com propriedades incomuns que não são encontradas na natureza. Silva (2015) fez um estudo sobre os metamateriais que são usados em antenas para faixa de frequência de 6 GHz e 16 GHz. Os *patch* podem ter várias geometrias, Araujo (2017) em seu trabalho faz um estudo sobre a geometria elíptica e retangular para as frequências de 28GHz. Devido aos custos de alguns sistemas de comunicação, é importante diminuir os custos mantendo a qualidade e o desempenho, nesse trabalho é abordado a influência da permeabilidade e permissividade no tamanho da antena de microfitas, também é estudado os efeitos que a permeabilidade e permissividade do substrato causa na transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas. O texto está dividido em 6 capítulos, no **Capítulo 2** é abordado as equações de Maxwell, tanto para casos ideais como para meios materiais, também é abordado a propagação de ondas eletromagnéticas. No **Capítulo 3** trata-se de informações sobre as antenas de microfitas e aborda o método de análise usado nesse trabalho. No **Capítulo 4** mostra alguns resultados obtido para o Ferrite e o FR4 e resultados obtidos para os campos nos substratos. No **Capítulo 5** é apresentado as conclusões e as perspectivas de continuação do trabalho.

2 EQUAÇÕES DE MAXWELL

Todos os fenômenos eletromagnéticos podem ser descritos pelas equações de Maxwell, são essas equações que regem todo o eletromagnetismo. Em 1864, Maxwell unificou a eletricidade e o magnetismo com suas equações, elas têm várias aplicações nas engenharias elas podem ser escritas na forma integral e diferencial, também podem ser escritas para meios materiais.

As equações de Maxwell são a junção das leis de Gauss da eletricidade e do magnetismo junto com as leis de Ampère e de Faraday. De acordo com a lei de Gauss para campos elétricos o fluxo de campo elétrico através de uma superfície gaussiana é proporcional a carga elétrica envolvida pela superfície. Essa lei pode ser descrita pela equação (1) se tornando assim a primeira das equações de Maxwell.

$$\oint_s E \cdot \hat{n} dS = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

A lei de Gauss para o magnetismo diz que o fluxo de campo magnético através da superfície gaussiana é zero pois não existe carga magnética essa lei pode ser descrita pela equação (2), tornando assim a segunda equação de Maxwell.

$$\oint_s B \cdot \hat{n} dS = 0 \quad (2)$$

De acordo com a lei de Faraday-Maxwell um campo elétrico é induzido em uma curva fechada quando um campo magnético varia com o tempo através da curva fechada, o caso contrário também acontece, um campo elétrico pode induzir campo magnético. Essa lei é descrita pela equação (3) é a terceira equação de Maxwell.

$$\oint_c E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_s B \cdot \hat{n} dS \quad (3)$$

A lei de Ampère diz que da mesma forma que uma carga polarizada produz um campo elétrico, uma corrente polarizada produz um campo magnético, assim essa lei pode ser descrita pela equação (4), sendo a quarta equação de Maxwell.

$$\oint_c B \cdot dl = \mu_0 I + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_s P \cdot \hat{n} dS \quad (4)$$

As equações que regem o eletromagnetismo também podem ser escritas na forma diferencial, essas equações constituem a base para o funcionamento de dispositivos eletromagnéticos como motores elétricos, transmissores e receptores de televisão, telefones, aparelhos de radar e fornos de micro-ondas (RESNICK, 2016).

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (8)$$

2.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL EM MEIOS MATERIAIS

É de suma importância que as equações de Maxwell sejam reescritas para meios materiais, pois para os casos que as propagações de ondas fora do vácuo, as ondas eletromagnéticas sofrem refração e reflexão, que depende das propriedades do meio em que estejam a se propagar.

$$D = \epsilon E \quad (9)$$

$$B = \mu H \quad (10)$$

$$J = \sigma E \quad (11)$$

Após serem redefinidos os campos elétricos, magnéticos e a densidade de corrente para meios materiais as equações de Maxwell podem ser reescritas. Trabalhar com as equações em meios materiais é bastante vantajoso, pois podem ser feitas as análises para qualquer tipo de material basta conhecer as suas permeabilidades e permissividades no meio.

Essas são as equações de Maxwell na forma integral para meios materiais:

$$\oint_s D \cdot ds = \int_v \rho_v dv \quad (12)$$

$$\oint_s B \cdot ds = 0 \quad (13)$$

$$\oint_l E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s B \cdot dS \quad (14)$$

$$\oint_l H \cdot dl = \int_s (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \cdot dS \quad (15)$$

Essas são as equações de Maxwell na forma diferencial para meios materiais:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (16)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (17)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (18)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (19)$$

2.2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A equação diferencial cuja a solução descreve uma onda eletromagnética e sua velocidade de propagação pode ser obtida a partir das equações de Maxwell no vácuo. Considerando $\rho = J = 0$ tomando o rotacional da equação (7), e utilizando na equação (5), temos:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla + \frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times B) = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (20)$$

mas:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \quad (21)$$

como:

$$\nabla E = 0 \quad (22)$$

obtemos:

$$-\nabla^2 E = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (23)$$

Analogamente tomou-se o rotacional da equação (8) e utilizando em (6) obtemos:

$$-\nabla^2 B = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (24)$$

As equações (23) e (24) equivalem a seis equações diferenciais escalares uma para cada componente de E e B para simplificar consideremos que E e B estejam em x e y:

$$E_y = E_y(x, t) \quad (25)$$

$$B_z = B_z(x, t) \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2} \quad (28)$$

Depois de algumas manipulações matemáticas obtemos:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (29)$$

A equação (29) representa uma onda oscilando na direção y propagando-se na direção x com velocidade v .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3,0 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = c \quad (30)$$

c é a velocidade de uma onda eletromagnética no vácuo.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (31)$$

A equação (31), é a equação diferencial da onda cuja a solução mais geral é dada por:

$$\psi = \psi_m e^{(kr \pm \omega t)} \quad (32)$$

com:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (33)$$

sendo K o número de onda $\omega = 2\pi f$ que é a velocidade angular. Para onda se propagando na direção x temos:

$$\psi = \psi_m \sin(kx \pm \omega t) \quad (34)$$

Como o vetor campo elétrico é perpendicular ao vetor campo magnético temos que a propagação da onda eletromagnética na direção do vetor de Poynting dado pela equação (35).

