

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Thiago dos Santos Mota

PROJETO DE *PROBE* RF UTILIZANDO TECNOLOGIA PLANAR

Palmas – TO

2019

Thiago dos Santos Mota

PROJETO DE *PROBE* RF UTILIZANDO TECNOLOGIA PLANAR

Projeto de Graduação II submetido ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins, como parte do requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Xavier de Araújo.

Palmas – TO

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M917p Mota, Thiago dos Santos .
PROJETO DE PROBE DE RF UTILIZANDO TECNOLOGIA PLANAR /
Thiago dos Santos Mota. – Palmas, TO, 2019.
52 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Humberto Xavier de Araújo

1. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA. 2. ANTENAS
PLANARES. 3. ELETROMAGNETISMO. 4. INTERFERÊNCIAS. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

Thiago dos Santos Mota

PROJETO DE *PROBE* RF UTILIZANDO TECNOLOGIA PLANAR

Projeto de Graduação II submetido ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins, como parte do requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e avaliado pela seguinte banca avaliadora.

Data de Aprovação 10 / 04 / 2019

Prof. Dr. Humberto Xavier de Araújo
Universidade Federal do Tocantins – UFT

Prof^a. Dr^a. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini
Universidade Federal do Tocantins – UFT

Prof. MSc. Eliel Poggi dos Santos
Universidade Federal do Tocantins – UFT

Palmas – TO

2019

Dedico este trabalho a todas as mentes brilhantes que dedicaram suas vidas à evolução humana e científica, especialmente a Carl Sagan que com sua filosofia e trabalho mostrou-me o caminho do conhecimento e do ceticismo.

“Para mim, é muito melhor compreender o Universo como ele realmente é do que persistir na ilusão, por mais satisfatória e reconfortante que seja.” – Carl Sagan.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais pelo apoio e dedicação dados em uma vida inteira.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Humberto Xavier que com seu vasto conhecimento pode me guiar pelos caminhos complexos e maravilhosos da engenharia.

Agradeço aos meus amigos pelo acolhimento nas horas de frustração e por me ajudarem a ter um senso melhor de humanidade.

Agradeço ao colegiado do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins por proporcionar ensino de qualidade para a formação de engenheiros capazes de fazer a diferença no mundo.

Agradeço à Universidade Federal do Tocantins por proporcionar ambiente e estrutura para a formação profissional de qualidade.

Agradeço ao PET Engenharia Elétrica UFT, à Empresa Júnior Tesla Engenharia, e à Propesq que proporcionou minhas Iniciações Científicas, por me darem oportunidade de contato com pesquisa e pesquisadores de qualidade para o meu desenvolvimento em pesquisas científicas e projetos de extensão.

Por fim, agradeço a todos os estudiosos que ao longo dos séculos compartilharam seu conhecimento para que a humanidade chegasse onde está. Sem eles a realização da tecnologia atual não seria possível e não seríamos nada mais que seres primitivos.

RESUMO

Com a evolução da tecnologia e seu domínio, surgem novas áreas e conseqüentemente novos problemas a serem resolvidos. Dessa forma, surgem normas das quais devem ser seguidas para que ocorra um funcionamento correto e seguro das áreas de atuação. A Compatibilidade Eletromagnética é a área de estudos que investiga a interação entre objetos em meio eletromagnético e os previne de interferir uns aos outros em seu funcionamento. Para a realização de alguns testes de compatibilidade eletromagnética é necessário o desenvolvimento de *Probes* projetados para atender determinadas tecnologias.

A tecnologia planar apresenta boas características para o desenvolvimento de *probes* em determinadas frequências com o auxílio da tecnologia metamaterial. Neste trabalho foi desenvolvido uma solução de projeto de *probe* utilizando tecnologia planar para a aplicação de testes de compatibilidade eletromagnética de baixo custo, podendo fazer assim com que empresas de tecnologia façam testes preliminares economizando recursos de reparos em projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Compatibilidade Eletromagnética; Antenas Planares; Metamateriais; Microeletrônica;

ABSTRACT

With the evolution of technology and its domain, new areas arise and consequently new problems to be solved. In this way, rules emerge that must be followed in order for a correct and safe operation of the operation areas to occur. Electromagnetic Compatibility is the area of study that investigates the interaction between objects in electromagnetic environment and prevents them from interfering with each other in their functioning. For the accomplishment of some tests of electromagnetic compatibility it is necessary the development of Probes designed to meet certain technologies.

The planar technology presents good characteristics for the development of probes in certain frequencies with the aid of metamaterial technology. In this work, a probe design solution using planar technology was developed for the application of low cost electromagnetic compatibility tests, thus enabling technology companies to perform preliminary tests, saving project repair resources.

KEYWORDS: Electromagnetic Compatibility; Planar Antennas; Metamaterials; Microelectronics;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de emissão (a) irradiada (b) e susceptibilidade.	14
Figura 2- Elementos e Formas de condução EMC.....	19
Figura 3- correntes de modo diferencial e comum;.....	20
Figura 4- decomposição da corrente total em correntes do modo comum e modo diferencial.	20
Figura 5- campos resultantes de correntes de modo comum e de modo diferencial.	21
Figura 6- exemplos de <i>probes</i> detectores de campo magnético (<i>H-Field Near-Field Probe</i>) .	23
Figura 7– Exemplo de antena planar;.....	24
Figura 8– Arranjo Dente-de-Leão;.....	25
Figura 9– Arranjo Cactus;.....	25
Figura 10- Estruturas metamateriais (a)SRR_ <i>Split Ring Ressonator</i> ; (b) CSRR_ <i>Complementary Split Ring Ressonator</i> ; (c) CLL_ <i>Capacitively Load Loop</i> ; (d) JCP_ <i>Jerusalem Cross Pair</i> ; (e)Fractal; (f)Tripolo; (g) Arranjo tripolar.....	26
Figura 11- Dimensões da célula unitária CLL.....	27
Figura 12– Geometria <i>Microstrip</i> de <i>Patch</i> Retangular.....	28
Figura 13– Geometria e Medidas do <i>Patch</i> da Antena Planar Base frente e verso, respectivamente;.....	31
Figura 14– Perdas por Retorno da Antena Planar Base.....	32
Figura 15– <i>Probe</i> com geometria <i>loop</i>	33
Figura 16– Perdas por Retorno do <i>Probe</i> com tecnologia <i>Loop</i>	33
Figura 17– Dimensões da Célula Metamaterial CLL para Operação em 1GHz.....	35
Figura 18– Dimensões e Geometria da Face Frontal do <i>LIBELULA</i>	37
Figura 19– Geometria da Face Posterior do <i>LIBELULA</i>	38
Figura 20– perdas por retorno do <i>Probe LIBELULA</i>	38
Figura 21 – <i>LIBELULA</i> Fabricada.....	39
Figura 22– <i>Probe Loop</i> e <i>LIBELULA</i> Fabricados.	40
Figura 23- MS4642A <i>Vector Network Analyzer 20GHz</i> da Anritsu.....	41
Figura 24– Testes do <i>LIBELULA</i> sendo realizados no <i>VNA</i>	41
Figura 25– gráfico de perdas por retorno gerados em tela do <i>VNA</i>	42
Figura 26– Resultados Sobrepostos de Simulação e Fabricação do <i>LIBELULA</i>	43
Figura 27– testes do <i>Probe Loop</i> no <i>VNA</i>	44

Figura 28- gráfico de perdas por retorno gerados em tela do VNA.45

LISTA DE ABREVIACOES

UFT	Universidade Federal do Tocantins
IEEE	Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
EMC	<i>Eletromagnetic Compatibility</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
CISPR	<i>Comit International Spcial des Perturbations Radio</i>
LISN	Rede de Estabilizao de Impedância de Linha
EMI	<i>Eletromagnetic Interference</i>
RF	Radiofrequência
DNG	<i>Double Negative</i>
SRR	<i>Split Ring Ressonator</i>
CSRR	<i>Complementary Split Ring Ressonator</i>
CLL	<i>Capacitively Load Loop</i>
JCP	<i>Jerusalem Cross Pair</i>
FR-4	<i>Fire Resistant - 4</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos Gerais	16
1.3	Objetivos Específicos	16
1.4	Metodologia	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Leis de Maxwell	17
2.2	Compatibilidade Eletromagnética	18
2.3	Interferências Eletromagnéticas.....	18
2.4	Emissões Irradiadas.	19
2.5	Correntes de Modo Comum e Diferencial.....	19
2.6	Normas EMC Para Emissões Irradiadas.....	22
2.7	<i>Probes</i> RF	22
2.8	Antenas Planares.....	24
2.9	Metamateriais	26
3.	PROJETO DO PROBE INSPIRADO EM METAMATERIAL.....	28
3.1	Projeto com Antena Planar	28
3.2	Célula Metamaterial.....	34
4.	RESULTADOS	37
4.1	<i>Probe</i> Projetado (<i>LIBELULA</i>)	37
4.2	Fabricação do <i>Probe</i>	39
5.	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

É evidente que com a evolução da tecnologia e com ela de seus componentes eletrônicos e microeletrônicos, exista a necessidade de desenvolvimento dos métodos de análise de qualidade dos mesmos, visto que nesse meio existe a probabilidade eminente, por consequência das leis da eletricidade e magnetismo, a possibilidade de interferências entre equipamentos. Sendo elas, interferências tanto irradiadas quanto conduzidas como comentam Montrose e Nakauchi (2004).

Segundo Rothwell (2018), diversos tipos de equipamentos elétricos e eletrônicos, estão sujeitos a emissões irradiadas ou conduzidas tanto sendo susceptíveis, quanto sendo emissores. Sendo assim, no caso da interferência irradiada, podendo atuar como antenas¹, emanando potência em frequências diversas e podendo afetar no funcionamento de outros equipamentos ao alcance da interferência, ou até mesmo o próprio equipamento fonte da irradiação indesejada.

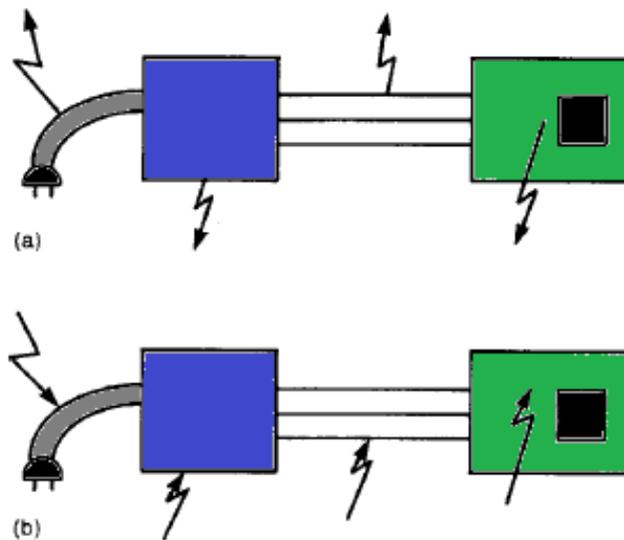
Os testes utilizados para determinar esses tipos de situações, são chamados testes de compatibilidade eletromagnética, ou EMC *tests*. Segundo Montrose e Nakauchi, existem diversos tipos de testes EMC que são aplicados nas tecnologias atuais, dos quais são necessários se entender a verdadeira teoria sobre compatibilidade eletromagnética para poder se aplicar os testes de forma eficaz nos equipamentos testados, tornando-se assim um campo bastante complexo para aplicação da engenharia.

Os testes podem ser aplicados a partir do momento em que o produto desenvolvido foi finalizado e devidamente integrado em sua aplicação, daí pode ser testado em normas EMC. Existem normas em diferentes partes do globo que regulamentam os testes de compatibilidade eletromagnética e determinam por exemplo suas faixas de frequências e seus métodos de procedimento, dentre essas normas, pode-se citar a FCC e CISPR, afirma Rothwell (2018).

A Figura 1 apresenta os diagramas de emissões e susceptibilidade irradiadas.

¹ Antena, que por definição do Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), é todo dispositivo capaz de se tornar um meio para irradiar ou estabelecer ondas de rádio

Figura 1 - Esquema de emissão (a) irradiada (b) e susceptibilidade.



