



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS, TECNOLÓGICAS E HUMANAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ISAAC MARCELINO DE MEDEIROS

**PROJETO DE ANTENA DE MICROFITA DUALBAND APLICADA A VEÍCULOS
AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

ANGICOS/RN

2018

ISAAC MARCELINO DE MEDEIROS

**PROJETO DE ANTENA DE MICROFITA DUALBAND APLICADA A VEÍCULOS
AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.
Campos Caraúbas, para obtenção do título
de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Walber Medeiros
Lima.

Co-orientador: Prof. Me. Juan Rafael
Filgueira Guerra.

ANGICOS/RN

2018

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

M488p Medeiros, Isaac Marcelino de Medeiros.

Projeto de antena de microfita dualband aplicada a veículos aéreos não tripulados. / Isaac Marcelino de Medeiros Medeiros. - 2018.

78 f. : il.

Orientadora: Walber Medeiros Lima. .
Coorientadora: Juan Rafael Filgueira Guerra. .
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de , 2018.

1. Antena de Microfita. 2. VANT. 3. Dual Band Antenas. I. , Walber Medeiros Lima., orient. II.

, Juan Rafael Filgueira Guerra., co-orient. III.

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

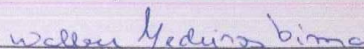
ISAAC MARCELINO DE MEDEIROS

**PROJETO DE ANTENA DE MICROFITA DUALBAND APLICADA A
VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

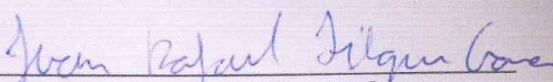
Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido – UFERSA. Campos Caraúbas,
para obtenção do título de Bacharel
em Ciências e Tecnologia.

Defendida em: 17 / 09 / 2018.

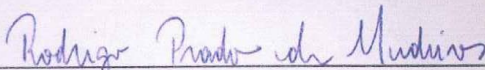
BANCA EXAMINADORA



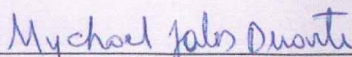
Prof. Dr. Walber Medeiros Lima
Presidente



Prof. Me. Juan Rafael Filgueira Guerra
Membro



Prof. Dr. Rodrigo Prado de Medeiros
Membro



Eng. Mychael Jales Duarte
Membro

Dedico esse trabalho a toda minha família, minha base de apoio e de felicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, saúde, por todas oportunidades que tive, assim como dificuldade e problemas que enfrentei, porque são com eles que aprendo as lições que a vida me impõe.

Agradeço a minha família, meu pai João Marcelino Filho, que se sacrifica muitas vezes com sua ausência para tentar garantir o pão de cada dia, em especial a minha mãe Raimunda Angélica de Medeiros, mulher forte, guerreira que sempre lutou por mim, dando exemplo de coragem e força para enfrentar todos os problemas de cabeça erguida.

Aos meus tios e tias, que acreditam em mim, sempre desejando o que a de melhor, querendo sempre ver meu sucesso.

A minha namorada Raliane Brena da Silva Araújo, companheira, amiga, confidente, por todo o amor que ela sempre demonstra, apoio e carinho.

Agradeço a meu orientador Juan Rafael Filgueira Guerra, por ter me apoiado, ajudado e auxiliado durante todo esse período que ele passou na instituição, assim como fora dela.

Agradeço aos meus amigos: César Augusto, Cláudio Rafael, Eduardo Henrique, Jefferson Romero, Gean Gonçalves, Hamilton Freire, Hugo Andersson, Igor Lamark, Pedro Henrique, Peterson Yamagushi, Thyago Clemente, Ytalo Cleyton, que sempre me ajudaram em todos os momentos difíceis, seja com conhecimento, descontração, mostrando uma real amizade.

As demais pessoas que me ajudaram direta ou indiretamente, para ajudar a chegar onde estou.

A instituição UFERSA, pela estrutura para realização do meu estudo e trabalho.

“Há uma força motriz mais poderosa do que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: A Vontade.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Com o avanço das tecnologias, novos aparelhos vêm surgindo com tempo. Muitos desses mecanismos são criados no intuito de ajudar e facilitar a vida humana, dessa forma necessitando serem controlados. No caso de sistemas *wireless*, o recebimento ou transmissão de dados e comandos é realizado por conjuntos de antenas, que em muitos casos devem ser reduzidas, ter uma boa flexibilidade entre outros parâmetros necessários, surgindo assim as antenas de microfitas, apresentam pequenas dimensões e são utilizadas em baixa frequência, sendo bastante utilizadas na área de telecomunicações. Este trabalho tem como objetivo projetar uma antena com múltipla banda, para ser implementada no VANT. O projeto da antena parte da definição das características de frequência necessária, escolhendo assim o tipo e geometria da antena para atender essas exigências. Foi utilizado o *software* HFSS, com o intuito de simular e obter os resultados computacionais, com isso, foi possível encontrar uma estrutura de antena que melhor se adaptasse a frequência de 2,4 GHz e 5.8GHz, conseguindo dessa forma ser feito o teste prático e a elaboração das antenas. Com base em todo o conhecimento teórico feito no trabalho foi possível construir as antenas e verificar o seu comportamento *dual band*.

Palavras-chave: Antena de Microfita; VANT; Dual Band Antenas.

ABSTRACT

With the advancement of technologies, new gadgets have come up with time. Many of these mechanisms are created to help and facilitate human life, so they need to be controlled. In the case of wireless systems, the reception or transmission of data and commands is carried out by sets of antennas, which in many cases must be reduced, have a good flexibility among other necessary parameters, thus appearing microfita antennas, have small dimensions and are used in low frequency, being widely used in the telecommunications area. This work aims to design a multiband antenna to be implemented in the VANT. The antenna design starts from the definition of the required frequency characteristics, thus choosing the type and geometry of the antenna to meet these requirements. The HFSS software was used in order to simulate and obtain the computational results. In this way, it was possible to find an antenna structure that best suited the frequency of 2.4 GHz and 5.8 GHz, thus achieving the practical test and the elaboration of antennas. Based on all the theoretical knowledge made at work it was possible to construct the antennas and check their dual band behavior.

Keywords: Microfite Antenna; VANT; Dual Band Antennas.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DE UMA ANTENA DE MICROFITA.....	20
FIGURA 2 – FORMAS DE PATCH.....	21
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE RADIAÇÃO (A) 2D E (B) 3D	22
FIGURA 4 – MODELO DE UM QUADRIPOLO.	25
FIGURA 5 – GRÁFICO DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.	27
FIGURA 6 – ALIMENTAÇÃO POR LINHA.....	28
FIGURA 7 – ALIMENTAÇÃO POR CABO COAXIAL DE UMA ANTENA DE MICROFITA. (A) VISTA SUPERIOR (B) VISTA LATERAL.	29
FIGURA 8 – ARRANJO DE UMA ANTENA DE MICROFITA, APLICADA EM WLAN PARA 5.8 GHz.	31
FIGURA 9 – EXEMPLO DE ARRANJOS LINEARES (A) ARRANJO 1x2 (B) ARRANJO 2x1.....	32
FIGURA 10 – EXEMPLO DE ARRANJO COM N ELEMENTOS.....	33
FIGURA 11 – EXEMPLO DE ARRANJO PLANAR (A) ARRANJO 4x4, (B) ARRANJO 3x3.	34
FIGURA 12 – GEOMETRIA DE UM ARRANJO PLANAR COM MxN ELEMENTOS.	35
FIGURA 13 – (A) ALIMENTAÇÃO EM LINHA. (B) ALIMENTAÇÃO FORA DA LINHA.....	36
FIGURA 14 – ALIMENTAÇÃO EM PARALELO.	38
FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DO DIVISOR DE TRÊS PORTAS, E SEU CIRCUITO EQUIVALENTE. ...	39
FIGURA 16 – TRANSPORTE DE CORRENTE DE CURVA DE MICROFITA. (A) SEM CHANFRO, (B) 50% DE CHANFRO E (C) 70% DE CHANFRO.....	39
FIGURA 17 – PROCESSO DE ACOPLAMENTO MUTUO.....	41
FIGURA 18 – TIPO DE ACOPLAMENTOS MÚTUOS PRESENTES EM UM ARRANJO DE ANTENAS.	41
FIGURA 19 – GEOMETRIA RETANGULAR DE MICROFITA PARA OS MODELOS DE CAVIDADE....	43
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS E DENSIDADE DE CORRENTES NA ANTENA.	44
FIGURA 21 – ANTENA DE MICROFITA. (A) FENDA RADIADA SEPARADA POR L, (B) VISTA AO LONGO DO COMPRIMENTO E (C) VISTO AO LONGO DA LARGURA.	46
FIGURA 22 – MODELAGEM DA PERMISSIVIDADE EFETIVA (A) MEIOS DISTINTOS (AR E SUBSTRATO), (B) MEIO UNIFORME.	47
FIGURA 23 – COMPRIMENTO FÍSICO E EFETIVO DE UM PATCH RETANGULAR.	47
FIGURA 24 – INSET FEED, APLICADO AO PATCH DE UMA ANTENA DE MICROFITA.	50
FIGURA 25 – MODELO PROJETADO POR REGINALD DENY.....	51
FIGURA 26 – FRITZ X.....	52
FIGURA 27 – MODELO DO V-1, BUZZ BOMB.	52
FIGURA 28 – AERONAVE MQ-1 PREDATOR.....	53
FIGURA 29 – EXEMPLO DE UM QUADROTOR.	57
FIGURA 30 – FLUXOGRAMA DOS PASSOS DA METODOLOGIA.....	59
FIGURA 31 – GEOMETRIA DA ANTENA.	60
FIGURA 32 – CORTE DA PLACA. (B) MOTO ESMERIL 360W – 220V – MOTOMIL – MML50. (C) PAQUÍMETRO.	61
FIGURA 33 – ADESIVO COLADO NA PLACA.	62
FIGURA 34 – SOLUÇÃO DE PERCLORETO E RECIPIENTE.	62
FIGURA 35 – ANTENAS PROPOSTA, (A) PATCH, (B) PLANO DE TERRA.	63
FIGURA 36 – CONECTOR SMA FÊMEA RETO DE QUATRO PINOS.	64
FIGURA 37 – ANALISADOR DE REDES VETORIAIS.....	64