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (35)$$

2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM MEIOS MATERIAIS

Conforme as ondas eletromagnéticas se propagam em um material dielétricos as ondas perdem energia durante sua propagação devido à condutividade desse meio. Segundo o (SADIKU, 2012) um dielétrico com perdas é um meio parcialmente condutor (dielétrico imperfeito ou condutor imperfeito) no qual sua $\sigma \neq 0$ ao contrário de um dielétrico sem perdas (dielétrico perfeito) onde $\sigma = 0$. Em um meio dielétrico com perdas, linear, isotrópico e homogêneo que está livre de cargas $\rho_v = 0$, assumindo o fator $e^{j\omega t}$ as equações de Maxwell podem ser escritas em formas harmônicas no tempo:

$$\nabla \cdot E_s = 0 \quad (36)$$

$$\nabla \cdot H_s = 0 \quad (37)$$

$$\nabla \times E_s = -j\omega\mu H_s \quad (38)$$

$$\nabla \times H_s = (\sigma + j\omega\epsilon)E_s \quad (39)$$

Determinando o rotacional de ambos os lados da equação (38) temos:

$$\nabla \times \nabla \times E_s = -j\omega\mu\nabla H_s \quad (40)$$

Aplicando a identidade vetorial utilizando na equação (39) fazendo algumas simplificações obtemos:

$$-\nabla^2 E_s = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)E_s \quad (41)$$

ou

$$\nabla^2 E_s - \gamma^2 E_s = 0 \quad (42)$$

onde

$$\gamma^2 = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \quad (43)$$

γ é chamado de constante de propagação do meio. Por meio de um procedimento similar pode ser mostrado que, para o campo H:

$$\nabla^2 H_s - \gamma^2 H_s = 0 \quad (44)$$

As equações (42) e (44) são conhecidas como equações vetoriais Homogêneas de Helmholtz, como γ e uma quantidade complexa podemos fazer:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (45)$$

α e β são obtidos da seguinte forma:

$$-Re\gamma^2 = \beta^2 - \alpha^2 = \omega^2\mu\epsilon \quad (46)$$

$$\gamma^2 = \beta^2 + \alpha^2 = \omega^2\mu\epsilon \quad (47)$$

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right]^2} - 1} \quad (48)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right]^2} + 1} \quad (49)$$

Assumindo que a onda se propaga ao longo de z e tem somente componente x.

$$-\nabla\gamma^2 E_x(z) = 0 \quad (50)$$

$$\frac{\partial^2 E_x(z)}{\partial z^2} - \gamma^2 E_x(z) = 0 \quad (51)$$

Resolvendo a equação diferencial temos:

$$E_x(z) = E_1 e^{-\gamma z} + E_2 e^{\gamma z} \quad (52)$$

Onde E_1 e E_2 são constantes, como o campo E_2 e finito no infinito ele tende a ser zero.

$$E(z, t) = E_1 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (53)$$

O campo $H(z, t)$ e obtido por um procedimento similar.

$$H(z, t) = H_1 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \Theta) \quad (54)$$

onde

$$H_1 = \frac{E_1}{\eta} \quad (55)$$

η é uma quantidade complexa conhecida como impedância intrínseca.

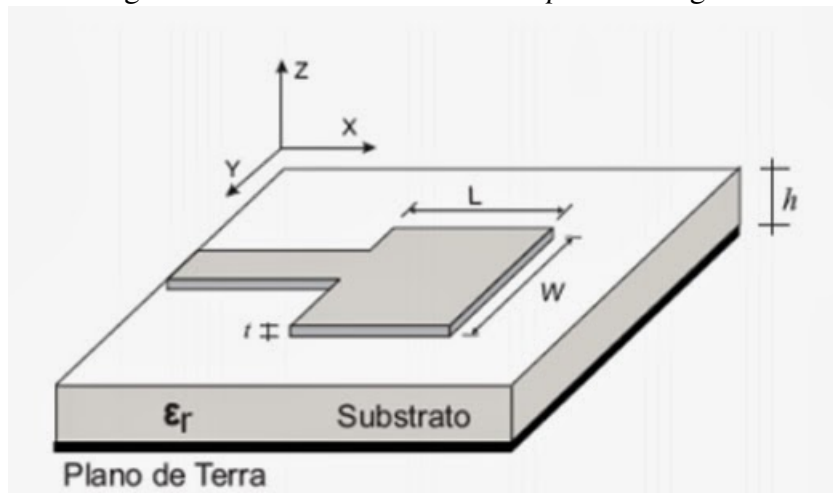
$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (56)$$

$$\tan 2\theta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad (57)$$

3 ANTENAS DE MICROFITA

As antenas de microfita em sua forma mais simples são compostas por uma camada dielétrica que pode ser composta por substratos dielétricos pode ser constituída por materiais dielétrico isotrópicos e por dielétricos anisotrópicos, elas também são compostas por um plano de terra e por um *patch*. O *patch* pode ter várias geometrias como: circular, retangular, elíptica, triangular, entre outras, a geometria do *patch* e definida com forme a característica que se deseja obter Balanis (2005).

Figura 1: Antena de microfita com *patch* retangular



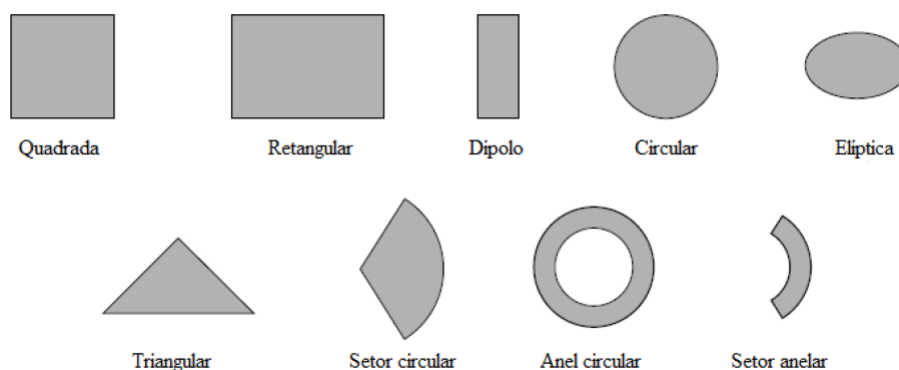
Fonte: Balanis (2005)