Fonte: Adaptado de PAUL, 2006

Segundo Montrose e Nakauchi, para realizar os testes de EMC, foram desenvolvidos alguns métodos e podem ser citados a Rede de Estabilização de Impedância de Linha (LISN) para interferências conduzidas e as câmaras anecóicas para medições de interferências irradiadas.

Segundo Rothwell O LISN consiste em um filtro para medições de interferências conduzidas, nele são analisados diferentes tipos de anomalias elétricas, quando conectado a um analisador de espectro. Projetado de forma que quando ligado a um equipamento que funciona em frequência da rede elétrica, é capaz de não interferir na passagem da baixa frequência de operação (60Hz por exemplo) e conduz as altas frequências detectadas (ruído indesejado) para o analisador, e assim feito seu estudo.

Câmaras anecóicas são utilizadas em testes de compatibilidade eletromagnética em situações de emissões irradiadas, onde podem simular a situação de “campo aberto” ou seja, reduzem ao máximo as interferências eletromagnéticas externas para que seja analisado o espectro resultante da interação de ondas eletromagnéticas apenas com o objeto estudado. Geralmente são utilizadas antenas para emitir sinais direcionais ao objeto analisado e observado através de instrumentação adequada, os resultados do comportamento eletromagnético no ambiente, daí pode ser encontrado ou concluídas irregularidades no sistema, o que poderia inviabilizar sua aprovação em testes de qualidade.

A medida que a ciência evolui e descobre respostas sobre suas perguntas anteriores, surgem outras múltiplas perguntas no lugar, que podem ser interpretadas como problemas.

Tais problemas necessitam de soluções científicas e tecnológicas, as quais requerem novos desenvolvimentos de outras tecnologias. Com a evolução da eletrônica e microeletrônica no geral, observaram-se alguns problemas envolvidos e relacionados a esses dispositivos que resultaram em interferências tanto conduzidas quanto irradiadas. Esses fenômenos precisaram ser regulamentados e então desenvolvidas uma série de soluções para que o desempenho e qualidade de diversos equipamentos nesse meio não sofresse declínio. Equipamentos que trabalham como filtros por exemplo, são capazes de impedir interferências conduzidas, dentro de suas limitações, porém só podem ser aplicadas essas técnicas após a detecção de irregularidades no circuito. Para isso, são criadas as *Probes*. Afirmam Montrose e Nakauchi

As técnicas de medição tradicionais requerem instrumentação para detecção de rádio frequência (RF) por exemplo. *Probes* são transdutores que podem ser utilizados para realização de testes destas magnitudes. O transdutor ideal pode ser observado como o instrumento que consegue transferir o máximo de potência da fonte para o receptor de forma a entregar a maior confiabilidade de informações que o emissor produz na realidade.

Nesse contexto, esse trabalho apresenta a proposta de um *Probe* utilizando tecnologia planar e analisados suas características em relação a essa aplicação. Esse *Probe* projetado com a característica de arranjo planar, foi inspirado em estruturas metamateriais e pôde ser comparado ao *probe* tradicional obtendo assim resultados interessantes que tornam relevantes a aplicação da tecnologia planar para testes de compatibilidade eletromagnética.

1.1 Justificativa

Com a maior popularização da tecnologia sem fio e de componentes eletrônicos que trabalham em alta frequência, é imprescindível focar na qualidade do produto desenvolvido, visto que em grande parte, no mundo atual, estarão sujeitos a diversos tipos de interferências externas e até internas de sistemas elétricos e eletrônicos, as quais podem prejudicar fortemente seu funcionamento. A criação de maneiras mais eficientes através de instrumentação otimizada de realização dessas tarefas, as quais nem sempre são baratas e eficientes, traz à tona alguns dos benefícios de um bom projeto de EMC, que são a segurança que se tem com os equipamentos, a redução de despesas, principalmente com manutenção, o aumento da durabilidade do produto, consequentemente e a legalidade do mesmo.

1.2 Objetivos Gerais

Projetar e fabricar uma plataforma de baixo custo para testes de compatibilidade eletromagnética, utilizando tecnologia planar. Assim, diversificando as formas de medição de um modo ainda econômico, ajudando na qualidade do funcionamento de equipamentos elétricos.

1.3 Objetivos Específicos

Neste trabalho pretende-se desenvolver um protótipo de *Probe* para aplicação em radiofrequência que seja capaz de captar sinais em frequências que sejam regulamentadas pelas normas CISPR, utilizando tecnologia planar e seu comportamento com a aplicação de estruturas metamateriais semelhantes aos aplicados em tecnologia de antenas planares. Podendo assim acusar se um produto ou equipamento está nas conformidades das normas de compatibilidade eletromagnética para emissões irradiadas.

1.4 Metodologia

A simulação do protótipo será realizada com utilização do software CST STUDIO SUITE, software utilizado para o desenvolvimento de sistemas que utilizam interação com ondas eletromagnéticas e eletromagnetismo no geral, no caso deste trabalho, será focada a aplicação em sistemas de antenas planares e suas tecnologias. Serão utilizados cálculos para sistemas de *microstrip*, para sintonia em frequências específicas.

O protótipo foi construído através do método de fabricação de circuitos impresso, aos quais se utiliza chapas pré-fabricadas com os condutores e substratos específicos, após isso foram realizados testes de bancada utilizando analisador de rede do laboratório de micro-ondas e antenas do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins para a obtenção dos resultados experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Leis de Maxwell

Para que se possa ter um melhor entendimento dos fenômenos eletromagnéticos, inclusive de interferências, é necessário um breve embasamento teórico sobre teoria eletromagnética, começando pelas leis que regem o eletromagnetismo. As equações de Maxwell. Segundo Machado (2013), essas equações descritas na forma diferencial são:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (4)$$

Podem ser resumidas teoricamente como Lei de Gauss Elétrica, Lei de Gauss Magnética, Lei de Faraday e Lei de Ampere, respectivamente.

- A Lei de Gauss aborda basicamente que a existência de uma carga provoca com que exista fluxo de campo elétrico em direção divergente quando envolvido por uma superfície de um volume fictício (gaussiana).
- A Lei de Gauss Magnética, fala sobre a não existência até hoje de conhecimento humano sobre fluxo divergente de campo magnético, sendo o fluxo que sai de uma superfície volumétrica sendo igual ao que entra. Dessa forma não sendo descoberto até os dias atuais a existência de monopolo magnético.
- A Lei de Faraday mostra que o efeito de variação de fluxo magnético através do tempo, induz um campo elétrico de natureza rotacional, podendo assim gerar corrente em circuitos fechados.
- A Lei de Ampere aborda que a variação do fluxo de campo elétrico e consequentemente podendo ser de densidade de corrente, se torna fonte de campo magnético, que se propaga ortogonalmente ao sentido de propagação da densidade de corrente.

A variação contínua de fluxo de densidade de corrente por exemplo, pode gerar propagação de campo magnético variável que por sua vez gera campo elétrico. Dessa forma circuitos podem irradiar ondas eletromagnéticas que são entendíveis por análise das leis de Maxwell.

2.2 Compatibilidade Eletromagnética

Compatibilidade eletromagnética se dá pelo conceito de sistemas elétricos serem eletricamente compatíveis. E isso pode ser estudado com o cumprimento de alguns requisitos, segundo Suela (2016).

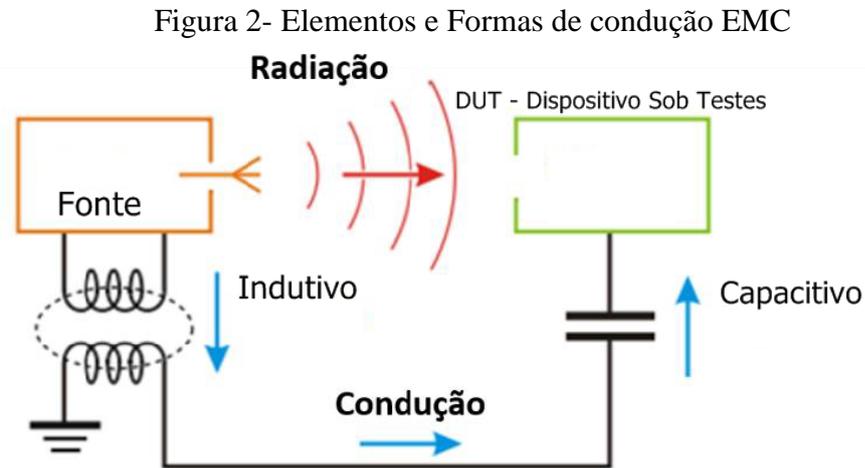
- O sistema não causar mau funcionamento em outros sistemas que estão suscetíveis a sua influência, ou seja, o equipamento não deve influenciar o resultado do outro.
- O sistema não pode ser suscetível a interferências internas não desejadas, causadas por outros sistemas emissores.
- O sistema não pode se autosabotar, isto é, ruídos causados por seu próprio funcionamento não podem influenciar em processos dentro dele mesmo.

Vale lembrar que sistema engloba todo tipo de objeto ou ser vivo que influencie fisicamente no resultado, portanto os parâmetros também devem se basear em limites que não afetem seres vivos. Assim, compatibilidade eletromagnética pode ser definida como a capacidade de um sistema operar em um sistema eletromagnético sem interferir e sem ser interferido.

2.3 Interferências Eletromagnéticas

A partir de análise deste estudo, segundo Suela (2016), fica evidente que a interferência eletromagnética se dá por meio de um emissor e um receptor. Desta forma, precisa-se de um gerador da Interferência Eletromagnética (EMI), de um objeto suscetível à interferência (receptor EMI) e de um meio viável para que a interferência possa se propagar e afetar o sistema susceptível. O meio de propagação pode se dividir em algumas formas, como emissões conduzidas, onde o sinal parasita se propaga por meio de condução de circuitos de alguma forma conectados e emissões irradiadas, onde o sinal parasita se propaga por meio de ondas eletromagnéticas que ultrapassam a blindagem do sistema emissor e afetam outro

sistema, também pode-se dar por acoplamentos capacitivos e indutivos, como mostrado no esquemático da Figura 2.



Fonte: Adaptado de FAIOSSANDER SUELA, 2016;

Interferências eletromagnéticas portanto, podem ser definidas como o a não funcionalidade correta de um sistema devido à sua susceptibilidade a interferências de ruídos eletromagnéticos provenientes de sistemas externos.

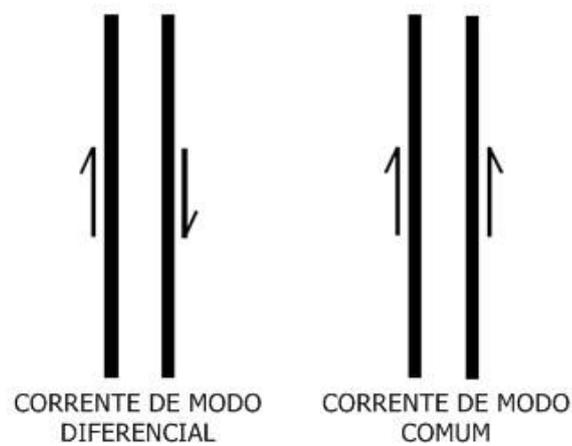
2.4 Emissões Irrradiadas.

Dispositivos eletrônicos podem gerar campos eletromagnéticos, que se propagam através de suas diversas estruturas. A maioria dessas propagações podem ser consideradas como não-intencionais, visto que não se deseja a emissão desse tipo de radiação; já radiadores intencionais podem também propagar radiações não-intencionais, em momentos por exemplo de emissão de frequências que não estão programadas nem planejadas a serem irradiadas. Daí se vem um estudo para entender de onde são originadas essas emissões irradiadas.

2.5 Correntes de Modo Comum e Diferencial.

Quando se fala em compatibilidade eletromagnética, é comum se falar em sinais de modo comum e diferencial, visto que são situações diferentes de interações entre condutores que causam reações diferentes. Para condutores que transportam correntes a frequências consideráveis em relação ao sistema de distribuição elétrica, pode-se obter os dois tipos de modos. Como mostrado na Figura 3.