FIGURA 38 – FREQUÊNCIA COM TRUNCAMENTO DE 30%.....	66
FIGURA 39 – FREQUÊNCIA COM TRUNCAMENTO DE 35%.....	67
FIGURA 40 – FREQUÊNCIA COM TRUNCAMENTO DE 25%.....	68
FIGURA 41 – DIAGRAMA DE RADIAÇÃO EM 3D (A) 25%, (B) 30% E (C) 35%.....	69
FIGURA 42 - COMPARAÇÃO DOS DOIS RESULTADOS DE FREQUÊNCIA, DAS ANTENAS SIMULADAS E AS CONSTRUIDAS, SEGUINDO A SEQUÊNCIA (A) 30%, (B) 25% E (C) 35%.	71
FIGURA 43 - AGRUPAMENTO DOS DOIS RESULTADOS (A) COMPUTACIONAL E (B) EXPERIMENTAL.....	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ALGUMAS UTILIZAÇÕES DOS VANT’S NO SETOR CIVIL.	54
TABELA 2 – CATEGORIAS DE VANT’S.	55
TABELA 3 – FAIXAS DE RADIOFREQUÊNCIAS DISPONÍVEIS.....	57
TABELA 4 – VALORES DAS DIMENSÕES DA ANTENA.	60
TABELA 5 – RESULTADOS OBTIDOS EM RELAÇÃO A LARGURA DE BANDA (MHz).....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

ARV – Analisador de Redes Vetoriais

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

FDTD – Finite Difference Time Domain

FEM – Finite Element Method

FPV - First personal View

MNM – Multiport Network Model

MoM – Method of Moments

RFID – Radio Frequency Identification

TLM – Transmission Line Method

USAF – Força aérea americana

VANT's – Veículos Aéreos Não Tripulados

VTOL – Vertical Take-Off and Landing

WCIP – Wave Concept Iterative Procedure

LISTA DE SÍMBOLOS

U	Intensidade de Radiação
U_0	Intensidade de Radiação média
P_{rad}	Potência de Irradiação
D	Diretividade
G	Ganho
P_{in}	Potência de Entrada
η_{cd}	Eficiência da Antena
η	Eficiência
η_{rad}	Eficiência de Radiação
η_{ref}	Eficiência de Reflexão
P_R	Potência Radiada
P_E	Potência Fornecida a Antena
P_P	Potência Perdida nos Materiais da Antena
Γ	Coeficiente de Reflexão
Z_E	Impedância de Entrada da Antena
Z_0	Impedância Característica da Linha de Transmissão
V	Tensão
I	Corrente
S_{11}	Coeficiente de Reflexão na Porta
S_{12}	Ganho de Tensão Reversa
S_{21}	Ganho de Tensão Direta
S_{22}	Coeficiente de Reflexão na Porta 2
BW	Largura de Banda
f_{sup}	Frequência Superior
f_{inf}	Frequência Inferior
d	Espaçamento de Fase

β	Deslocamento de Fase
R_E	Impedância de Entrada
G_1	Auto condutância da Antena
G_{12}	Condutância Mútua
K_0	Número de onda no Espaço Livre
J_0	Função de Bessel de Primeira ordem
dB	Decibéis
f_{sup}	frequência superior
f_{inf}	frequência inferior

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. Objetivos	18
2.1 Geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. Referencial Teórico	19
3.1 Antena de Microfita	19
3.1.1 Diagrama de Radiação	21
3.1.2 Diretividade, Ganho e Eficiência	22
3.1.3 Perda de retorno	25
3.1.4 Largura da banda	26
3.1.5 Linha de Microfita	28
3.1.6 Cabo coaxial	29
3.1.7 Arranjo de Antenas	30
3.1.8 Configuração geométrica dos arranjos de antenas	31
3.1.9 Equação de alimentação	35
3.1.10 Acoplamento mútuo	40
3.1.11 Métodos de Análise de Projeto	42
3.1.12 Modelo de Cavidade	43
3.1.13 Modelo de linha de transmissão	46
4. Veículos aéreos não tripulados	50
4.1 História dos veículos aéreos não tripulados	50
4.2 Classificações dos VANT's	54
4.3 Quadrorotor	56
5. MATERIAIS E MÉTODOS	59
6. Resultados e Discussão	65
6.1 Análise dos Dispositivos Propostos	65
6.1.1 Resultados Computacionais	65
6.1.2 Resultados Experimentais	70
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
7.1 Considerações para trabalhos futuros	75
8. Referências Bibliográficas	76

1. INTRODUÇÃO

Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT's, derivando do inglês *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, são descritos muitas vezes como pequenos aparelhos aéreos, apesar de contemplar diversos tamanhos e pesos que são empregados de acordo com sua função, podem ser construído por inúmeros matérias e formatos, sendo utilizado tanto para fins militares como civil (Neris, 2001).

Na criação e desenvolvimento dos veículos aéreos não tripulados (VANT's) são estudados vários aspectos importantes, como sua estrutura, seu formato, peso e o principal que é sua função, o trabalho que esse VANT vai empregar, depois que o mesmo for desenvolvido e testado. Dessa forma, é necessário um estudo sobre as antenas que serão empregadas tanto na transmissão como na recepção do sinal, pois elas serão de fundamental importância na comunicação entre o operador e o aparelho, tendo a inevitabilidade de saber a frequência de atuação, assim como geometria aplicada a essa antena.

Com o avanço tecnológico e a necessidade de modernizar as antenas convencionais, com a ideia de unir o baixo custo de produção e sua fácil adaptação a várias geometrias, surge a antena de microfita, com seu design compacto, fácil modelagem, baixo peso e entre outros aspectos. Dessa forma, com apresentação de todas essas características, as antenas de microfita passam a ser muito utilizadas na área de telecomunicação, em radares, satélites, celulares, aeronaves, mísseis e outras aplicações (Balanis, 2005).

Diante da necessidade de criar uma geometria para a antena de microfita, será utilizado nesse trabalho o *software* HFSS, para auxiliar a simulação assim como o comportamento das ondas eletromagnéticas. A geometria da antena pensada para o VANT deve atender os preceitos da Radio Frequency Identification – RFID, sendo utilizada para as tecnologias que usam a frequência de rádio como captura de dados, dessa forma utilizando as frequências de 2,4GHz e 5,8GHz classificadas como micro onda, perfeitas para os VANT's.

2. Objetivos

2.1 Geral

Este trabalho tem como finalidade analisar e desenvolver antenas de microfitas para um sistema de rádio controle de um VANT.

