

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

NÍCHOLAS FONSECA MARTINS

Desenvolvimento de Antenas para CubeSats utilizando Manufatura Aditiva:

São João da Boa Vista

2021

Nícolas Fonseca Martins

Desenvolvimento de Antenas para CubeSats utilizando Manufatura Aditiva:

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações .

Orientador: Prof^o Dr. Denilson Paulo Souza dos Santos

Coorientador: Prof^o Dr. Rafael Abrantes Penchel

São João da Boa Vista

2021

M386d	Martins, Nícholas Fonseca Desenvolvimento de Antenas para CubeSats utilizando Manufatura Aditiva / Nícholas Fonseca Martins. -- São João da Boa Vista, 2021 69 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista Orientador: Denilson Paulo Souza dos Santos Coorientador: Rafael Abrantes Penchel 1. Antenas (Eletrônica). 2. Linhas de transmissão em fita. 3. Telecomunicações. 4. Satélites artificiais em telecomunicação. 5. Impressão tridimensional. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS PARA CUBESATS UTILIZANDO
MANUFATURA ADITIVA**

Aluno: Nicholas Fonseca Martins

Orientador: Prof. Dr. Denilson Paulo Souza dos Santos

Banca Examinadora:

- Denilson Paulo Souza dos Santos (Orientador)
- Crystopher Cardoso de Brito (Examinador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 018/2020)

São João da Boa Vista, 26 de novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, a minha família, principalmente minha Mãe que sempre me apoiou durante os anos de formação. Ao meu orientador Denilson Paulo Souza dos Santos, que me auxiliou durante todo o desenvolvimento do trabalho. Ao meu coorientador Rafael Abrantes Penchel que me auxiliou nas medidas das antenas. A todos os professores que contribuíram ao meu aprendizado e meu desenvolvimento ao longo do curso. A todos meus colegas de curso que me auxiliaram e me apoiaram na minha formação. E por fim quero agradecer a esta instituição tão imponente eu agradeço pelo ambiente propício à evolução e crescimento, bem como a todas as pessoas que a tornam assim tão especial.

“A competitividade de um país não começa nas indústrias ou nos laboratórios de engenharia. Ela começa na sala de aula.”
(Lee Iacocca)

RESUMO

Desde o lançamento do Sputnik I no fim da década de 60, a indústria de satélites experimentou grandes avanços tecnológicos. Ao oferecer uma solução de baixo custo e com menor tempo de desenvolvimento, o padrão CubeSat permitiu que diversas instituições e organizações fossem capazes de desenvolver missões aeroespaciais. O uso de CubeSats atualmente vem se confirmando como uma tendência tecnológica no setor espacial. Nos últimos anos, a demanda por antenas eletricamente pequenas continua a aumentando, especialmente entre dispositivos sem fio móveis, eletrônicos médicos e sistemas aeroespaciais. O método de Manufatura Aditiva (AM) pode tornar o método de produção de antenas mais acessível e financeiramente viável. Para demonstrar a aplicação de manufatura aditiva, diferentes tipos de antenas com varias formas de estruturas de substrato foram projetados e fabricados utilizando ácido polilático (PLA).

O *Electromagnetic Band Gap* (EBG) são estruturas periódicas em material dielétrico ou condutivo, Atualmente é pouco discutido antenas com substratos EBG, pois elas elevam o nível de complexidade do projeto. Porém a Manufatura aditiva permite trazer uma facilidade na sua construção em um substrato. Foi projetado e simulado seis antenas patch utilizando o substrato de PLA no ANSYS HFSS, e foi analisado seu ganho e sua perda de retorno. Foi feita a construção das antenas, sendo impresso o substrato em uma impressora 3D, utilizando um preenchimento de 100%, com a construção foi possível apresentar técnicas de baixo custo para o desenvolvimento de antenas com aplicação aeroespacial que utiliza substrato impresso 3D. O substrato foi construído com estruturas inspiradas em EBG, com topologias de furos, prisma quadrático e prisma hexagonal. Foi realizadas validações dos estudos apresentadas através de resultados de simulação e medição de protótipos.

PALAVRAS-CHAVE: Antena Retangular Patch. EBG. Manufatura aditiva. CubeSat.

ABSTRACT

Since the launch of Sputnik I in the late 1960s, the satellite industry has made great technological advances. By offering a low-cost solution with less development time, the CubeSat standard has allowed several institutions and organizations to be able to develop aerospace missions. The use of CubeSats is currently confirming itself as a technological trend in the space sector. In recent years, demand for electrically small antennas continues to increase, especially among mobile wireless devices, medical electronics and aerospace systems. The Additive Manufacturing (AM) method can make the antenna production method more accessible and cost-effective. To demonstrate the application of additive manufacturing, different types of antennas with various forms of substrate structures were designed and manufactured using polylactic acid (PLA). The Electromagnetic Band Gap (EBG) are periodic structures in dielectric or conductive material. Currently, antennas with EBG substrates are not discussed, because they raise the level of complexity of the project. Six patch antennas were designed and simulated using PLA substrate in ANSYS HFSS, and their gain and return loss were analyzed. The construction of the antennas was done by printing the substrate in a 3D printer, using a 100% fill, with the construction, it was possible to present low-cost techniques for the development of antennas with aerospace application that use 3D printed substrate and validations of the studies presented through simulation and measurement results of prototypes.

KEYWORDS: Rectangular Patch Antenna. EBG. Additive manufacturing. CubeSat.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	SCD-1 (INPE, 1993)	13
Figura 2	Categorias de satélites (CGEE, 2018)	14
Figura 3	Comparação entre tamanho de CubeSat (MABROUK, 2021)	16
Figura 4	Antenas Hipotéticas: Transmissora (esq.) e Receptora (dir.)	19
Figura 5	Linha terminada em uma carga de impedância Z_L	20
Figura 6	Mecanismo de radiação para uma Antena Patch de Microfita.	23
Figura 7	linha de microfita acoplada a uma antena <i>patch</i> retangular.	25
Figura 8	Representação de uma linha de microfita	26
Figura 9	Impressora aditiva extrudando filamento ABS	28
Figura 10	Antena <i>patch</i> de microfita com substrato em PLA	31
Figura 11	Dimensões Calculadas do <i>patch</i>	32
Figura 12	Antena 1 renderizada	32
Figura 13	Dimensões otimizadas do <i>patch</i>	33
Figura 14	Falhas na corrosão do <i>patch</i> - Aumento de 200X	34
Figura 15	Corrosão não linear, falhas na superfície - Aumento de 200X	34
Figura 16	Construção do Patch através do corte do laminado de cobre	35
Figura 17	Construção do Patch através do corte do laminado de cobre	35
Figura 18	Construção do Patch otimizado através do corte do laminado de cobre	36
Figura 19	<i>Preview</i> da construção dos substratos	36
Figura 20	<i>Preview</i> da construção dos substratos das antenas otimizadas	37
Figura 21	Impressão dos substratos em impressora 3D	37
Figura 22	Substratos desenhados e modelados no Solidworks para a impressão 3D	38
Figura 23	Substratos desenhados e modelados no Solidworks para a impressão 3D - II	39
Figura 24	Prototipação das antenas em <i>software</i>	40
Figura 25	Antena 1 - Simulação de antena microstrip retangular	41
Figura 26	Valores simulados e medidos de $ S_{11} $ (dB) para a antena 1.	42
Figura 27	Diagrama de radiação 3D normalizado	42
Figura 28	Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.	43
Figura 29	Impedância da antena.	43
Figura 30	Antena 2 - Simulação de antena microstrip retangular ajustada numericamente	44
Figura 31	Valores simulados e medidos de $ S_{11} $ (dB) para a antena 2	44
Figura 32	Diagrama de radiação 3D normalizado	45
Figura 33	Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.	45
Figura 34	Impedância da antena.	46
Figura 35	Antena 3 - Simulação de antena microstrip retangular com furos quadráticos	46
Figura 36	Valores simulados e medidos de $ S_{11} $ (dB) para a antena 3	47
Figura 37	Diagrama de radiação 3D normalizado	47

Figura 38	Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.	48
Figura 39	Impedância da antena.	48
Figura 40	Antena 3 - Simulação de antena microstrip retangular ajustada numericamente com furos quadráticos	49
Figura 41	Valores simulados e medidos de $ S_{11} $ (dB) para a antena 4.	49
Figura 42	Diagrama de radiação 3D normalizado	50
Figura 43	Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.	50
Figura 44	Impedância da antena.	51
Figura 45	Antena 5 - Simulação de antena microstrip retangular com furos hexagonais	51
Figura 46	Valores simulados e medidos de $ S_{11} $ (dB) para a antena 5.	52
Figura 47	Diagrama de radiação 3D normalizado	52
Figura 48	Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.	53
Figura 49	Impedância da antena.	53
Figura 50	Antena 6 - Simulação de antena microstrip retangular ajustada numericamente com furos hexagonais	54
Figura 51	Valores simulados e medidos de $ S_{11} $ (dB) para a antena 6.	54
Figura 52	Diagrama de radiação 3D normalizado	55
Figura 53	Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.	55
Figura 54	Impedância da antena.	56
Figura 55	Setup - para Medidas da Perda de retorno	57
Figura 56	Setup para medição de Perda de Retorno e VSWR.	58
Figura 57	Perda de Retorno medida Antena 1	58
Figura 58	$ S_{11} $ medido e simulado Antena 1	59
Figura 59	Perda de Retorno medida Antena 2	59
Figura 60	$ S_{11} $ medido e simulado Antena 2	60
Figura 61	Perda de Retorno medida Antena 3	60
Figura 62	$ S_{11} $ medido e simulado Antena 3	61
Figura 63	Perda de Retorno medida Antena 4	61
Figura 64	$ S_{11} $ medido e simulado Antena 4	62
Figura 65	Perda de Retorno medida Antena 5	62
Figura 66	$ S_{11} $ medido e simulado Antena 5	63
Figura 67	Perda de Retorno medida Antena 6	63
Figura 68	$ S_{11} $ medido e simulado Antena 6	64
Figura 69	Perda de Retorno Antena 1 - $\epsilon_r = 2,23$	65
Figura 70	Casamento de impedâncias Antena 1 - $\epsilon_r = 2,23$ - $F_r = 2,8Ghz$	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões da antena <i>patch</i>	32
Tabela 2 – Parâmetros utilizados na impressão dos substratos	36
Tabela 3 – Tempo e quantidade de material utilizado na impressão para cada substrato	37
Tabela 4 – Material utilizado para confecção das antenas.	38
Tabela 5 – Dimensões do substrato e furo.	39
Tabela 6 – Dimensões das Antenas Patch	39
Tabela 7 – Resultados de Simulação das antenas	56
Tabela 8 – Materiais utilizados para o testes experimentais	57
Tabela 9 – Resultados Experimentais	64
Tabela 10 – Erro relativo percentual de $ S_{11} $ das antenas	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos	15
2	CUBESAT	16
3	ANTENAS	19
3.1	Perda de Retorno e casamento de impedância	19
3.2	Largura de banda	21
3.3	Ganho e diretividade	21
3.4	Eficiência	22
4	ANTENAS DE MICROFITA	23
4.1	Fundamentos de radiação	24
4.2	<i>patch</i> retangular	24
4.3	Alimentação por linha de microfita	25
5	MANUFATURA ADITIVA	27
6	MATERIAIS E MÉTODOS	29
6.1	Equacionamento para Antenas de Microfita com Substratos inspirados em EBG	29
6.2	Antena <i>patch</i> de microfita com substrato impresso em PLA	30
6.3	Técnicas de baixo custo para o desenvolvimento de Antenas de microfita com substrato PLA impresso em 3d e Antenas inspiradas em EBG com Furos Quadráticos e Hexagonais	33
6.3.1	Construção	33
6.3.1.1	<i>patch</i>	33
6.3.1.2	Substrato	36
6.3.2	Custos de produção	37
6.4	Projeto e configuração das antenas	38
6.5	Características dos protótipos	39
7	RESULTADOS DE ANTENAS COMPACTAS E MINIATURIZADAS PARA COMUNICAÇÕES SEM FIO	41
7.1	Protótipos simulados e resultados	41
7.1.1	Protótipos simulados - Antena 1	41
7.1.2	Protótipos simulados - Antena 2	44
7.1.3	Protótipos simulados - Antena 3	46
7.1.4	Protótipos simulados - Antena 4	49

7.1.5	Protótipos simulados - Antena 5	51
7.1.6	Protótipos simulados - Antena 6	54
7.1.7	Análise de Resultados Simulados	56
7.1.7.0.1	<i>Radiação</i>	56
7.1.7.0.2	<i>Casamento de Impedâncias</i>	56
7.2	Protótipos experimentais e resultados	57
7.2.0.1	Antena 1 - $ S_{11} $	58
7.2.0.2	Antena 2 - $ S_{11} $	59
7.2.0.3	Antena 3 - $ S_{11} $	60
7.2.0.4	Antena 4 - $ S_{11} $	61
7.2.0.5	Antena 5 - $ S_{11} $	62
7.2.0.6	Antena 6 - $ S_{11} $	63
7.2.1	Resultados	64
8	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O período histórico entre os anos de 1957 e 1975 ficou conhecido mundialmente como Corrida Espacial. O marco inicial desse período foi o lançamento do primeiro satélite artificial do mundo, o Sputnik I, pela União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). A partir dos anos 60, milhares de satélites foram postos em órbita em todo o mundo.

O primeiro satélite artificial operado pelo Brasil foi lançado em 8 de fevereiro de 1985 e recebeu o nome de BrasilSat A1. Ele foi construído pela a empresa canadense Spar Aerospace. O BrasilSat A1 tornou possível a independência no setor de telecomunicações do Brasil. Com o passar dos anos, outros satélites operados pelo Brasil foram colocados em órbita e, paralelamente, foram obtidos o conhecimento e a tecnologia necessária para que fossem construídos objetos desse tipo em território nacional (WINTER; MELO, 2007). Nos anos de 1993 e 1998, foram lançados os Satélites de Coleta de Dados, SCD-1 e SCD-2, respectivamente. Ambos foram produzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos, e representaram as bases para o desenvolvimento da tecnologia para a construção de satélites e seus veículos lançadores no Brasil (WINTER; MELO, 2007).



Figura 1 – SCD-1 (INPE, 1993)

Dentro da classe conhecida como satélites de pequeno porte, os CubeSats fazem parte, principalmente, das categorias de picosatélite e nanosatélite, as quais especificam objetos com massa entre 0,1 kg e 1 kg e entre 1 kg e 10 kg, respectivamente.

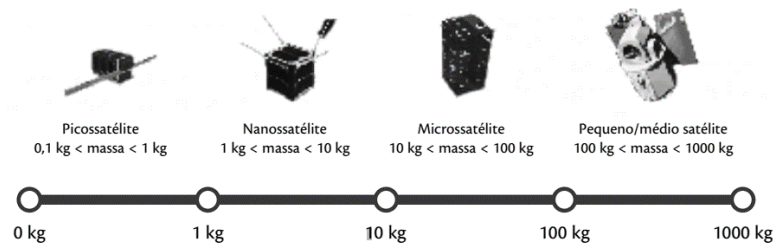


Figura 2 – Categorias de satélites (CGEE, 2018)

Entre as aplicações desses tipos de satélites, destacam-se: sensoriamento remoto da Terra, telecomunicações, ciência de um modo geral, defesa e treinamento de estudantes e profissionais da área espacial (CGEE, 2018).

As antenas de microfita são leves, compactas, de baixo custo e fácil instalação, podendo ser montadas em superfícies planas ou não. Se integradas aos dispositivos diretamente, elas ficam mais protegidas e diminuem as perdas na linha de alimentação, estas que são estruturas que irradiam e recebem energia eletromagnética pelo espaço livre (BALANIS, 2015). Existe um grande interesse em diversas áreas das telecomunicações nas Antenas patch em microfita. Isso é devido as inúmeras vantagens sobre as antenas de micro-ondas convencionais. Pesquisadores tem investido em projetos de antenas que atendam as necessidades desses sistemas e que possuem facilidade de fabricação, baixo custo, compactas e facilidade de conexão em circuitos integrados de micro-ondas. Entretanto uma das desvantagens mais aparentes desse tipo de antena é a sua largura de banda ser bem estreita, determinada pelas dimensões do patch metálico e pela constante dielétrica e a altura do substrato, outra desvantagem é o baixo ganho. as desvantagens das antenas de microfita demandam por pesquisas e diversas técnicas têm sido utilizadas para resolver ou diminuir estes problemas, entre elas, o uso de geometrias fractais para diminuir o comprimento físico da antena mantendo seu comprimento elétrico através de um melhor aproveitamento do espaço de preenchimento; uso de substratos largos para aumentar a eficiência e largura de banda; uso de cavidades para eliminar ondas de superfície mantendo uma boa largura de banda; formação de arranjos para alcançar bom desempenho de varredura e diretividade, etc. Também existem muitas iniciativas para alcançar ou melhorar características desejadas em alguns sistemas. O projeto das antenas foi executado para a frequência de 2,4 GHz, onde temos aplicações em sistemas de comunicação sem fio inclusive, aeroespacial e foi simulada as antenas pelo software comercial ANSYS HFSS. Seis protótipos de antenas propostas foram construídos e medido em um analisador de espectro com o intuito de validar o modelo teórico proposto.

1.1 MOTIVAÇÃO

Atualmente, a maioria das aplicações de antenas patch de microfita encontram-se na área de comunicação sem fio. Para resolver características indesejáveis presentes nas Antenas Patch, várias técnicas têm sido investigadas e empregadas, sendo uma das mais promissoras o uso de substratos *Electromagnetic Band-Gap* (EBG). O EBG são estruturas periódicas em material dielétrico ou condutivo. Essas estruturas proveem a propagação de ondas eletromagnéticas em uma frequência específica

para todos os estados de polarização e ângulos de incidência de uma antena, oferecendo características passa-banda e rejeita-banda.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho consistem no projeto de simulação no ANSYS HFSS e da construção de antenas com substratos impressos 3D, utilizando técnicas de baixo custo para o desenvolvimento de antenas com substrato impresso 3D e validações dos estudos apresentadas através de resultados de simulação e medição de protótipos. E por fim, apresentar proposições para trabalhos futuros.

2 CUBESAT

Em 1957, iniciou-se o começo da exploração espacial, o predecessor de toda a história dos satélites é o denominado “Sputnik 1”, não só foi capaz de orbitar a Terra em seu apogeu, mas trouxe reconhecimento para a comunidade científica russa. Nos últimos 64 anos centenas de satélites foram lançados propondo e sedimentando diversas áreas da ciência. O avanço da eletrônica possibilitou a diminuição espacial de componentes de comunicação, radio, telemetria, sensores e afins, possibilitando a construção de espaçonaves com baixo custo energético, baixo custo financeiro e com construções compactas.

A ideia de compactar, diminuir os custos e aumentar a eficiência dos equipamentos de exploração espacial acarretou no desenvolvimentos dos Cubesats, que por sua vez, se configuraram em tamanhos denominados "U". A unidade U é equivalente a dimensões $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ com a intenção de ter aproximadamente 1 kg em toda sua estrutura de proteção e hardwares de funcionamento. Desenvolvida pela parceria entre Stanford e a California Polytechnic State Universities (PUIG-SUARI; TURNER; TWIGGS, 2001), onde foram definidos os padrões para o CubeSat, podendo combinar conjuntos de 1U ou 0,5U, para formar CubeSats de tamanhos variados.

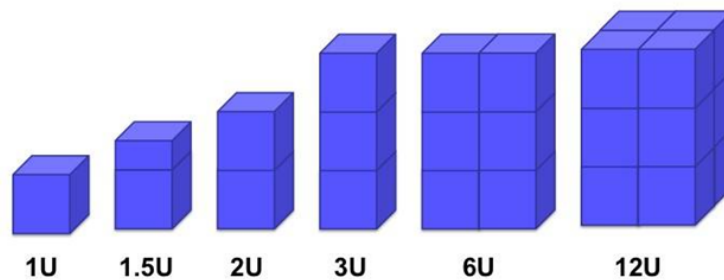


Figura 3 – Comparação entre tamanho de CubeSat (MABROUK, 2021)

O CubeSat iniciou-se com a proposta de auxiliar na propagação do conhecimento, portanto, como uma primeira via educacional, foi e é muito utilizada para demonstrações e desenvolvimentos de tecnologias que poderiam se utilizadas dentro de um ou dois anos de pesquisa (SELVA; KREJCI, 2012). Com o passar do tempo, os CubeSats deixaram o viés educacional, e começou a ganhar espaço pelo baixo custo em suas missões.

A estrutura de um CubeSat é composta pelo circuito de potência, propulsão, controle de bordo (Orientação, navegação e controle (GNC)), sistema de comunicação, sistema de comando e armazenamento de data e sistema de controle termal.

- O sistema de energia elétrica (potência), é construído basicamente de uma fonte de energia, uma unidade de armazenamento, distribuição e regulação. A maior parte dos CubeSats adota células fotovoltaicas, pois possuem alta eficiência pela proximidade ao Sol e fácil acesso a luz solar (LARSON; WERTZ, 1992).
- O sistema de propulsão possibilita a mudança de órbita, o levantamento, controle de atitude, formação e capacidades de desorbitação ao cumprir seu dever, os sistemas de propulsão mais utilizados são os sistemas químicos ou elétricos. Os sistemas químicos possuem um empuxo maior, mas possui uma limitação de impulso em relação aos elétricos (JOHNSON; STANSBERY, 2010).
- O sistema de controle de bordo pode ser considerado uma junção do ODCS e do ADCS, a Determinação de órbita e controle, denominada de subsistema ODCS. Tem a função de medir e manter a posição em função do tempo levando em conta o centro de massa do satélite. O ADCS é o subsistema responsável pelo controle da orientação, o sistema de orientação também possui um sistema de navegação por satélite (GNSS), parecido com o GPS, sendo um método eficaz para manter o CubeSat dentro da órbita baixa (LARSON; WERTZ, 1992).
- Sistema de comunicação é o que permite o downlink do payload e dos dados que a missão planeja estudar, utilizam de rádios VHF (Very high frequency) e UHF (Ultra high frequency) (CAPPELLETTI; BATTISTINI; MALPHRUS, 2020).
- O sistema de comando e armazenamento ou comando e manipulação é responsável por receber, validar, decodificar e distribuir os comandos aos sistemas, também armazena os dados da missão para downlink, integra também as funções responsáveis pelo monitoramento da vida útil dos componentes, além da segurança, muitos são compostos por microcontroladores MSP ou PIC, pelo baixo consumo energético (CAPPELLETTI; BATTISTINI; MALPHRUS, 2020).