Figura 3- correntes de modo diferencial e comum;



Fonte: Adaptado de EDWARD ROTHWELL, 2018.

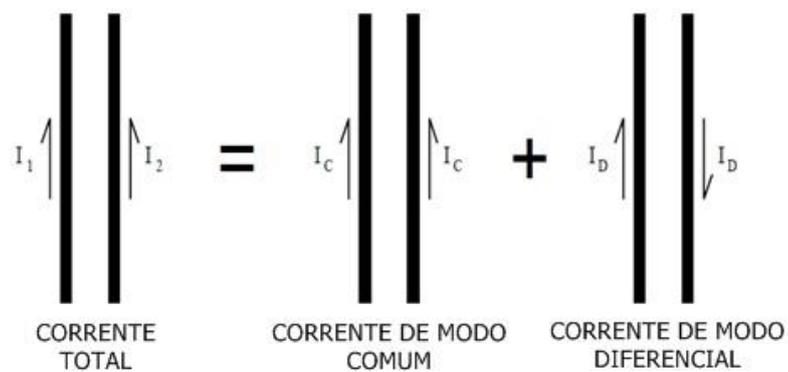
Dadas correntes arbitrárias em condutores paralelos, se as correntes estão em direções opostas são configuradas como correntes de modo diferencial. Se configuradas no mesmo sentido, são chamadas de correntes de modo comum. De forma que:

$$I_1 = I_C + I_D \quad (5)$$

$$I_2 = I_C - I_D \quad (6)$$

Dessa forma, as correntes presentes nos condutores paralelos são resultado de associações das correntes de modo comum e diferencial, como mostrado na Figura 4:

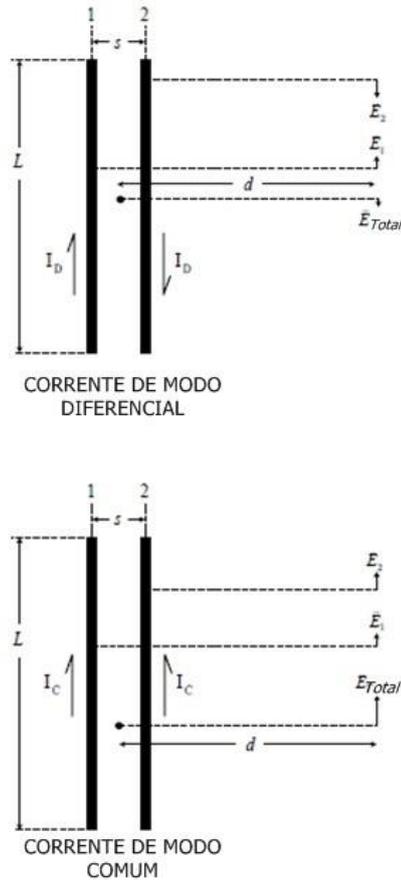
Figura 4- decomposição da corrente total em correntes do modo comum e modo diferencial.



Fonte: Adaptado de EDWARD ROTHWELL, 2018.

De forma que os campos resultantes desses dois tipos de interações de fato diferem entre si, como mostrado na Figura 5:

Figura 5- campos resultantes de correntes de modo comum e de modo diferencial.



Fonte: Adaptado de EDWARD ROTHWELL, 2018.

A Figura 5 mostra as interações entre campo elétrico no sistema de correntes de modo comum e de correntes de modo diferencial mostrando então que campos elétricos emitidos para uma dada distância, se subtraem para correntes de modo diferencial e se somam para correntes de modo comum.

Ao se utilizar teoria de arranjo de antenas para chegar a equações de campo máximo e fazendo as manipulações necessárias a partir de um modelo de interações mútuas, obtemos as seguintes expressões para:

Modelos de emissão para correntes de modo diferencial:

$$\vec{E} \text{ max} = 1,317 \cdot 10^{-14} f^2 \frac{L \cdot S}{r} |I_D| \quad (7)$$

Modelos de emissão para correntes de modo comum:

$$\vec{E} \max = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{f \cdot L \cdot |I_C|}{r} \quad (8)$$

Onde:

f = frequência de operação

r = raio do campo observado

Que mostram alguns parâmetros de projetos que podem ajudar na redução de emissões irradiadas não desejadas. Como reduzir a frequência e a corrente de operação do circuito pode ser difícil para a execução de um projeto, pode-se observar a partir das equações (7) e (8) que reduzindo L e S são estratégias viáveis para a redução de emissões.

2.6 Normas EMC Para Emissões Irradiadas

Como grande parte das áreas da engenharia, o estudo das normas de emissões irradiadas, são regidas por normas que determinam procedimentos de medição e segurança nessa área. A CISPR 16-1 por exemplo especifica alguns dos sistemas de medição para campos eletromagnéticos e testes de perturbação em radiofrequência. Essa norma limita o estudo de 9 kHz a 18 GHz. A norma CISPR tem sido adotada internacionalmente como a norma base.

2.7 Probes RF

De acordo com Montrose e Nakauchi, existem *probes* utilizados em detecção de campos elétricos e magnéticos, chamados de *Near-field* ou *closed-field probes* que são comumente utilizados no desenvolvimento de produtos para um diagnóstico prévio sobre emissões irradiadas que podem ocorrer, os três tipos básicos de *probes* para diagnóstico de EMI são chamados de:

- *H-Field Near-Field Probe* que precisam de um nível de tensão proporcional ao campo magnético observado. Este *probe* pode apontar circuitos fontes de emissão de radiofrequência. São usados geralmente para distâncias pequenas em relação a fonte de radiação e para lugares com áreas potencialmente problemáticas, também utilizados para interferências conduzidas.
- *E-Field Far-Field Probe* são estruturas muito sensíveis, capazes de verificar tipos de variação em radiação em baixa intensidade, utilizados muito em

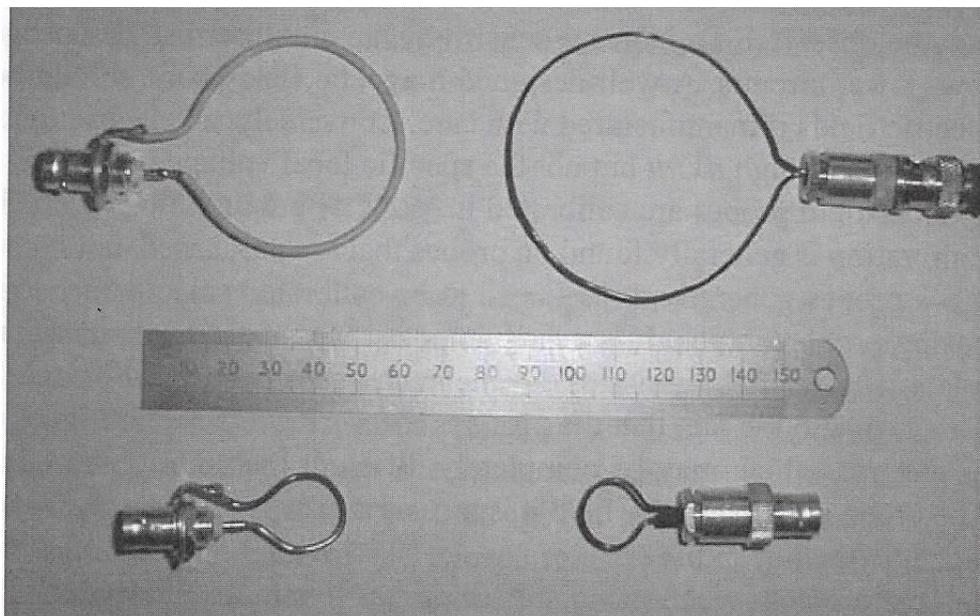
sistemas de captação para televisão e radiofrequência. Estes *probes* podem ser usados também para verificação de blindagem e efeitos de filtros instalados em cabos usados ainda para testes de certificação de produtos, devido sua sensibilidade.

- *High Impedance Probe* é um dispositivo de alta impedância que geralmente é utilizado com osciloscópio, pode impedir sobrecargas em circuitos. É do tipo de contato direto do metal que a compõe.

A maioria dos *probes* devem ser conectadas a cabos coaxiais com impedância de 50Ω por isso é comum que haja uma espécie de adaptação das *probes* para que sejam casadas todas na mesma impedância e isso pode ser feito de diversas formas, sendo uma delas muito comum, a solda de um resistor de 50Ω em série com o *probe*.

É comum que *probes* RF de fabricação caseira seja baseada em antenas *loop* por suas vantagens. As antenas *loop* são utilizadas como *probes H-Fields* por apresentar algumas características interessantes, como seu baixo custo de fabricação, por serem bastante diretivas o que facilita a identificação de problemas pontuais, porém são de baixa precisão para altas frequências e a utilização de mais de uma espira no *probe* causa efeitos capacitivos que diminuam ainda mais sua precisão, como mostra a Figura 6:

Figura 6- Exemplos de *probes* detectores de campo magnético (*H-Field Near-Field Probe*)



Fonte: MONTROSE e NAKAUCHI, 2004;

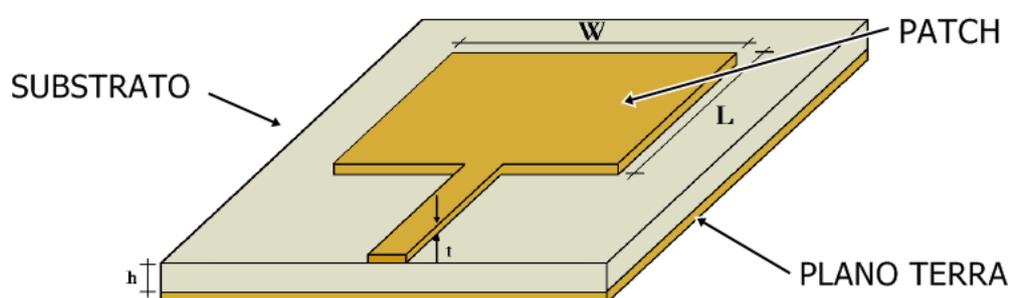
2.8 Antenas Planares

Com o avanço da tecnologia móvel, torna-se cada vez mais necessário a diminuição do tamanho dos aparelhos de comunicações, tendo em vista que são utilizadas em muito mais funções, exigindo antenas muito menores e muito mais potentes. Por isso tornou-se necessário o estudo da antena planar, ou antena *patch*, pois ela atende os requisitos por ser compacta e na maioria das vezes com pequenas alturas, assim ocupando pouquíssimo espaço em aparelhos e podendo atuar em altas frequências.

A antena de microfita como mostrada na Figura 7, é dividida em três partes principais as quais são chamadas de *patch*, substrato e plano terra. O *patch* é a parte superior da antena. No geral, as antenas de microfita são utilizadas para altas frequências e sua geometria e dimensões são os principais fatores para determinar em quais frequências a antena entrará em ressonância, ou seja, terá melhores coeficientes de irradiação, conseqüentemente conseguindo transmitir melhor informações.

Normalmente o *patch* e o plano terra são feitos de materiais condutores como o cobre (principalmente) e contém entre esses condutores, o substrato, o qual é composto de material dielétrico. Assim, a antena atua como um capacitor que é capaz de irradiar seu campo elétrico por suas bordas, favorecendo diferentes frequências de acordo com sua geometria.