A constante dielétrica é um parâmetro importante, pois ele está relacionado diretamente com a frequência de ressonância da antena e também influencia no tamanho e na largura de banda da antena de microfita. Os substratos com baixa permissividade conduzem maiores potencias irradiadas, maiores larguras de banda, permitindo um aumento no tamanho da antena porem adquirem excitações de ondas e radiações indesejadas, substratos com permissividade alta terão uma baixa eficiência e uma largura de banda estreita, porém pode ser obtida uma antena de tamanho menor Silveira (2016). A forma do *patch* influencia na distribuição de corrente e na distribuição de campo na superfície da antena, através da distribuição de campo entre o *patch* e o plano de terra pode ser determinado a radiação da antena e a distribuição de corrente na superfície do *patch* Lavor (2015). Algumas geometrias utilizadas são mostradas na Figura 2. As geometrias são escolhidas de acordo com a necessidade, pois as antenas são adaptadas a superfície dos objetos, elas são projetadas de forma que não interfiram na aerodinâmica de equipamento como foguetes e satélites, também são projeta para aparelhos como celulares tablets e microcomputadores, pois são fáceis de serem adaptadas a suas respectivas geometrias. O elemento irradiante da antena e *patch* de espessura t sendo $t \ll \lambda$.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (58)$$

c e a velocidade da luz no vácuo dado em metros por segundo f e frequência dada em hertz, λ é o comprimento de onda guiado pela estrutura de microfita, o plano terra e o *patch* são espaçados por um substrato dielétrico de altura h com $h \ll \lambda$ onde o substrato fica acima de um plano de terra t com $t \ll h$.

Figura 2: Geometrias utilizadas em *patch* de antenas de microfita



Fonte: Balanis (2005)

As antenas de microfita possuem muitas vantagens quando comparadas antenas convencionais, vantagens de usar equipamentos que possuem antenas de microfita são: baixo peso e pouco volume, simplicidade para confecção com a tecnologia de circuitos impressos, facilidade de integração com outros dispositivos, pequenas dimensões, possibilidade de polarização linear ou circular. Entretanto esses dispositivos também possuem desvantagem ao ser comparados com as antenas convencionais como: largura de banda estreita, baixa eficiência, baixa capacidade de potência, complexas estruturas de alimentação para antenas de alto desempenho, radiações indesejadas na estrutura da antena Lavor (2015).

3.1 SUBSTRATO PARA ANTENA DE MICROFITA

Os substratos mais utilizados são o de constantes dielétricas mais baixas para melhoria do desempenho da antena pois esses materiais possibilitam maior largura de banda e eficiência, os substratos dielétricos mais utilizados são os que tem a constante dielétrica entre $2,2 \leq \epsilon \leq 12$. A Tabela 1 mostra alguns materiais e suas propriedades dielétricas. O processo de escolha do substrato é feito de acordo com as características que se deseja obter da antena como: frequência de ressonância e larguras de bandas específicas. Existem substratos com as seguintes características: anisotrópicos, isotrópicos, materiais PBG (*Photonic Bandgap*), MTF (*Multi frame Joiner*) e outros. Substratos anisotrópicos: são materiais que o comportamento do campo elétrico aplicado depende da direção do campo ou pelos eixos do material que depende da estrutura cristalina do material. Substratos isotrópicos: são materiais que o comportamento do campo elétrico não depende da direção do campo. Materiais PBG(*Photonic Bandgap*): e uma

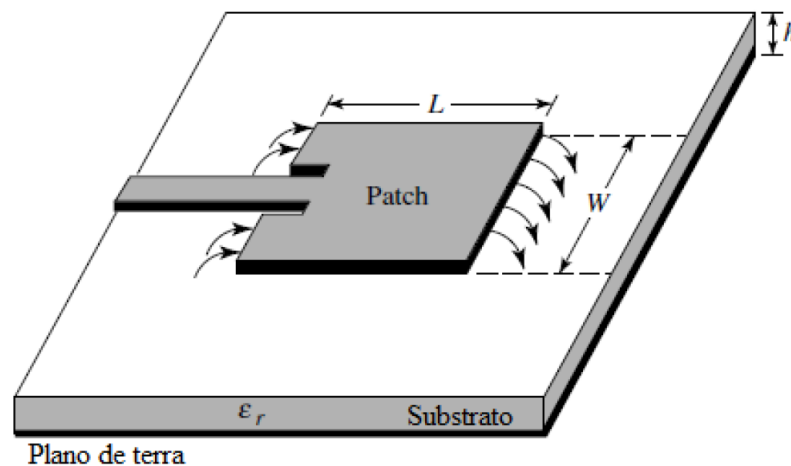
estrutura periódica onde a propagação de ondas em certas frequências são proibidas. MTF (*Multi frame Joiner*): substrato moderno desenvolvido com a tecnologia de filme fino.

Tabela 1: Materiais e suas Constantes Dielétricas

Materiais	Constantes (ϵ_r)
Ar	1,0
Alumina	9,2
Ferrite	12,0
FR4	4,4
Silica fundida	3,8

As antenas de microfita podem ser alimentadas de muitas maneiras diferentes existem técnicas de alimentação como: alimentação por linhas de microfita, por cabo coaxial, por linha de ondas coplanar, acoplamento por proximidade, acoplamento por abertura. Na alimentação por linha de microfita uma fita com largura menor que a largura do *patch* é conectada a extremidade do elemento radiador, na região interior o *patch* e modelado como uma linha de transmissão. A vantagem de usar essa técnica é que pode ser facilmente implementada no substrato durante a construção da antena, a Figura 2 mostra como é feito esse tipo de alimentação.

Figura 3: Alimentação Por linha de Microfita



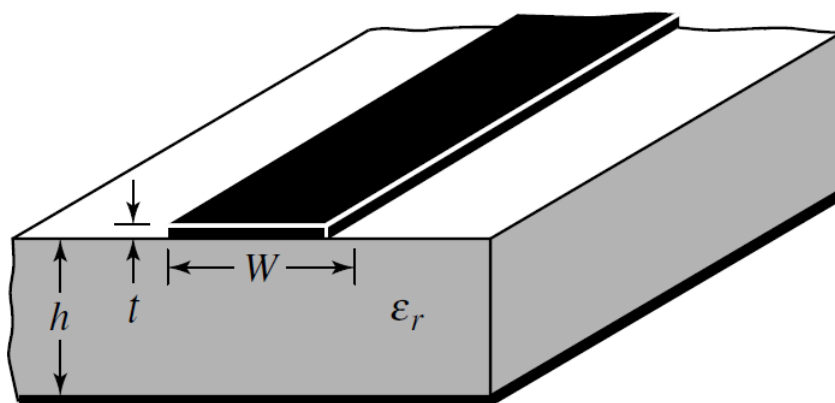
Fonte: Balanis (2005)

3.2 MÉTODO DE ANÁLISE

Existem muitos métodos de análise para as antenas de microfita, os modelos mais utilizados são os da linha de transmissão, cavidade e o da onda completa que inclui principalmente as equações integrais e o método dos momentos. Desses métodos o que vai ser abordado nesse trabalho é o método da linha de transmissão pois produz resultados satisfatórios nas análises de antenas de microfita com *patch* retangular. As linhas de transmissão são usadas para transmitir

sinais elétricos e energias de um ponto para outro, esse modelo é o mais simples para análises. O modelo da linha de transmissão representa a antena de microfita por dois slots separados por uma linha de transmissão, que possui comprimento L e tem baixa impedância Z . Como o comprimento da linha de transmissão é finito, os campos nas bordas não são uniformes e sofrem uma pequena distorção, isso deve ser levado em conta por influenciar na ressonância e na frequência da antena, na Figura 4 é mostrado o modelo da linha de microfita.