Diversos países do mundo e suas agências governamentais começaram a difundir as missões com a utilização do CubeSat, especialmente promovendo competições entre as diversas academias, a própria NASA influencia em diversas pesquisas, em suas iniciativas, já houve mais de 120 lançamentos de CubeSat em 32 estados dos estados unidos (MAHONEY, 2016). Existem diversos temas de exploração para a utilização de CubeSat, os que mais influenciaram a comunidade científica se enquadram entre a heliofísica, astrofísica e a exploração do espaço profundo, que consistem respectivamente no estudo das conexões entre o Sol e o sistema solar, descrito como a física do Sol; O estudo de todas as reações do universo, utilizando os conceitos da física, procurando analisar o comportamento de grandezas físicas como a densidade e a temperatura das estrelas, galáxias e afins; O estudo voltado para nebulosas, galáxias e corpos que estão em distâncias extremas em relação a Terra. A missão NEUTRON- 1 foi uma das responsáveis pela exploração da heliofísica procurando medir o fluxo de nêutrons de baixa energia na órbita da terra, utilizaram um CubeSat tamanho 3U mapearam e analisaram a abundância de neutros, avaliaram a variabilidade da radiação cósmica em função da variabilidade solar, eventos de partículas solares e distúrbios do campo magnético da terra. (NUNES et al., 2019) A missão HaloSat foi auxiliou na exploração da astrofísica espacial, projetado para analisar a distribuição de gás quente

com a intenção de acompanhar a massa e a geometria do halo galáctico (Uma nebulosa de poeira, gás e matéria escura). O CubeSat também auxiliou na sedimentação de detectores de derivação compostos de silício (HALOSAT, 2020). A missão Lunar Flashlight tem a finalidade de desenvolver pesquisas na lua, analisando através de *lasers* infravermelhos e um espectrômetro, o lado escuro da lua, perto do seu polo sul da lua mapeando o gelo nessas regiões, fornecendo informações sobre o que poderiam ser um recurso valioso no futuro, pois a água que compõem o gelo, pode ser analisada para usos futuros. Também vai servir para demonstrar o funcionamento do refletômetro a laser, sendo o único CubeSat a testar a tecnologia a utilizar a tecnologia de propulsão “Verde”, composta de um propelente menos tóxico que os convencionais (COHEN et al., 2020).

Pequenos satélites modernos requerem antenas para realizar quatro funções fundamentais:

- Telemetria, rastreamento e comando (TTC), que inclui uplink e downlink, em diferentes frequências;
- Downlink de alta velocidade para dados de carga útil, por exemplo, em missões de observação da Terra;
- Recepção de sinal GPS / GNSS;
- Ligações cruzadas entre satélites; Essas funções geralmente requerem várias antenas diferentes.

Geralmente as antenas utilizadas são normalmente são hélices, monopolos, patches e copas excitadas por patch, dependendo da frequência alcance, requisitos de cobertura e aplicação (GAO et al., 2009). Um dos primeiros estudos sobre antenas planas para pequenos satélites apareceu em (TANAKA et al., 1995), para preservar a área de antenas e células solares em um micro-satélite, os autores projetaram um sistema de irradiação com os painéis solares fixados no topo da antena patch.

3 ANTENAS

Antena é um sistema irradiante que transmite ou recebe energia eletromagnética. O campo elétrico introduz os elétrons livres da antena em movimento, gerando radiação eletromagnética, ou seja, a energia elétrica é transformada em fótons pela antena transmissora. Na antena receptora ocorre o processo inverso, a energia eletromagnética recebida movimenta os elétrons livres da antena receptora fazendo gerar um sinal elétrico que é conduzido até o receptor. De forma simplificada, Balanis define antena como “uma estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento” (BALANIS, 2015). Na Figura 4 é apresentado um esquemático de duas antenas hipotéticas, uma transmissora e outra receptora. Uma antena pode ser considerada um dispositivo que converte a corrente alternada de um condutor em ondas eletromagnéticas de mesma frequência para o espaço livre, sendo também capaz de fazer o processo inverso (BALANIS, 2015). O avanço tecnológico, principalmente de circuitos integrados de micro-ondas, conduziu a uma evolução natural nas comunicações *wireless*.

Figura 4 – Antenas Hipotéticas: Transmissora (esq.) e Receptora (dir.)



Fonte: Adaptado de (BALANIS, 2015)

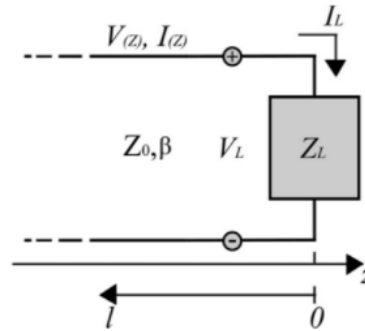
A representação hipotética das antenas dipolo da Figura 4. É possível notar que cada uma se assemelha a um circuito aberto, porém um circuito aberto não pode fornecer corrente e sem corrente não há radiação. Entretanto, existe um efeito capacitivo entre os dois lados de uma antena, de modo que, com o aumento da frequência surge um caminho de baixa impedância. Com isso, uma antena comporta-se como um circuito RLC (Resistência (R), Indutância (L), Capacitância (C)).

3.1 PERDA DE RETORNO E CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

Em uma antena ideal não existe perda de retorno. Nas antenas reais essa perda deve ser o menor possível. A perda de retorno é comumente mensurada em escala logarítmica, o decibel (dB). Quando a impedância de entrada da antena não corresponde à impedância de saída do dispositivo de guiamento (linha de microfita, cabo coaxial, guia de ondas, etc.) ocorre um descasamento de impedância.

O descasamento faz com que parte da energia da antena volte de encontro a energia que sai do dispositivo de guiamento em direção a antena, gerando as ondas estacionárias e consequentemente as perdas. Sendo assim, parte da energia não é transmitida (POZAR, 2011).

Pozar apresenta algumas teorias e formulações que são abordadas de forma sucinta abaixo (POZAR, 2011). Na Figura 5 é apresentado um exemplo de linha de transmissão cuja terminação se dá em uma carga de impedância Z_L . Vale ressaltar que uma antena pode ser entendida como uma carga para a linha.

Figura 5 – Linha terminada em uma carga de impedância Z_L 

Fonte: adaptado de (POZAR, 2011)

Z_0 é a impedância característica da linha e representa a relação de tensão para corrente da onda viajante. A onda incidente é representada por $V_0^+ e^{-j\beta z}$, onde β é a constante de fase e z a variável espacial. $V(z)$ e $I(z)$ correspondem a tensão e corrente com relação a z . V_L , I_L , e Z_L são respectivamente voltagem, corrente e impedância na carga e finalmente o l se refere à linha. Quando $Z_L \neq Z_0$ (descasamento), Z_L deve ser a relação de tensão para corrente. Para tal, o somatório das ondas incidentes e refletidas deve ser igual à tensão total na linha, de forma análoga para a corrente total.

A amplitude (normalizada) da tensão da onda refletida em relação à tensão da onda incidente é definida como coeficiente de reflexão de voltagem, conforme a equação 3.1 :

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.1)$$

A tensão e a corrente na linha são uma superposição das ondas incidentes e refletidas, também chamadas ondas estacionárias (POZAR, 2011). Se $Z_L = Z_0$, implica $\Gamma = 0$, ou seja, não haveria onda refletida.

Na prática $0 < \Gamma < 1$. Se $\Gamma = 1$, potência máxima seria entregue a carga, se $\Gamma = -1$ não haveria potência alguma entregue a carga. Quando nem toda potência disponível no gerador é entregue a carga ocorre o que é chamado de perda de retorno (dada em dB), a qual pode ser obtida pela equação 3.2:

$$RL = -20 \log |\Gamma| \text{ dB} \quad (3.2)$$

Se $\Gamma = 0 \rightarrow RL = \infty \text{ dB}$, carga casada.

Se $\Gamma = 1 \rightarrow RL = 0 \text{ dB}$, reflexão total.

O aumento de Γ eleva a razão de V_{max} por V_{min} (valores máximos e mínimos para a tensão na linha). Essa medida de descasamento da linha é chamada VSWR (Voltage Standing Wave Ratio – relação de onda estacionária de tensão), a qual pode ser obtida pela equação 3.3:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.3)$$

Se $1 \leq VSWR \leq \infty$, Se $VSWR = 1$, carga casada

Neste trabalho o leitor verá o termo S_{11} , em referência a perda de retorno (RL). S_{11} é uma referência técnica ao Analisador de espectro utilizado na medição, trata-se da relação de entrada e saída do sinal

na porta 1.

Em uma antena real é comum adotar que, para um funcionamento eficiente da mesma, temos que ter um S_{11} menor que -10 dB, que corresponde a 90% de energia entregue pela antena na frequência de ressonância. É abaixo desse limiar de -10 dB que se define a largura de banda da antena.

3.2 LARGURA DE BANDA

A largura de banda define a faixa de frequência na qual a antena pode funcionar com qualidade. A banda é definida na linha de corte de -10 dB de S_{11} ; F_c é a frequência central, F_s e F_i são os limites superior e inferior da banda, respectivamente.

O cálculo da largura de banda em termos percentuais é obtido, conforme equação 3.4:

$$BW_{\%} = 100 \cdot \frac{F_s - F_i}{F_c} \quad (3.4)$$

3.3 GANHO E DIRETIVIDADE

Uma antena isotrópica é uma antena hipotética na qual a radiação se dá uniformemente em todas as direções. Qualquer antena que apresente aspectos direcionais em relação a uma antena isotrópica possui um ganho (BALANIS, 2015), (ANDRADE, 2019), o qual é definido pela equação 3.5:

$$G = \frac{PMRA}{PMRAR} \quad (3.5)$$

Onde PMRA é a potência máxima recebida de uma antena de interesse e PMRAR é a potência máxima recebida da antena de referência (ANDRADE, 2019).

Em uma antena cujo comprimento seja diferente de zero existe radiação preferencial, em uma direção específica (θ, φ) , e pode ser denotado *diretividade*, a diretividade é obtida da razão entre a intensidade de radiação da antena em determinada direção $\Phi(\theta, \varphi)$ e a potência média radiada relativa a todas as direções ao longo de uma esfera imaginária posicionada no campo distante, conforme equação 3.6.

$$D = \frac{IRDD}{IRMTD} \quad (3.6)$$

Onde, IRDD é a intensidade de radiação em uma dada direção e IRMTD é a intensidade de radiação média, relativa a todas as direções (ANDRADE, 2019).

A radiação média para uma esfera é $\frac{1}{4\pi} \cdot P_T$ (potência total radiada), portanto a diretividade pode ser dada pela equação 3.7.

$$D = \frac{4\pi\Phi(\theta, \varphi)}{P_T} \quad (3.7)$$

Sucintamente, a diferença fundamental entre ganho e diretividade é a consideração das perdas de potência nas partes de condutividade e dielétricas da antena (FUSCO, 2009), portanto:

- Diretividade, D é a razão entre a intensidade de radiação da antena de interesse e a intensidade de radiação da antena referência.
- Ganho, G é a razão entre intensidade de radiação da antena de interesse e a intensidade de radiação da antena de referência, a qual irradia a mesma potência oferecida na entrada da antena de interesse, porém sem considerar perdas resistivas da antena.

Ganho e diretividade se relacionam com a eficiência de radiação da antena, conforme equação 3.8,

$$G = e_r \cdot D \quad (3.8)$$

Onde, e_r é a eficiência de radiação da antena.

O ganho pode ser relacionado ainda com a área efetiva da antena, conforme equação 3.9.

$$G = A_e \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \quad (3.9)$$

Onde, λ é o comprimento de onda e A_e é a área efetiva da antena.

3.4 EFICIÊNCIA

A eficiência de radiação e_r de uma antena pode ser denotada como a razão entre a potência efetivamente radiada P_r no meio e a potência entregue (P_e) na entrada da antena, ou seja, em seus terminais. A eficiência de radiação (e_r) pode ser calculada conforme equação 3.10:

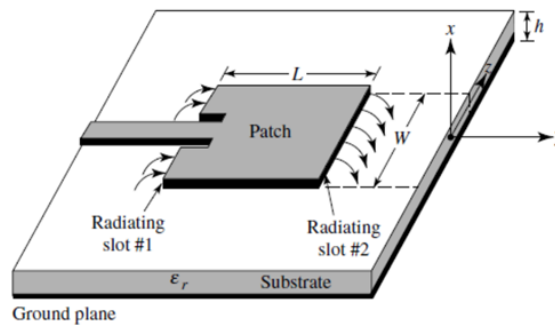
$$e_r = \frac{P_r}{P_e} \quad (3.10)$$

Apesar de ser um parâmetro muito importante para antenas a e_r , por si só, não permite o cálculo da perda na transferência de potência entre o gerador e a antena, pois como mencionado anteriormente em 3.1 (perda de retorno e casamento de impedância). Existe uma parcela da energia que é refletida da antena em direção ao gerador devido o descasamento de impedância. Além disso, a reflexão também pode ocorrer por descontinuidades no gerador, linhas de transmissão e antena.

4 ANTENAS DE MICROFITA

Antenas patch desenvolvidas em microfita são classificadas como antenas planares. Tais dispositivos são comuns na faixa de micro-ondas, mas podem ser utilizados a partir de 1GHz . São simples, tem um custo reduzido e são compatíveis com tecnologia de circuito impresso (KOZAKOFF, 2010). Suas utilizações mais comuns são radar, comunicações via satélite, comunicações móveis, mísseis, aeronaves, sistema de posicionamento global (GPS), entre outros. A idealização da microfita é atribuída a diversas pessoas, entre elas Greig e Englemann (GRIEG; ENGELMANN, 1952) e Deschamps (DESCHAMPS, 1953), esse último especificamente para antenas. Na década 1970 houve um aumento expressivo da quantidade e do impacto das publicações de antenas planares ,na época surgiu demanda por antenas de perfil baixo para a nova geração de mísseis.

Figura 6 – Mecanismo de radiação para uma Antena Patch de Microfita.



Fonte: adaptado de (BALANIS, 2015)

Antenas de microfita são constituídas de um *patch* radiante separado de um plano de terra por uma camada dielétrica também conhecida por substrato dielétrico (BALANIS, 2015). Na Figura 6 é apresentado um esquemático de uma antena de microfita típica.

O *patch* radiante é uma camada metálica bem mais fina que o comprimento de onda no espaço livre λ_0 . O substrato dielétrico deve ter baixa perda (FUSCO, 2009) e pode ser feito de uma variedade de materiais com valores típicos de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. A distância h entre *patch* e plano de terra é, comumente, $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$ (BALANIS, 2015).

Existem diversas geometrias para o *patch*, algumas podem ser obtidas analiticamente e outras apenas numericamente. A escolha da geometria vai depender da demanda e dos parâmetros desejados no projeto. Geometrias comuns como a retangular são mais simples de modelar, existem diversas outras geometrias mais complexas, a exemplo das geometrias fractais.

Para uma maior eficiência, largura de banda e facilidade de radiação em antenas de microfita, utilizam-se substratos largos com um valor baixo da constante dielétrica ϵ_r . O contrário é desejado para circuitos de micro-ondas para evitar radiação e acoplamento, pois desta forma ocorre o confinamento dos campos. A alimentação mais prática para antenas de microfita é com linha de transmissão de microfita impressa no mesmo substrato, nesse caso, surge a necessidade de um equilíbrio na escolha do material, já que um substrato largo aumentará a radiação espúria na linha, o que virá a contribuir negativamente para o diagrama de radiação e conseqüentemente para outros parâmetros da antena.

Além disso, o aumento da espessura do substrato faz surgir ondas de superfície que alteram a potência disponível para a radiação direta (BALANIS, 2015).

4.1 FUNDAMENTOS DE RADIAÇÃO

Observando a Figura 6 é possível verificar que o *patch* se comporta como um circuito aberto; a corrente nas extremidades de L do *patch* é 0 e máxima no centro, o inverso ocorre para a tensão, cujo mínimo está no início de L o máximo no final, o *VSWR* resulta em 1. Surge o efeito de campo de franjas nas extremidades.

Quando a antena é alimentada seu *patch* é excitado e uma distribuição de carga é mantida na parte de baixo da plaqueta, ou seja, onde a mesma faz contato com o substrato (ANDRADE, 2019). De forma análoga o plano de terra também é excitado. Em dado instante o *patch* está carregado positivamente e o plano de terra negativamente. Isso faz com que haja uma força de atração que mantém muitas cargas entre o *patch* e o plano de terra (essa quantidade varia de acordo com ε_r do material dielétrico), porém no *patch* algumas cargas positivas vão para as margens devido a força de repulsão entre as mesmas. A radiação se dá devido ao efeito de franjas gerado por estas cargas nas margens, próximo às bordas do *patch*, o campo elétrico sofre um espalhamento para fora dos limites laterais da antena. O resultado disso é uma permissividade efetiva do dielétrico menor do que a permissividade real (ANDRADE, 2019). A quantidade de Efeito de Borda depende das dimensões do *patch* e da altura do substrato (FUSCO, 2009).

A maioria das linhas de campo fica confinada no substrato dielétrico da antena, e outras passam pelo efeito de borda. Parte das ondas se propaga no substrato e parte no ar, portanto há uma constante dielétrica efetiva $1 < \varepsilon_{eff} < \varepsilon_r$, se o ar é o outro meio acima da microfita, que considera a velocidade de propagação na microfita e o efeito de borda (BALANIS, 2015). De fato, a microfita geralmente está em um meio de permissividade híbrida: substrato da antena e ar.

4.2 PATCH RETANGULAR

Um *patch* muito comum e bastante utilizado em antenas de referência em diversas pesquisas é o *patch* retangular. Seu comprimento L controla a frequência e sua largura W, a impedância. Utilizar valores maiores para W pode incrementar a largura de banda, com prejuízo às dimensões da antena. As equações 4.1, 4.2 e 4.3, obtidas de (BALANIS, 2015), são utilizadas para obter W, L, e o ε_{eff} .

$$W = \frac{c}{2 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}} \quad (4.1)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo, f é a frequência de interesse e ε_r a constante dielétrica do material.

$$L = \frac{c}{2 \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 0,842h \cdot \left(\frac{(\varepsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\varepsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \right) \quad (4.2)$$

Onde ε_{eff} é constante dielétrica efetiva obtida da equação 4.3 e h é a espessura do substrato dielétrico.

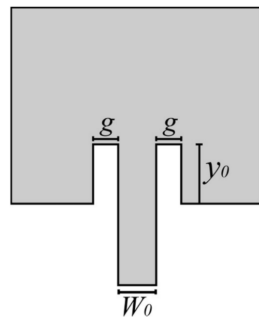
$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \right) \quad (4.3)$$

4.3 ALIMENTAÇÃO POR LINHA DE MICROFITA

Uma linha de microfita é composta por uma fita metálica separada do plano de terra por um material dielétrico. Uma representação é encontrada na Figura 9. O uso deste tipo de alimentação tem a desvantagem de promover maior radiação espúria quando usada com substratos largos, porém é fácil de casar a impedância através do controle de sua largura e ponto de inserção, além disso, é mais robusta e fácil de construir, já que está no mesmo plano da antena. A modelagem da largura de uma linha de microfita para uma dada impedância, bem como a análise da impedância de uma linha com determinada largura, podem ser obtidos de forma analítica.

Na Figura 7 podemos observar um inset feed em uma antena *patch* retangular convencional.

Figura 7 – linha de microfita acoplada a uma antena *patch* retangular.



Fonte: Autoria própria, adaptado de (BALANIS, 2015)

Apesar da radiação espúria, uma grande vantagem que motiva o uso de linhas de microfita, é a possibilidade de fácil casamento de impedância através do ajuste do ponto de inserção y_0 e da largura da linha W_0 .

É possível projetar a largura de uma linha de microfita para uma impedância de interesse através das equações 4.4 e 4.5) a seguir, contidas nas referências (BALANIS, 2015; POZAR, 2011) .

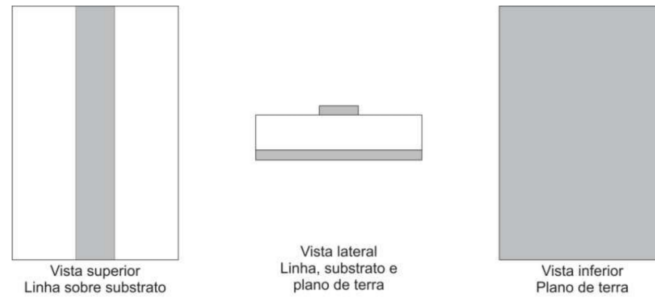
Para linhas cuja a largura é menor que a espessura do substrato, portanto, $\frac{W}{h} < 1$.

$$Z_0 = \frac{60}{(\varepsilon_{eff})^{1/2}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0,25 \frac{W}{h} \right) \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} + 0,041 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

onde Z_0 é a impedância característica da linha, ε_{eff} é a permissividade relativa efetiva, W é a largura da linha de microfita, h é a espessura do substrato dielétrico e ε_r é a constante dielétrica relativa do material.

Figura 8 – Representação de uma linha de microfita



Fonte: adaptado de (FUSCO, 2009)

Para linhas cuja a largura é menor que a espessura do substrato, portanto, $\frac{W}{h} \geq 1$.

$$Z_0 = \frac{120\pi}{(\varepsilon_{eff})^{1/2}} \cdot \frac{1}{\left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \cdot \left(\frac{W}{h} + 1,444\right)\right]} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \quad (4.7)$$

5 MANUFATURA ADITIVA

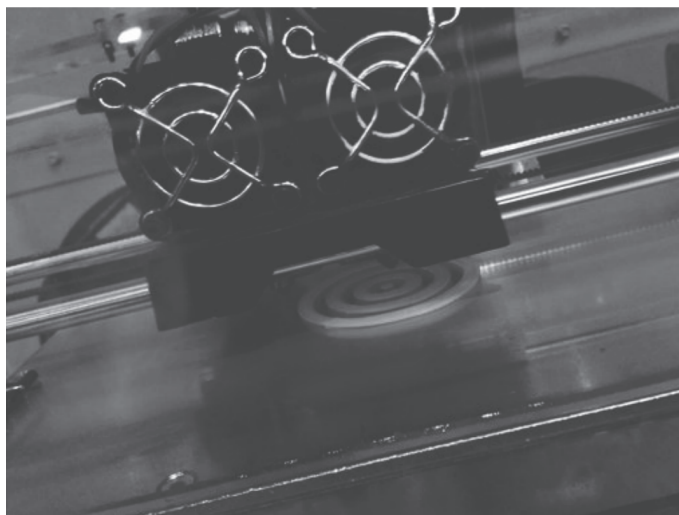
Na década de 1980, uma nova forma de manufatura industrial, que tradicionalmente era a manufatura subtrativa, foi proposta, a chamada manufatura aditiva. Os objetos 3D são produzidos pela adição camadas de material, em vez de remover material de um bloco inteiro. Essa forma de fabricação tem sido chamada de impressão 3D com referência a tecnologia semelhante usada em jato de tinta impressoras.

Ao longo do anos,cerca de mais de 30.000 patentes sobre impressão 3D foram publicadas apenas nos EUA.Recentemente Várias tecnologias de aditivos têm sido propostas , desde a fotopolimerização até a deposição por fusão até a bioimpressão . Ao mesmo tempo, vários programas de computador de código aberto que auxiliam no processo de fabricação foram disponibilizados na web.Atualmente,As impressoras 3D atualmente são mais baratas e acessíveis para o público. Isso resulta em uma boa possibilidade de usar impressoras 3D para prototipagem de antenas. As impressoras 3D estão usando materiais específicos que são novos para antena e tecnologia eletrônica resultando em diferentes antenas estruturas para atender às especificações da antena. A impressora 3D pode-se utilizar ácido polilático (PLA), um termoplástico biodegradável de alta resistência (GARLOTTA, 2001)

A forma tradicional de fabricação industrial de objetos sólidos consiste na remoção de material de um dado bloco sólido até que a forma prescrita seja obtida. É chamado de fabricação subtrativa e usa ferramentas como tornos e fresadoras.O caminho inverso, ou seja, adicionar material camada por camada para construir o objeto tridimensional é chamado de fabricação aditiva e é semelhante à maneira de construir edificações. Industrialmente, não foi usado até tempos recentes. Existe uma terceira forma de fabricação de objetos tridimensionais, ou seja, formando líquido ou material plástico na forma exigida e, em seguida, produzindo a solidificação do material. Esta última forma costumava ser frequentemente empregada na prototipagem.