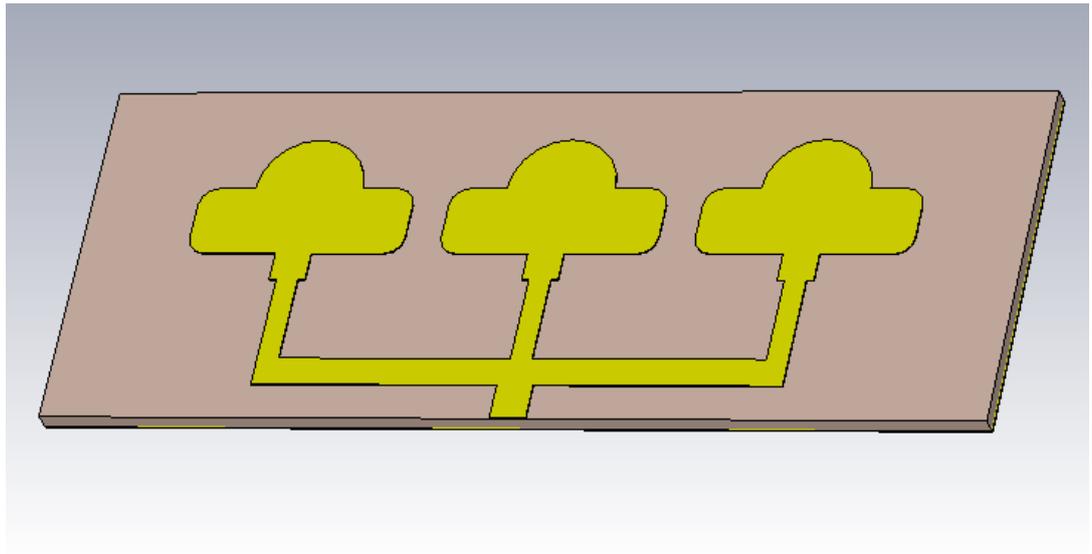
Figura 7– Exemplo de antena planar;



Fonte: adaptado de CAPOVILLA, 2004;

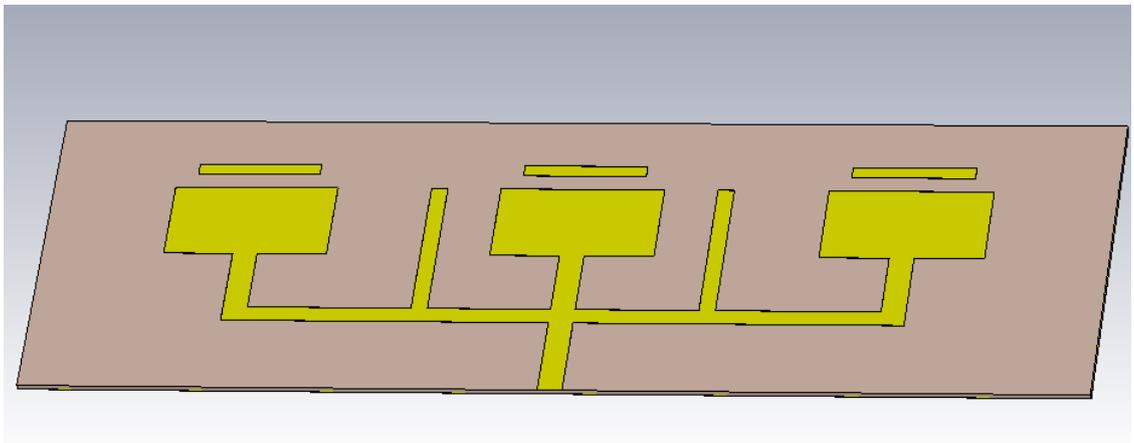
Como antenas de um elemento apenas, por muitas vezes sofrem problemas de baixa diretividade, surge a necessidade de se trabalhar com arranjos de antenas para obter melhores resultados. Esses arranjos podem estar organizados ao longo de um eixo (linear), ou de uma superfície plana (planar). As Figuras 8 e 9 mostram exemplos de arranjos.

Figura 8– Arranjo Dente-de-Leão;



Fonte: Autor.

Figura 9– Arranjo Cactus;



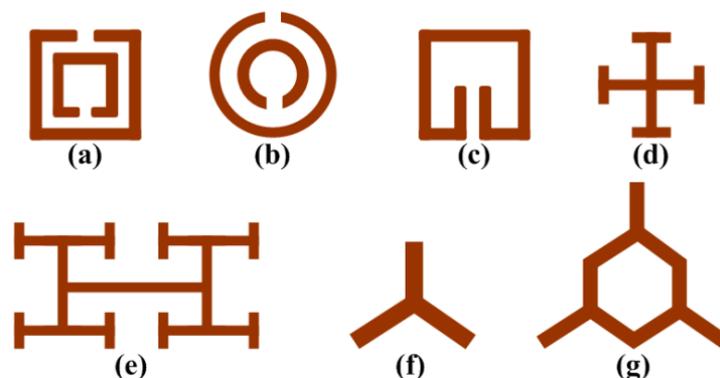
Fonte: Autor.

Analogamente o arranjo de antenas de microfita consiste em basicamente arranjar geometricamente os elementos da antena, componente do *patch*. Observa-se que é possível rearranjar em diferentes geometrias, para obter diferentes resultados, assim com a intenção de melhorar os resultados da antena simples, ou apenas tentar modificar alguma característica.

2.9 Metamateriais

De acordo com Guelber (2014), os metamateriais partem de um conceito de materiais artificiais, pois apresentam comportamentos que não são encontrados na natureza. Comportamento característico intrinsecamente pelos parâmetros de permeabilidade magnética (μ) e permissividade elétrica (ϵ), sendo os dois com valores negativos. A permeabilidade magnética e a permissividade elétrica definem as características elétricas dos materiais, determinando assim a resposta de um material quando exposto a uma radiação eletromagnética. Dessa forma, metamateriais se classificam como DNG (*double negative*) pelo valor negativo de suas duas características, o que possibilita comportamento eletromagnético incomum, podendo ser usados em várias aplicações e possibilitando novos resultados. Metamateriais aplicados em antenas podem ser arranjados de forma periódica, de forma que imite uma estrutura cristalina de um determinado material, assim, podendo fazer com que a onda eletromagnética tenha uma determinada reação construtiva ao entrar em contato com eles. Aplicando-os em antenas é possível modificar algumas respostas das mesmas, de forma a alterar suas perdas por retorno, pontos de ressonância, ganho e diretividade. Nesse meio de pesquisa, foram desenvolvidos uma série de tipos de metamateriais, os quais têm diferentes características e geometrias, as quais são apresentados na Figura 10.

Figura 10- Estruturas metamateriais (a)SRR_ *Split Ring Ressonator*; (b) CSRR_ *Complementary Split Ring Ressonator*; (c) CLL_ *Capacitively Load Loop*; (d) JCP_ *Jerusalem Cross Pair*; (e)Fractal; (f)Tripolo; (g) Arranjo tripolar



Fonte: GUELBER, 2014

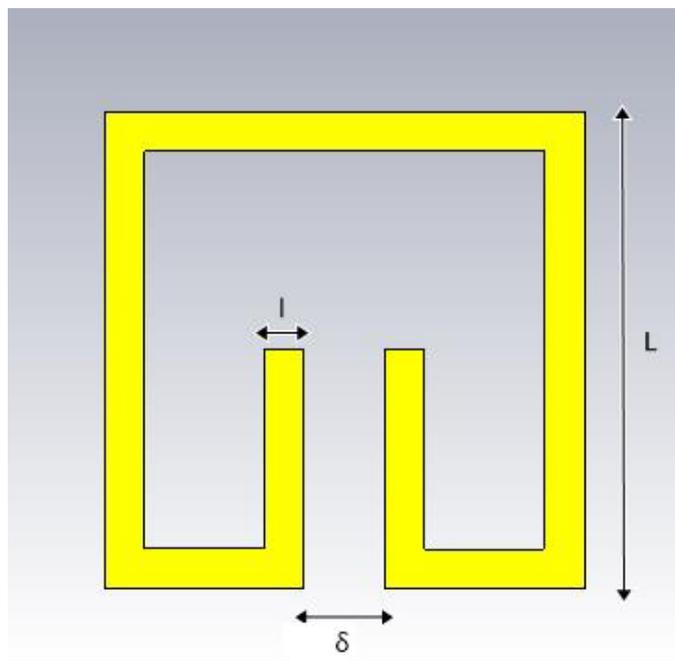
Para aplicação desses metamateriais é necessária uma periodicidade na distância entre os mesmos verticalmente e horizontalmente no *patch* da antena ou em seu plano terra. A

distância para alguns metamateriais pode ser calculada de acordo com a frequência de interesse. Ainda de acordo com Guelber, a célula metamaterial CLL pode ter suas dimensões e sua distância entre si calculada de acordo com a frequência que se queira trabalhar. Utilizando a Equação (9), pode-se obter as dimensões necessárias.

$$L = \frac{\lambda_0}{10}, \quad \delta = \frac{L}{6}, \quad l = \frac{1}{2}\delta \quad (9)$$

As dimensões cotadas são descritas na Figura 11:

Figura 11- Dimensões da célula unitária CLL.



Fonte: Autor.

A estrutura metamaterial CLL é uma simplificação da estrutura SRR, dependendo do seu posicionamento, ele pode se caracterizar como condutor elétrico ou condutor magnético. Quando a onda plana incide no lado da abertura da célula, a mesma age como um condutor magnético artificial, e quando incidida na parte superior, como condutor elétrico artificial.

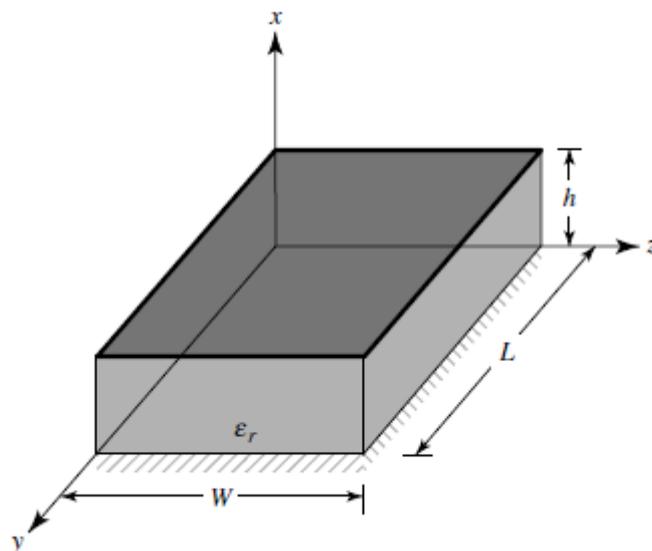
3. PROJETO DO PROBE INSPIRADO EM METAMATERIAL

3.1 Projeto com Antena Planar

Inicialmente para finalidades de projeto, pretendeu-se se basear em alguns parâmetros que estão disponíveis na literatura e que de alguma forma se encaixavam nos objetivos desse trabalho, utilizando tecnologias para projetos de antenas planares. Tais antenas que abordadas anteriormente, apresentam uma série de possibilidades de modelagem as quais se tornam bastante aplicáveis em nosso cotidiano. Tem-se uma extensa gama de possibilidades de projetos, os quais têm que se tornar aplicáveis à finalidade de trabalho. Desta forma foram analisadas algumas técnicas de projetos para que se chegasse a um resultado otimizado, que serão abordados.

Para se obter um projeto de antena planar base, precisa-se utilizar algumas equações que já são bem consolidadas nessa ciência, que se baseia na geometria retangular desse tipo de tecnologia demonstrada segundo Balanis (1997) essa antena pode ser calculada de acordo com alguns parâmetros que envolvem dimensões primárias, como frequência em que se pretende operar e espessura do substrato da mesma assim como o tipo do substrato. Como mostrado na Figura 12:

Figura 12– Geometria *Microstrip* de *Patch* Retangular



Fonte: BALANIS (1997)

A antena planar retangular depende de dimensões como o comprimento e largura do *patch*, o comprimento e largura do substrato e do plano terra. Após o projeto dessa antena, teve que se observar que as dimensões da mesma dependiam da espessura do substrato que desta vez foi fixado em aproximadamente 1,5mm, pelo fato de maior facilidade de obtenção e manuseamento da estrutura dessa espessura para possível futura fabricação, tendo assim a possibilidade de desenvolver trilhas na placa mais largas que também facilitariam a fabricação do dispositivo sem ajuda de tecnologia de ponta para dimensões micrométricas, visto que o objetivo do *probe* deve ser aplicado a um teste de baixíssimo custo. Optou-se por utilizar o substrato composto pelo material FR-4, visto que o mesmo é de uso comum nesta tecnologia e apresenta uma facilidade de se encontrar. Tendo em vista essas circunstâncias, foi possível realizar o projeto da antena base.