Figura 4: Linha de Microfita

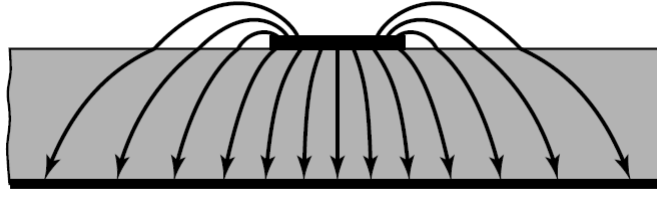


Fonte: Balanis (2005)

As linhas de campos que passam por dielétricos diferentes como o ar e substrato da antena de microfita, em sua maioria residem no substrato dielétrico de maior permissividade, em alguns substratos são introduzidos uma constante dielétrica efetiva por causas dos efeitos das franjas e das propagações de ondas na linha, na figura (5) são mostradas linhas de campos típicas.

Para uma linha com ar acima do substrato, a constante dielétrica efetiva tem valores na faixa de $1 < \epsilon_{ref} < \epsilon_r$, para a maioria aplicações onde a constante dielétrica do substrato é muito maior que ϵ_{ref} , o valor de ϵ_{ref} será mais próximo do valor da constante dielétrica real ϵ_r do substrato. A constante dielétrica efetiva também é uma função da frequência, à medida que a frequência de operação aumenta a linha microfita se comporta mais como uma linha homogênea de um dielétrico, enquanto a constante dielétrica efetiva se aproxima do valor da constante dielétrica do substrato Balanis (2005).

Figura 5: Linhas de Campos



Fonte: Balanis (2005)

Para baixas frequências, a constante dielétrica efetiva é essencialmente constante. Os valores iniciais em baixas frequências da constante dielétrica efetiva podem ser calculados pela equação (59).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (59)$$

Supondo uma frequência f_r é possível determinar o comprimento L e a largura W do *patch* da antena através das equações (60) e (61), ΔL é a relação aproximada para a extensão normalizada do comprimento, que pode ser obtido da equação (62) sendo h a espessura do material.

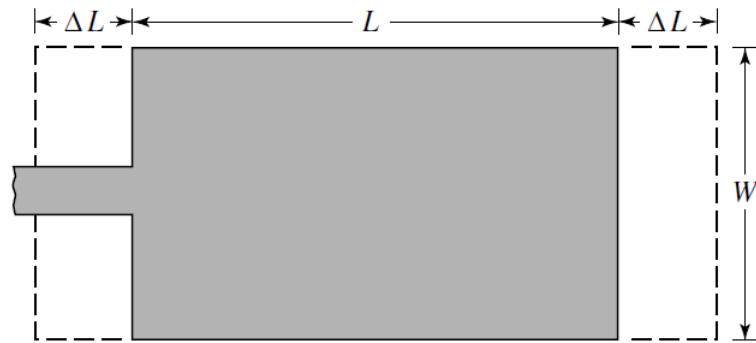
$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} - 2\Delta L \quad (60)$$

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (61)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (62)$$

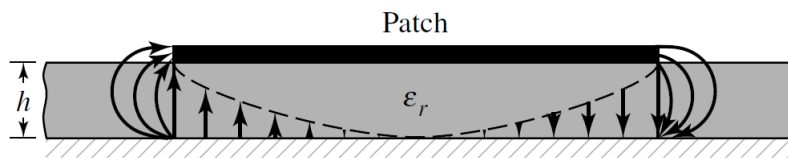
A Figura 6 mostram como fica as dimensões da antena vista do topo, essas dimensões são calculadas através das equações (60) e (61), a Figura 7 mostra a vista lateral da antena onde é possível notar a espessura do material que é composto o dielétrico da antena.

Figura 6: Vista do Topo da Antena



Fonte: Balanis (2005)

Figura 7: Vista lateral da antena



Fonte: Balanis (2005)

Como ΔL estendeu o comprimento L agora comprimento efetivo é dado pela equação (62).

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (63)$$

A frequência de ressonância é dada pela equação (64), como a equação (64) não leva em conta os efeitos de bordas ela tem que ser reescrita para que esses efeitos entrem nos cálculos.

$$(f_r)_{010} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (64)$$

$$(f_{rc}) = q(f_r)_{010} = q \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (65)$$

O fator q é fator de redução de comprimento, como o substrato aumenta a altura, os efeitos de bordas também aumentam.

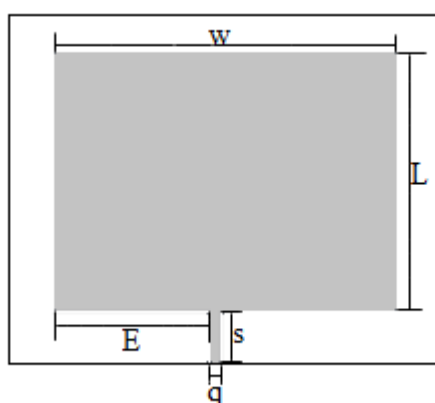
4 RESULTADOS

Os materiais usados para as antenas foram o Ferrite e o FR4, esses materiais possuem uma diferença grande entre suas permissividades e permeabilidades, facilitando nas análises dos campos. A geometria padrão adotada para esse estudo foi o *patch* retangular e seu tamanho varia com a permissividade relativa do material do substrato, o tamanho do plano de terra e da linha de alimentação foram ajustados através de simulações.