O advento dos computadores na segunda metade do século XX e o desenvolvimento de tecnologias avançadas *software* de computador para projeto auxiliado por computador (CAD) e manufatura (CAM) têm revolucionado as formas de design, prototipagem e fabricação.

Figura 9 – Impressora aditiva extrudando filamento ABS



Fonte:(SAVINI; SAVINI, 2015)

Recentemente, a tecnologia de impressão 3D tem sido cada vez mais utilizada para a fabricação de estruturas 3D. Este método de manufatura tem várias vantagens sobre os métodos de fabricação tradicionais, incluindo um menor fator de forma, peso mais leve, menor custo e sendo mais bio-amigável e sustentável. Nos últimos anos, a impressão 3D tem sido utilizada para a fabricação de antenas (GIBSON, 2015). Em (MIRZAEI, 2015) a impressão 3D foi usada para a fabricação da parte do substrato da antena. Nestes projetos, o protótipo da antena foi fabricado usando materiais de substrato de impressão 3D disponíveis e, em seguida, a parte do radiador foi criada revestindo um condutor material nas camadas impressas em 3D.

Em (OLIVAS, 2011) as partes dielétricas e condutivas da antena foram ambas fabricado usando impressão 3D e como um processo integrado.

Um dos objetivos apresentados nesse trabalho é a fabricação dos substrato da utilizando manufatura aditiva ,foi realizada a impressão 3D com material PLA (Poliácido Láctico) da Marca 3DLab com uma impressora modelo BIQU B1, marca BigTreeTech - Biqu e qualidade de impressão na taxa de 0,05mm por altura de camada depositada. . No entanto, existem muitos materiais utilizados na impressão 3D, alguns deles são: ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PET (Politereftalato de etileno), Nylon, Gesso e Resina. Entre outros matérias menos utilizados encontram-se: titânio, aço, cerâmica, cera, areia e vidro (MIRZAEI, 2015).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados o equacionamento para Antenas de Microfita com Substratos inspirados em EBG considerando a alteração da permissividade devido a inserção de furos, e a metodologia utilizada para a simulação construção e medidas das antenas.

6.1 EQUACIONAMENTO PARA ANTENAS DE MICROFITA COM SUBSTRATOS INSPIRADOS EM EBG

Nesta seção 6.1 serão apresentados equacionamentos. Pois ao inserir furos em um substrato, a permissividade é alterada. As equações analíticas para obtenção de dimensões de *patches* utilizam a permissividade dos substratos, seus resultados serão comprometidos se o valor do parâmetro não considerar a alteração da permissividade, devido a inserção dos furos. As equações a seguir, visam calcular a permissividade de um substrato EBG, servindo como um fator de correção para as equações clássicas de cálculo de dimensões de *patch*, as quais não consideram furos no substrato (ANDRADE, 2019).

Atualmente é pouco discutido antenas com substratos EBG, é que elas elevam o nível de complexidade do projeto. observando as equações (4.1) (4.2) e (4.3), elas determinam o tamanho de um *patch* retangular a partir de alguns parâmetros. Um desses parâmetros é a constante dielétrica ϵ do material. Ao utilizar substratos EBG, uma estrutura híbrida é criada e a ϵ é alterada, o que influencia na largura do *patch* (4.1), na permissividade relativa efetiva (ϵ_r) (4.3) e, conseqüentemente, no comprimento do *patch* (4.2). Se uma antena utiliza um substrato de permissividade baixa, a sua frequência aumenta, e analogamente, uma permissividade alta a frequência irá diminuir.

Primeiro é necessário calcular o volume do substrato. o volume total (V_{total}) do substrato convencional retangular (incluindo o volume dos furos) é de cálculo simples e intuitivo, conforme a equação (6.1)

$$V_{total} = \Delta L \cdot \Delta W \cdot \Delta h \quad (6.1)$$

O próximo passo é realizar os cálculos do volume de uma unidade de furo (V_{furo}). Isso dependerá do formato do furo, se quadrado, calcula-se de acordo com a equação (6.2):

$$V_{furo \text{ quadrado}} = a^2 \cdot h \quad (6.2)$$

Onde h é altura do furo e a o lado do quadrado.

Já para um formato de furo prisma hexagonal teremos:

$$V_{furo \text{ hexagonal}} = \frac{3 \cdot b^2 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot h \quad (6.3)$$

Onde h é altura do furo e b o lado do hexágono.

O volume do material principal ($V_{material}$) do substrato, no qual contém os furos pode ser calculado, conforme equação (6.4):

$$V_{material} = V_{total} - (V_{furo} \cdot n) \quad (6.4)$$

Onde n é o número de furos no substrato.

Conforme (6.5) e (6.6) é muito simples encontrar a porcentagem do material principal e qual é a porcentagem do material das lacunas.

$$V_{material\%} = \frac{V_{material} \cdot 100}{V_{total}} \quad (6.5)$$

$$V_{furo\%} = 100 - V_{material\%} \quad (6.6)$$

Para encontrar a permissividade efetiva do substrato EBG basta somar os produtos das porcentagens dos materiais pelos seus respectivos valores de permissividade, conforme equação (6.7).

$$\varepsilon_{eff(Final)} = \varepsilon_{r\ material} \cdot V_{material\%} + \varepsilon_{r\ furo} \cdot V_{furo\%} \quad (6.7)$$

Inserindo (6.5) e (6.6) em (6.7) e simplificando algebricamente obtemos:

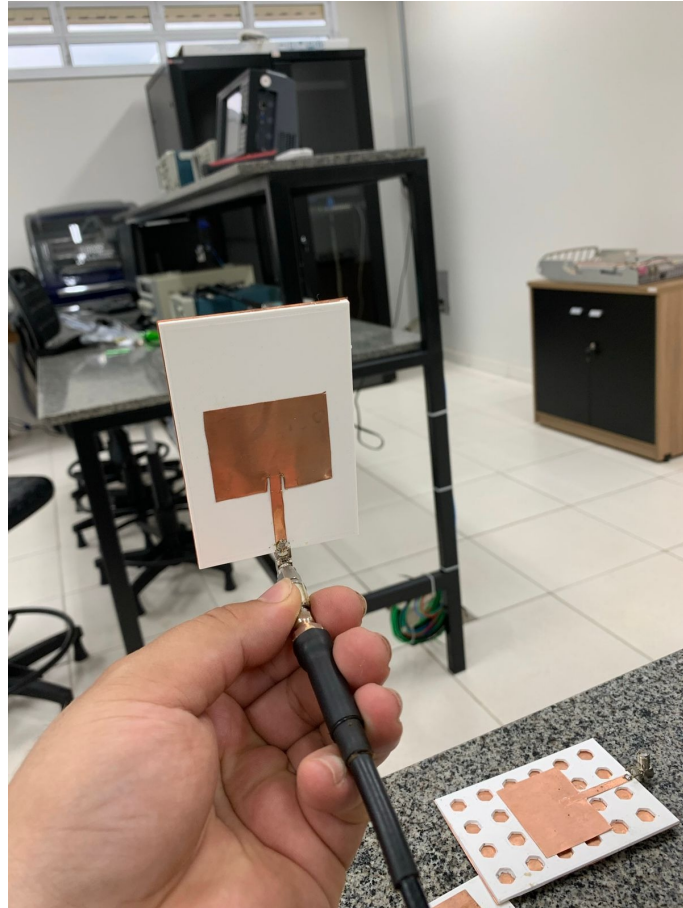
$$\varepsilon_{eff(Final)} = \left(\frac{\varepsilon_{material} \cdot V_{material}}{V_{total}} \right) + \left(\frac{\varepsilon_{furo} \cdot V_{furo} \cdot n}{V_{total}} \right) \quad (6.8)$$

6.2 ANTENA *PATCH* DE MICROFITA COM SUBSTRATO IMPRESSO EM PLA

As antenas estudadas tiveram como base uma antena planar de microfita formada por um *patch* retangular de laminado de cobre e um plano de terra, separados por um dielétrico. O substrato utilizado é o Ácido Polilático (PLA), e a permissividade relativa adotada $\varepsilon_r = 3,09$, tangente de perdas $\tan\delta = 0,0099995$ e espessura $h = 1,57$ mm. A técnica de alimentação escolhida, é por meio de linha de microfita. Assim, na configuração de alimentação escolhida, um cabo coaxial de 50Ω é conectado por meio de um conector SMA à linha de microfita, para alimentação da antena *patch* de microfita, tal qual mostrado na Figura 10.

As antenas *patch* de microfita que deu origem ao estudo foi projetada para uma frequência de ressonância $F_r = 2,4$ GHz e largura de banda $BW = 68$ MHz. Para esta antena, a impedância de entrada é $Z_{in} = 184,05 \Omega$

Figura 10 – Antena *patch* de microfita com substrato em PLA



Fonte: A autoria própria

A largura W da antena *patch* é calculada por meio da Equação 4.1, da seção 4.2, onde c é a velocidade da luz no vácuo.

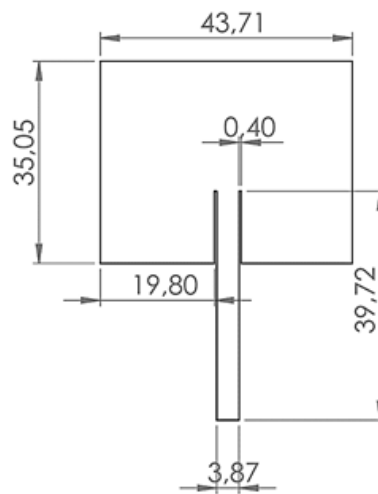
A partir das Equações (4.1), (4.2) e (4.3) da seção 4.2 são calculadas a largura $W = 43,705 \text{ mm}$ e o comprimento $L = 35,0495 \text{ mm}$, para a antena Patch. As dimensões do plano de terra projetadas ao projeto são: largura do substrato $subY = 61 \text{ mm}$ e comprimento do substrato $subX = 50 \text{ mm}$. E a linha de microfita utilizada para alimentação da antena tem largura da linha de alimentação " $FeedWidth$ " = $3,868 \text{ mm}$ e comprimento da linha de alimentação " $FeedLenght$ " = $27,202 \text{ mm}$. O casamento de impedância entre a antena *patch* de microfita e a linha de microfita de alimentação é obtido por meio da posição do inset " $InsetDistance$ " = $12,515 \text{ mm}$, sendo a largura do gap do inset " $InsetGap$ " = $0,4 \text{ mm}$.

As dimensões da antena *patch* retangular acima calculadas, são apresentadas conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões da antena *patch*

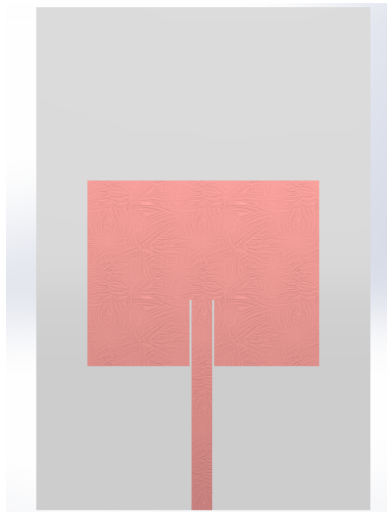
Dimensões	Medidas [mm]
W	43,705
L	35,0495
l_0	27,202
w_0	3,868
y_0	12,515
x_0	0,4

Fonte: Autoria própria

Figura 11 – Dimensões Calculadas do *patch*

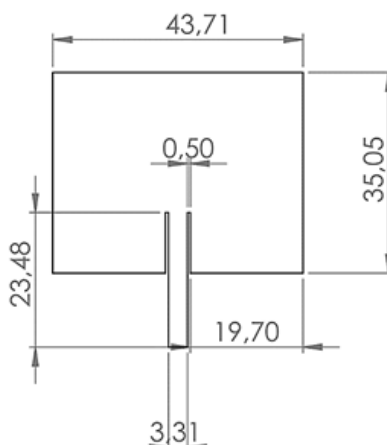
Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Antena 1 renderizada



Fonte: Autoria própria utilizando Software Solidworks Visualize

Foi realizado ajustes paramétricos na antena para otimizar sua perda de retorno,

Figura 13 – Dimensões otimizadas do *patch*

Fonte: Autoria própria

6.3 TÉCNICAS DE BAIXO CUSTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA COM SUBSTRATO PLA IMPRESSO EM 3D E ANTENAS INSPIRADAS EM EBG COM FUROS QUADRÁTICOS E HEXAGONAIS

O advento das impressoras 3D impulsionou a produção de protótipos e projetos em geral. Serão apresentados os resultados de seis antenas *patch* retangular em microfita com substrato impresso em impressora 3D para validar a eficiência das técnicas, serão também são apresentados os materiais, as técnicas de análise e construção, custos que podem viabilizar a produção de antenas de microfita com substratos impressos para fins de ensino, iniciação científica e pesquisas.

As topologias de furos estudadas foram: prisma quadrático e prisma hexagonal. A conservação das frequências, por ocasião do uso de outras geometrias. Nesta seção são mostrados os procedimentos utilizados e os comportamentos observados para os parâmetros de perda de retorno, casamento de impedância, largura de banda, eficiência de radiação e ganho, bem como equacionamentos, etc.

6.3.1 Construção

6.3.1.1 *patch*

Com relação à construção, os *patches* a princípio seriam obtidos por corrosão em percloroeto de ferro de um laminado de cobre cuja espessura é de aproximadamente 0,145 mm – porém não foi obtido resultado satisfatório, houve duas tentativas para a corrosão, primeiro, a corrosão dos laminados excedeu o tempo que foi previamente estimado que ocasionou que os adesivos dimensionados com as dimensões do *patch* foi avariado, e dissolveram na solução aquosa, o que impossibilitou a corrosão de forma uniforme no laminado. Na segunda tentativa utilizando um novo material de adesivo na superfície do laminado. que suporta mais tempo exposto ao percloroeto de ferro. O laminado, que ficou adesivado cerca de 6 horas submerso no percloroeto de ferro, e foi obtido uma corrosão razoável, entretanto nas bordas houve um leve contato com a solução aquosa devido a exposição do material com o percloroeto de ferro, e com isso ocorreu corrosões em pequenas superfícies dentro da região que estava sendo protegida pelo adesivo.

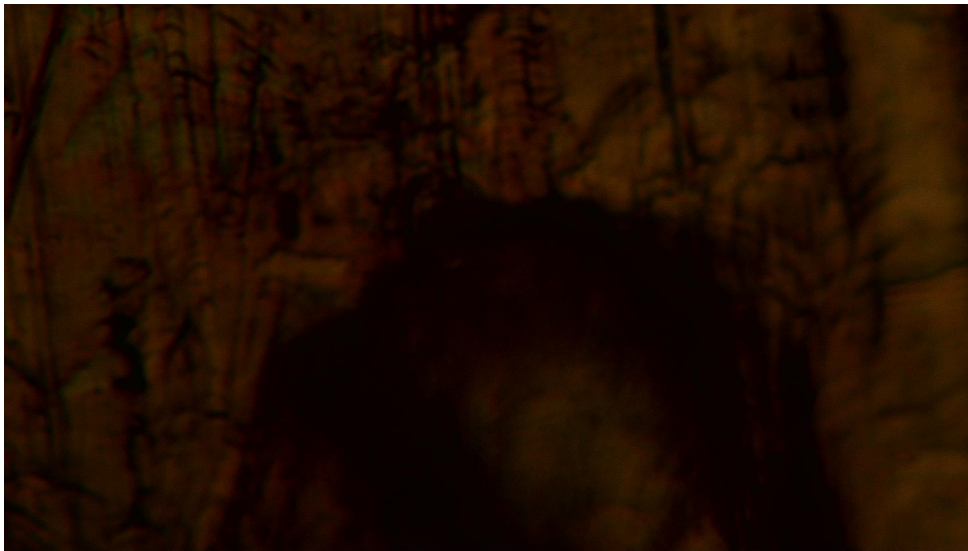
Posteriormente, o *patch* foi analisado no microscópio e pode-se encontrar diversas falhas e imperfeições na corrosão onde pode-se observar na Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 – Falhas na corrosão do *patch* - Aumento de 200X



Fonte:Autoria própria

Figura 15 – Corrosão não linear, falhas na superfície - Aumento de 200X

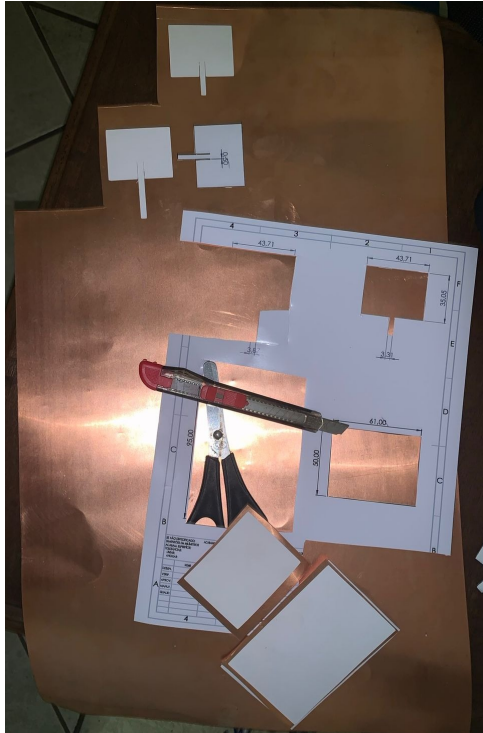


Fonte:Autoria própria

Podemos observar na Figura 14 as imperfeições tanto na linha de microfita de alimentação quanto nas imperfeições em torno do gap do *patch*. Já na Figura 15 podemos observar um "buraco" em uma das extremidades do *patch*, um desgaste abrupto do laminado de cobre, quase um corte do material.

Com isso, após esses impeditivos, foi realizada a construção dos *patches* através de corte do laminado de cobre onde se utilizou os mesmos adesivos sobressalentes que anteriormente foram previstos para corrosão. Os adesivos tiveram função de gabarito para o corte para-se obter os Patches e os Planos terra, de forma que eles fossem com as medidas que foram dimensionadas previamente pelas Equações e HFSS.

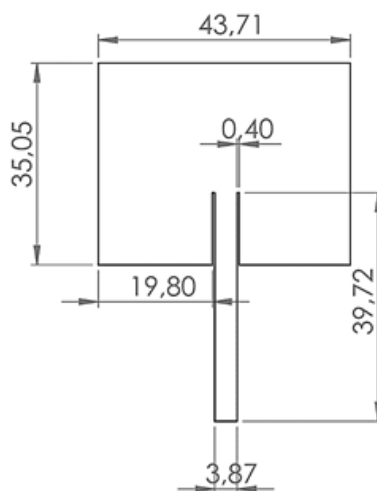
Figura 16 – Construção do Patch através do corte do laminado de cobre



Fonte: Autoria própria

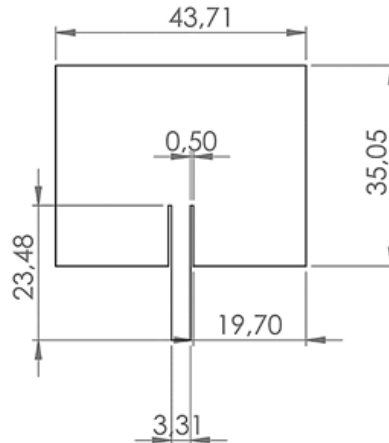
As antenas são alimentadas por linha de microfita, por ser localizada no mesmo plano da antena e pela facilidade de casar a impedância valendo-se da técnica de inset feed. O projeto do casamento de impedância foi para 50Ω . Utilizou-se conector SMA tipo fêmea. Na Figura 17 e Figura 21 é apresentado o projeto com as dimensões das antenas propostas. Nas Figuras a seguir é mostrado e é exibida as antenas.

Figura 17 – Construção do Patch através do corte do laminado de cobre



Fonte: Autoria própria

Figura 18 – Construção do Patch otimizado através do corte do laminado de cobre



Fonte: Autoria própria

6.3.1.2 Substrato

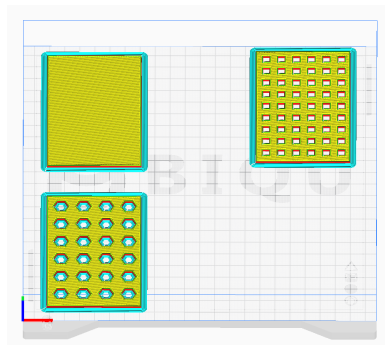
A construção, dos substratos foi realizada utilizando filamento de PLA de diâmetro de 1,75mm da Marca 3DLab. A espessura dimensionada através do projeto foi de $h = 1,57\text{mm}$ e os Parâmetros para impressão é dada conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na impressão dos substratos

Substratos Parâmetros	Tempo de impressão Caracterização
Altura da camada	0,05mm
Preenchimento	100%
Padrão de preenchimento	<i>Grid</i>
Temperatura de impressão	200°C
Temperatura da mesa de impressão	60°C
Velocidade de impressão	60mm/s
Velocidade de impressão de suporte	10mm/s
Velocidade de ventoinha	100%
Tipo de adesão na mesa	<i>Brim</i>

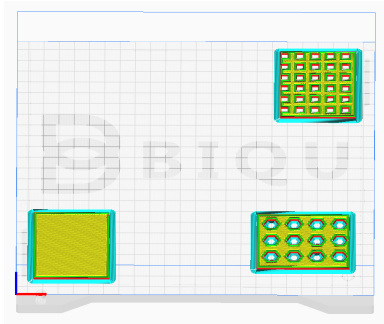
Fonte: Autoria própria

Figura 19 – Preview da construção dos substratos



Fonte: Autoria própria utilizando o *software* Ultimaker Cura

Figura 20 – *Preview* da construção dos substratos das antenas otimizadas



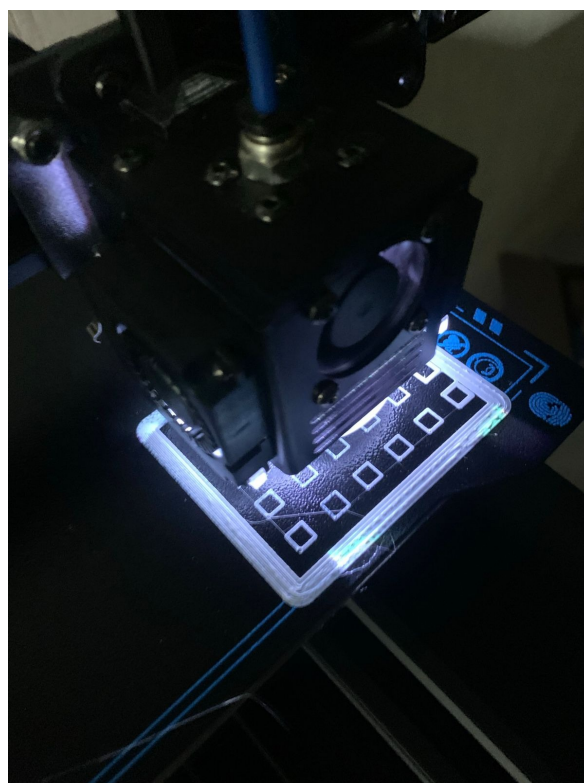
Fonte: A autoria própria utilizando o *software* Ultimaker Cura

Tabela 3 – Tempo e quantidade de material utilizado na impressão para cada substrato

Substratos	Tempo de impressão	Quantidade de material utilizado (g)
Substrato antena não otimizadas	9hrs 18min	31 g
Substrato antena otimizadas	5hrs 25min	16 g

Fonte: A autoria própria

Figura 21 – Impressão dos substratos em impressora 3D



Fonte: A autoria própria

6.3.2 Custos de produção

Uma lista contendo as ferramentas e materiais básicos empregados na construção das estruturas é apresentada na Tabela 4. Para efeito de esclarecimento o grama do ouro era avaliado em R\$326,32.