Para se obter as dimensões de comprimento L , da estrutura planar a partir da frequência de operação (1GHz), tem-se:

$$(f_r)_{010} = \frac{V_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

Onde, V_0 é tido como a velocidade da luz no vácuo. E ao ponto que se descobre a velocidade no meio (dielétrico escolhido), que se é encontrada com a equação:

$$\frac{V_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (11)$$

Onde:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (12)$$

É-se sabido que ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo e, ϵ_r , a permissividade relativa do material que para o substrato FR-4 tem o valor constante de 4,3.

Portanto:

$$L \cong 72mm$$

Para se saber o valor dessa dimensão do substrato, tem-se que:

$$w = \frac{V_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (13)$$

Sendo assim:

$$w \cong 92mm$$

Para encontrar ΔL , é preciso se aplicar a equação:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\mathcal{E}_{reff} + 0,3)\left(\frac{w}{h} + 0,264\right)}{(\mathcal{E}_{reff} - 0,258)\left(\frac{w}{h} + 0,8\right)} \quad (14)$$

Onde:

$$\mathcal{E}_{reff} = \frac{\mathcal{E}_r + 1}{2} + \frac{\mathcal{E}_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Tem-se que h é a espessura do substrato, ou seja 1,5mm.

Portanto:

$$\mathcal{E}_{reff} \cong 3,26$$

Aplicando-se à equação anterior, tem-se:

$$\Delta L \cong 0,733mm$$

A dimensão ΔL pode ser considerada a variação entre o tamanho do substrato e o tamanho do *patch* da antena base retangular, em relação as bordas superiores e inferiores. Sendo assim a diferença do comprimento do *patch* e do comprimento do substrato, se apresenta como $2\Delta L$.

Com a intensão de se encontrar a dimensão da trilha de entrada para se ter uma impedância de entrada da linha casada a 50Ω , utilizou-se a equação:

$$z_c = \frac{120\pi}{(\mathcal{E}_{reff})^{\frac{1}{2}} \left[\frac{w_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w_0}{h} + 1,444 \right) \right]} \quad (16)$$

Aderindo z_c como a impedância de entrada em linha, e w_0 como a espessura da trilha de entrada da antena

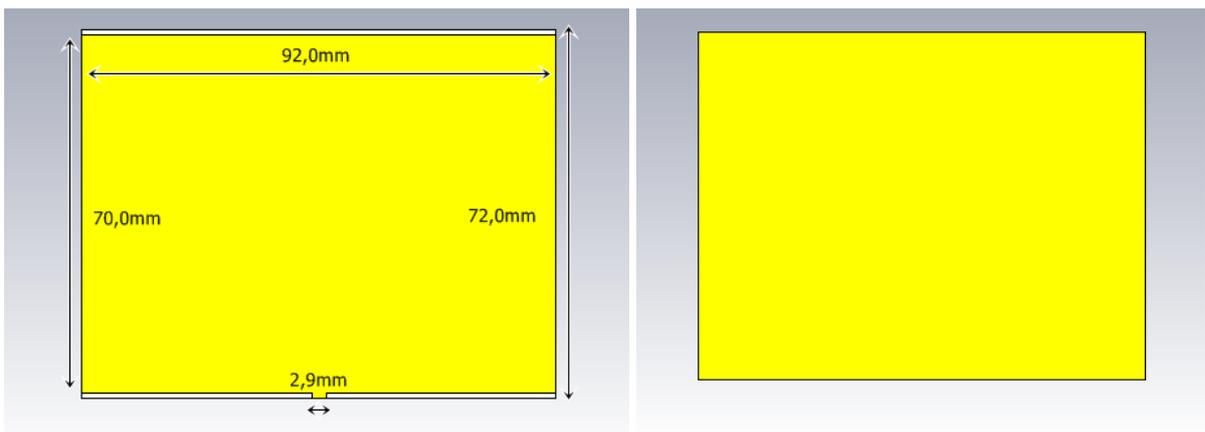
$$z_c = 50\Omega$$

Chegamos à:

$$w_0 \cong 2,94mm$$

Se optou por utilizar as equações de cálculo de dimensões de antenas planares retangulares por questão de parâmetros físicos, se tornar mais compacta que outras geometrias com o objetivo de atender as necessidades da frequência de operação de 1GHz. Dessa forma então foi projetada a antena base planar retangular para se obter os resultados à frequência pretendida, a qual se caracterizou da seguinte maneira pela representação gráfica na Figura 13:

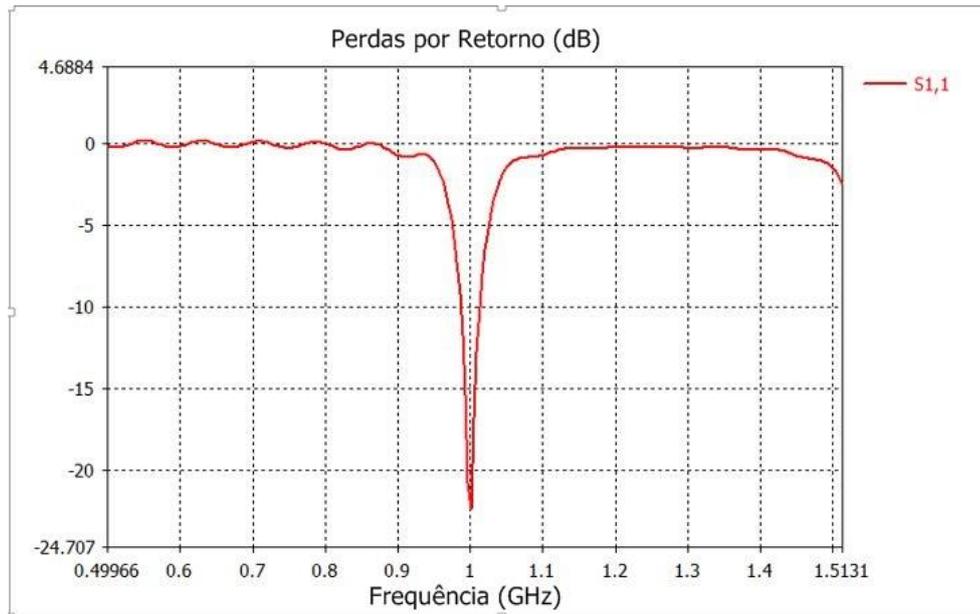
Figura 13– Geometria e Medidas do *Patch* da Antena Planar Base frente e verso, respectivamente;



Fonte: Autor.

Essa antena base teve como resultados de perdas por retorno associados a frequência de operação objetivo do trabalho, de forma que obteve-se o seguinte gráfico disposto na Figura 14.

Figura 14– Perdas por Retorno da Antena Planar Base.



Fonte: Autor.

Os resultados apresentados por esse modelo, atenderam às expectativas em relação à faixa de funcionamento, tendo em vista que calculadas as dimensões para uma frequência de ressonância de 1GHz, foi observada uma perda por retorno mais baixa nessa mesma frequência, atingindo aproximadamente -22dB, mostrando que a antena cumpre com seu objetivo inicial de projeto dimensões base de ressonância.

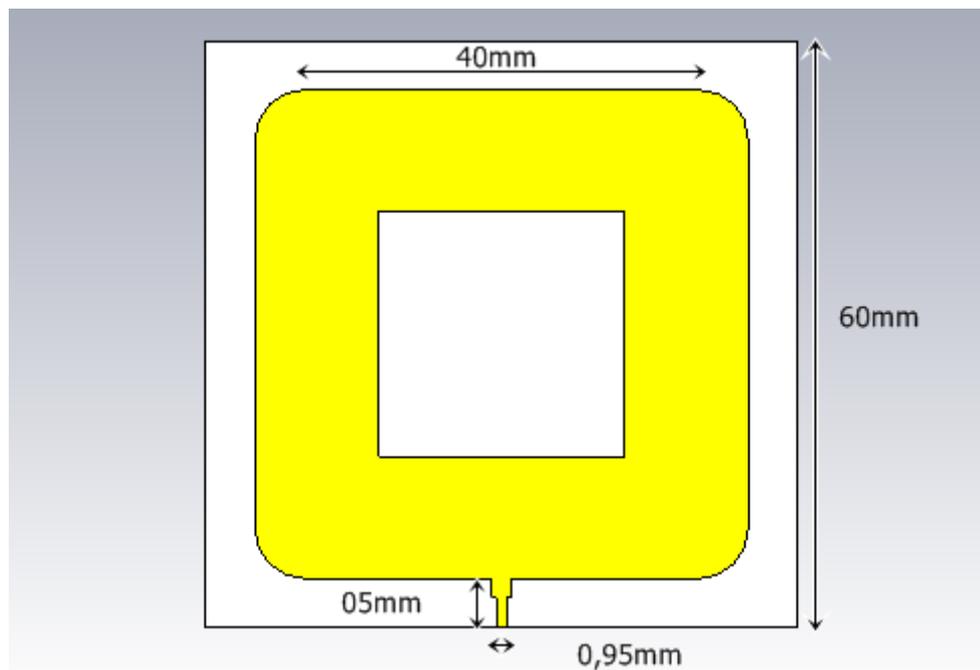
Próximo passo, visando “imitar” os parâmetros utilizados na literatura para o projeto de *probes* que atendam a finalidade da pesquisa, utilizou-se algumas das dimensões conhecidas e frequentemente usadas no projeto de *probes* com tecnologia *loop*, para determinada faixa de frequências.

Como pretende-se chegar a um ponto de ressonância em aproximadamente 1GHz, foram utilizadas geometrias de *probes loop* que captam até 1GHz de acordo com a literatura. As dimensões são dadas segundo Montrose e Nakauchi como sendo de diâmetro de aproximadamente 10mm para *probes* que utilizam tecnologia *loop*, para obter ressonância em até 1GHz. Para aspectos práticos, os melhores resultados após uma sequência exaustiva de simulações, foi encontrada após se tirar aproximadamente uma média entre dimensões favoráveis a antenas planares aqui calculadas e as dimensões utilizadas em tecnologia *loop*.

Inspirado nisso, foi possível desenvolver algo para analisar a reação de um objeto aproximadamente semelhante ao utilizado, só que nesse momento utilizando tecnologia planar, e portanto apenas para captação de dados.

Para essa fase de projetos, escolheu-se trabalhar com o material dielétrico FR-4 por alguns fatores, entre eles, a facilidade de se conseguir a placa para a fabricação, tendo em vista que é um dos dielétricos bastante aplicados na fabricação de antenas planares. Para este caso, aplicado a espessura de 0,5mm do dielétrico, sendo os melhores resultados conseguidos em simulação tendo assim o seguinte projeto inicial disponível na Figura 15.

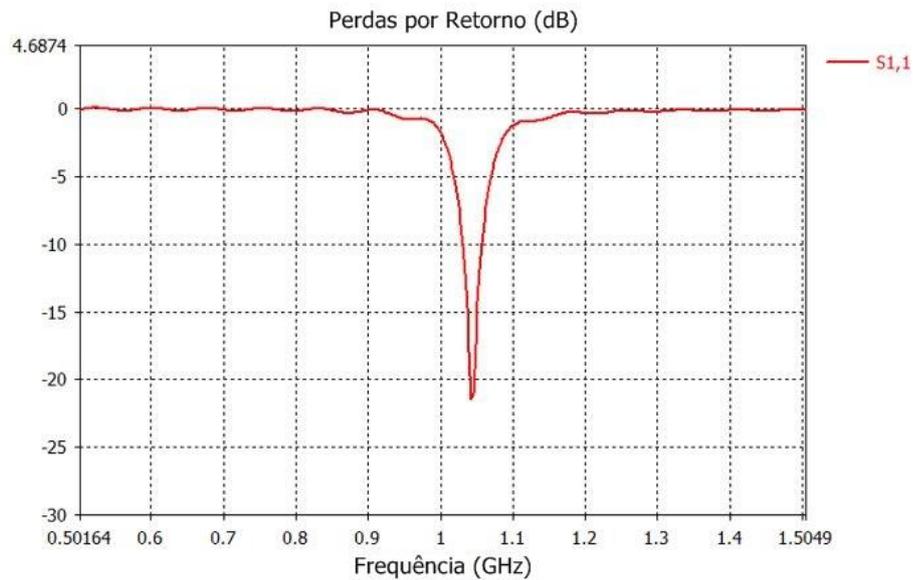
Figura 15– *Probe* com geometria *loop*.