4.1 PROJETO DAS ANTENAS

O material mais comum para fabricação da placa de circuito impresso dupla face é o FR4, com maior desempenho e longa vida útil. Outra característica positiva é o excelente custo-benefício da placa FR4, é alinhar um baixo valor de compra com alta performance. Uma vantagem é que as placas podem ser produzidas de acordo com o tipo de aplicação, tornando a sua aplicação muito versátil. Muito usado na eletrônica, as placas podem ser feitas com algumas camadas dependendo da aplicação que se deseja, elas são feitas com fibra de vidro tecido e coberto com epóxi. É um material rígido forte, sendo resistente à fissuração devido à flexão e à pressão e suporta uma temperatura de 120 graus centígrados. A placa de circuito impresso dupla face é utilizada nos mais diversos segmentos da indústria, sendo necessário o uso de tecnologia eletrônica nas seguintes áreas: informática, telecomunicações, automotivo, médico-hospitalar, aéreo especial, entre muitas outras.

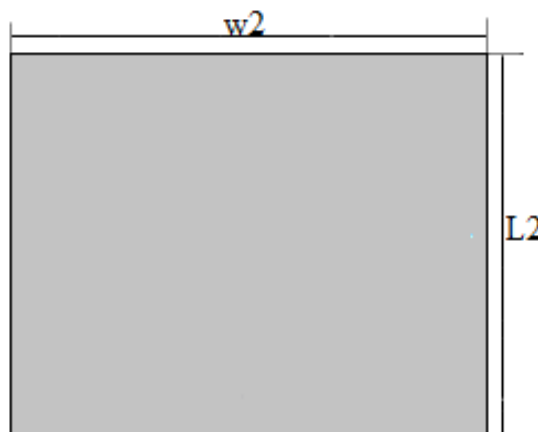
Figura 8: *Patch* da Antena



Fonte: Próprio Autor

O *patch* da antena Figura 8 é feito de cobre e possui as seguintes dimensões $W=69\text{mm}$ e $L=52\text{ mm}$ sendo sua espessura igual a 0.05 mm , já a linha de alimentação possui as seguintes dimensões $q = 2.5\text{mm}$ de largura e $s = 10.5\text{mm}$ de comprimento, com sua espessura $0,05\text{ mm}$ e sendo $E = 31.3\text{ mm}$. Os cálculos das dimensões da antena foram feitos numericamente usando o Scilab.

Figura 9: Plano de Terra



Fonte: Próprio Autor

O plano de terra Figura 9, possui as seguintes dimensões $w_2 = 86$ mm e $L_2 = 70$ mm sendo sua espessura de 0,05 mm, Entre o *patch* e plano de terra existe uma espessura de 1,58 mm. O tamanho do plano terra foi obtido a partir de simulações onde seus parâmetros foram sendo ajustados de acordo com desempenho da antena, nas frequências desejadas esse tamanho de plano de terra foi o que teve melhor desempenho. Os dados das dimensões das antenas encontram-se na Tabela 2.

Os Ferrite são uma classe de materiais compostos, constituídos por ferro oxidado e outros metais em um estado cerâmico quebradiço. Eles são policristalinos, o que significa que são compostos de grandes quantidades de cristais, e exibem fortes propriedades magnéticas. Uma utilização comum para os Ferrite é na supressão de interferência eletromagnética e na interferência de rádio frequência em circuitos elétricos, onde muitas vezes são referidos como isolantes magnéticos, o Ferrite ideal por ter uma alta resistência magnética.

Existem duas categorias gerais para a composição de Ferrite. Os compostos moles de Ferrite, que são uma mistura de ferro e metais leves, tais como níquel, alumínio, ou manganês, onde eles são utilizados em transformadores elétricos e outros dispositivos que requerem a possibilidade de um campo magnético ser facilmente invertido. Os compostos rígidos de Ferrite são compostos de ferro e metais mais duros, tais como cobalto, bário, estrôncio entre outros. Os compostos de bário são utilizados como isolantes magnéticos e ímãs permanentes que normalmente são necessários em aplicações de consumo, tais como portas e travas magnéticas. O Ferrite por possuir uma permissividade maior que o FR4 possibilitou a redução do tamanho da antena para a faixa de frequência de 2.5GHz.

Os parâmetros do plano de terra foram obtidos através de simulações, seu tamanho foi ajustado para minimizar as perdas por correntes parasitas, esse é um parâmetro que influencia no desempenho da antena.

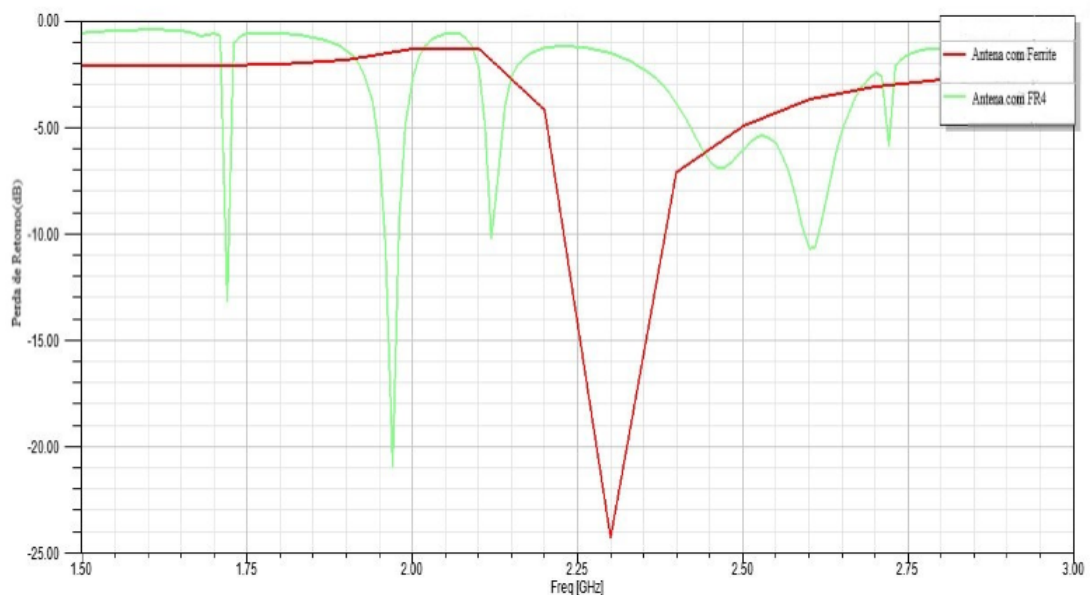
A antena com substrato FR4 em questão de tamanho é maior que a antena com Ferrite, suas faixas de funcionamento em GHz sem perda de retorno são 1.71 GHz; 1.96 GHz; 2.12 GHz

Tabela 2: Dimensões das Antenas

Dimensões em (mm)	Ferrita	FR4
Largura do <i>patch</i>	8	69
Comprimento do <i>patch</i>	8	52
Largura da linha de alimentação	0.24	2.5
Comprimento da linha de alimentação	2	10.5
Largura do plano de terra	16	86
Comprimento do plano de terra	12	70

e 2.58 GHz. Já a antena com Ferrite teve seu tamanho reduzido e funciona sem perda de retorno em todas as faixas entre 2.22GHz e 2.38GHz. Todos esses dados são mostrados no gráfico da figura 10, onde a curva em verde e função que descreve o ganho da antena de FR4 e a função em vermelho descreve o ganho da antena de Ferrite.