Tabela 4 – Material utilizado para confecção das antenas.

Itens utilizados	Custos financeiros - Real (R\$)
Impressora 3D- Biqu B1	2476,78
Filamento PLA Branco - 3DLAB	108,00
Adesivos Patch Vinílicos	30,00
Adesivos Patch Couche	40,00
10 Conectores SMA Fêmea	43,29
Percloroeto De Ferro - Implastec - 500ml	46,90
Chapa Folha De Cobre 0,15mm x 30cm x 50cm	96,00
Total	2840,97

Fonte: Autoria própria

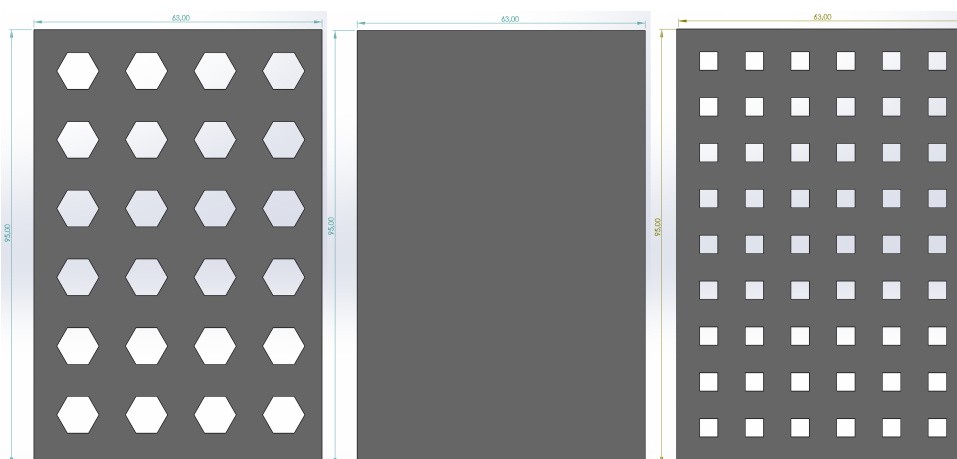
6.4 PROJETO E CONFIGURAÇÃO DAS ANTENAS

O material utilizado no projeto e na manufatura dessas antenas foram laminado de cobre e PLA (Ácido Poliláctico) de qualidade Premium+, marca 3DLab. PLA é um dos materiais mais utilizados em impressão 3D, sua impressão é fácil e o custo é baixo. É um material termoplástico biodegradável de origem natural e de fontes renováveis, como amido de milho ou cana-de-açúcar, e que dispõe de uma razoável resistência na absorção de impactos.

Utilizou-se uma impressora modelo B1, marca Bigtreetech - Biqu, com qualidade de impressão na taxa de 0,05mm por altura de camada depositada. A impressão consiste em reproduzir um modelo 3D projetado em computador. O produto é gerado através da fundição do filamento do material camada a camada, até a reprodução completa do modelo projetado.

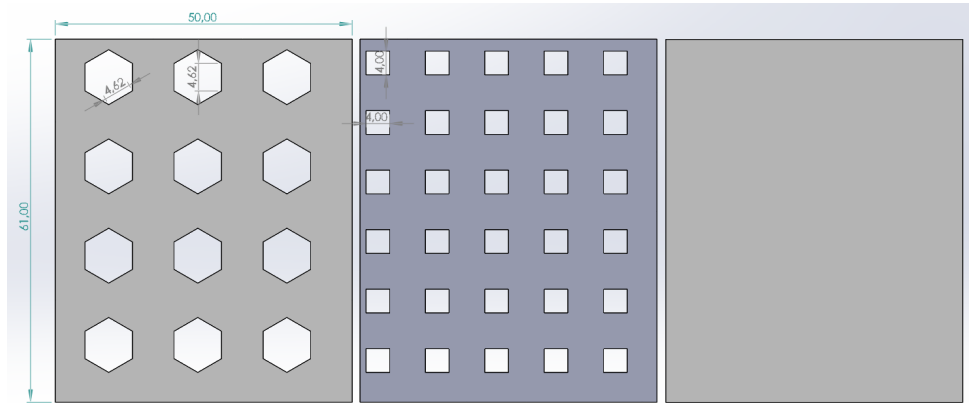
As geometrias utilizadas nos furos foram do tipo prisma hexagonal e prisma quadrático. O furo hexagonal tem seu lado aproximadamente 4,62mm, o lado do quadrado mede aproximadamente 4 mm. A espessura h do substrato é igual entre as estruturas 1,57 mm.

Figura 22 – Substratos desenhados e modelados no Solidworks para a impressão 3D



Fonte: SolidWorks Autoria própria

Figura 23 – Substratos desenhados e modelados no Solidworks para a impressão 3D - II



Fonte: SolidWorks autoria própria

Tabela 5 – Dimensões do substrato e furo.

Substrato	W [mm]	L [mm]	h [mm]	Tipo de Furo	Número de furos	Pitch [mm]	Volume Furo [mm ³]
1	63	95	1,57	-	-	-	-
2	63	95	1,57	prisma quadrático	54	10	1356,48
3	63	95	1,57	prisma hexagonal	24	15	1330,22
4	50	61	1,57	-	-	-	-
5	50	61	1,57	prisma quadrático	30	10	753,6
6	50	61	1,57	prisma hexagonal	12	15	1044,22

Fonte: Autoria própria

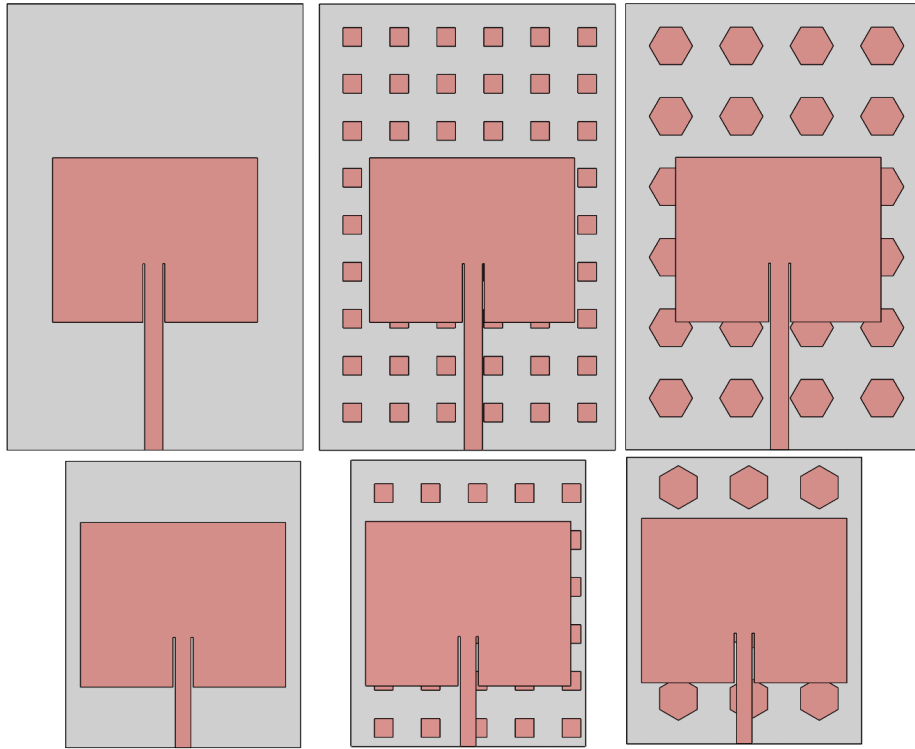
6.5 CARACTERÍSTICAS DOS PROTÓTIPOS

Os protótipos foram analisados de 1,2 GHz a 3,6 GHz. As antenas são as mesmas em patches, planos de terra, conectores e a única diferença é a presença de furo, o tipo de furo e volume do furo, e as mesmas se encontram na tabela 5. Na Tabela abaixo é apresentado as dimensões do Patch e do Substrato.

Tabela 6 – Dimensões das Antenas Patch

Antena	1	2	3	4	5	6
W_{sub} [mm]	63	50	63	50	63	50
L_{sub} [mm]	95	61	95	61	95	61
h [mm]	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
W [mm]	43,705	43,705	43,705	43,705	43,705	43,705
L [mm]	35,0495	35,0495	35,0495	35,0495	35,0495	35,0495
l_0	12,515	10,58	12,515	10,58	12,515	10,58
w_0	3,868	3,3121	3,868	3,3121	3,868	3,3121
y_0	27,20	12,9	27,20	12,9	27,20	12,9
x_0	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5

Fonte: Autoria própria

Figura 24 – Prototipação das antenas em *software*

Fonte: Autoria própria utilizando o *software* SolidWorks

7 RESULTADOS DE ANTENAS COMPACTAS E MINIATURIZADAS PARA COMUNICAÇÕES SEM FIO

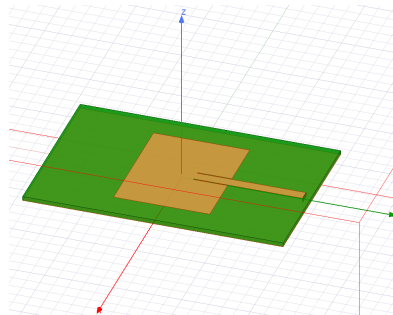
Este Capítulo apresenta os Resultados dos projetos de antenas *patch* de microfita miniaturizadas para utilização em aplicações de comunicações sem fio. As simulações relativas aos projetos foram realizadas utilizando o *software* Ansoft HFSS 2020 R2 e os resultados experimentais foram obtidos a partir de medidas realizadas com os protótipos fabricados, por meio de um Analisador de espectro, modelo USB-SA44B , da Signal Hound.

7.1 PROTÓTIPOS SIMULADOS E RESULTADOS

Os resultados simulados foram obtidos através do *software* ANSYS HFSS 2020 R2.

7.1.1 Protótipos simulados - Antena 1

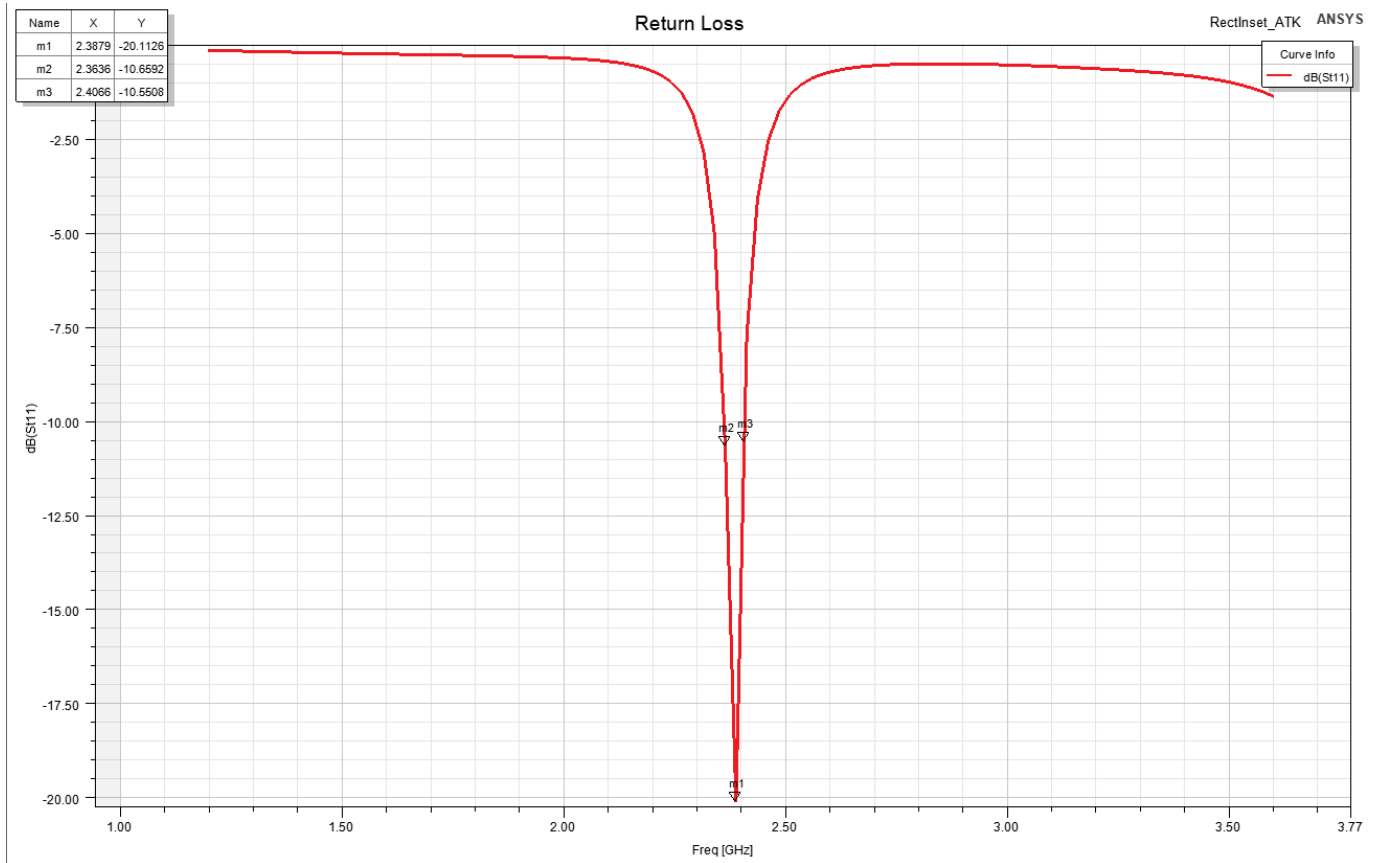
Figura 25 – Antena 1 - Simulação de antena microstrip retangular



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Na Figura 26 , é mostrado gráfico de $|S_{11}|$ (dB) em função da frequência, para a antena 1 , com os resultados simulados.

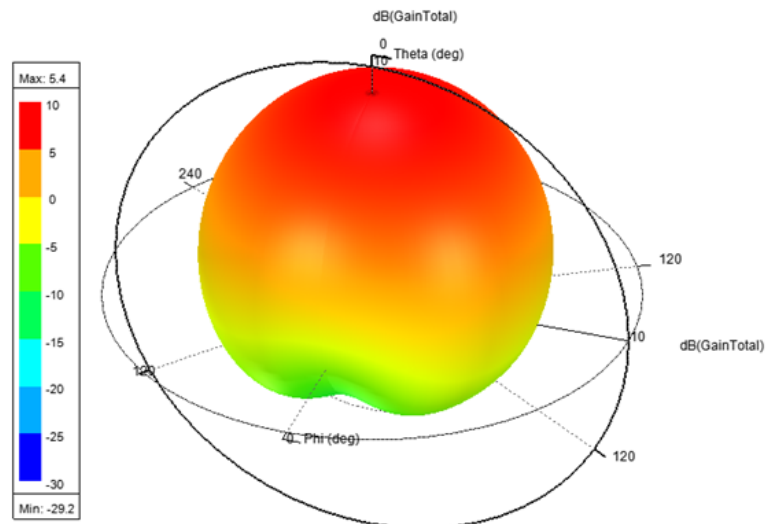
Figura 26 – Valores simulados e medidos de $|S_{11}|$ (dB) para a antena 1.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Na Figura 27 , é mostrado a representação do ganho (dB) da Antena 1 (dB), com os resultados simulados.

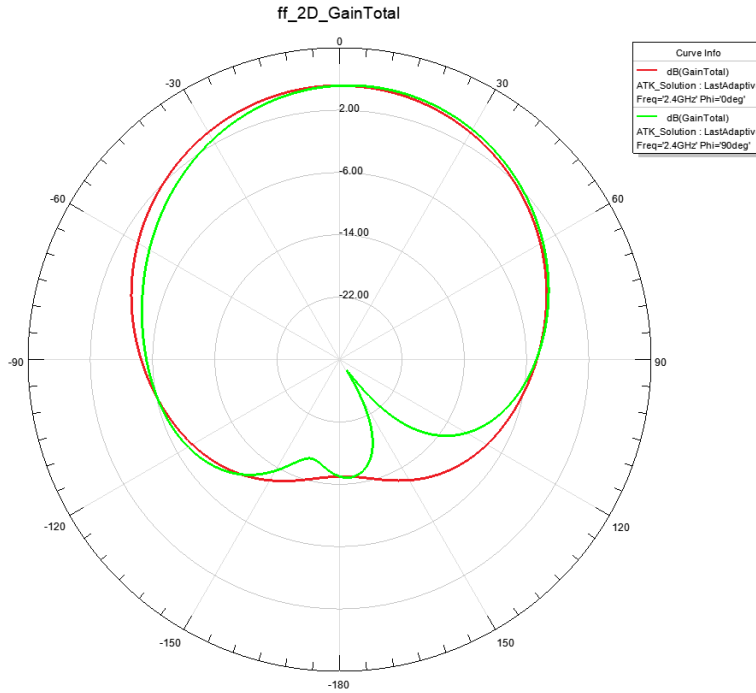
Figura 27 – Diagrama de radiação 3D normalizado



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

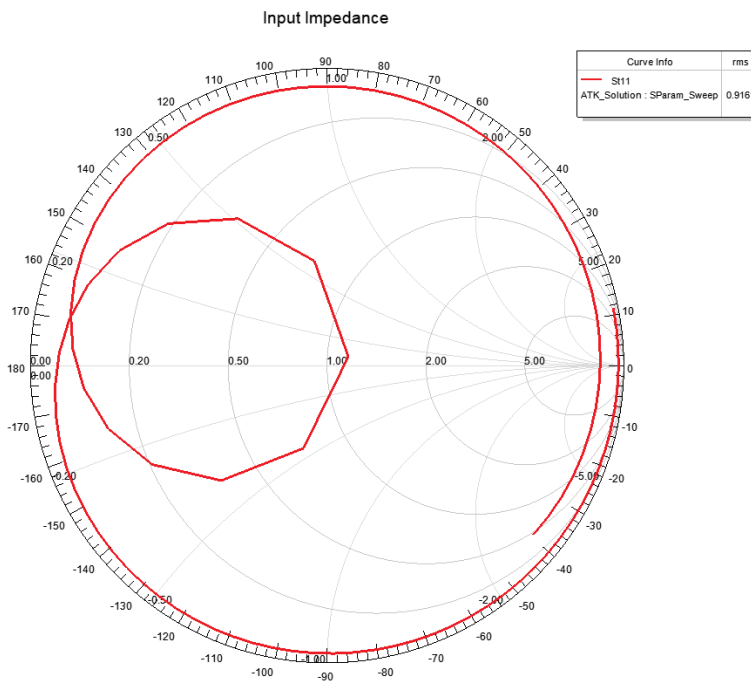
Na Figura 27 e Figura 28 , ilustram a representação do ganho (dB) da Antena 1 (dB), com os resultados simulados através dos diagramas de radiação 3D normalizado e 2D (planos E e H).

Figura 28 – Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

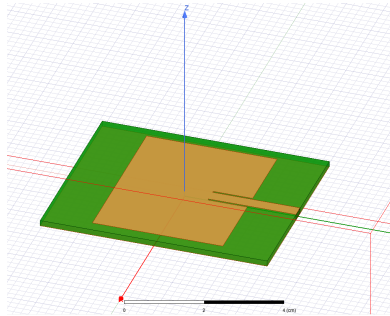
Figura 29 – Impedância da antena.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

7.1.2 Protótipos simulados - Antena 2

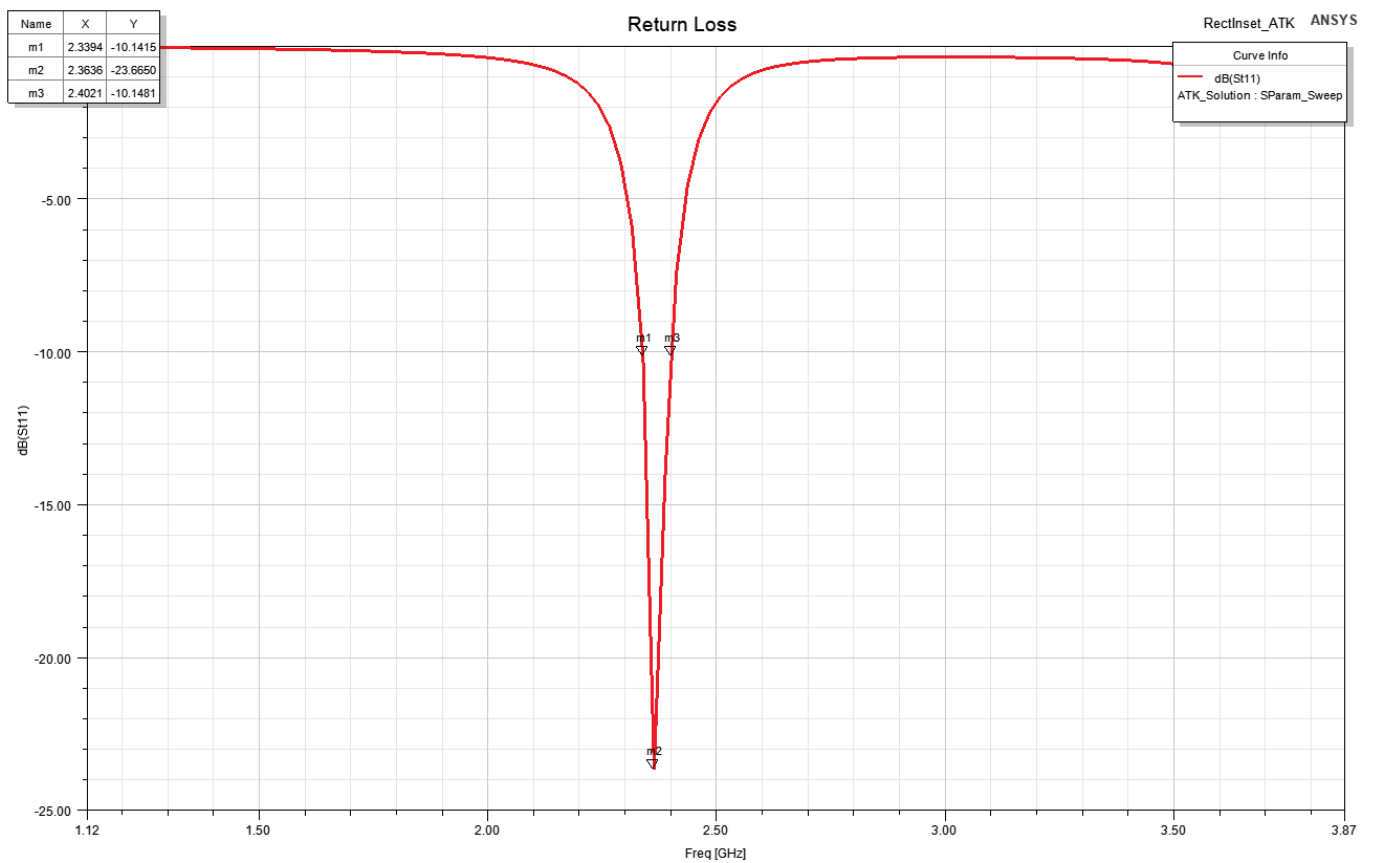
Figura 30 – Antena 2 - Simulação de antena microstrip retangular ajustadaa numericamente



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

A Figura 31, demonstra o gráfico de $|S_{11}|$ (dB) em função da frequência, para a antena 2 , com os resultados simulados.