Fonte: Autor.

Que se comportou da seguinte forma como mostrado pelo gráfico de perdas por retorno na Figura 16:

Figura 16– Perdas por Retorno do *Probe* com tecnologia *Loop*.



Fonte: Autor.

As perdas por retorno dessa estrutura, mostram um funcionamento da mesma deslocado em relação à frequência objetivo, tendo assim perdas nesse ponto em aproximadamente -22dB. Observando que foram utilizadas dimensões baseadas na antena retangular planar base, calculada, e inspirada sua geometria em relação aos *probes* que utilizam tecnologia *loop*, é possível se ter uma ideia de como estruturas planares podem se comportar em situações em que são feitas de maneira relativamente semelhante à estruturas as quais são comparadas e portanto observado que uma de suas características interessantes é a facilidade de se trabalhar em altas frequências, porém tendo uma estreita largura de banda que pode ser aplicada em diversas situações com objetivos específicos. Uma desvantagem observada desse resultado foi a própria espessura do substrato que se torna de difícil manuseio para um *probe* que se pretende ter uma fabricação caseira, como sua proposta inicial.

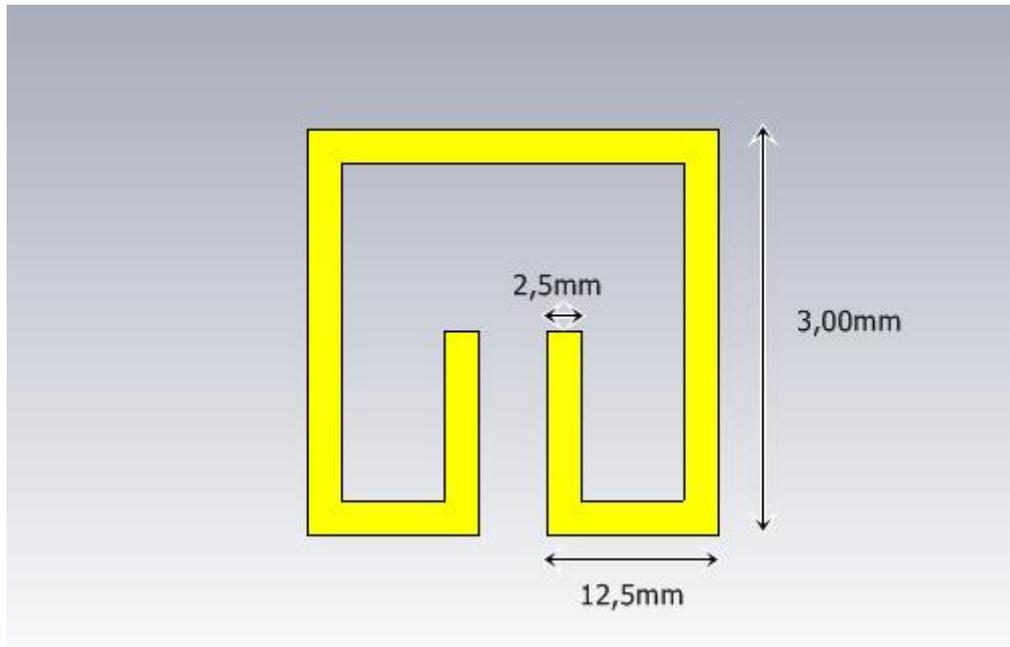
3.2 Célula Metamaterial

A célula metamaterial que foi escolhida para inspirar esse projeto foi a célula CLL, por sua facilidade de se poder projetá-la para uma certa frequência. De acordo com a Equação

9, pode-se definir facilmente através do comprimento de onda de que se pretende trabalhar, as dimensões da célula, as quais serão a base para o desenvolvimento do *probe*.

As dimensões bases são resultantes para se manipular a uma frequência de aproximadamente 1GHz estão disponíveis na Figura 17:

Figura 17– Dimensões da Célula Metamaterial CLL para Operação em 1GHz



Fonte: Autor.

Inspirado nessa célula metamaterial pode-se desenvolver dispositivos mais semelhantes aos *probes* que são utilizados, em seu formato compacto, observando os *probes* utilizados na literatura. Dessa forma, pensou-se no desenvolvimento de formatos que pudessem se basear em algumas das características da célula metamaterial.

Diferentemente da tecnologia *loop*, a tecnologia planar permite o projeto e fabricação de diferentes geometrias, tendo em vista que seus dois condutores, tanto do considerado *patch* quanto do plano terra, podem ser moldados de acordo com o gabarito que lhes é proposto, podendo assim mudar completamente sua resposta em relação a determinada frequência, de acordo com a sua dimensão.

Para se posicionar células metamateriais em estruturas planares, existem algumas técnicas que são conhecidas por trazer bons resultados de acordo com seu objetivo, dentre as mais complexas, existe a possibilidade de posicionamento utilizando algoritmos de rede neural que testam estatisticamente o melhor resultado de interações entre células introduzidas

em meio ao *patch* ou ao plano terra, de forma que possam ser tanto, feitas com trilhas de cobre “extras” sobre a placa, quanto espécies de corrosão da mesma, assim, tendo a vantagem de poder não aumentar o tamanho original de estruturas planares que são modificadas buscando melhorias ou qualquer que seja a alteração, utilizando esse tipo de tecnologia.

Os resultados apresentados a seguir, são vindos de um processo de múltiplas simulações, as quais foram testados os melhores posicionamentos, os melhores arranjos e geometrias para que pudessem ser utilizados como o protótipo de *probe*. Visto que é um sistema inspirado em geometria metamaterial, foram utilizadas dimensões baseadas nas informações obtidas de estruturas ressonantes calculadas anteriormente, como da antena planar retangular base e também da célula metamaterial calculada CLL para a frequência de ressonância proposta.

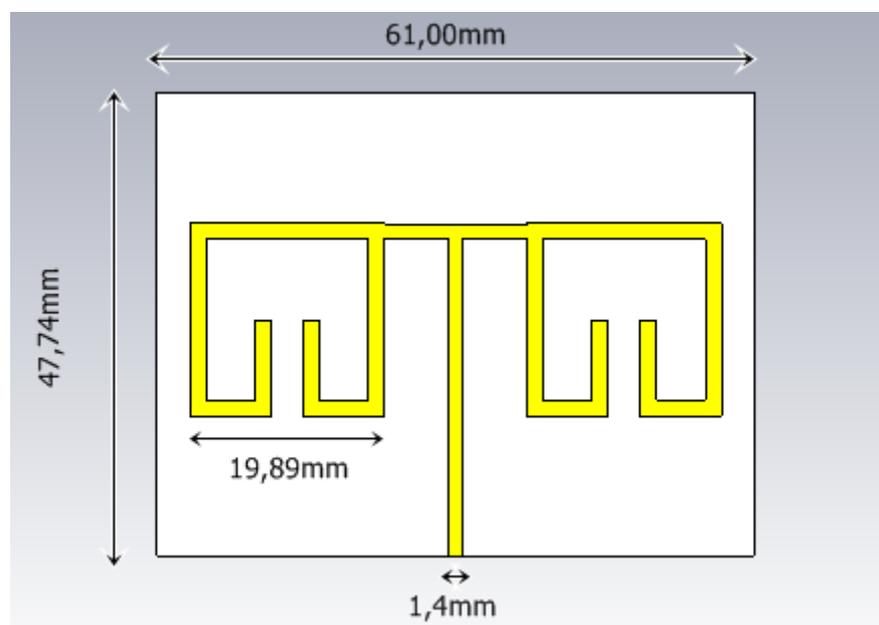
4. RESULTADOS

4.1 *Probe* Projetado (*LIBELULA*)

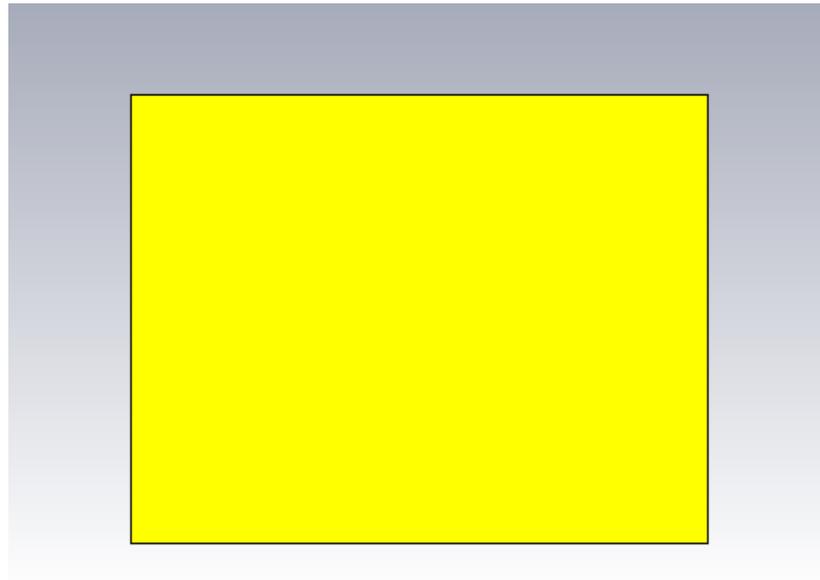
O *probe* projetado foi obtido como uma espécie de arranjo do tipo horizontal, utilizou-se técnicas semelhantes do usado para se obter arranjos em antenas planares com dois elementos irradiantes no *patch*, que foi baseado na estrutura metamaterial. A estrutura metamaterial CLL, foi utilizada como base para a geometria dos dois elementos irradiantes, tendo em vista obter um ponto de ressonância aproximado ao que suas dimensões foram projetadas. A princípio foram utilizadas as dimensões de substrato da antena planar retangular base e também baseadas as mesmas dimensões da célula metamaterial original, onde poderiam se esperar resultados aproximados.

Como nem tudo na engenharia pode ser considerado linear, foram observados alguns deslocamentos de frequência de ressonância, provavelmente pela diminuição da extensão do *patch* em relação à antena planar base e por isso alteradas grandezas mecânicas para que assim fossem adaptadas proporcionalmente as grandezas elétricas que para algumas situações podem ser consideradas lineares e inversamente proporcionais. Dessa forma obtendo o *probe* inspirado em geometria de células metamateriais foi batizado de *LIBELULA* com as seguintes dimensões e desenho dispostos nas Figuras 18 e 19.

Figura 18– Dimensões e Geometria da Face Frontal do *LIBELULA*.

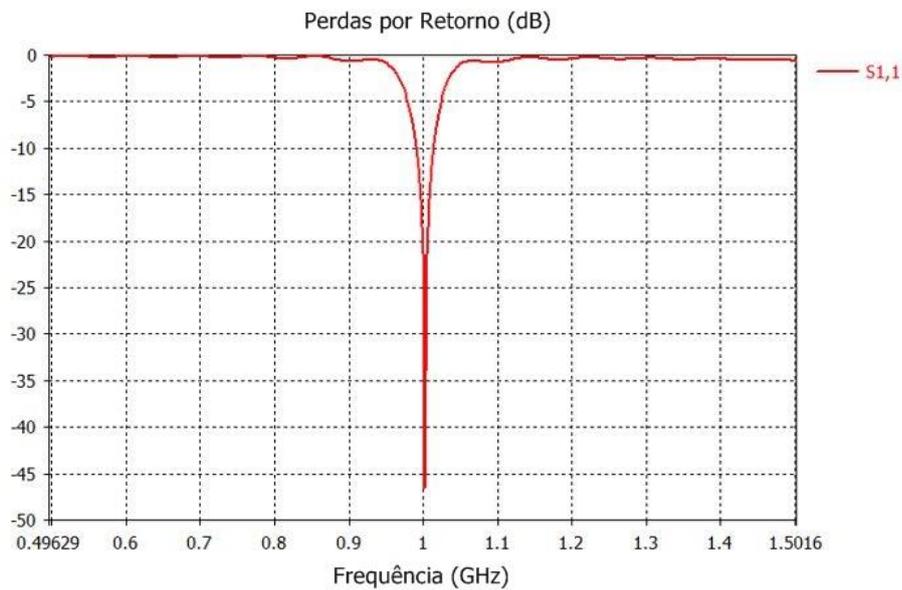


Fonte: Autor.