Figura 10: Perda de Retorno e Largura de Banda



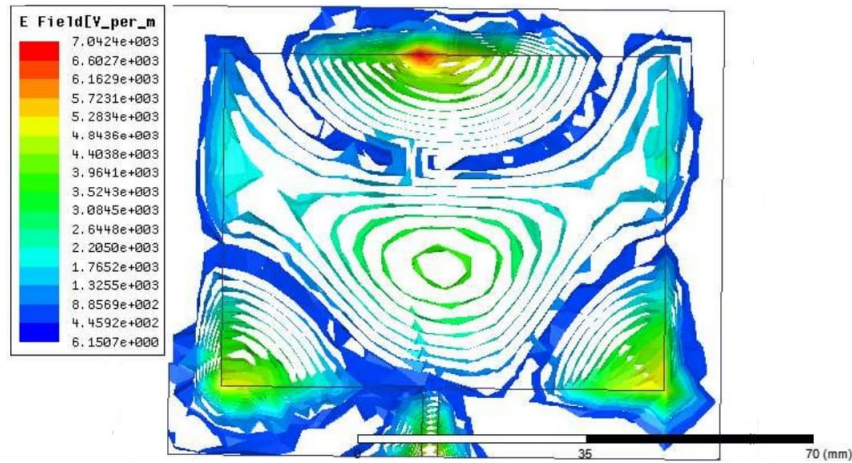
Fonte: Próprio Autor

4.2 CAMPOS NAS ANTENAS

As ondas eletromagnéticas que se propagam no material sofrem variações tanto na sua velocidade como no seu rotacional, sua propagação é sempre na direção onde o campo elétrico é perpendicular ao campo magnético. Em cada material as ondas propagam-se de maneiras específicas, que depende das propriedades dos materiais, nos substratos existem perdas de energia, que é um fator que influencia diretamente na emissão ou recepção de sinais elétricos.

As ondas eletromagnéticas sofrem variações em sua velocidade ao mudar de meio, dependendo do meio ela pode aumentar ou diminuir sua velocidade causando defasagem, sendo assim é importante analisar o comportamento dos campos nesse meio material, pois as perdas de retorno nos sinais emitidos são causadas devido a dielétricos não ideais.

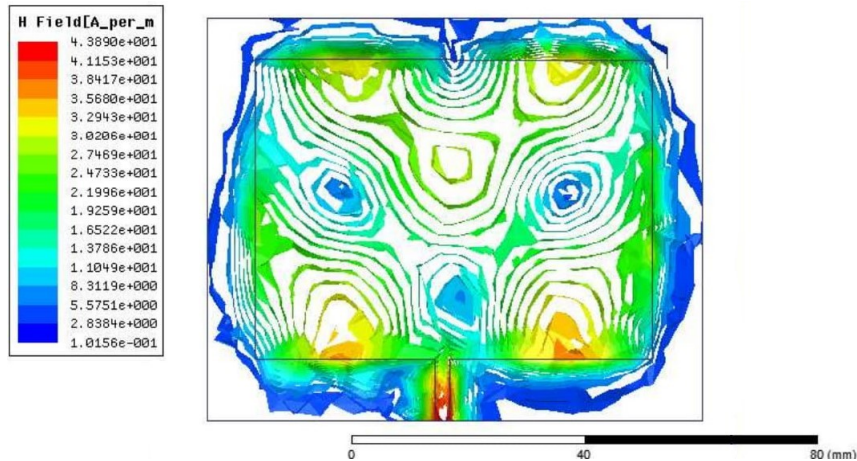
Figura 11: Campo Elétrico no Substrato FR4



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 11 temos a propagação do campo elétrico no substrato do FR4, onde sua maior parte de campo elétrico se retém nas bordas do *patch* e na linha de alimentação por microfita. Na figura 12 temos a representação do campo elétrico na forma vetorial, nota-se que o campo elétrico é divergente e varia de intensidade conforme vai se propagando no material.

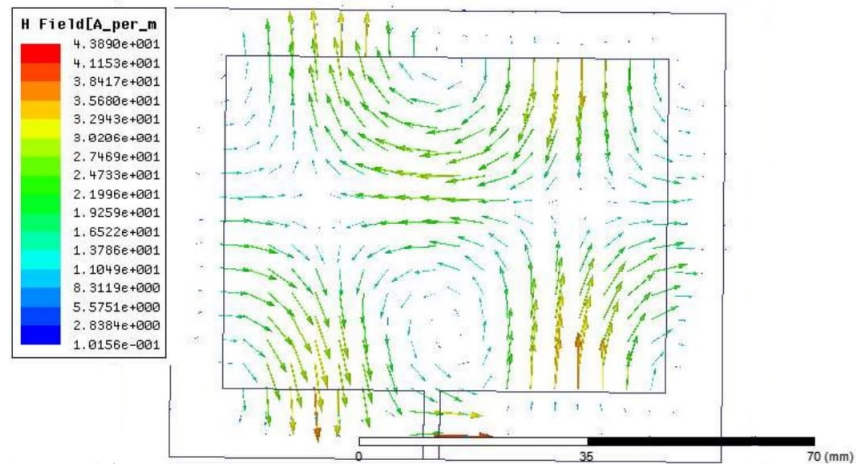
Figura 12: Campo Magnético no Substrato FR4