2.2 Objetivos específicos

- Compreender os conceitos físicos relacionados ao projeto de antenas de microfita;
- Projetar e simular as antenas;
- Confeccionar e testar as antenas;
- Comparar e analisar os resultados experimentais e simulados.

3. Referencial Teórico

3.1 Antena de Microfita

As antenas em sua maioria, são compostas de material condutor, tendo forma e tamanho capaz de converter a onda guiada em onda radiada e vice-versa, ou seja, são estruturas intermediárias entre os espaços livres e a linha de transmissão. Tendo um importante papel na transmissão de radiofrequência, tanto para transmitir e receber o sinal na frequência desejada (Silveira, 2015).

Com o desenvolvimento do mercado consumidor e a necessidade de novas tecnologias acompanhadas da redução de custos e melhor desempenho, as antenas de microfita, passam a se encaixar nesses requisitos. Atraindo, portanto, a atenção dos pesquisadores aplicações nas quais essas características possam ser usadas com maior facilidade (Maia A. S., 2016).

Atualmente a aplicação das antenas de microfita vem ganhando grandes proporções, no que diz respeito a propagação da comunicação sem fio, devido apresentarem, uma estrutura leve, de baixo peso, fácil adaptação a superfícies planas e não planas. Além de todas essas características, exibem uma construção barata, simples, robusta e sua produção por circuito impresso (Silva I. B., 2014).

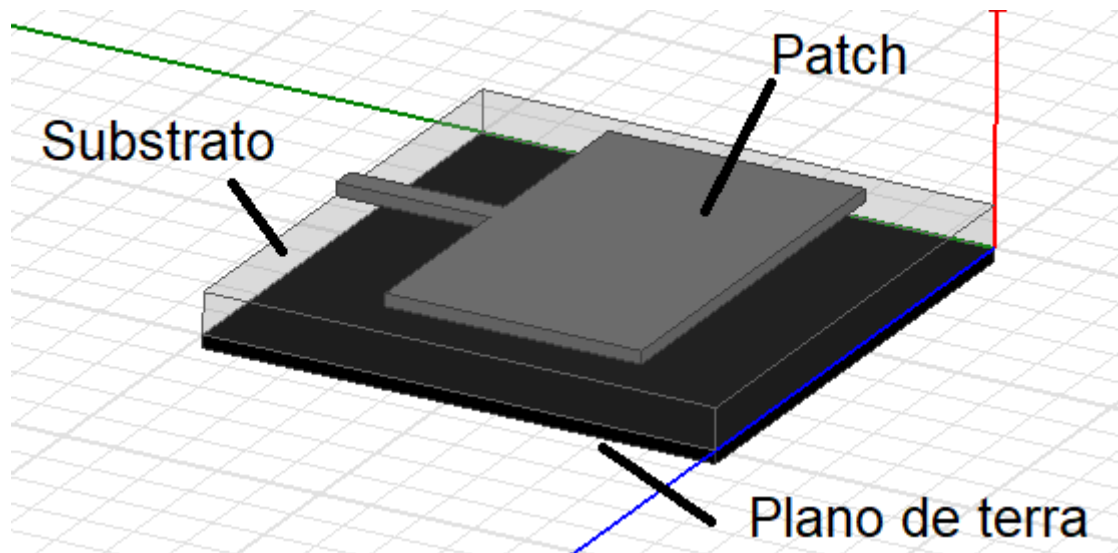
Os estudos relacionados as antenas de microfita, foram iniciados por Deschamps em 1953. Com o desenvolvimento da telecomunicação, essa antenas passaram a ser observadas, devido o potencial que elas apresentavam para novas aplicações, seu aprofundamento com maior afinidade foi iniciado na década de 70 Muson e Howell (Araújo, 2018).

A utilização das antenas de microfita se dá devido suas características, no que diz respeito a propagação da comunicação sem fio, devido apresentarem, uma estrutura leve, fácil adaptação a superfícies planas e não planas. Com essas características, as antenas de microfita passam a ser muito utilizadas na área de telecomunicação (Pereira J. P., 2016)

Uma antena de microfita clássica e simples é constituída de um substrato dielétrico que separa na sua face superior o *patch* ou condutor radiante, apresentando

uma espessura menor que o comprimento de onda no espaço livre, e na sua outra face o aterramento, sendo apresentado na Figura 1 a geometria dessa antena (Araújo, 2018).

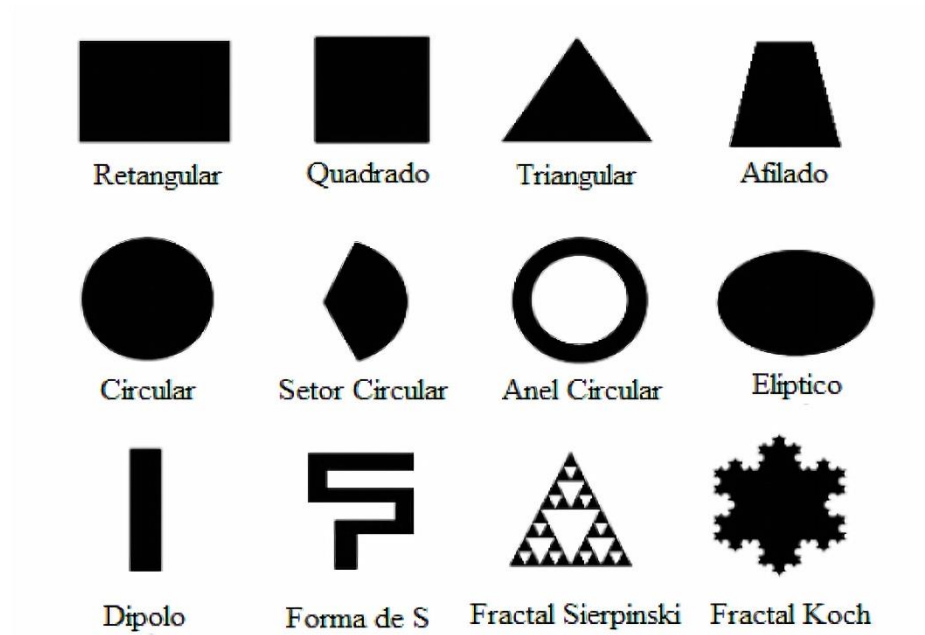
Figura 1 – Representação de uma antena de microfita.



Fonte: Adaptado de (Silveira, 2015).

As geometrias das antenas de microfita são de grande importância para a mesma, com essas estruturas são obtidas a distribuição de corrente de acordo com a geometria do *patch*, dessa forma quanto maior a variação da geometria, numerosos resultados são encontrados assim como a fórmula matemática usada. Podem ser encontrados vários moldes usadas como base para diversificar os resultados, encontrando geometrias simples, tais como: circular, retangular, triangular e até formas mais complexas, por exemplo geometria fractal (Brito, 2018).

Figura 2 – Formas de *patch*.



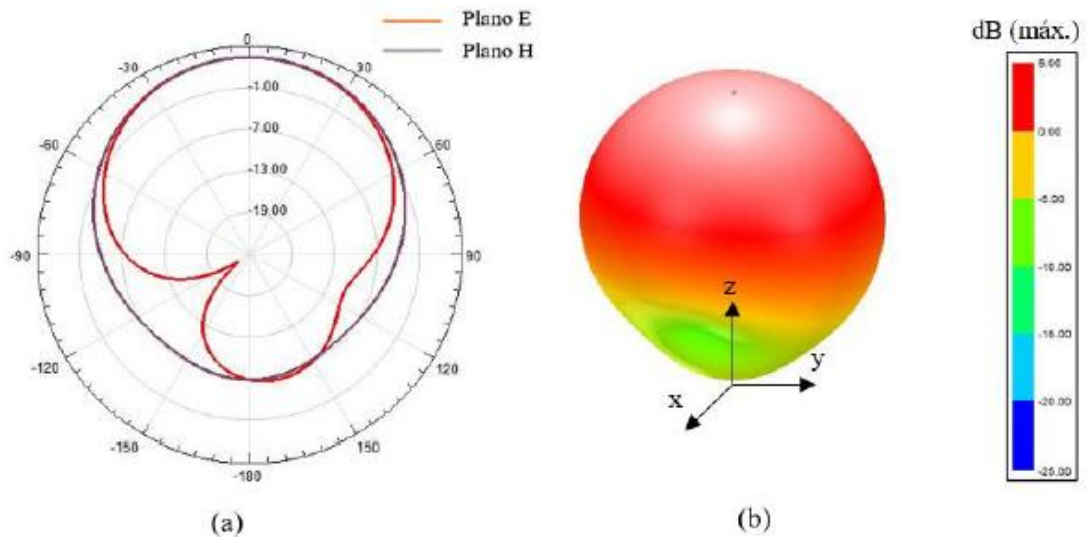
Fonte: (Maia A. S., 2016)

3.1.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação é a representação gráfica das particularidades de propagação das ondas eletromagnéticas da antena, capaz de se propagar por todo o espaço livre, sendo encontrado através das coordenadas espaciais partindo do centro que nesse caso seria a antena. Com esse diagrama também pode ser exibido a amplitude do campo magnético, do campo elétrico ou da potência radiada (Sobrinho, 2018).