Figura 19– Geometria da Face Posterior do *LIBELULA*.

Fonte: Autor.

O *LIBELULA* foi projetado com lâmina composta do material dielétrico FR-4, o qual apresenta uma espessura entre lâmina e outra de 1,5mm e com espessura padrão de cobre de 0,035mm. Suas dimensões compactas porém não micrométricas, possibilitam sua fabricação sem ajuda de tecnologia de prototipagem de antenas planares, muito avançada. Os resultados de perdas por retorno podem ser conferidos na Figura 20.

Figura 20– perdas por retorno do *Probe LIBELULA*.

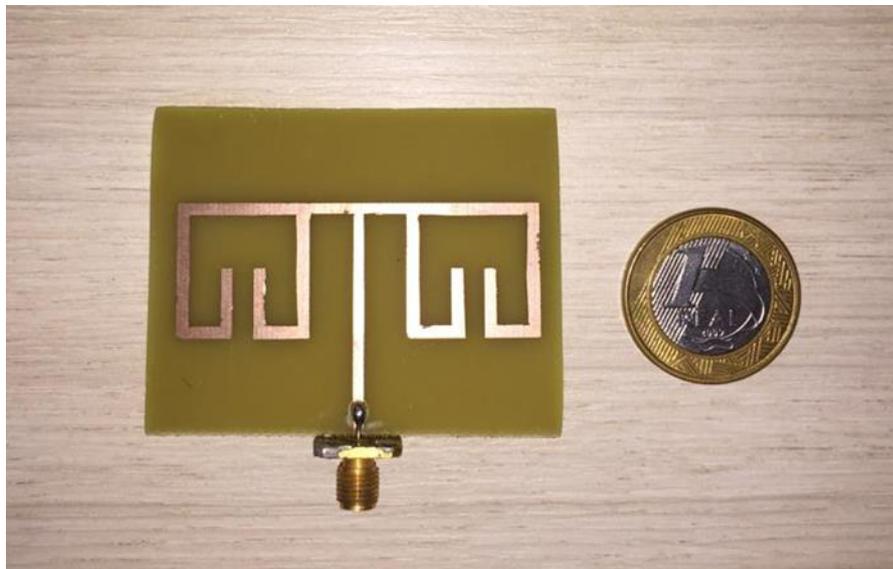
Fonte: Autor.

Essa estrutura, apresenta perdas por retorno com ressonância na frequência de 1GHz, com aproximadamente -47dB, o que significa que o *LIBELULA* será capaz de atender à necessidade de se testar essa frequência em equipamentos que emitem radiação indesejada, nesta faixa, que devem ser certificados pelos testes de compatibilidade eletromagnética.

4.2 Fabricação do *Probe*

Para a fabricação do *probe LIBELULA*, foi necessária utilizar a técnica de fabricação de placa de circuito impresso, onde se utiliza a adesivos do gabarito, imprime-se as medidas exatas da estrutura em adesivos, que se transformam em uma espécie de gabarito para que o cobre da placa do *probe* fosse corroído corretamente pelo percloroeto de ferro (FeCl_3). Após feito o corte na placa que será corroída, é pregado o adesivo que se comporta como gabarito e, adicionada a placa adesivada como decalque, para corrosão em FeCl_3 . A parte não coberta pelo decalque fica em contato direto com o FeCl_3 , o que leva a corrosão da parte da placa cobreada, assim sobrando cobre apenas na área coberta da placa e, dessa forma, revelada como o desenho exato do decalque que a cobria anteriormente. O resultado é mostrado na Figura 21.

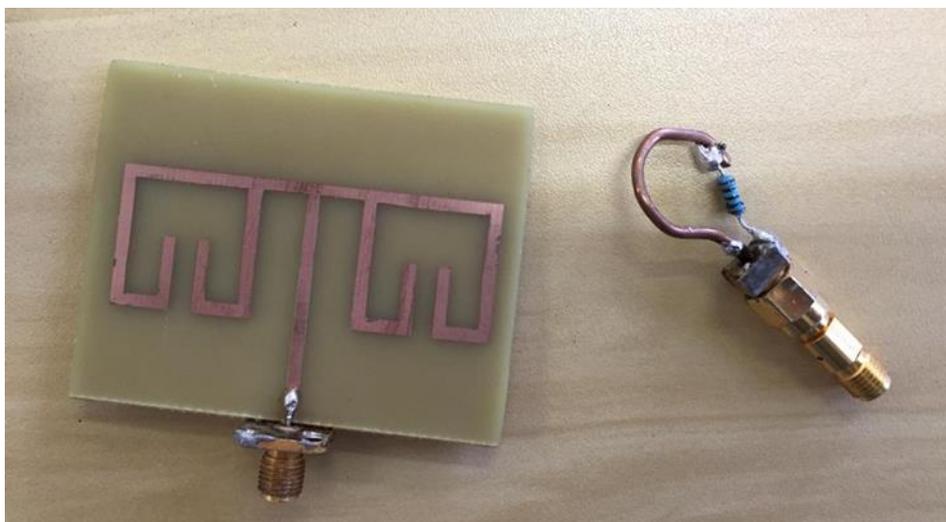
Figura 21 – *LIBELULA* Fabricada.



Fonte: Autor.

Para efeito de teste e comparação, foi realizada a fabricação do *probe* sugerido por Montrose e Nakauchi no qual utiliza a tecnologia *loop* e casa a impedância através de resistores entre seu condutor interno e seu condutor terra. A Figura 22 mostra a comparação dos dois tipos de *probes*.

Figura 22– *Probe Loop* e *LIBELULA* Fabricados.



Fonte: Autor.

O *probe* que utiliza tecnologia *loop* foi fabricado de forma caseira também, como sugere o autor, utilizando fio de cobre que se solda em conector coaxial através de resistores com a intenção de casamento de impedância a 50Ω na entrada do conector.

Por dificuldades de se conseguir resistores de 50Ω para tal função, utilizou-se dois resistores de 100Ω em paralelo, ambos os resistores de 1% de precisão. Assim medida a resistência de entrada do conector após a montagem, chegando a aproximadamente 50Ω entre o condutor interno do conector e o condutor externo do conector.

Para a realização dos testes foi utilizado o analisador de frequências do modelo MS4642A *Vector Network Analyzer 20GHz* da Anritsu, pertencente ao Laboratório de Micro-ondas e Antenas da Universidade Federal do Tocantins, mostrado na Figura 23.

Figura 23- MS4642A Vector Network Analyzer 20GHz da Anritsu



Fonte: Autor

Para serem realizados os testes, foi necessária a conexão do *probe* em uma das portas coaxiais, primeiramente com o *probe LIBELULA*, para obter os resultados de perdas por retorno dentro da faixa de frequências esperada. Para isso foi utilizada a faixa de análise entre 500MHz e 1,5GHz para a geração dos gráficos. O método de medição levou em consideração a configuração de análise de estrutura *microstrip*, levando em conta a permissividade elétrica relativa do material e as medidas da trilha de entrada e do substrato, para resultados mais precisos. A Figura 24 mostra a realização dos testes com o *LIBELULA*.

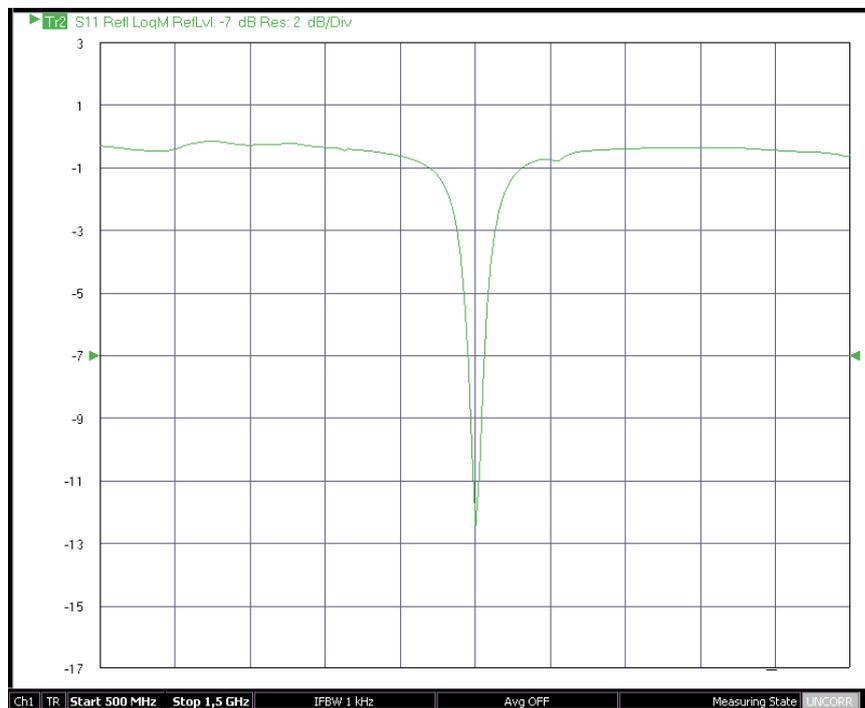
Figura 24– Testes do *LIBELULA* sendo realizados no VNA.



Fonte: Autor.

A Figura 25 mostra o arquivo de imagem que obtém o gráfico resultante da análise realizada pelo VNA, para o *LIBELULA*.

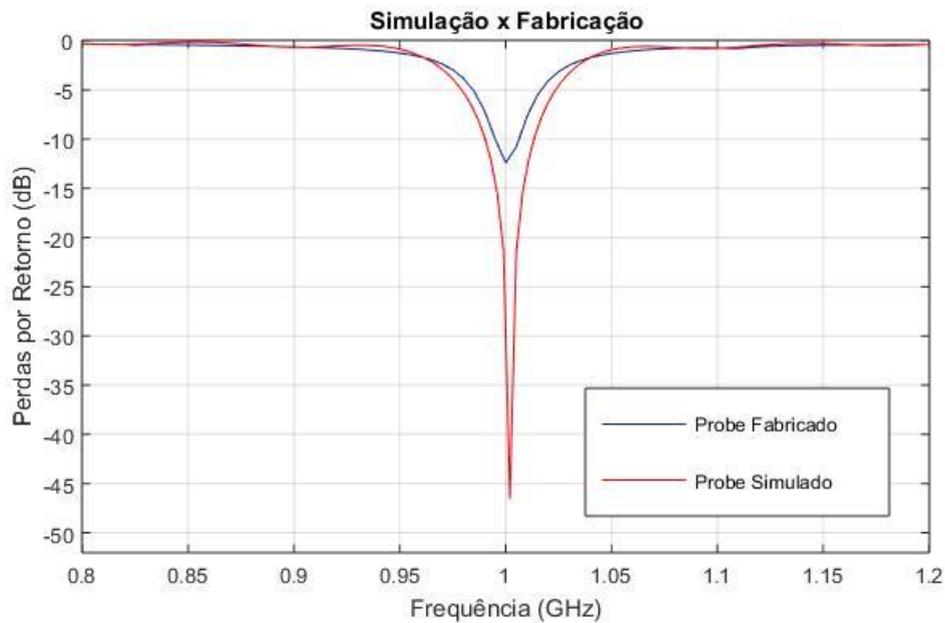
Figura 25– gráfico de perdas por retorno gerados em tela do VNA.



Fonte: Autor.

Para se comparar os resultados da simulação do *LIBELULA*, utilizou-se a sobreposição dos gráficos resultantes da simulação e da fabricação. Os dados em “.txt” foram programados na plataforma *matlab* e cruzados para validação. A Figura 26 mostra os gráficos comparados.