Fonte: Próprio Autor

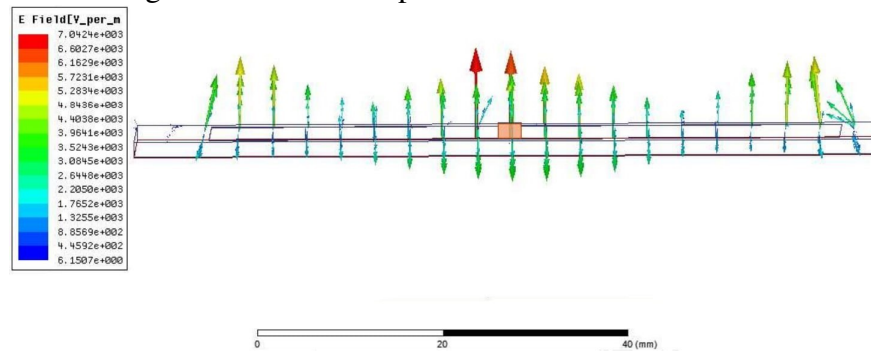
O campo magnético no substrato do FR4 Figura 13, se propaga de forma rotacional formando vórtices de campo magnético no material, o campo magnético se concentra na sua maior parte nas extremidades do *patch* e ao longo da linha de alimentação por microfita. Na Figura 14 temos o campo magnéticos na forma vetorial que indica a direção e o sentido do campo magnético. Os campos na antena de FR4 possuem uma variação de intensidade ao longo do substrato, no caso do campo elétrico sua amplitude máxima é de $7.0424 \cdot 10^4$ N/C e sua amplitude mínima é 6.1507 N/C, já o campo magnético possui amplitude máxima de $4,3890 \cdot 10^1$ T e uma amplitude mínima de $1,0156 \cdot 10^{-1}$ T.

Figura 13: Vetor Campo Magnético no Substrato FR4



Fonte: Próprio Autor

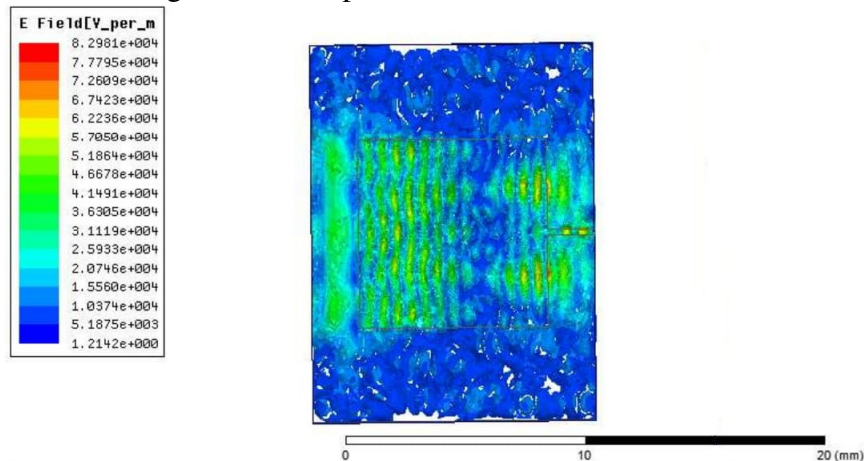
Figura 14: Vetor Campo Elétrico no Substrato FR4



Fonte: Próprio Autor

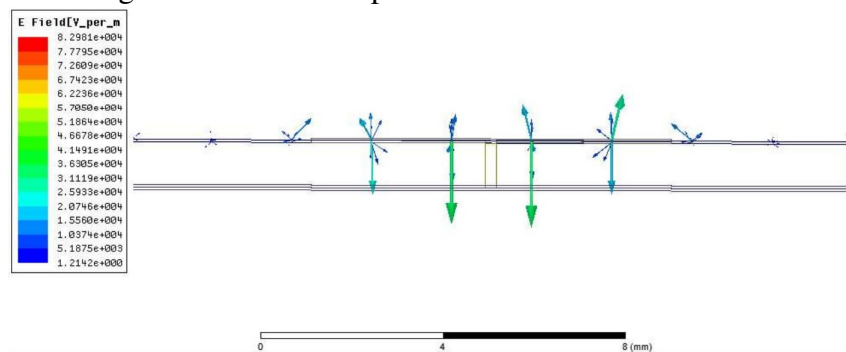
Como o Ferrite possui uma permissividade maior que a do FR4, o tamanho da antena foi reduzido, os campos elétricos e magnéticos propagam-se de maneira diferente no material Ferrite, nesse material existe uma redução na velocidade das ondas eletromagnéticas quando as ondas penetram no substrato.

Figura 15: Campo Elétrico no Substrato Ferrite



Fonte: Próprio Autor

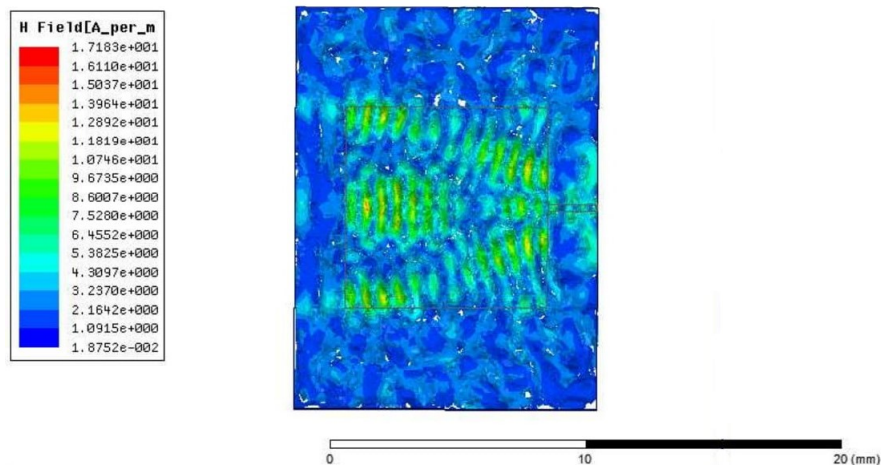
Figura 16: Vetor Campo Elétrico no Substrato Ferrite