Contudo, o diagrama de radiação pode ser representado em duas dimensões 2D, assim como em terceira dimensão 3D, a construção desses diagramas são de acordo com o campo elétrico E o campo magnético H , as Figuras 3 (a) e (b), respectivamente representam os diagramas em 2D e 3D (Sobrinho, 2018).

Figura 3 – Diagrama de radiação (a) 2D e (b) 3D



Fonte: (Sobrinho, 2018).

3.1.2 Diretividade, Ganho e Eficiência

Segundo (Balanis, 2005) a diretividade é caracterizada como sendo uma razão entre duas intensidades de radiação, uma com direção específica (U) e outra com a intensidade média de radiação sendo propagada em todas as direções (U_0). Sendo descrita em uma antena como: a capacidade de acumular energia em uma direção definida.

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} , \quad (1)$$

Em que P_{rad} é a potência de radiação determinada em um ponto com coordenada específicas e 4π refere-se ao ângulo sólido formado.

Relacionando as intensidades de radiação de acordo com a definição de diretividade, determina-se a Equação 2

$$D = \frac{U}{U_0} , \quad (2)$$

Logo,

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} , \quad (3)$$

Definindo-se: Diretividade D , intensidade de radiação U , intensidade de radiação média U_0 e potência de irradiação no ponto definido P_{rad} .

Assim como a diretividade, o ganho de potência da antena ou apenas ganho, expressa o desempenho da distribuição de potência, porém ele apresenta uma diferença, passa a analisar as perdas da antena, assim como a comparação da qualidade das antenas associado a transferência de potência para o meio. Segundo (Balanis, 2005) o ganho, é estabelecido entre a intensidade de radiação, em uma dada direção, e a intensidade de radiação que seria obtida se a potência fosse aceita pela antena, fosse radiada isotropicamente, ou seja, igual intensidade para todas as direções.

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} , \quad (4)$$

Contudo, pode ser observado a equivalência entre as equações de diretividade e ganho. Porém ocorre uma diferença entre elas, pois a eficiência da antena não é unitária, dessa forma boa parte da potência de entrada (P_{in}) não é convertida em potência radiada (P_{rad}). Podendo descrever a equação a seguir.

$$P_{rad} = \eta_{cd} P_{in} , \quad (5)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 4 do ganho:

$$G = \eta_{cd} \frac{4\pi U}{P_{rad}} , \quad (6)$$

Assim,

$$G = \eta_{cd} D , \quad (7)$$

Segundo (Balanis, 2005), para o cálculo da eficiência da antena é levado em consideração as perdas nos terminais de entrada e no interior da antena, dessa forma a eficiência é expressa como determinado na Equação 8.

$$\eta = \eta_{rad} \cdot \eta_{ref} , \quad (8)$$

Definisse-se: Eficiência η ,Eficiência η_{rad} de radiação e Eficiência de reflexão η_{ref} .

Quando uma onda eletromagnética é propagada, boa parte da energia que é enviada para a antena é perdida, devido a estrutura da antena ou é perdida no meio, o restante da energia é convertida em campo irradiante (Maia A. S., 2016). Dessa forma, a eficiência de radiação é determinada pela Equação 9

$$\eta_{rad} = \frac{P_R}{P_E} = \frac{P_E - P_P}{P_E} , \quad (9)$$

Definindo: Potência radiada P_R , potência fornecida a antena P_E , potência perdida nos materiais da antena P_P .

Quando a uma diferença na impedância entre a antena e a linha de alimentação, acontece o descasamento de impedância, gerando assim por consequência a perda da potência do sinal, pois parte do sinal é refletido para a fonte. Dessa forma, descrevendo a eficiência de reflexão, podendo ser encontrada pela Equação 10 (Pereira T. T., 2018).

$$\eta_{ref} = 1 - |\Gamma|^2 , \quad (10)$$

Onde o coeficiente de reflexão da antena (Γ) é dado pela Equação 6.

$$\Gamma = \frac{Z_E - Z_0}{Z_E + Z_0} , \quad (11)$$

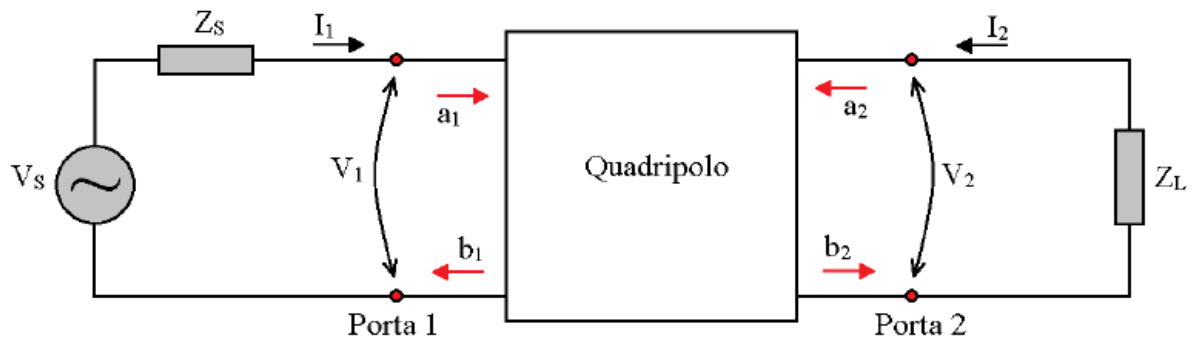
Definindo: impedância da entrada da antena Z_E , impedância característica da linha de transmissão Z_0 .

3.1.3 Perda de retorno

A perda de retorno (RL) é uma das principais propriedades a serem consideradas na elaboração do projeto de antenas, pois com ela é possível determinar a correlação entre a potência fornecida e a potência refletida pela antena. Contudo, as antenas são circuitos que operam em baixo sinal, na escala de micro-ondas, podendo ser definida com duas portas, uma porta de entrada e a outra de radiação (Pereira T. T., 2018).

Partindo desses parâmetros se tem o estudo do quadripolo, sendo o mesmo eficaz em circuitos de rádio frequência para a definição da matriz de espalhamento (matriz S), com a simplicidade das medições e a utilização em circuitos de altas frequências (Pereira T. T., 2018). A Figura 4 representa o modelo de quadripolo, onde a_1 , a_2 , b_1 e b_2 simbolizando nessa ordem, as ondas de tensão complexas normalizadas, incidentes e refletidas.

Figura 4 – Modelo de um quadripolo.



Fonte: (Holanda, 2016)

Com base nos sinais de entrada (V_1 e I_1) saída (V_2 e I_2), as vantagens independentes (a_1 e a_2) e dependentes (b_1 e b_2) são definidas através das seguintes equações.

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}}, \quad (12)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} , \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} , \quad (14)$$

$$b_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} , \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} , \quad (16)$$

Definindo: a onda de potência incidente na porta é representada $(V_2 + Z_0 I)$, coeficiente de reflexão na porta S_{11} , representa o ganho de tensão reversa S_{12} , ganho de tensão direta S_{21} , coeficiente de reflexão na porta 2 S_{22} .

O primeiro termo da matriz de espalhamento possui uma interação com a perda de retorno, tendo a mesma descrição com o coeficiente de reflexão (Γ) (Holanda, 2016).

$$RL = -20\log |S_{11}| , \quad (17)$$

Por fim, no coeficiente de reflexão os valores adotados para o intervalo de frequência serão valores menos de -10dB, (Castro, 2018).