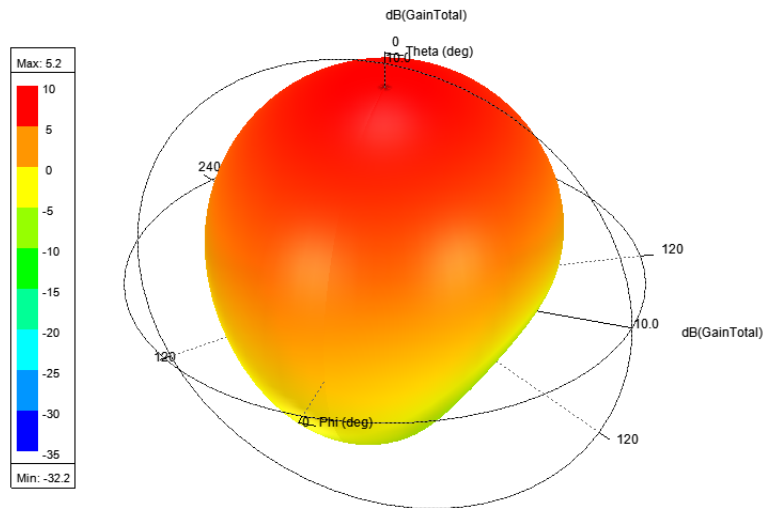
Figura 31 – Valores simulados e medidos de $|S_{11}|$ (dB) para a antena 2 .



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Na Figura 32, é mostrado a representação do ganho (dB) da Antena 2 (dB), com os resultados simulados.

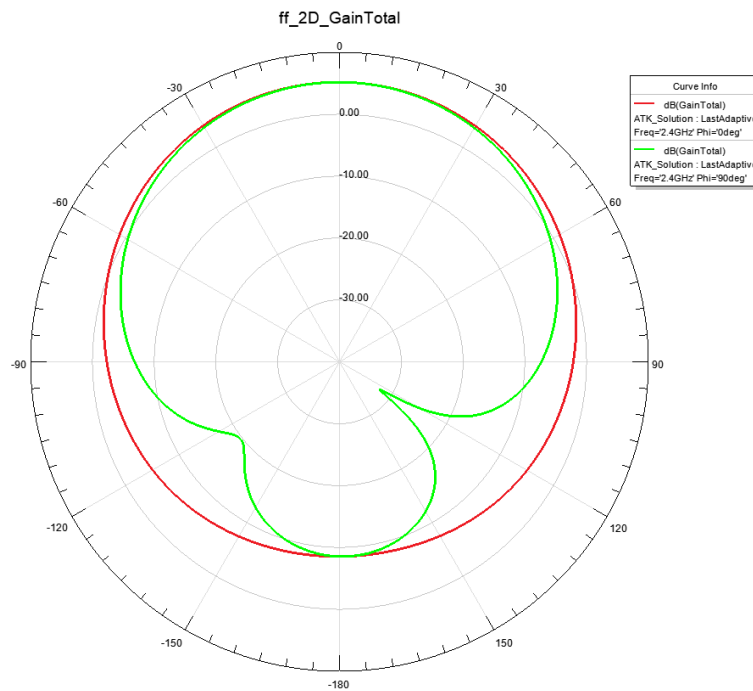
Figura 32 – Diagrama de radiação 3D normalizado



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

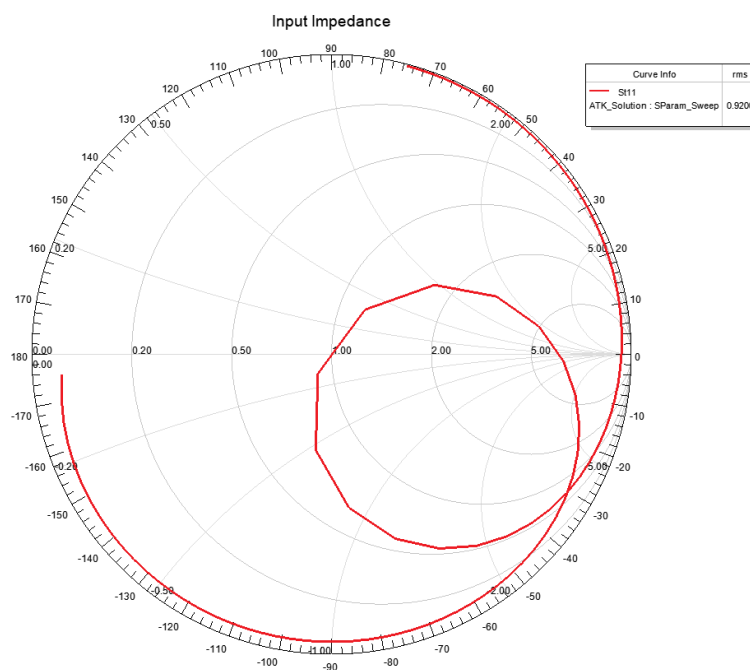
A Figura 32 e Figura 33, ilustram a representação do ganho (dB) da Antena 2 (dB), com os resultados simulados através dos diagramas de radiação 3D normalizado e 2D (planos E e H).

Figura 33 – Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

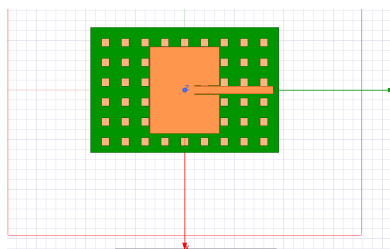
Figura 34 – Impedância da antena.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

7.1.3 Protótipos simulados - Antena 3

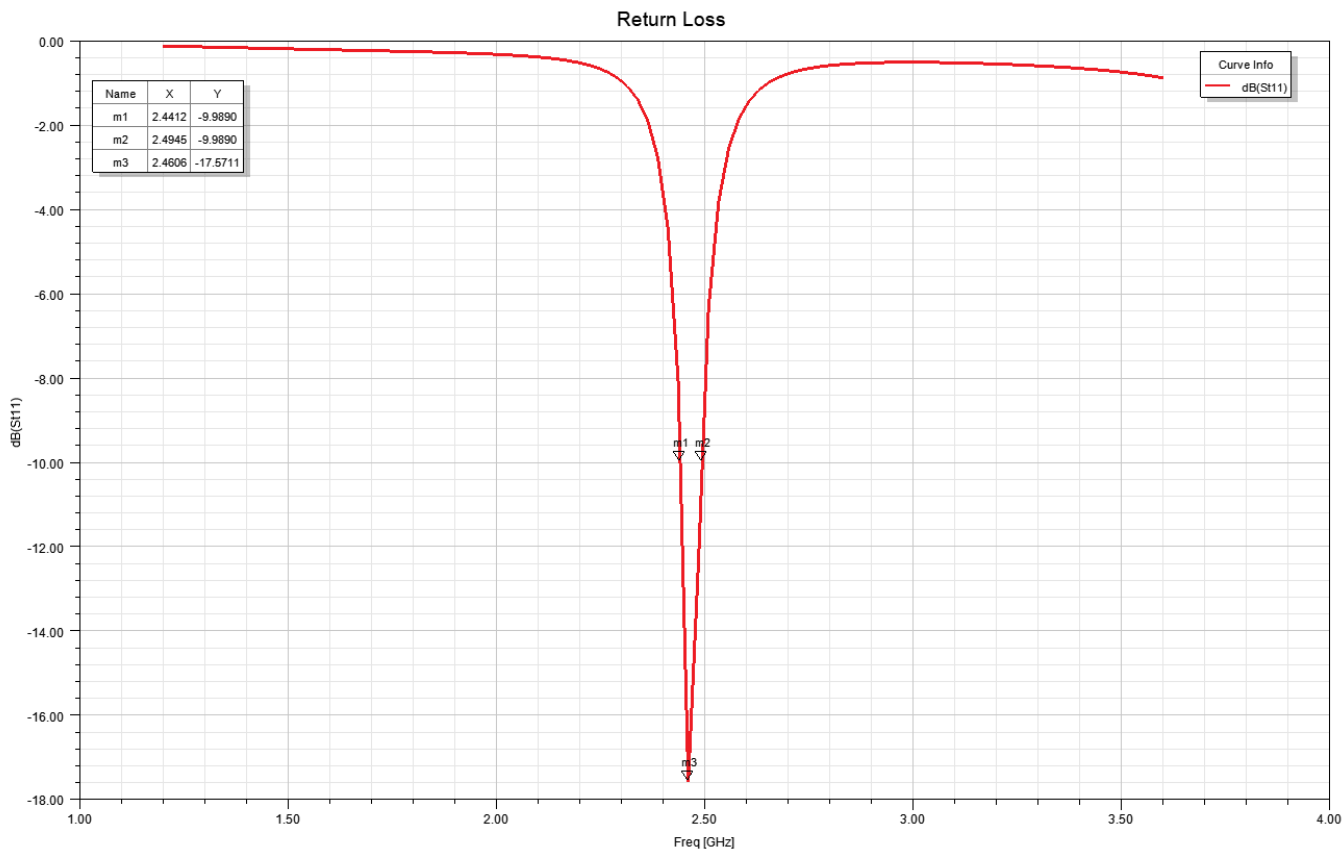
Figura 35 – Antena 3 - Simulação de antena microstrip retangular com furos quadráticos



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

A Figura 36 ,demonstra o gráfico de $|S_{11}|$ (dB) em função da frequência, para a antena 3 , com os resultados simulados.

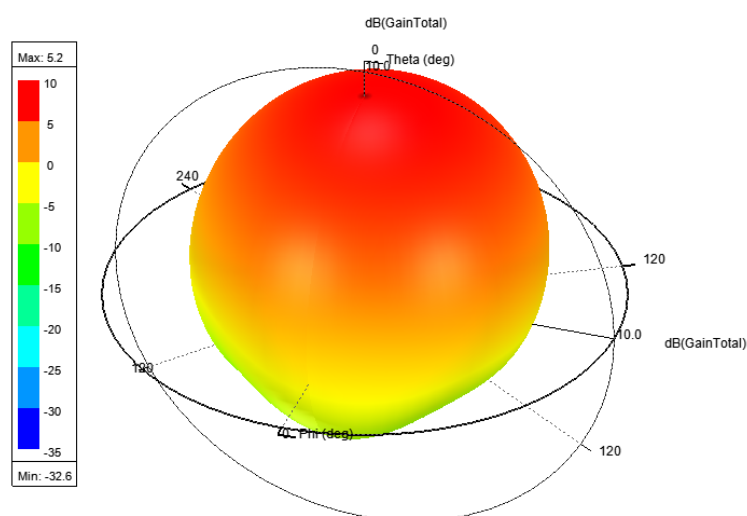
Figura 36 – Valores simulados e medidos de $|S_{11}|$ (dB) para a antena 3 .



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Na Figura 37 , é mostrado a representação do ganho (dB) da Antena 3 (dB), com os resultados simulados.

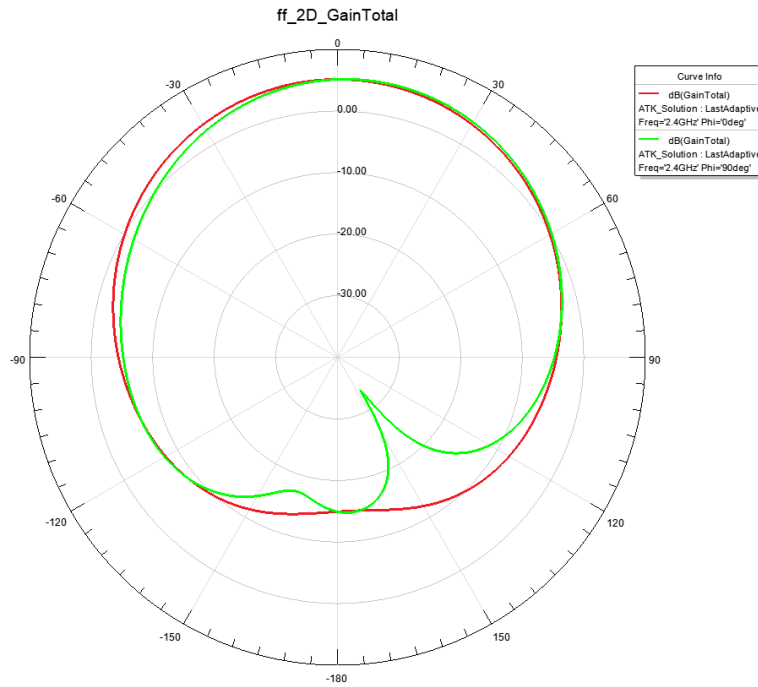
Figura 37 – Diagrama de radiação 3D normalizado



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

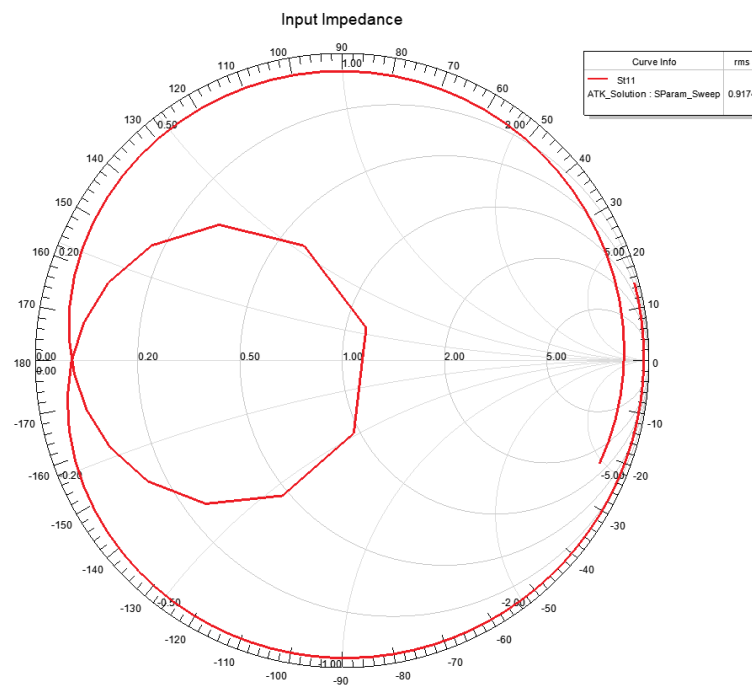
A Figura 37 e Figura 38 , ilustram a representação do ganho (dB) da Antena 3 (dB), com os resultados simulados através dos diagramas de radiação 3D normalizado e 2D (planos E e H).

Figura 38 – Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.



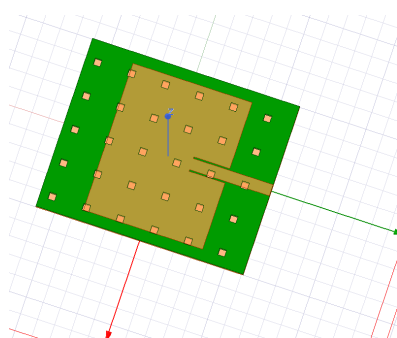
Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Figura 39 – Impedância da antena.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Figura 40 – Antena 3 - Simulação de antena microstrip retangular ajustada numericamente com furos quadráticos

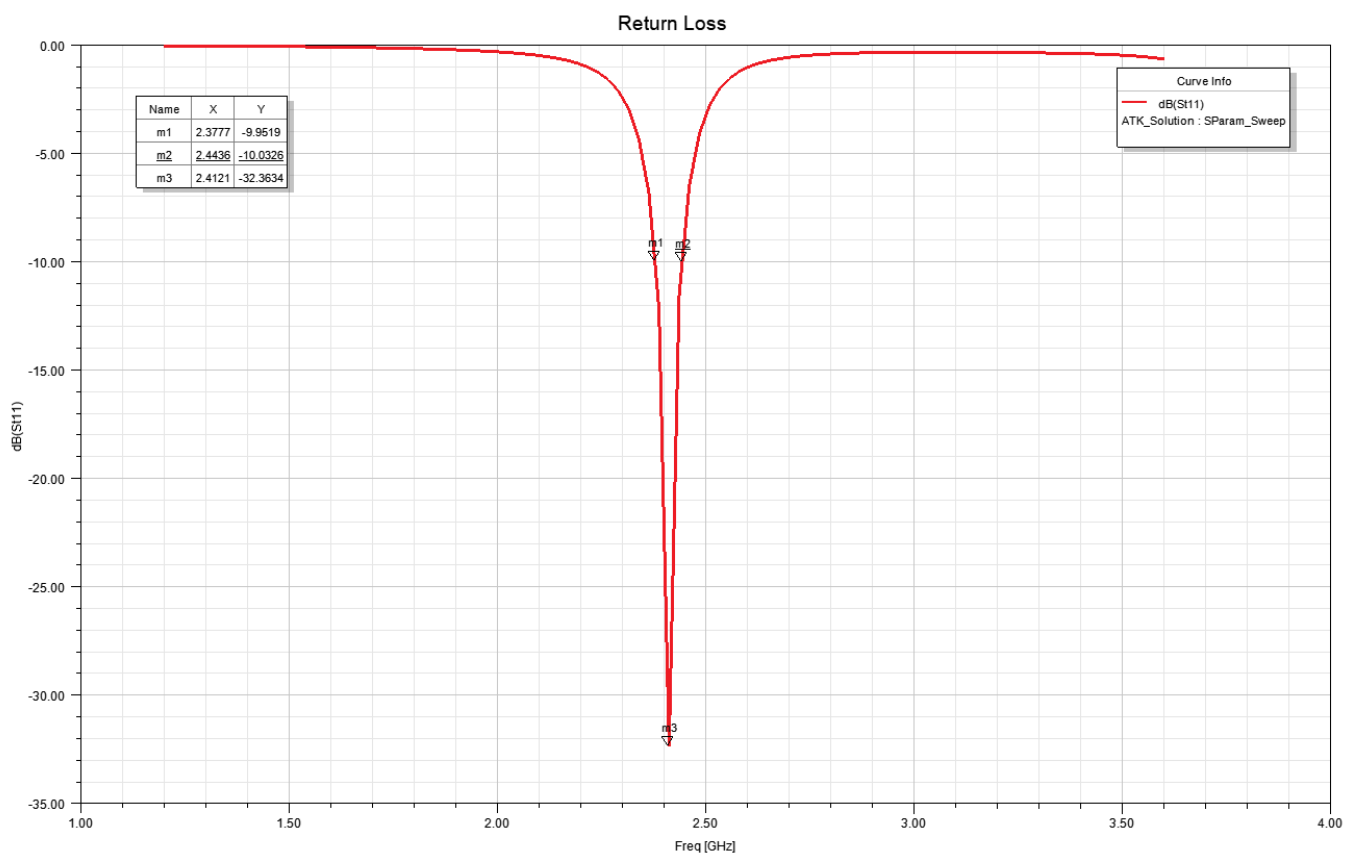


Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

7.1.4 Protótipos simulados - Antena 4

A Figura 41 ,demonstra o gráfico de $|S_{11}|$ (dB) em função da frequência, para a antena 4, com os resultados simulados.

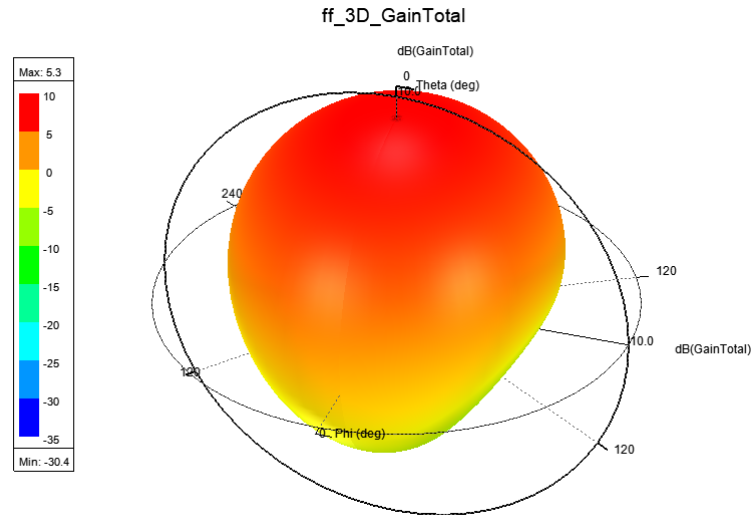
Figura 41 – Valores simulados e medidos de $|S_{11}|$ (dB) para a antena 4.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Na Figura 42 , é mostrado a representação do ganho (dB) da Antena 4 (dB), com os resultados simulados.