Fonte: Próprio Autor

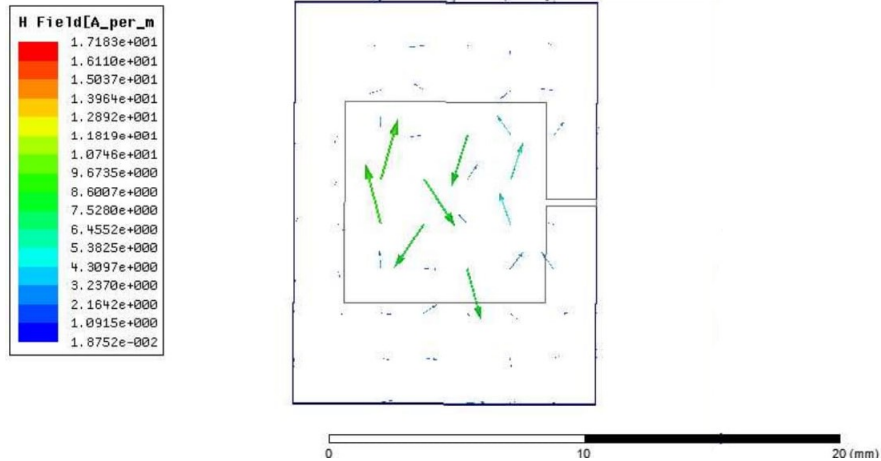
Na forma vetorial Figura 16, nota se claramente que o campo magnético se concentra no meio da antena de Ferrite, os campos na antena de Ferrite possuem uma variação de intensidade ao longo do substrato no caso do campo elétrico sua amplitude máxima de $8,2981 \cdot 10^4 N/C$ e sua amplitude mínima $1,2142 N/C$ no caso do campo magnético usa amplitude máxima é de $1,7183 \cdot 10^1 T$ e sua amplitude mínima e de $1,8752 \cdot 10^{-2} T$. O campo elétrico na Figura 15 está distribuído de maneira não uniforme no substrato e sua intensidade máxima fica próxima do *patch* e ao longo da alimentação de microfita. Na Figura 16 temos a representação do campo elétrico na forma vetorial, nota se que o vetor campo elétrico tem uma pequena inclinação quando está próximo às extremidades do *patch*. O campo magnético apresentado na Figura 17 está próximo ao *patch* da antena, o campo magnético está distribuído em todo material ferrimagnético que constitui a antena de microfita, na Figura 18 temos os vetores campo magnéticos que indica a direção e o sentido que o campo magnético está rotacionando.

Figura 17: Campo Magnético no Substrato Ferrite



Fonte: Próprio Autor

Figura 18: Vetor Campo Magnético no Substrato Ferrite



Fonte: Próprio Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após um levantamento teórico sobre antenas de microfitas neste trabalho foi apresentado um estudo de campos em materiais anisotrópicos em antenas de microfitas, bem como alguns resultados obtidos através de simulações de antenas com *patch* retangular, após um levantamento teórico a respeito das antenas de microfitas e seus arranjos, foi discutido a anisotropia dos materiais que são utilizados no substrato. O estudo concentrou-se no substrato dielétrico das antenas de microfitas e nas propagações das ondas eletromagnéticas, o estudo dos dielétricos imperfeitos mostrou que as ondas eletromagnéticas perdem parte de sua energia ao se propagar nesse tipo de material.

No caso das antenas, o material que são construídas influenciam diretamente na recepção e emissão de sinais de radiofrequência. Nas antenas de microfitas a maioria das perdas de retorno estão associadas a impedância intrínseca do material, essas impedâncias aparecem em materiais como os dielétricos com perdas que são materiais cuja condutividade não é diferente de zero, com as simulações notou-se que a antena com o material Ferrite teve um resultado bastante promissor pois o tamanho da antena foi reduzido, é muito útil poder fabricar antenas menores e mais compactas principalmente com os avanços tecnológicos nas telefonia móvel.

O método de análise por linha de transmissão utilizado nesse trabalho é eficaz na análise em antenas de formato retangular, todos os modelos de antenas funcionam em alguma faixa de frequência. As equações de Maxwell são bastante importantes nesse estudo de campos, pois além de serem uma ferramenta usada para descrever matematicamente certos fenômenos eletromagnéticos, possibilitam uma comparação de valores teórico com valores reais, para complementar esse trabalho pode ser construído os protótipos para comparar os valores reais com os valores simulados. Os valores obtidos através de simulações mostraram que o tamanho da antena é reduzido ao ser usado um material de com permissividade e permeabilidade maiores. A antena com o substrato de ferrita se mostrou um excelente casamento de impedâncias, sendo o melhor ganho da antena em -25 dB e com uma faixa estreita entre 2.22 GHz e 2.38 GHz.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, H. D. de. *Desenvolvimento de um Ressonador Retangular de Fenda com Múltiplas Camadas de Substrato e com Utilização de Material PBG para Sistema de Comunicação Sem Fio*. Tese (Doutorado – Engenharia Elétrica e da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013.
- ARAUJO, J. B. O. de. Desenvolvimento de antenas de microfitas de padrão elíptico e retangular em 28 GHz aplicadas ao 5G. *SBRT*, ACM, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2017.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory*. 3. ed. [S.l.]: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005. ISBN 978-0471667827,047166782X.
- DMITRIEV, K. Q. da Costa e V. Análise de antenas de microfitas acopladas eletromagneticamente a espiras retangulares. p. 1–5, 2006.
- FREITAS, J. V. de. Análise da influência do ressonador quadrado em antenas de microfitas com plano de terra truncado. p. 1–2, 2018.
- JUNIO, D. C. lacerda Aluisio Cersa dos santos. *Projeto e construção de antenas de microfitas para sistema movel celular*. 64 p. Tese (projeto de final de graduação – em Engenharia Eletrica) — Universidade de Brasília, 2008.
- LAVOR, O. P. *Bi Anisotropia em Antenas de Microfitas Retangulares e Estruturas Circulares Modificadas*. Tese (Doutorado – em Engenharia Eletrica e da Computação) — Centro de Tecnologia, UFRN, 2015.
- RESNICK, H. . *Fundamentos de Fisica Eletromagnetismo*. 3. ed. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos Editor, 2016. ISBN 978-85-216-3208-5.
- SADIKU, M. N. *elementos de eletromagnetismo*. 5. ed. [S.l.]: bookman, 2012. ISBN 8540701502,047166782X.
- SILVA, J. L. da. Mestrado – Sistemas de comunicação e automação, *Estudo do comportamento de antenas de microfitas com substrato metamaterial*. 2015. 80 p.
- SILVEIRA, R. V. L. da. Um estudo teorico sobre o uso das antenas de microfitas. *IIICONEDU*, ACM, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2016.
- SOUZA, P. V. B. D. de. *Modelagem e Simulação de Meio Metamateriais com Permissividade elétrica e Permeabilidade Magnética Próximas de Zero*. Graduação – Engenharia Elétrica — Universidade de São Paulo, 2011.
- ZAIDI, A. et al. Design and optimization of an inset fed circular microstrip patch antenna using dgs structure for applications in the millimeter wave band. In: *2016 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 99–103.