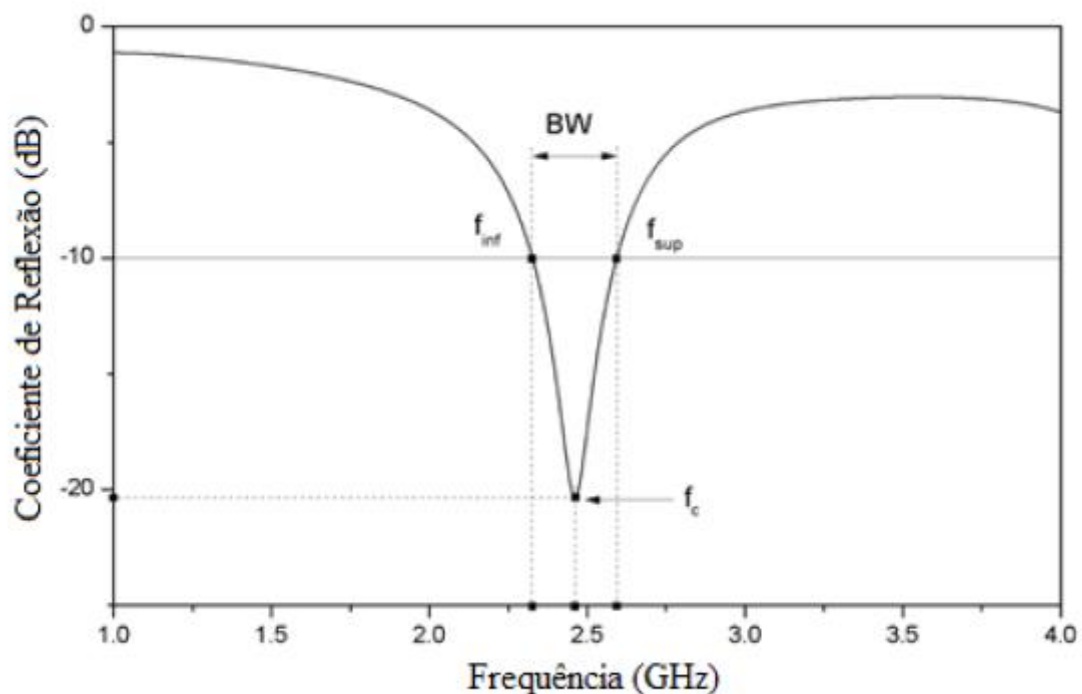
3.1.4 Largura da banda

A largura de banda ou *Bandwidth* é definida segundo (Balanis, 2005) como o intervalo de frequência na qual a performance da antena, referente a algumas

particularidades, em que a antena deve atuar corretamente no valor do intervalo da frequência ressoante. Em outras palavras, é a faixa de frequência que atua de um lado ao outro em volta da frequência central de operação.

Dessa forma, a frequência ressoante de uma antena ocorre na faixa de frequência, em que a perda de retorno atua a baixo de -10dB (reflexão próxima de 1%). Pois, com essa faixa de frequência as antenas de microfita, passam a ser utilizadas comercialmente, a Figura 5 ilustra a frequência de reflexão em função da frequência descrita.

Figura 5 – Gráfico do coeficiente de reflexão em função da frequência.



Fonte: (Holanda, 2016)

A expressão para a largura de banda pode ser expressa da seguinte forma (Pereira T. T., 2018).

$$BW = f_{sup} - f_{inf} , \quad (18)$$

Representando: frequência superior (f_{sup}), frequência inferior (f_{inf})

Para a antena de largura estreita, tendo como base a sua forma percentual, representada por:

$$BW(\%) = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_r} \times 100\% , \quad (19)$$

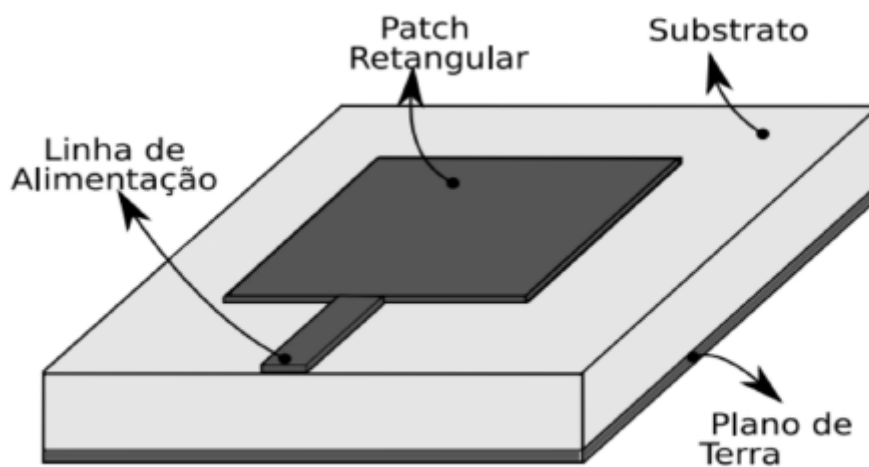
Com base na Equação 15 podem ser encontradas os valores percentuais da largura de banda das antenas, segundo Filho 2010 (Filho, 2010) tendo as seguintes classificações:

- Banda estreita, com $0\% < BW < 1\%$
- Banda Larga, com $1\% \leq BW \leq 20\%$
- Banda Ultra Larga, com $BW \geq 20\%$

3.1.5 Linha de Microfita

O mecanismo de alimentação por meio da linha de microfita, consiste na implementação de uma fita condutora, impressa sobre o plano do substrato e que é conectada ao *patch*, em que a mesma é estabelecida sobre o plano de terra, deixando assim a estrutura das antenas planar. Na Figura 6 é apresentado esse tipo de alimentação.

Figura 6 – Alimentação por linha



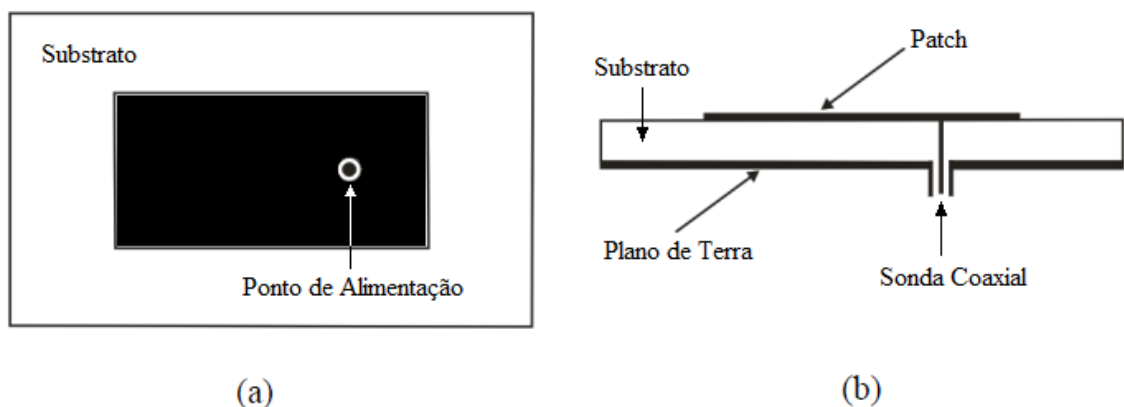
Fonte: (Brito, 2018).

Essa forma de alimentação apresenta grande vantagem, devido sua fácil construção assim como sua utilização e um casamento simples, podendo ajustar a impedância conforme o alimentador é usado. Com tudo, quando se utiliza esse modelo de alimentação em substratos com maiores dimensões, surge um aumento na largura de banda, entretanto, acrescentando radiações indesejadas na alimentação (Pereira T. T., 2018).

3.1.6 Cabo coaxial

Essa forma de alimentação é muito utilizada nas antenas de microfitas, a alimentação é feita através do cabo coaxial que perfura o plano de terra e o substrato dielétrico, dessa forma a parte interna é conectada ao *patch*, no momento em que a parte externa é conectada ao plano de terra. O local perfurado será da escolha do projetista da antena. Na figura 7 é representada a alimentação por cabo coaxial.

Figura 7 – Alimentação por cabo coaxial de uma antena de microfita. (a) Vista Superior (b) Vista Lateral.



Fonte: (Filho, 2010).

Com tudo, a utilização dessa alimentação para a antena de microfita possui uma fácil construção, apresentando um bom casamento de impedância. Porém, apresenta uma largura de banda estreita, assim como uma difícil modelagem, devido

ao número de acoplamento de solda que serão necessários para seu arranjo dificultando seu desempenho (Pereira T. T., 2018).