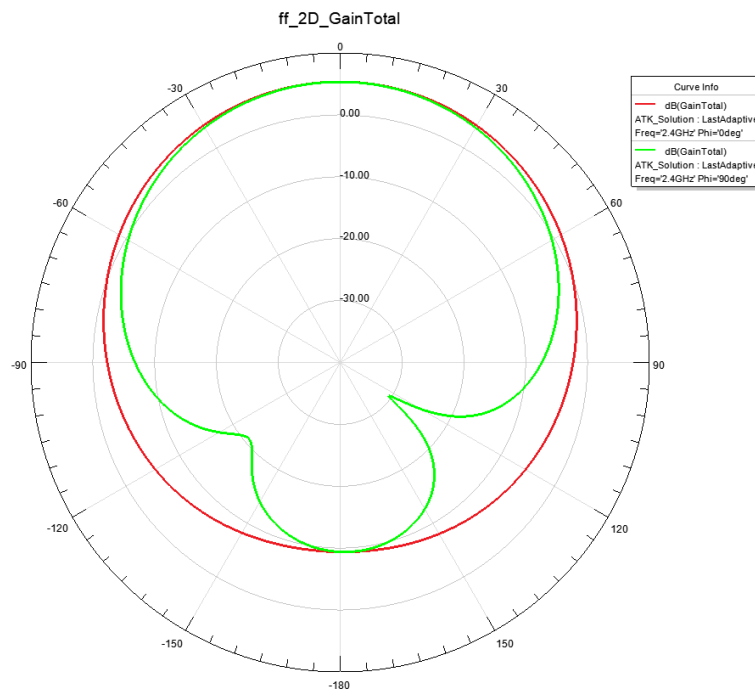
Figura 42 – Diagrama de radiação 3D normalizado



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

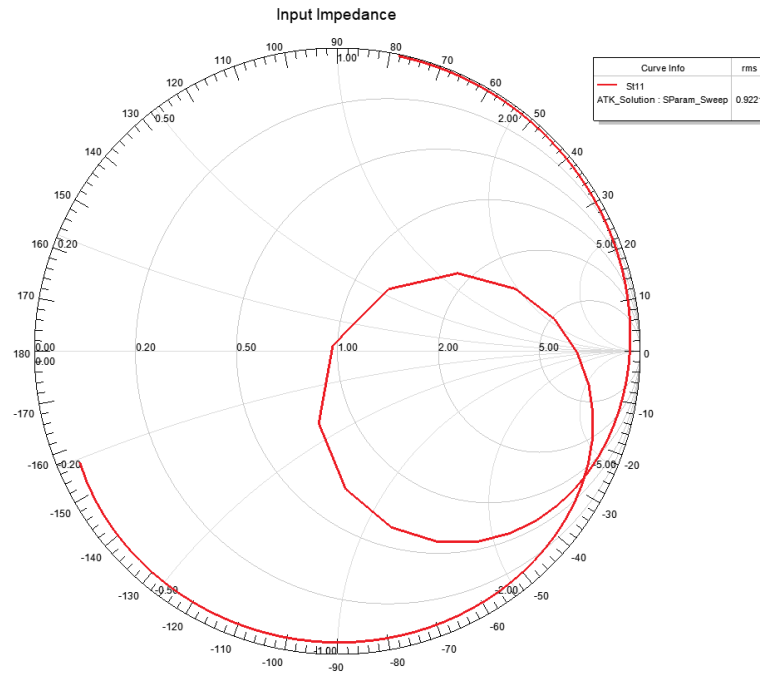
A Figura 42 e Figura 43 , ilustram a representação do ganho (dB) da Antena 4 (dB), com os resultados simulados através dos diagramas de radiação 3D normalizado e 2D(planos E e H).

Figura 43 – Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

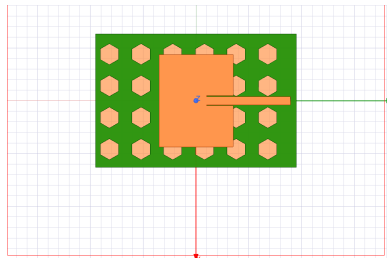
Figura 44 – Impedância da antena.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

7.1.5 Protótipos simulados - Antena 5

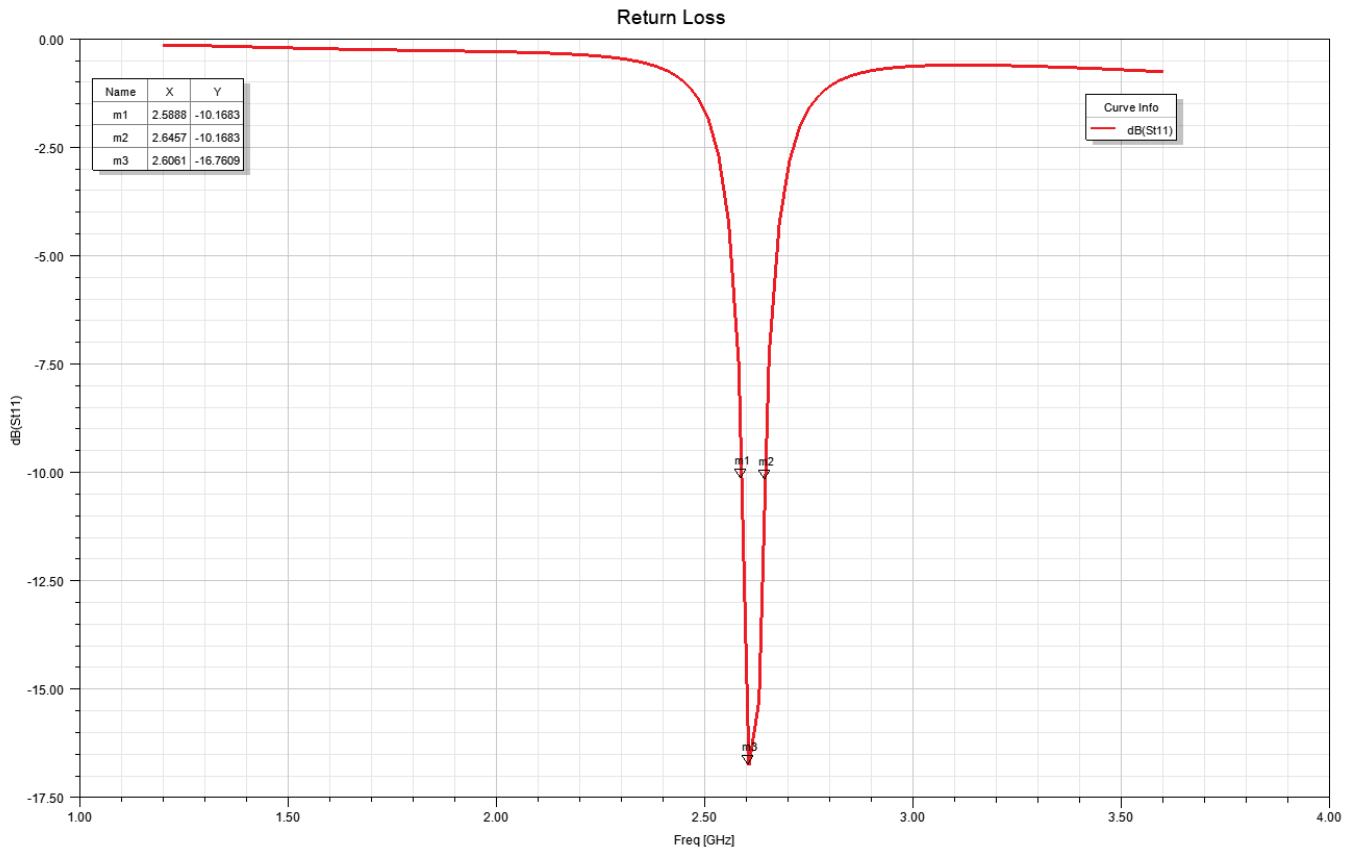
Figura 45 – Antena 5 - Simulação de antena microstrip retangular com furos hexagonais



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

A Figura 46 ,demonstra o gráfico de $|S_{11}|$ (dB) em função da frequência, para a antena 5, com os resultados simulados.

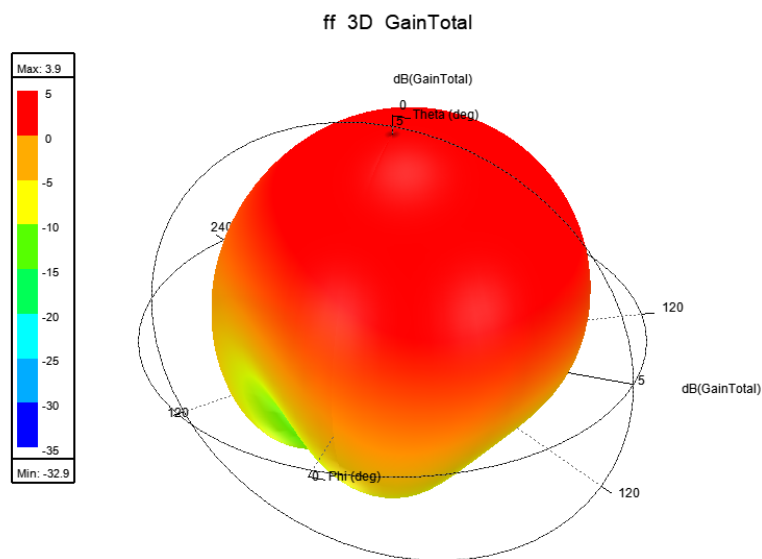
Figura 46 – Valores simulados e medidos de $|S_{11}|$ (dB) para a antena 5.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Na Figura 47 , é mostrado a representação do ganho (dB) da Antena 5 (dB), com os resultados simulados.

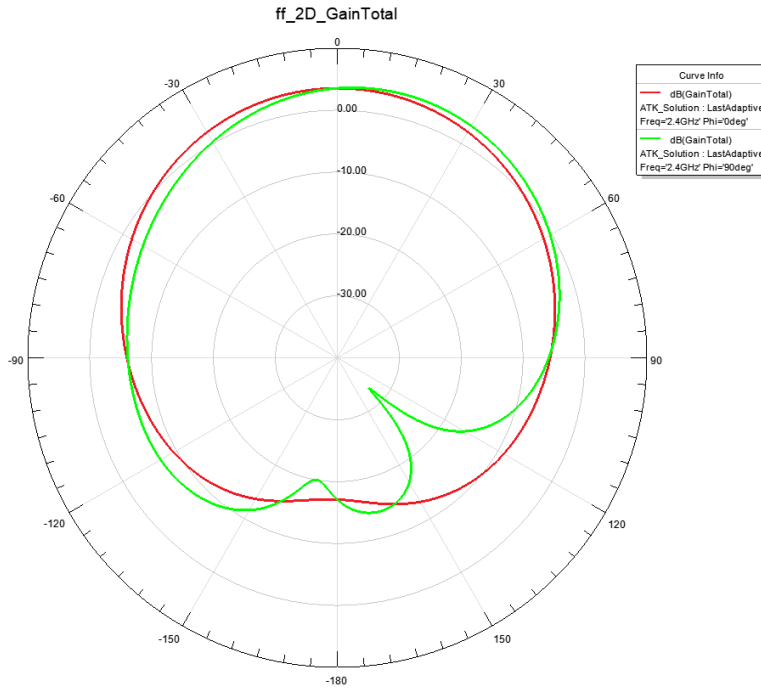
Figura 47 – Diagrama de radiação 3D normalizado



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

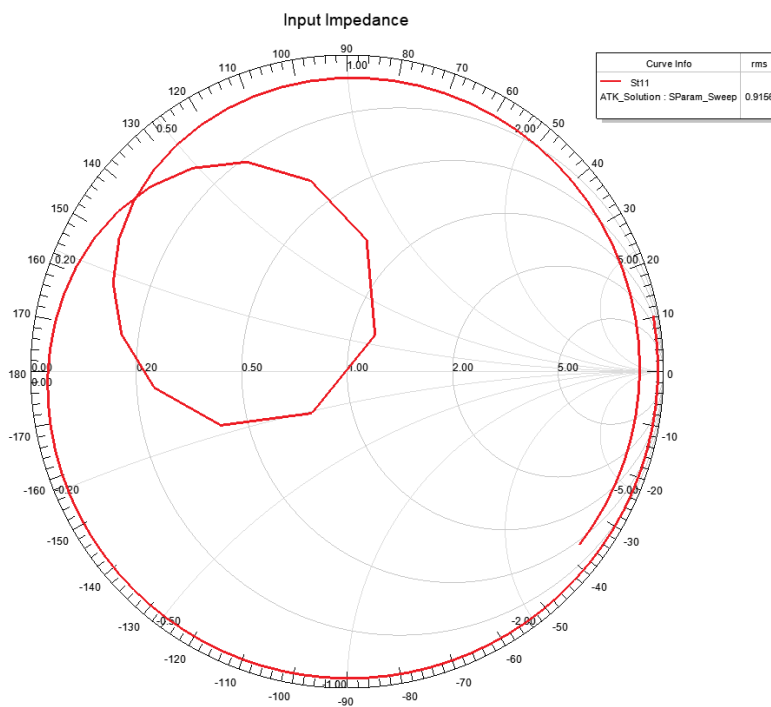
A Figura 47 e Figura 48 , ilustram a representação do ganho (dB) da Antena 5 (dB), com os resultados simulados através dos diagramas de radiação 3D normalizado e 2D (planos E e H).

Figura 48 – Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

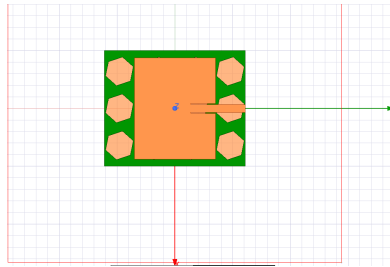
Figura 49 – Impedância da antena.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

7.1.6 Protótipos simulados - Antena 6

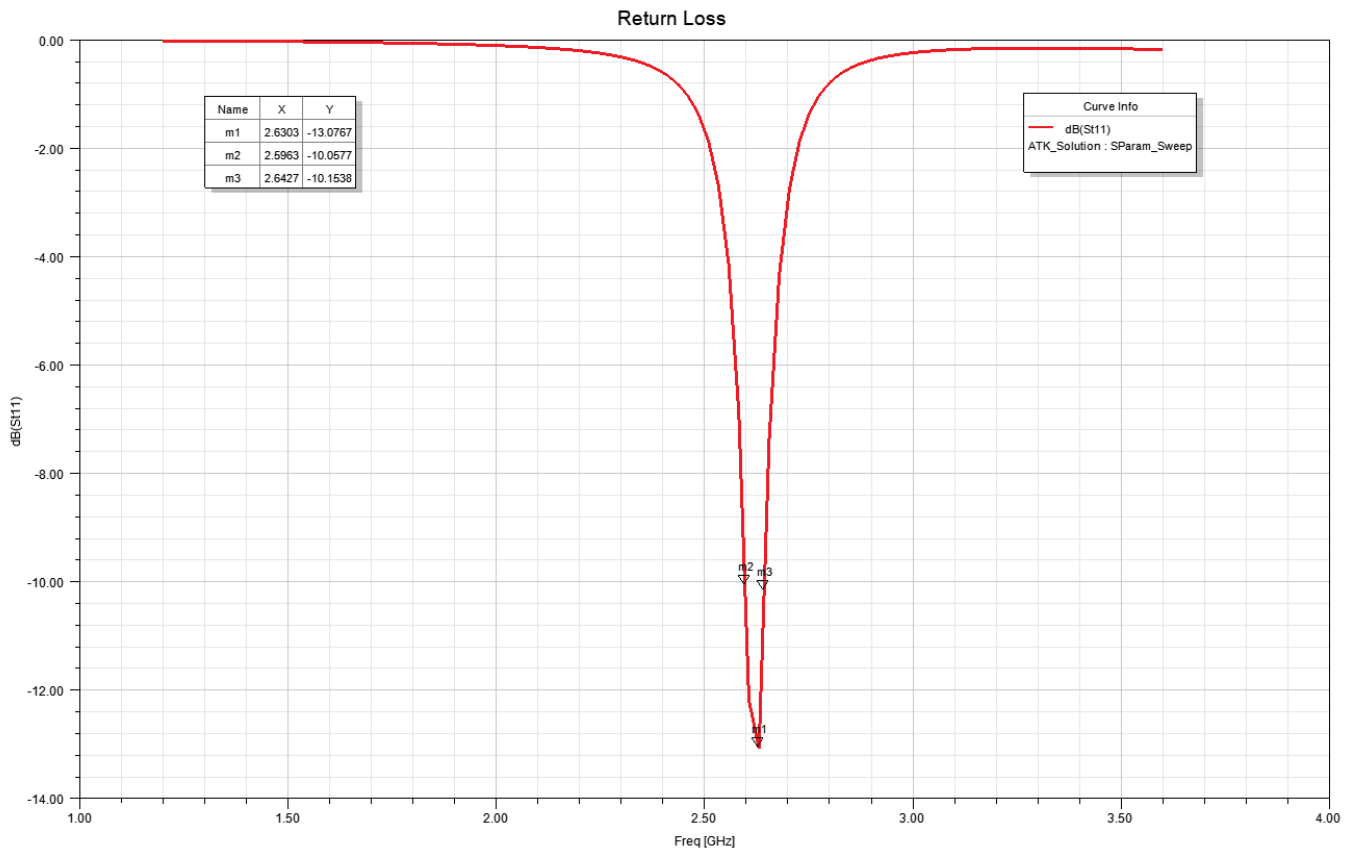
Figura 50 – Antena 6 - Simulação de antena microstrip retangular ajustada numericamente com furos hexagonais



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

A Figura 51 ,demonstra o gráfico de $|S_{11}|$ (dB) em função da frequência, para a antena 6, com os resultados simulados.

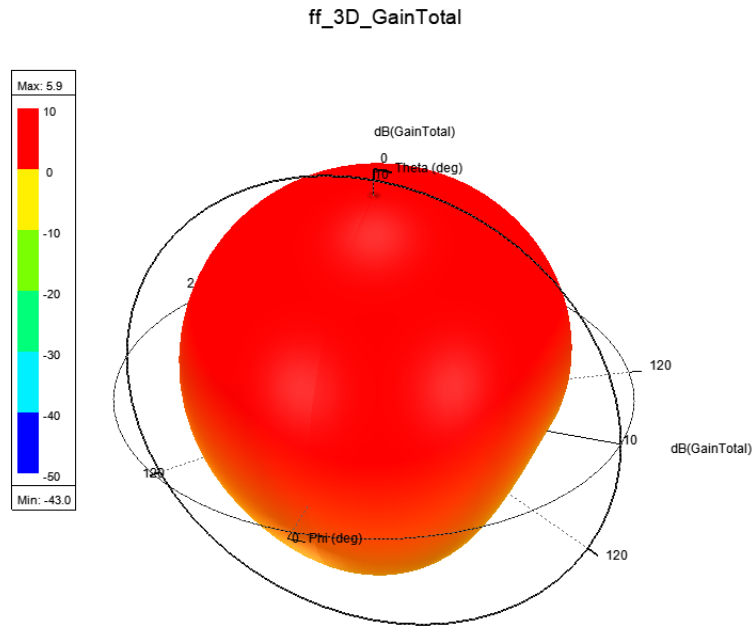
Figura 51 – Valores simulados e medidos de $|S_{11}|$ (dB) para a antena 6.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Na Figura 52 , é mostrado a representação do ganho (dB) da Antena 6 (dB), com os resultados simulados.

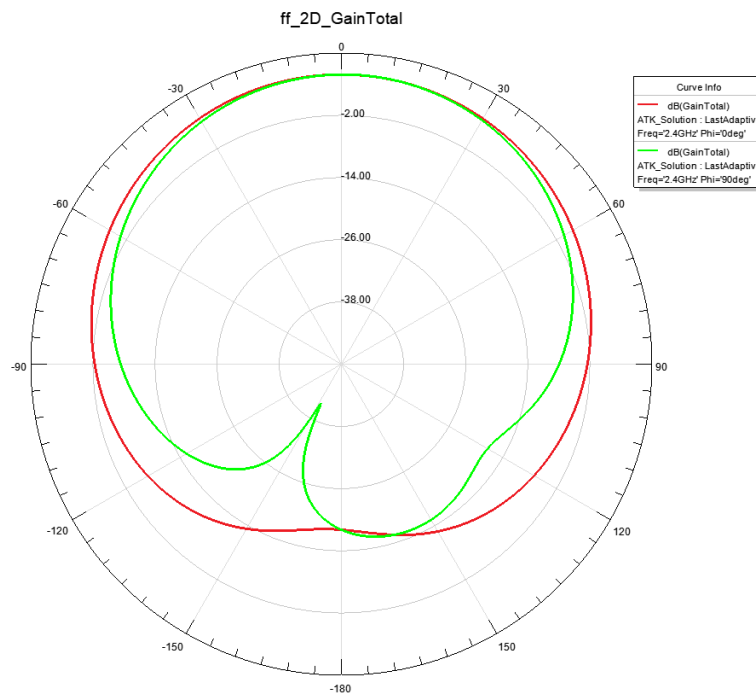
Figura 52 – Diagrama de radiação 3D normalizado



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

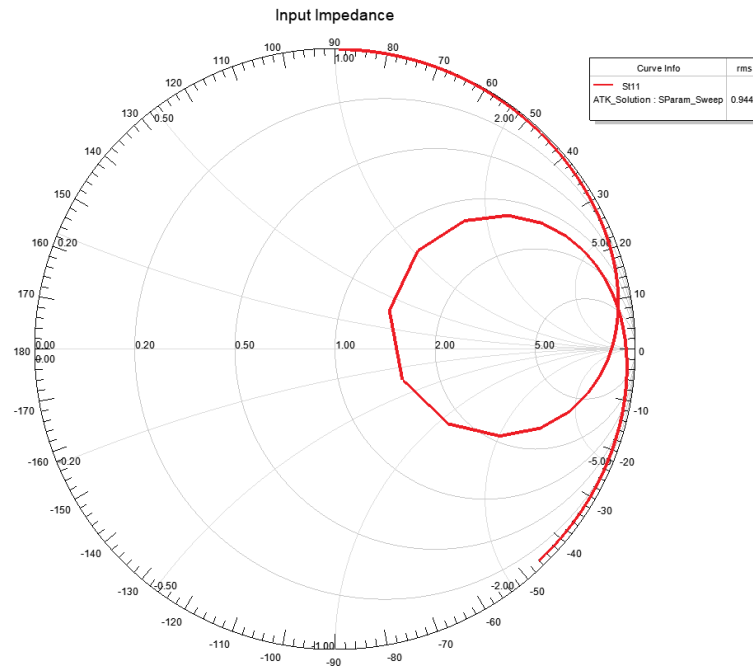
A Figura 52 e Figura 53 , ilustram a representação do ganho (dB) da Antena 6 (dB), com os resultados simulados através dos diagramas de radiação 3D normalizado e 2D(planos E e H).

Figura 53 – Diagrama de radiação 2D para os planos E e H.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

Figura 54 – Impedância da antena.



Fonte: Autoria própria, utilizando o software ANSYS HFSS.

7.1.7 Análise de Resultados Simulados

Sintetizando os resultados simulados das seis antenas, temos a Tabela abaixo:

Tabela 7 – Resultados de Simulação das antenas

	Antena 1	Antena 2	Antena 3	Antena 4	Antena 5	Antena 6
Frequência (Ghz)	2,3879	2,3636	2,46	2,4121	2,606	2,63
Perda de Retorno (dB)	-20,1126	-23,66	-17,57	-32,36	-16,76	-13,07
Largura da banda (Mhz)	43	62,7	53,3	65,9	57,7	46,4
Largura da banda (%)	1,8	2,65	2,17	2,73	2,21	1,76
Ganho (dB)	5,4	5,2	5,2	5,3	3,9	5,9

Fonte: Autoria própria

7.1.7.0.1 Radiação

Podemos observar que os diagramas de radiação das seis antenas, possuem um comportamento muito semelhante de um diagrama de radiação de uma antena *patch* retangular comum (DEEPIKA et al., 2017). Pois o máximo da radiação na direção de campo distante ocorre na direção de 0 graus.