Figura 26– Resultados Sobrepostos de Simulação e Fabricação do *LIBELULA*.

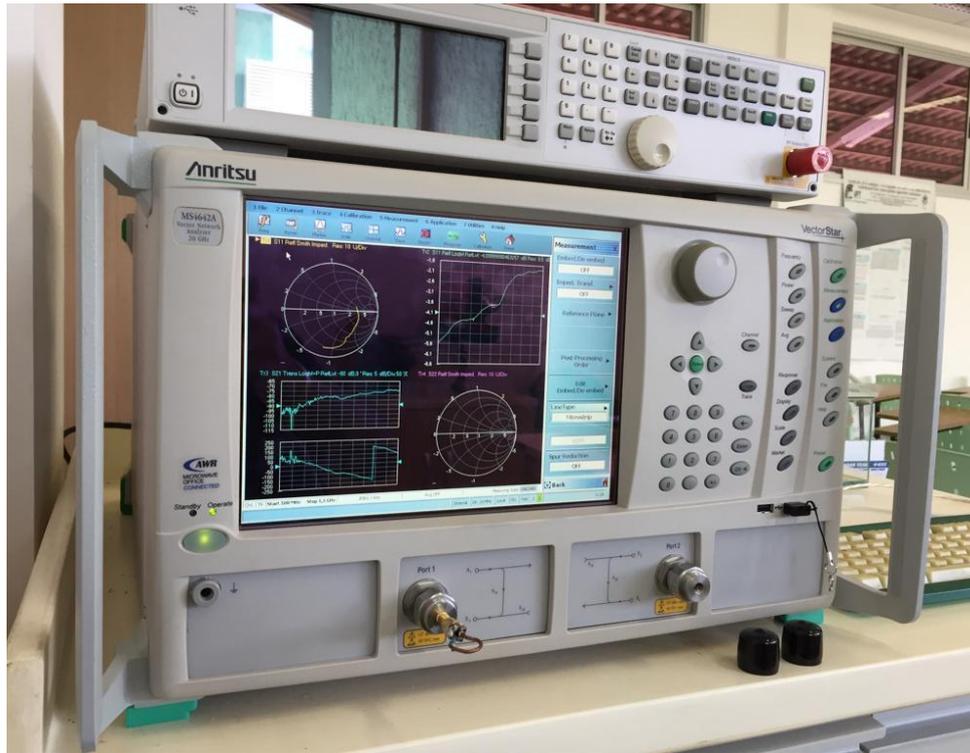


Fonte: Autor.

Ao observar os gráficos de comparação na Figura 26/, obtém-se os resultados comparados das perdas por retorno do *probe* fabricado e do *probe* simulado. Obtém-se a comprovação do funcionamento do sistema desenvolvido, claramente com perdas maiores, o que considera-se normal para a fabricação arcaica da estrutura, porém com um ponto de ressonância em mesma frequência. Enquanto que o *probe* simulado apresenta uma perda por retorno em 1GHz em aproximadamente -46dB o fabricado apresentou um resultado à mesma frequência de aproximadamente -14dB, dando característica de funcionamento portanto, à estrutura fabricada.

Ao ser fabricado o *probe* sugerido pela literatura, se foi testada também para efeitos práticos de comparação de resultados. Para isso também conectada à entrada coaxial e analisada com os mesmos parâmetros do *probe LIBELULA*. E assim captados seus dados para comparação. A Figura 27 mostra a realização dos testes no VNA.

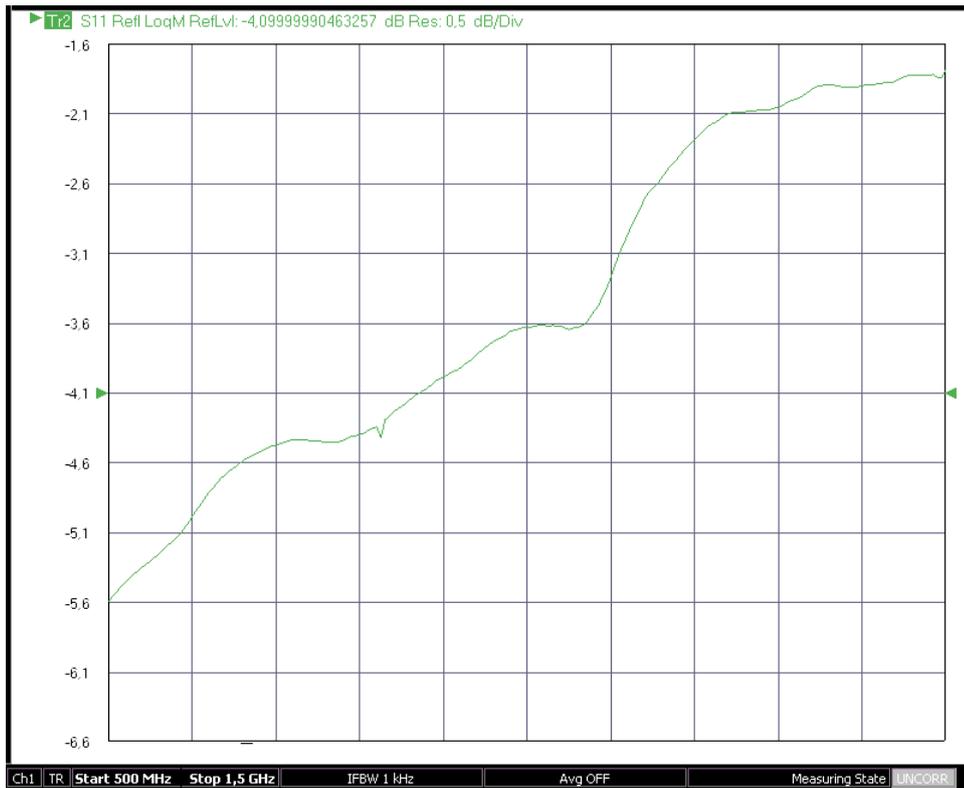
Figura 27– testes do *Probe Loop* no VNA.



Fonte: Autor.

O *probe* sugerido pela literatura foi desenvolvido a partir de várias tentativas de bons resultados, que acabaram por falhar, testados seguindo os passos sugeridos, desta forma, este *probe* foi o melhor resultado obtido em relação aos demais em caso comparativo de perdas por retorno para a faixa de análise escolhida, o que não mostra muita facilidade para se obter os resultados desejados e mostrados pela literatura estudada, já que se não tem uma boa precisão para um *probe* caseiro, como se denomina. A Figura 28 mostra o arquivo de imagem disponibilizado pelo Analizador em relação ao *Probe Loop*.

Figura 28- gráfico de perdas por retorno gerados em tela do VNA.



Fonte: Autor.

Com a observação desses resultados pode-se concluir o mau funcionamento do *probe* que utiliza tecnologia *loop*, visto que dentro dos parâmetros analisados, seus resultados não mostram perdas por retorno abaixo de -10dB em nenhum momento, o que para sentido de comparação, não chega nem perto do resultado obtido no *probe LIBELULA*.

5. CONCLUSÕES

Com a análise das tecnologias estudadas, vê-se a necessidade do desenvolvimento de formas baratas e acessíveis para a realização de testes de compatibilidade eletromagnética que visam melhorar a qualidade do funcionamento dos produtos eletrônicos e microeletrônicos fabricados. Tem-se também a necessidade de aplicações de tecnologias cada vez mais compactas e acessíveis, seguindo assim a tendência de evolução dos dispositivos que usufruem do meio eletromagnético.

Observa-se então a possibilidade de aplicação de tecnologia planar, cada vez mais utilizada hoje em dia pelas vantagens de poder trazer circuitos compactos, acessíveis de fácil fabricação. Desta tecnologia se fazem antenas por exemplo que podem ser aplicadas em dispositivos móveis facilmente, por atender com tranquilidade depois de desenvolvidas, suas necessidades, e com esse tipo de tecnologia é conseguido uma série de aplicações em avanços em telecomunicações.

O projeto do *probe LIBELULA* utilizando tecnologia planar mostra a facilidade de utilização dessa tecnologia para a aplicação em altas frequências. Enquanto que pode-se fabricar e ter bons resultados de testes e simulações com baixos custos, pode-se utilizar a teoria de antenas bastante consolidada, para produzir um bom resultado e assim comparar com a tecnologia utilizada tradicionalmente.

O *probe* utilizado com tecnologia *loop* não demonstrou facilidade a ser fabricada como o proposto o que entra em desacordo com sua proposta, ainda mais, levando em conta o mau funcionamento do mesmo, em uma banda de 0 a 1GHz assim como proposto pela literatura. O que traz em evidência o *LIBELULA*, *probe* projetado em tecnologia planar que apesar de seu layout e geometria mais complexos, demonstrou sintonia na frequência proposta e assim pode, através da manipulação de proporção mecânica, ser conFigurado para outras frequências.

Uma das vantagens de se utilizar tecnologia planar, é a possibilidade de se realizar arranjos de elementos que podem garantir uma infinidade de geometrias e trazer soluções variadas aos problemas de compatibilidade eletromagnética, diferentemente da tecnologia *loop* que propõe uma banda de frequências alta, mas ao mesmo tempo tende apenas a atender as baixas frequências, visto que quando opera em altas frequências, sofre muitos problemas de precisão de identificação de problemas de interferência eletromagnética irradiada.

Sendo assim, o *probe* planar pode ser aplicado em altas frequências específicas com dimensões bastante compactas e não perdendo portanto sua precisão nem quando se utilizados

arranjos, já que a tecnologia *loop* perde eficiência nesses casos, pois quando utilizados múltiplos *loops* na mesma estrutura, surgem interações capacitivas que interferem muito na medição de sua aplicação.

Com as vantagens de utilização de tecnologia planar, juntamente com a possibilidade de aplicação de sistemas metamateriais em meio a dispositivos, de forma que não aumentem seu tamanho original e que consigam através de arranjos planejados, mudar os resultados de interação eletromagnética para situações mais eficientes, essa então se torna uma boa opção para desenvolvimento de *Probe* de Radiofrequência para análises de testes de Compatibilidade Eletromagnética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Luiz Carlos Ferreira. **Avaliação de EMC em Veículos automotivos: Simulação e Testes**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Unicamp, Campinas, 2015.

BALANIS, Constantine A.. **Antenna Theory: analysis and design**. 2. ed. Arizona: John Wiley & Sons, Inc, 1997. Arizona State University.

CAETANO, Leonardo Martins. **Aplicações de arranjo de antenas de microfita com patch supercondutor**. 2010. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

CAPOVILLA, Carlos Eduardo. **ANTENAS PLANARES APLICADAS NAS COMUNICAÇÕES MÓVEIS DE ÚLTIMAS GERAÇÕES UTILIZANDO ELEMENTOS QUASI-YAGI**. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

GUELBER, Elise Fraga. **Aplicações Da Tecnologia Metamaterial Em Dispositivos De Telecomunicações**. 2014. 47 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal de São João Del-rei, Ouro Branco, 2014.

MACHADO, Kleber Daum. **Eletromagnetismo: Volume 2**. Ponta Grossa: Toda Palavra, 2013. 972 p.

MARTINS, Winner Humberto Vieira. **Projeto e desenvolvimento de antena multibandas e dispositivos microeletrônicos integrados de recepção para a futura telefonia 5G**. 2014. 35 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal de São João Del-rei, Congonhas, 2014.

MONTROSE, Mark I.; NAKAUCHI, Edward M.. **Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques**. Hoboken: Wiley Interscience, 2004.

PAUL, Clayton R.. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2. ed. Hoboken: Wiley Interscience, 2006.

POZAR, David M.. **Microwave engineering**. 4. ed. Hoboken: Wiley Interscience, 2012.

ROTHWELL, Edward. **Electromagnetic Compatibility (EMC) Course Notes**. -Michigan StateUniversity. Disponível em: <<https://www.egr.msu.edu/emrg/electromagnetic-compatibility-emc-course-notes>>. Acesso em: 29 set. 2018.

SUELA, Faiossander. **Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irradiados em Sistemas de Geração Fotovoltaica**. 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Ufmg, Belo Horizonte, 2016.