3.1.7 Arranjo de Antenas

As antenas são construídas para exercer determinada função, seja ela, transmitir ou receber o sinal, mas essas antenas possuem uma radiação simples e muitas vezes apresenta um diagrama de radiação largo, possuindo um baixo valor de diretividade. Essas características não são adequadas para serem utilizadas na comunicação a grandes distâncias, devido a necessidade de uma maior diretividade, por esse motivo é indispensável o aumento do tamanho elétrico da antena, uma das formas para esse aumento, seria também aumentar as dimensões da antena, que em muitos casos não é aceito, devido a proporção da antena assim como o local onde ela seria usada, além da variação que essa alteração causaria na frequência de operação da antena (Filho, 2010).

Umas das melhores formas para resolver essa situação, é o agrupamento dos elementos radiantes, tanto em sua configuração como na sua geometria, essa formação é chamada de arranjos de antenas e na sua maioria, os arranjos das antenas são similares, devido a simplicidade e praticidade na execução desse método, sendo demonstrado na Figura 8. Por fim, há uma ligação dos sinais dos componentes para formar a saída, tendo então uma maior diretividade, ocupando menos espaço no dispositivo. (Pereira T. T., 2018).

Figura 8 – Arranjo de uma antena de microfitas, aplicada em WLAN para 5.8 GHz.



Fonte: (Pereira T. T., 2018)

3.1.8 Configuração geométrica dos arranjos de antenas

Nessa seção será abordado os arranjos de antenas tendo foco nos arranjos lineares e planares. Nos arranjos lineares seus elementos radiadores estão ordenados de forma linear, em contrapartida, os arranjos planares estão organizados em uma grade retangular. Com tudo, em ambos os casos esses elementos são compostos do mesmo material, possuindo intervalos constantes entre os elementos próximos.

3.1.8.1 Arranjo linear

Os elementos são distribuídos ao longo de uma linha reta, podendo apresentar os mesmos espaçamentos entre os elementos radiadores, sendo representando na Figura 9. Assim como podem ser construídos com inúmeros arranjos lineares, como é a apresentado na Figura 10, em que os arranjos de N elementos em um campo distante apresentando a mesma propriedade física, ao longo do eixo “z”, o fator de arranjo pode ser alcançado levando em consideração os elementos como uma fonte pontual. Sendo estabelecida na Equação 20 (Pereira T. T., 2018).

$$FA = 1 + e^{j(kdk\cos\theta + \beta)} + e^{j2(kdk\cos\theta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kdk\cos\theta + \beta)} , \quad (20)$$

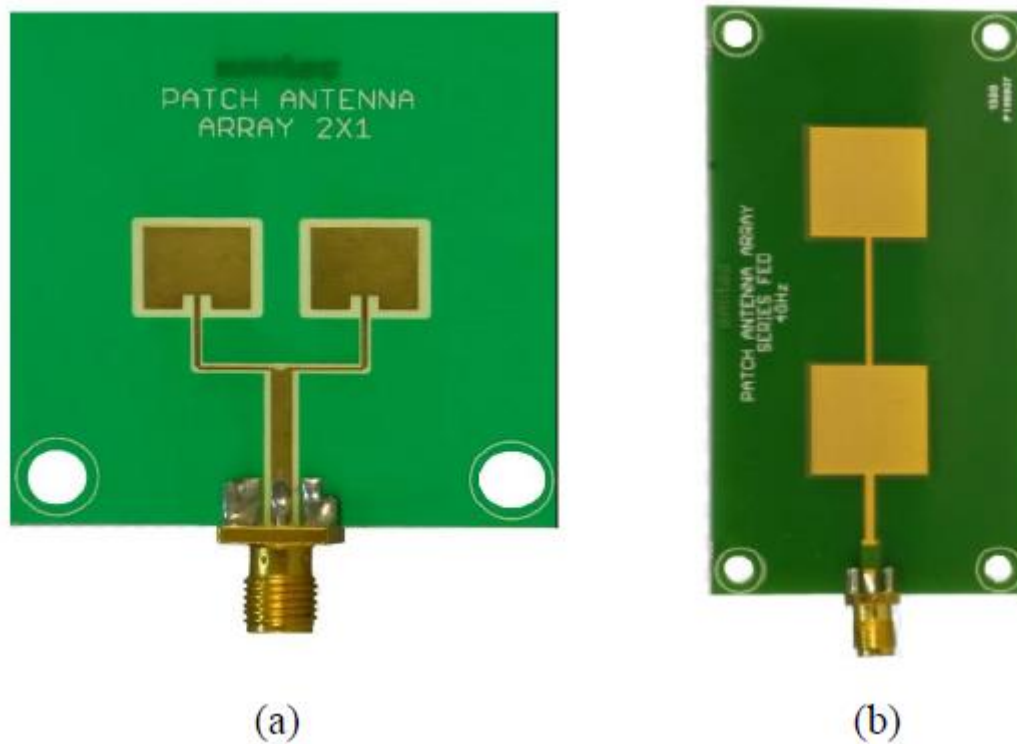
A Equação 20, pode ser reescrita como na Equação 21.

(21)

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kdcos\theta + \beta)} ,$$

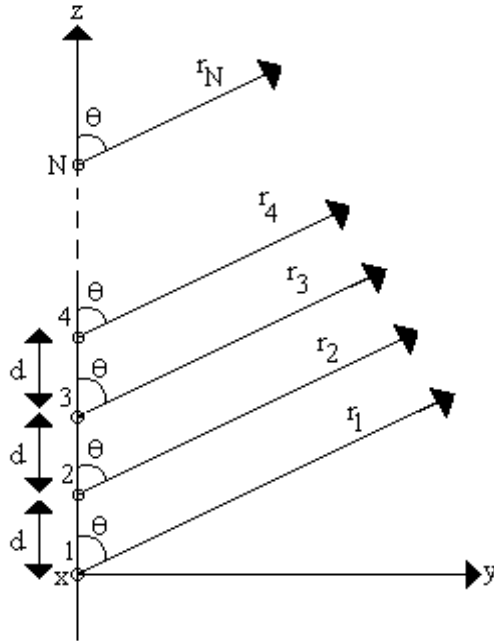
Sendo o $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda, d e β são, respectivamente, o espaçamento e o deslocamento de fase entre cada elemento.

Figura 9 – Exemplo de Arranjos Lineares (a) arranjo 1x2 (b) arranjo 2x1.



Fonte: (Pereira T. T., 2018).

Figura 10 – Exemplo de arranjo com N elementos.



Fonte: (Maia H. M., 2013)

Concluindo a organização do número máximo de elementos dos arranjos, pode ser reduzido para a Equação 22.

$$FA = \left| \frac{\sin\left(\frac{N}{2}(kdcos\theta + \beta)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}(kdcos\theta + \beta)\right)} \right|, \quad (22)$$

3.1.8.2 Arranjo planar

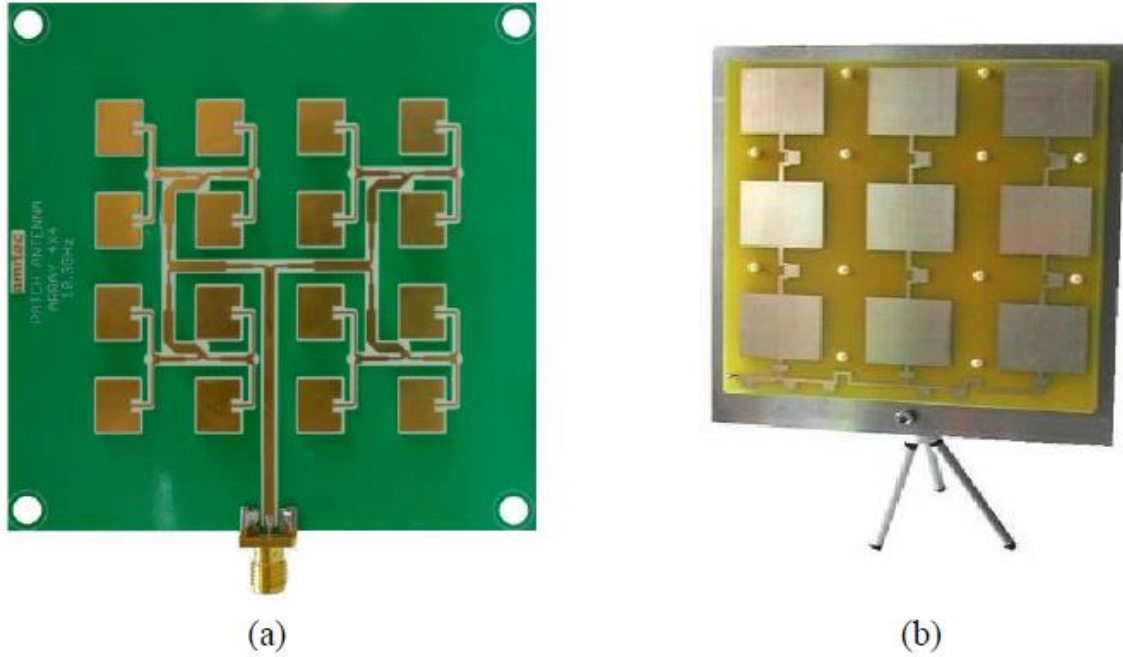
Os arranjos planares são utilizados, para alcançar ângulos de radiação em duas dimensões. Essas estruturas de arranjos possibilitam maior semelhança nos campos radiados, assim como sua capacidade adaptação a outras características de controle (Maia H. M., 2013). A Figura 11 demonstra o arranjo planar.