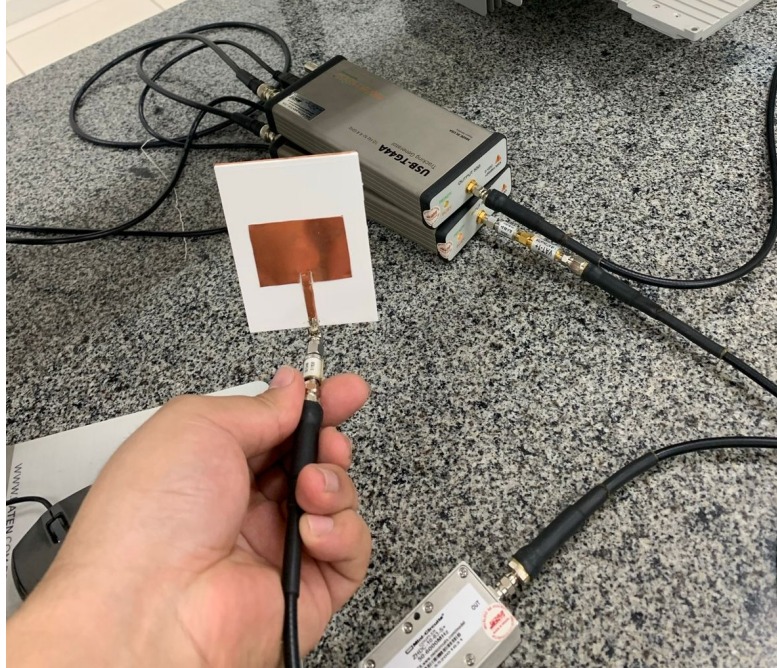
7.1.7.0.2 Casamento de Impedâncias

Conforme a Figura 29, Figura 34, Figura 39, Figura 44, Figura 49 e Figura 54, podemos observar que as antenas possuem um casamento de impedância razoável, pois as curvas se aproximam do centro da carta de Smith. Sendo assim, indicando um casamento próximo dos 50 Ω para as estruturas propostas.

7.2 PROTÓTIPOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

Os resultados medidos foram obtidos com Analisador de espectro. Foi realizado teste experimentais para mensurar perda de retorno e VSWR, foi utilizado um acoplador direcional 50MHz-6GHz, Analisador de espectro, modelo USB-SA44B e um Gerador de rastreamento modelo USB-TG44A.

Figura 55 – Setup - para Medidas da Perda de retorno



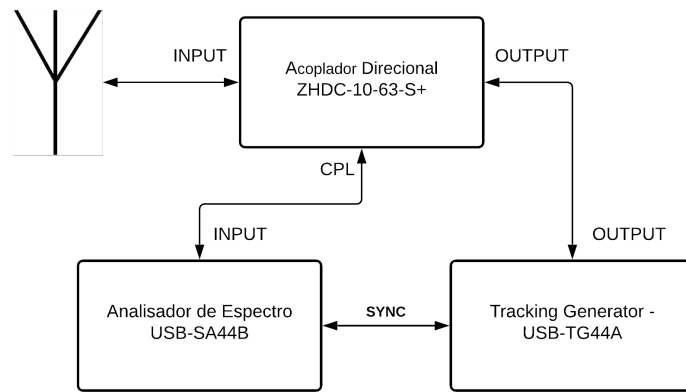
Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Materiais utilizados para o testes experimentais

Materiais
Acoplador Direcional 50MHz-6GHz - Mini-Circuits - ZHDC-10-63-S+
Analisador de espectro - Signal Hound - USB-SA44B
Gerador de Rastreamento - Signal Hound - USB-TG44A
DC Block SMA - Mini-Circuits - BLK-18-S+
Atenuador SMA - Mini- Circuits - VAT-1+

Fonte: Autoria própria

Figura 56 – *Setup* para medição de Perda de Retorno e VSWR.

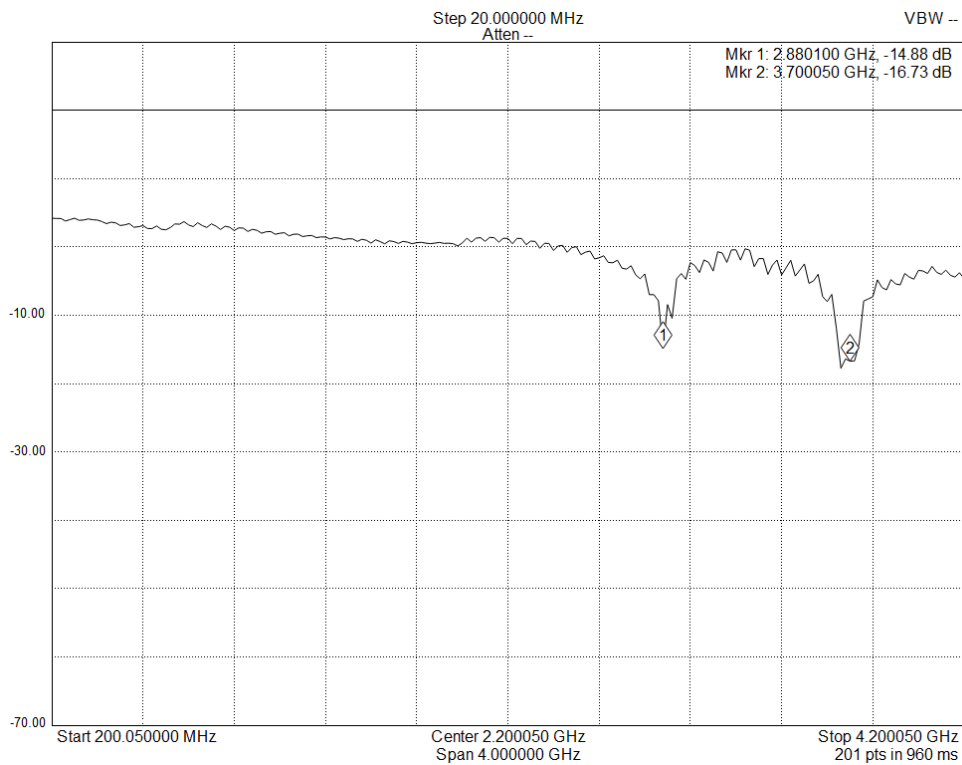


Fonte: Autoria própria.

As medidas são apresentadas nas figuras a seguir:

7.2.0.1 Antena 1 - $|S_{11}|$

Figura 57 – Perda de Retorno medida Antena 1



Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* Spike

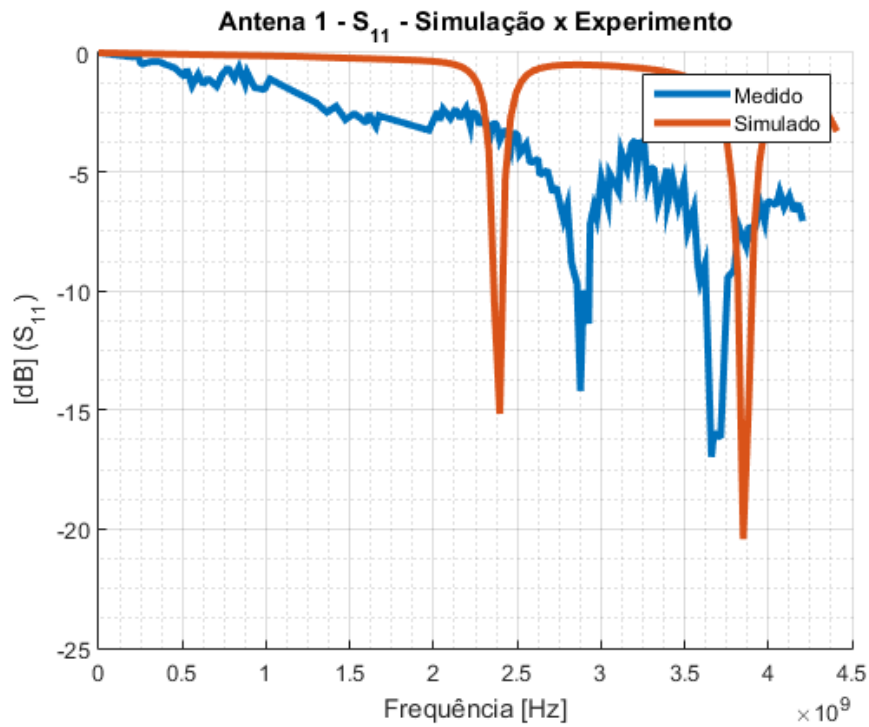
Figura 58 – $|S_{11}|$ medido e simulado Antena 17.2.0.2 Antena 2 - $|S_{11}|$

Figura 59 – Perda de Retorno medida Antena 2

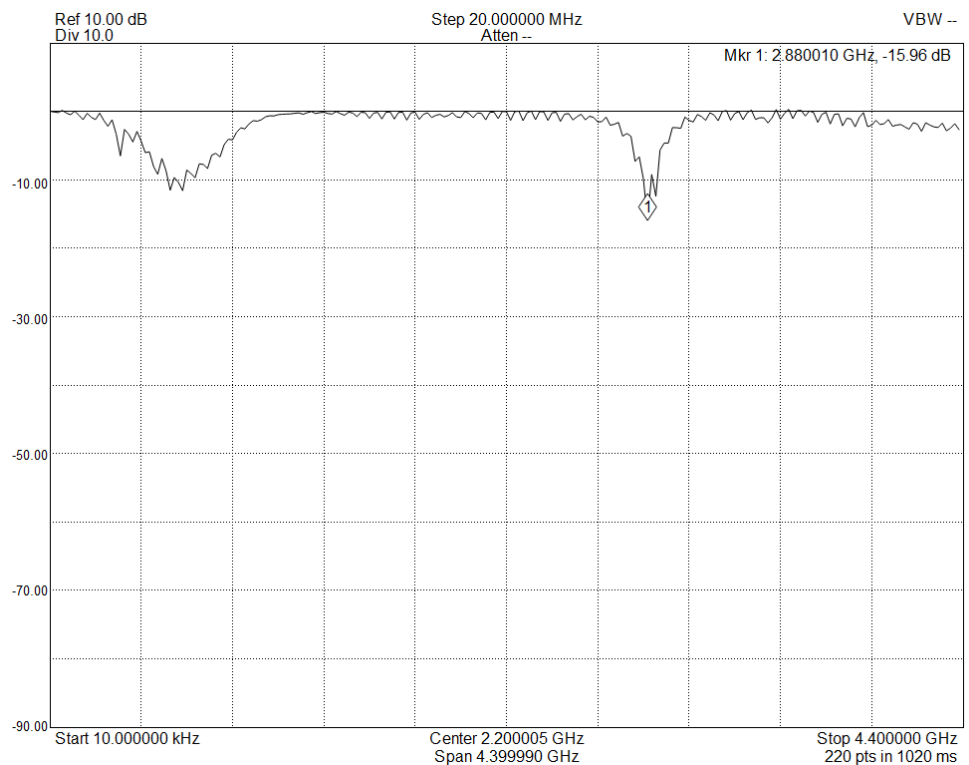


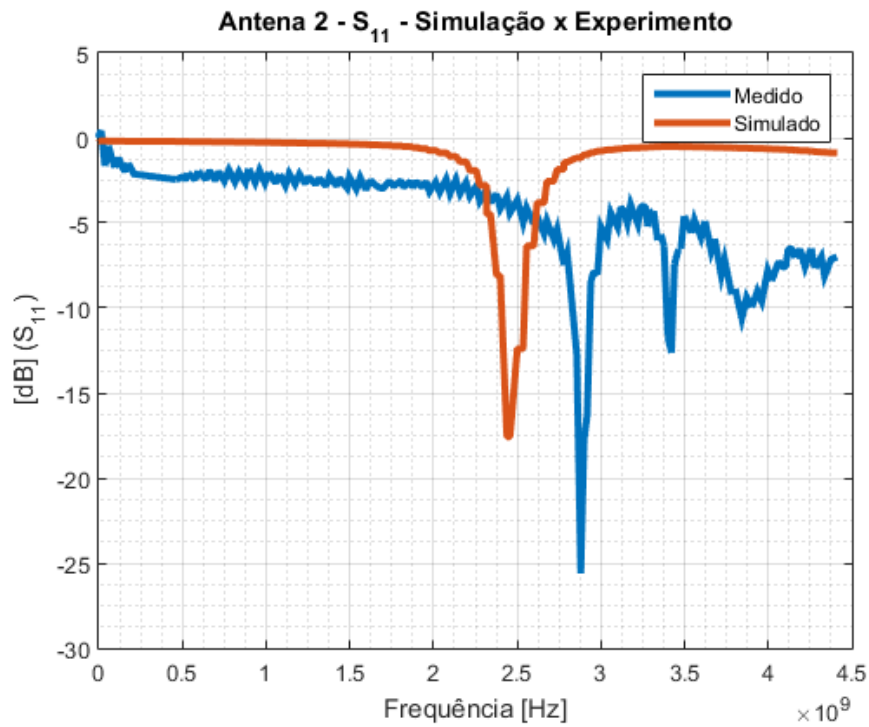
Figura 60 – $|S_{11}|$ medido e simulado Antena 27.2.0.3 Antena 3 - $|S_{11}|$

Figura 61 – Perda de Retorno medida Antena 3

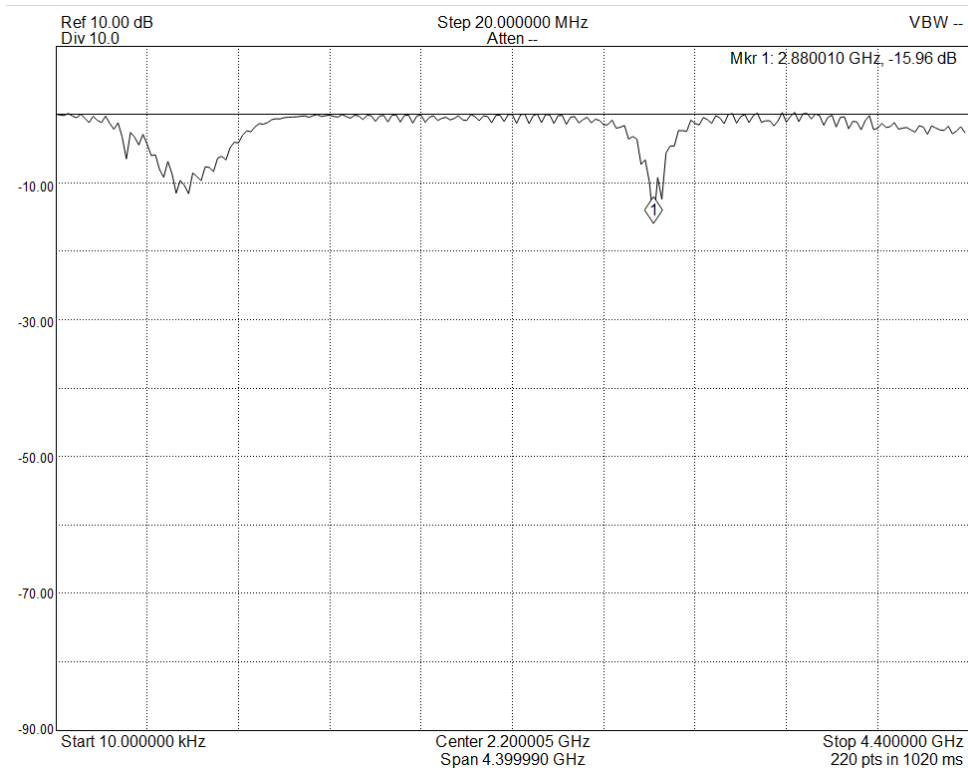
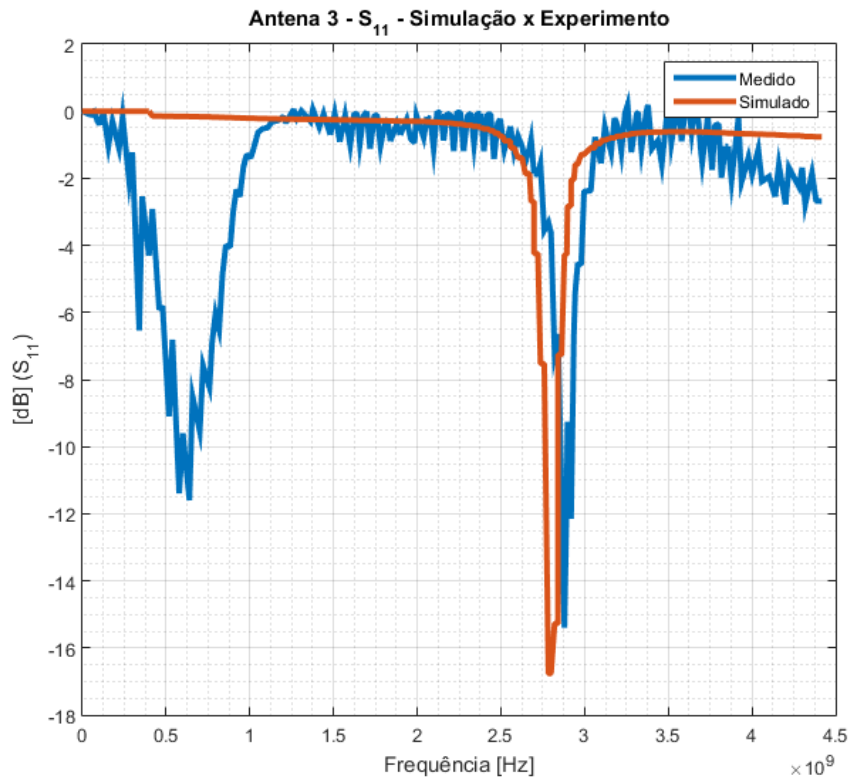
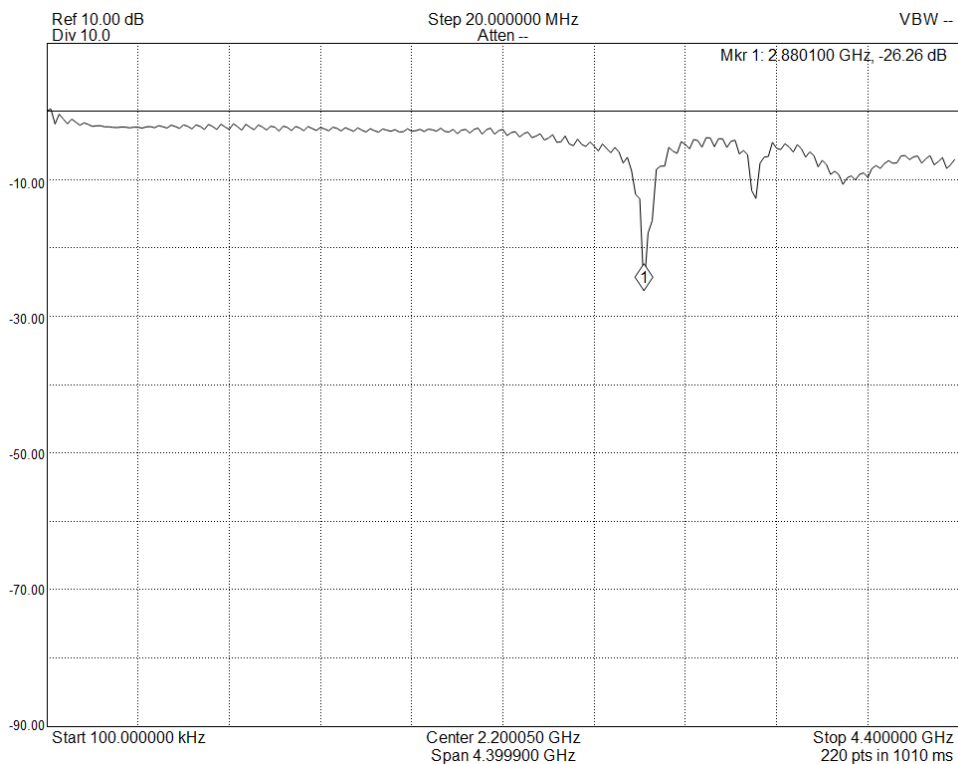


Figura 62 – $|S_{11}|$ medido e simulado Antena 3

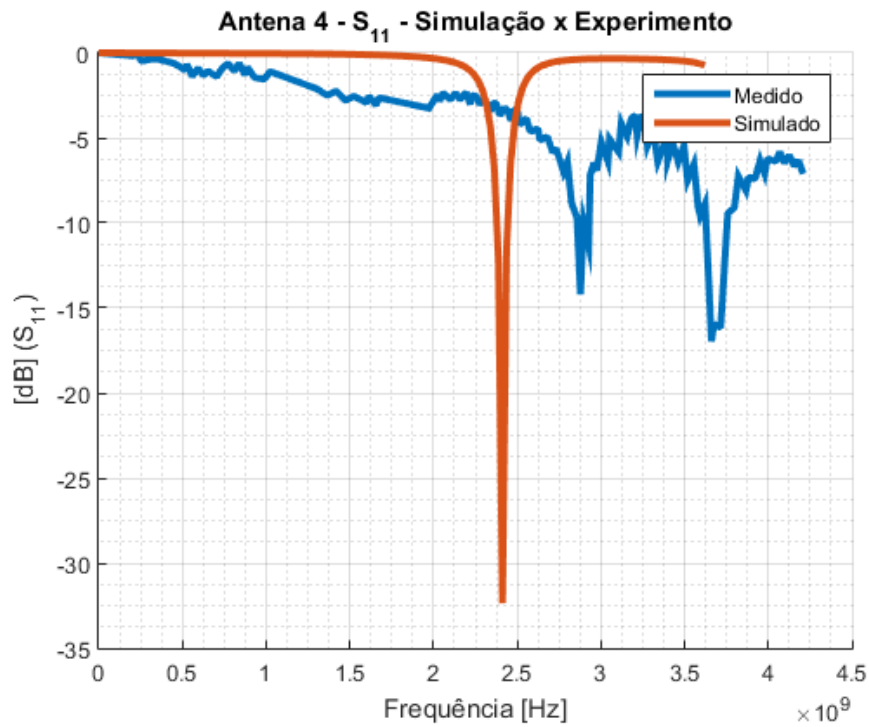
Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* MATLAB

7.2.0.4 Antena 4 - $|S_{11}|$

Figura 63 – Perda de Retorno medida Antena 4



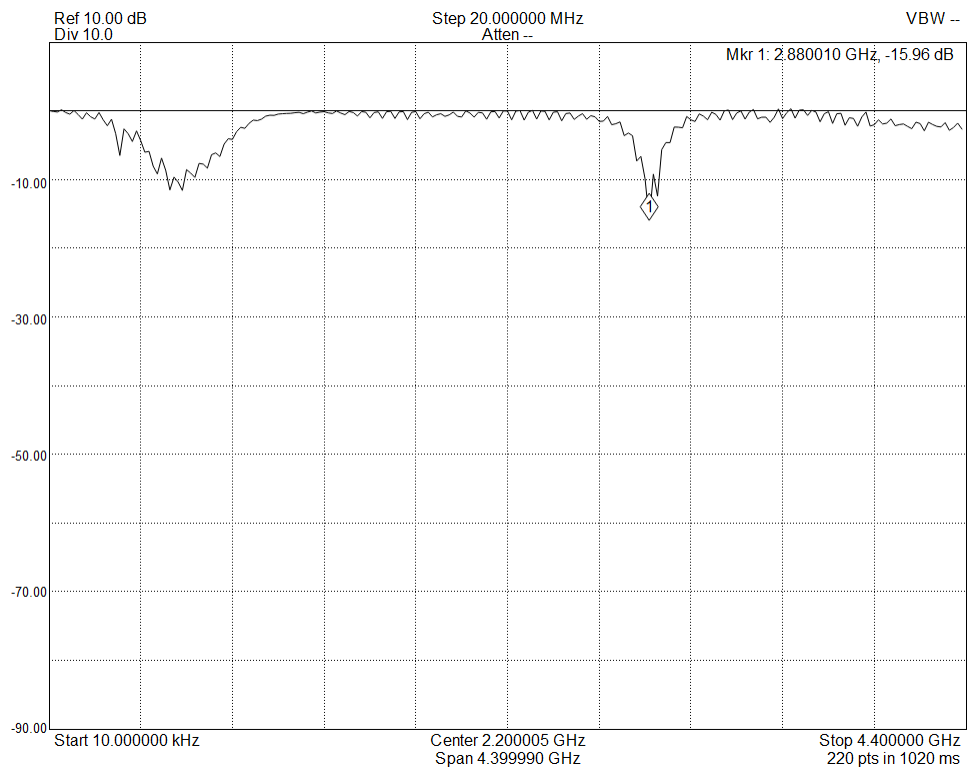
Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* Spike