O fator de arranjo é executado da seguinte forma, se M elementos são ordenados ao longo do eixo, então o fator de arranjo é dado da seguinte forma, Equação 23.

$$FA = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} , \quad (23)$$

Especificando: coeficiente de excitação para cada elemento (I_{m1}), distanciamento entre elementos no eixo x (d_x), deslocamento de fase no eixo x (β_x).

Figura 11 – Exemplo de arranjo planar (a) arranjo 4x4, (b) arranjo 3x3.



Fonte: (Pereira T. T., 2018).

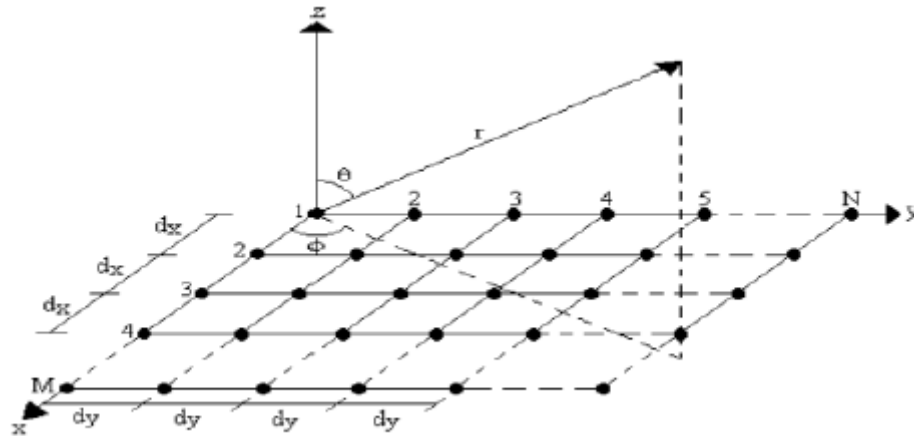
Com tudo, se for incluídos N elementos do arranjo por toda a extensão do eixo “y”, ao mesmo tempo com o conjunto de distanciamento dy e o deslocamento de fase β_y , forma um arranjo planar, sendo representado na Figura 12. Dispondo de um fator de arranjo representado na Equação 24.

$$FA = \sum_{n=1}^N I_{n1} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} , \quad (24)$$

Redefinindo os termos da Equação 24, chegamos a Equação 25.

$$FA = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} , \quad (25)$$

Figura 12 – Geometria de um arranjo planar com MxN elementos.



Fonte: (Maia H. M., 2013).

Na Equação 25, os índices “x” e “y” simbolizam as variáveis nos eixos relacionados, pela Equação 25 é representado que o fator de arranjo em um arranjo planar é o produto dos fatores nas direções dos eixos “x” e “y” (Filho, 2010).

Concluindo a organização do número máximo de elementos dos arranjos no eixo, podendo ser reduzido do fator de arranjo planar, representado na Equação 26.

$$FA = \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\Psi_x\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\Psi_x\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\Psi_y\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\Psi_y\right)} \right], \quad (26)$$

$$\Psi_x = kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x \quad \Psi_y = kd_y \sin\theta \cos\varphi + \beta_y ,$$

3.1.9 Equação de alimentação

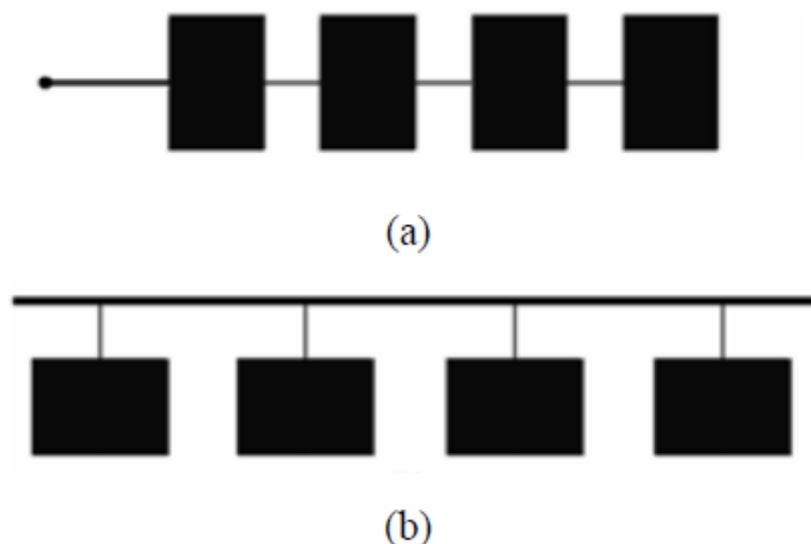
No que está relacionado a forma de alimentação, encontram-se duas formas principais para a alimentação de elementos dos arranjos, sendo eles paralelos ou em série, assim como também a combinação entre esses dois métodos.

3.1.9.1 Alimentação em Série

A forma de alimentação em série, compreende em uma linha de transmissão constante onde a energia é distribuída gradualmente pelos elementos radiantes por todo o percurso da linha. Levando em consideração toda a extensão da linha que separa os elementos, assim, o comprimento elétrico varia com a frequência, em seguida a defasagem da corrente de alimentação decorrendo entre elas. Em função disso, essas antenas são empregadas em muitas situações onde a direção do feixe varia com a frequência (Ezquerro, 2015).

Encontram-se dois modelos de alimentação em série, como podem ser vistos na Figura 13. A alimentação simétrica ou em linha, caracterizada na Figura 13-a, todos esses elementos são mantidos com a mesma potência e fase, que independe da frequência. A figura 13-b ilustra a alimentação assimétrica ou fora da linha, nesse arranjo é aceito o controle da defasagem entre os elementos, e portanto tem a direção do feixe principal (Ezquerro, 2015).

Figura 13 – (a) Alimentação em linha. (b) Alimentação fora da linha.



Fonte: (Ezquerro, 2015)

Na alimentação em linha as ligações entre os *patches* podem ser feitas pela utilização dos transformadores de impedância de um quarto de onda ($\lambda/4$), onde os projetos dessas antenas são tratados na alimentação em paralelo. Dessa forma a impedância é calculada de acordo com as seguintes Equações 16, 17 e 18, podendo

medir um transformador de um quarto de onda para o casamento de impedância entre os elementos.

$$R_E = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} , \quad (27)$$

$$G_1 = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{\cos\theta} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta}{120\pi^2} d\theta , \quad (28)$$

$$G_{12} = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta}{120\pi^2} J_0(K_0 L \sin\theta) d\theta , \quad (29)$$

Indicando: impedância de entrada (R_E), autocondutância da antena (G_1), condutância mútua (G_{12}), número de onda no espaço livre (K_0), função de Bessel de primeira ordem e argumento x (J_0)

3.1.9.2 Alimentação em Paralelo

Em contrapartida, podem ser alimentados arranjos de antenas microfita em paralelo, sendo de fácil realização, aceitando o reparo da defasagem entre os elementos do arranjo com uma maior precisão. Para unir a impedância da antena com a porta de entrada, é corriqueiro a utilização de um transformador de um quarto de onda ($1/4$ de λ), além de possibilitar o controle da fase de cada elemento (Ezquerro, 2015). A utilização de linha de microfita para a alimentação em paralelo é representada na Figura 14.