Figura 64 – $|S_{11}|$ medido e simulado Antena 4

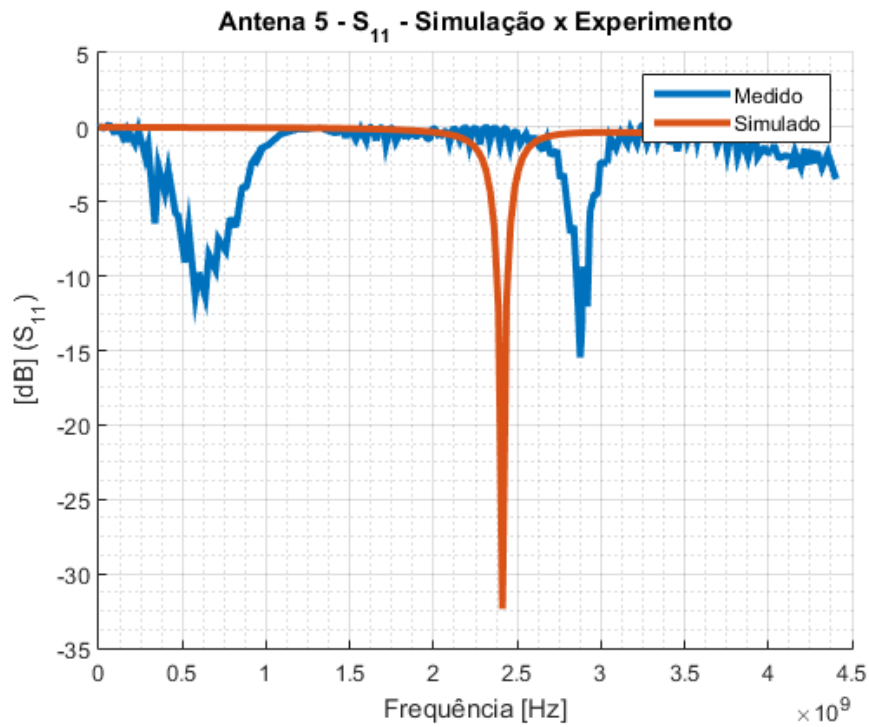
Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* MATLAB

7.2.0.5 Antena 5 - $|S_{11}|$

Figura 65 – Perda de Retorno medida Antena 5



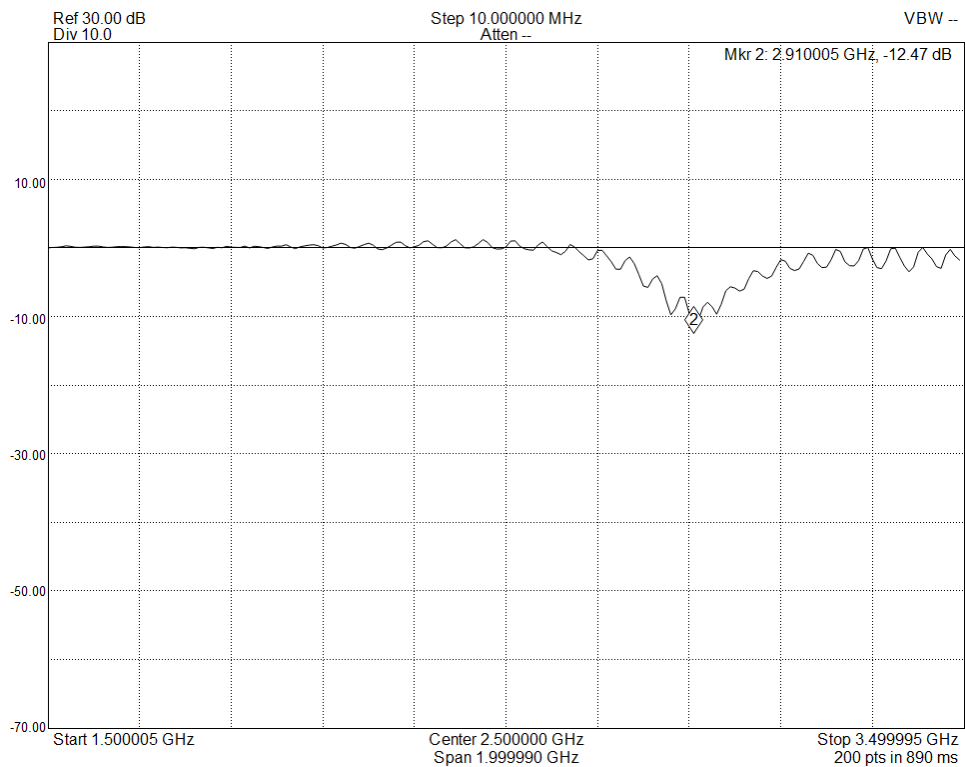
Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* Spike

Figura 66 – $|S_{11}|$ medido e simulado Antena 5

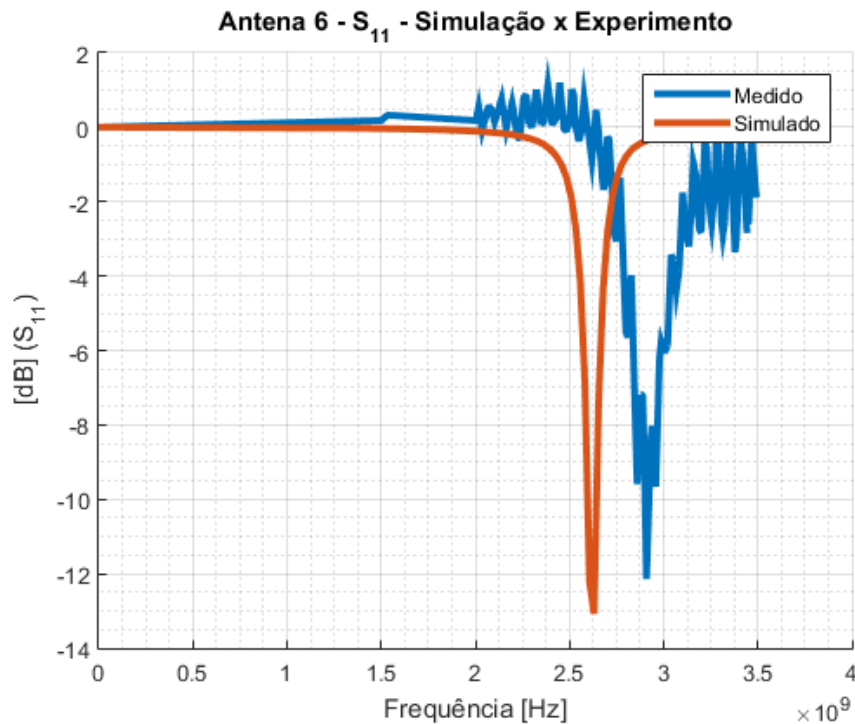
Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* MATLAB

7.2.0.6 Antena 6 - $|S_{11}|$

Figura 67 – Perda de Retorno medida Antena 6



Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* Spike

Figura 68 – $|S_{11}|$ medido e simulado Antena 6

Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* MATLAB

Sintetizando as perdas de retorno e utilizando as equações (3.2) e (3.3) para o cálculo do coeficiente de reflexão e VSWR conforme a tabela a seguir:

Tabela 9 – Resultados Experimentais

	F_r [GHz]	S_{11} - Return Loss [dB]	VSWR	Γ	Energia Radiada [%]	Energia Refletida [%]
Antena 1	2,8801	-14,8	1,4	0,0826	96,74919	3,2508
Antena 2	2,88001	-15,96	1,38	0,1597	97,44959	2,5504
Antena 3	2,88001	-15,96	1,3	0,1304	98,29958	1,7004
Antena 4	2,8801	-26,26	1,104	0,0494	99,75596	0,244
Antena 5	2,8801	-15,96	1,3	0,1304	98,29958	1,7004
Antena 6	2,91005	-12,47	1,60	0,2308	94,67314	5,3269

Fonte: Autoria própria

7.2.1 Resultados

Tabela 10 – Erro relativo percentual de $|S_{11}|$ das antenas

Erro relativo	E%
Antena 1	26,41428
Antena 2	32,5443787
Antena 3	9,163346614
Antena 4	18,85043263
Antena 5	4,77326969
Antena 6	4,590665647

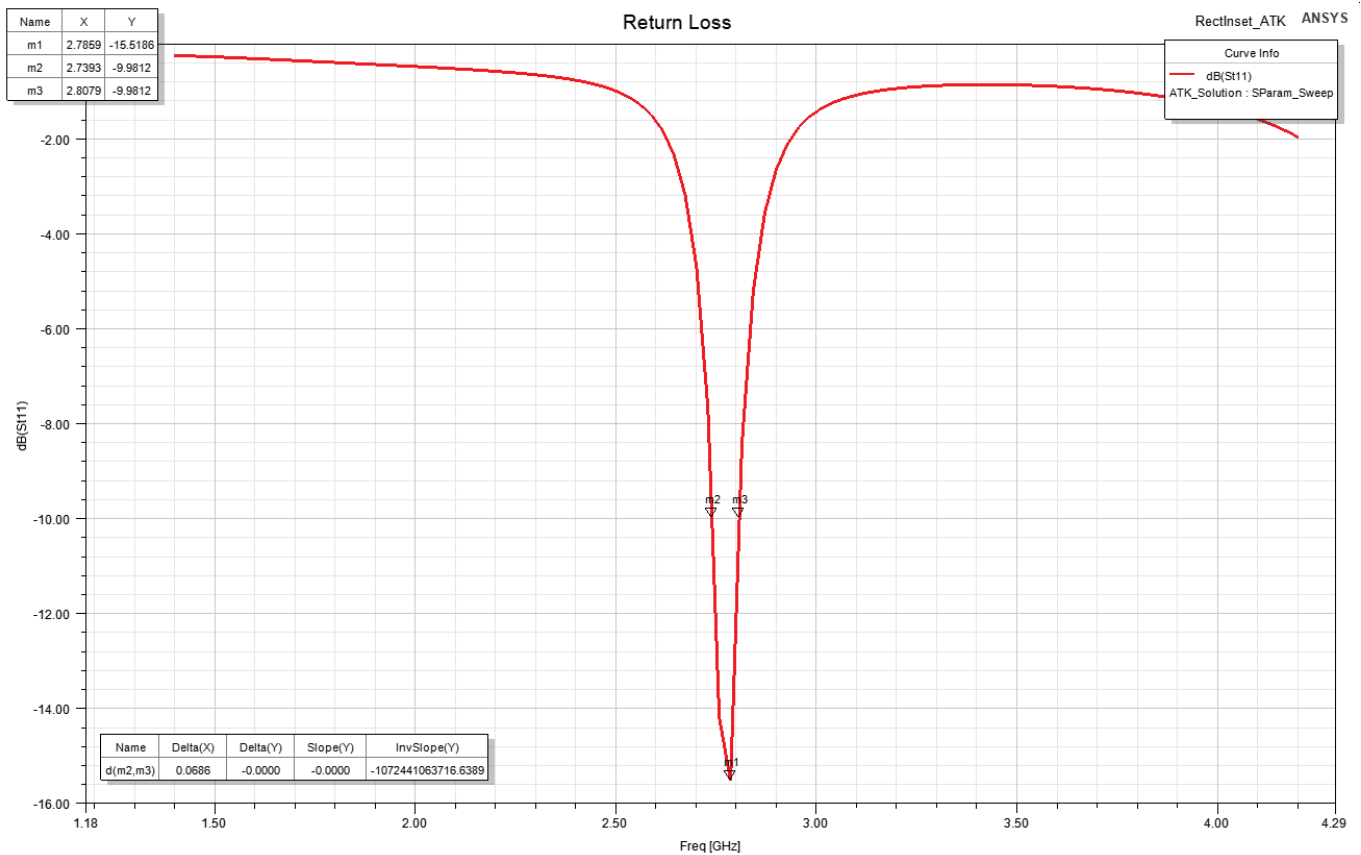
Fonte: Autoria própria

Após a realização dos testes experimentais, onde foi possível realizar as medidas de perda de retorno. Foi observado que a antena teve um comportamento um pouco diferente do esperado. Houve um

deslocamento da frequência de ressonância que inicialmente foi escolhida para o projeto. Isso ocorre devido imperfeições na confecção e a principalmente a caracterização do dielétrico, isso demonstra que o valor que inicialmente foi adotado para a constante ϵ_r é diferente da que foi testada. a constante dielétrica adotada no trabalho, inicialmente foi atribuída e utilizada a do banco de dados da ANSYS *Granta Materials Data for Simulation*, onde fornece dados de materiais para simulação(ANSYS, 2021).

Levando em premissa que a frequência de ressonância e todas as imperfeições na confecção da antena resulta nessa frequência de aproximadamente 2,8Ghz, Realizando as devidas manipulações nas equações (4.1),(4.3),podemos encontrar um valor próximo ao valor da constante dielétrica podemos considerar realizar pequenas modificações no projeto alterando apenas o material do modelo com uma nova constante dielétrica, com isso chegamos em um valor próximo a 2,23 e a partir desse valor novo da constante dielétrica e Realizando alterações simples no projeto no ANSYS HFSS e podemos verificar novamente se os resultados estão próximos aos experimentais.

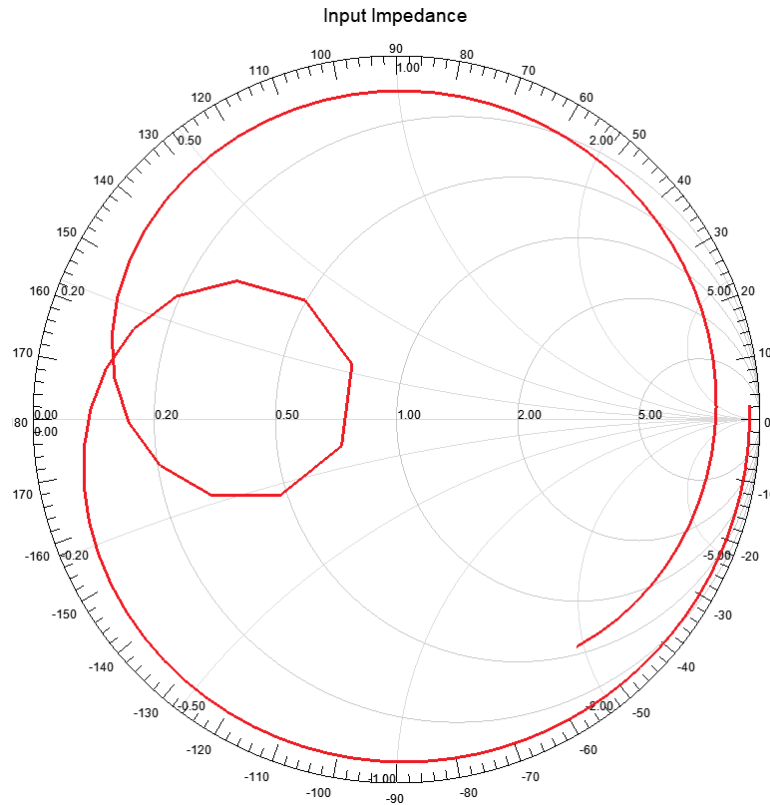
Figura 69 – Perda de Retorno Antena 1 - $\epsilon_r = 2,23$



Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* ANSYS HFSS

Como mostra a Figura 69 os resultados simulados e experimentais estão muito próximos. Também temos que levantar o ponto que, como o casamento de impedâncias foi realizado para um F_r de 2.4Ghz, é esperado que ocorra um pequeno descasamento dessas impedâncias e de fato ela ocorre, como podemos ver na figura Figura 70. O VSWR simulado é de aproximadamente 1,4.

Figura 70 – Casamento de impedâncias Antena 1 - $\epsilon_r = 2,23$ - $F_r = 2,8Ghz$



Fonte: Autoria própria, utilizando o *software* ANSYS HFSS

Após essa breve análise de resultados podemos concluir que, considerando ϵ_r menor que o que foi adotado no projeto teremos um erro percentual abaixo do que foi calculado, como por exemplo um erro de 4,5% para antena 1.

Alterando os materiais dos modelos das seis antenas e realizando o casamento com a linha de microfita de alimentação da antena, chegaremos em resultados muito satisfatórios. Essa diferença de resultados se dá por diversas imperfeições na confecção da antena e que a constante dielétrica está muito diferente da que foi adotada inicialmente no projeto. Alguns efeitos reais não foram considerados na simulação como imperfeições na confecção da antena.

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho, o foco principal foi o projeto e a manufatura de antenas *patch* retangulares alimentadas por microfita com operação faixa de operação de 2.4Ghz. Onde o substrato foi produzido utilizando manufatura aditiva. O embasamento teórico foi aprofundado com a leitura da literatura e livros referentes a teoria geral de antenas e o design de antenas *patch*, a partir dos quais foi possível adquirir conhecimento de construção e funcionamento de antenas *patch* em geral. Desde o equacionamento, dimensionamento, métodos de alimentação, métodos de análises, tipos de antenas e suas vantagens e desvantagens. As antenas de microfita tem seu ganho impactado pelas ondas que refletem e refratam no substrato, gerando correntes superficiais indesejadas, as quais desperdiçam energia. O uso da tecnologia de impressão 3D no processo de fabricação de antenas é um campo promissor para fins comerciais e acadêmicos. A utilização de impressão 3D possibilitou a possibilidade o estudo e a análise de geometria não-convencional de substrato. O deslocamento de frequência entre a antena sem furos e as antenas inspiradas em EBG era esperado, pois os furos introduzem uma permissividade elétrica menor, no caso a permissividade do ar, sendo assim aumentando a frequência. A diferença entre os resultados simulado e medido das antenas, foi atribuída à variação da permissividade nas frequências de interesse do projeto e imperfeições na confecção da antena. Os resultados medidos atestam o fato de que os métodos propostos podem ser utilizados para a fabricação de antenas. Para continuidade e sugestões para trabalhos futuros, é sugerido a realização da caracterização do dielétrico com o auxílio de equipamento adequado, estudos e construção de novas antenas impressas com outras geometrias de furo, construção, aferição de antenas inspiradas em EBG com furos dopados de material diferente do ar.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, B. O. d. Análise e projeto de antenas patch de microfitas com substrato inspirado em arranjo ebg. Brasil, 2019.
- ANSYS. **Granta Materials Data for Simulation**. 2021. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/materials/materials-data-for-simulation>>.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. New York, USA: John Wiley Sons, 2015.
- CAPPELLETTI, C.; BATTISTINI, S.; MALPHRUS, B. **CubeSat Handbook: From Mission Design to Operations**. [S.l.]: Academic Press, 2020.
- CGEE, C. de Gestão e E. E. **CubeSats. Volume 1: Theory**. Brasília, DF - Brasil: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018.
- COHEN, B. A. et al. Lunar flashlight: Illuminating the lunar south pole. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, IEEE, v. 35, n. 3, p. 46–52, 2020.
- DEEPIKA, J. et al. Parametrical variation and its effects on characteristics of microstrip rectangular patch antenna. In: IEEE. **2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)**. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- DESCHAMPS, G. A. Microstrip microwave antennas. In: **Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, Oct.** [S.l.: s.n.], 1953. p. 18–22.
- FUSCO, V. F. **Teoria e técnicas de antenas: princípios e prática**. [S.l.]: Bookman Editora, 2009.
- GAO, S. et al. Antennas for modern small satellites. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, IEEE, v. 51, n. 4, p. 40–56, 2009.
- GARLOTTA, D. A literature review of poly (lactic acid). **Journal of Polymers and the Environment**, Springer, v. 9, n. 2, p. 63–84, 2001.
- GIBSON, I. G. I. Additive manufacturing technologies 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer, 2015.
- GRIEG, D.; ENGELMANN, H. Microstrip-a new transmission technique for the kilomegacycle range. **Proceedings of the IRE**, IEEE, v. 40, n. 12, p. 1644–1650, 1952.
- HALOSAT. **HaloSat**. 2020. Disponível em: <<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/halosat/>>.
- JOHNSON, N. L.; STANSBERRY, E. G. The new nasa orbital debris mitigation procedural requirements and standards. **Acta Astronautica**, Elsevier, v. 66, n. 3-4, p. 362–367, 2010.
- KOZAKOFF, D. J. **Analysis of radome-enclosed antennas**. [S.l.]: Artech House, 2010.
- LARSON, W. J.; WERTZ, J. R. **Space mission analysis and design**. [S.l.], 1992.
- MABROUK, E. **What are SmallSats and CubeSats?** 2021. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats/>>.
- MAHONEY, E. **NASA Announces Seventh Round of Candidates for CubeSat Space Missions**. 2016. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/feature/nasa-announces-seventh-round-of-candidates-for-cubesat-space-missions/>>.

MIRZAEI, M. **Developing novel 3D antennas using advanced additive manufacturing technology**. [S.l.]: The University of North Dakota, 2015.

NUNES, M. A. et al. Neutron-1 mission: Low earth orbit neutron flux detection and cosmos mission operations technology demonstration. 2019.

OLIVAS, R. I. **Conformal electronics packaging through additive manufacturing and micro-dispensing**. [S.l.]: The University of Texas at El Paso, 2011.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

PUIG-SUARI, J.; TURNER, C.; TWIGGS, R. Cubesat: the development and launch support infrastructure for eighteen different satellite customers on one launch. 2001.

SAVINI, A.; SAVINI, G. A short history of 3d printing, a technological revolution just started. In: IEEE. **2015 ICOHTEC/IEEE international history of high-technologies and their socio-cultural contexts conference (HISTELCON)**. [S.l.], 2015. p. 1–8.

SELVA, D.; KREJCI, D. A survey and assessment of the capabilities of cubesats for earth observation. **Acta Astronautica**, Elsevier, v. 74, p. 50–68, 2012.

TANAKA, M. et al. Microstrip antenna with solar cells for microsatellites. **Electronics Letters**, IET, v. 31, n. 1, p. 5–6, 1995.

WINTER, O. C.; MELO, C. F. d. **A Conquista do Espaço do Sputnik a Missão Centenário**. São Paulo, Brasil: Livraria da Física, 2007.