A proposta do transformador de impedância de um quarto de onda que faz parte da rede de alimentação em paralelo é estudada de acordo com as seguintes Equações 30 a 34. Onde para cada impedância do transformador de um quarto de onda, tendo

relação entre a largura e o comprimento do substrato (w/h), sendo definido como a dimensão em função da frequência de projeto e material utilizado (Pereira T. T., 2018).

$$Z = \sqrt{Z_0 Z_L}, \quad (30)$$

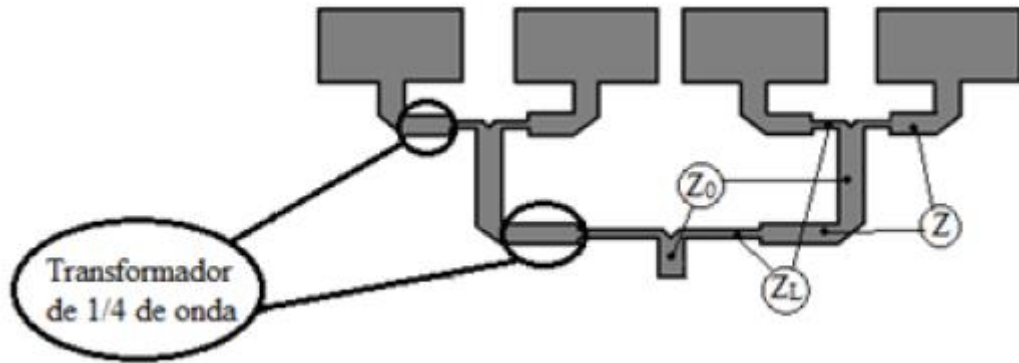
$$\begin{cases} \frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, Z \geq 40\Omega \\ \frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right], Z \leq 40\Omega, \end{cases} \quad (31)$$

$$A = \frac{Z\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{120} + 0.5 \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left[\ln\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{\epsilon_r} \ln\left(\frac{4}{\pi}\right) \right], \quad (32)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (33)$$

$$1 = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (34)$$

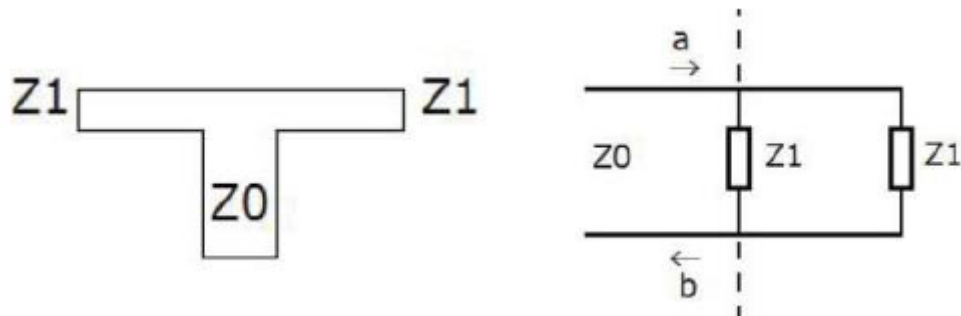
Figura 14 – Alimentação em paralelo.



Fonte: (Pereira T. T., 2018)

Com o compartilhamento de energia eletromagnética nos componentes de arranjo paralelo, é indispensável a utilização de um divisor de potência de três portas (junção em T), sendo representado na Figura 15. Tendo como propósito o compartilhamento da potência de forma uniforme, as impedâncias das linhas a serem casadas (Z_L), desempenhando a relação que é apresentada na Equação 35, portanto as linhas do arranjo devem dispor do mesmo espaçamento calculado com a Equação 31 (Pereira T. T., 2018)

Figura 15 – Ilustração do divisor de três portas, e seu circuito equivalente.

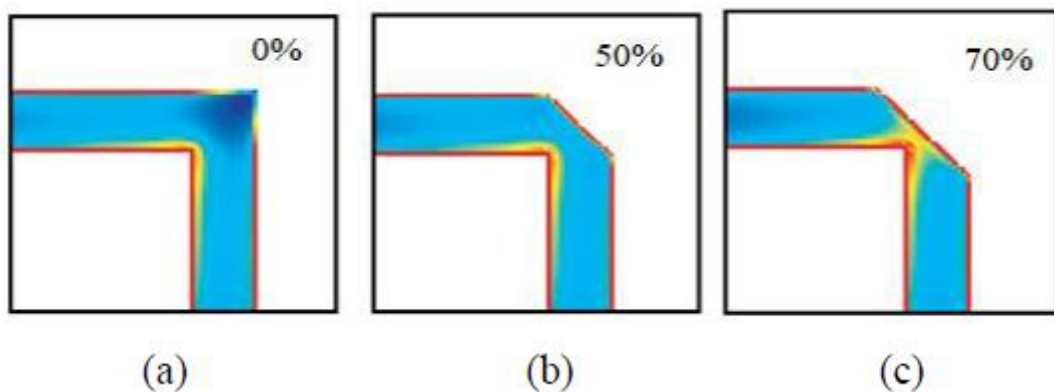


Fonte: (Ezquerro, 2015)

$$S_{11} = \frac{b}{a} = \frac{Z_1 \parallel Z_1 - Z_0}{Z_1 \parallel Z_1 + Z_0} = 0 \rightarrow Z_1 \parallel Z_1 = Z_0, \quad (35)$$

Nas redes de alimentação, onde é encontrado as curvas de linhas de microfitas o fluxo de corrente tende a ir pelo caminho com menor distancia possibilitando um aumento no fluxo da borda interna, em contrapartida, deixa as borda externa quase nulas. Sendo representado na Figura 16-a, para melhorar o casamento de impedância, é utilizado o chanfro nas curvas, na tentativa de diminuir o efeito capacitivo, assim como a impedância da linha de alimentação e aumentar o comprimento elétrico (Pereira T. T., 2018). Nas figuras 16-b e 16-c, d acordo com que o chanfro aumenta a densidade de corrente também sobe, devido a retirada do metal.

Figura 16 – Transporte de corrente de curva de microfita. (a) Sem chanfro, (b) 50% de chanfro e (c) 70% de chanfro.



Fonte: (Pereira T. T., 2018)

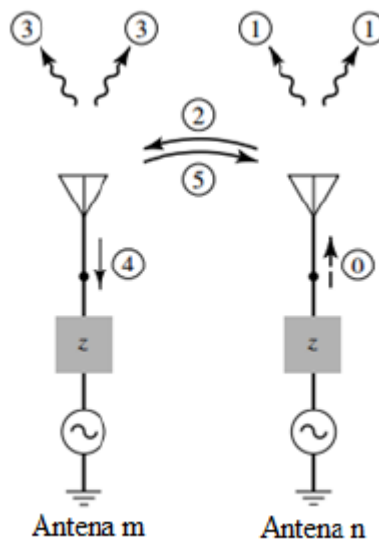
3.1.10 Acoplamento mútuo

O acoplamento mútuo ocorre quando duas ou mais antenas estão próximas das outras e estão ativas, recebendo ou transmitindo algum sinal eletromagnético, ocorrendo a troca de energia radia entre elas, em virtude das propriedades dielétricas não orientadas, que influencia nas particularidades da antena, dessa forma complicando a análise e o projeto da mesma. Essas interferências vão depender dos seguintes aspectos radiação: separação relativa, orientação relativa e a alimentação de cada um dos elementos. Todos esses parâmetros influenciam o desempenho, os coeficientes de reflexão e o padrão geral da antena (Balanis, 2005).

A Figura 17 demonstra de forma simples o acoplamento mútuo, tendo em mente que a imagem represente duas antenas “m” e “n”, sendo elas posicionadas uma próxima a outra. O aparelho será compreendido no momento em que uma fonte for conectada a antena “n”, o sinal gerado (0) a caminho da antena, será transmitido para o espaço (1) e em simultâneo a antena “m” (2). O incidente de energia “m” tende a rebater parte da energia (3), permitindo que o restante possa se mover para o gerador da antena “m” (4), alguma parte da energia refletida (3) pode ser retransmitida para a antena “n” (5). Esse processo pode ocorrer interminavelmente, o mesmo pode ocorrer se a antena “m” for a excitada e a “n” for a parasita antena (Balanis, 2005).

Se todas as duas antenas “m” e “n” forem excitadas ao mesmo tempo, o campo radiado e refletido por cada uma delas, será adicionado vetorialmente, chegando a um campo total em qualquer ponto. Assim a forma de contribuição total para o campo distante de um elemento particular no arranjo, não irá depender apenas da excitação fornecido por seu gerador (excitação direta), mas também sobre a excitação parasita total, que vai depender dos demais geradores (Pereira T. T., 2018).

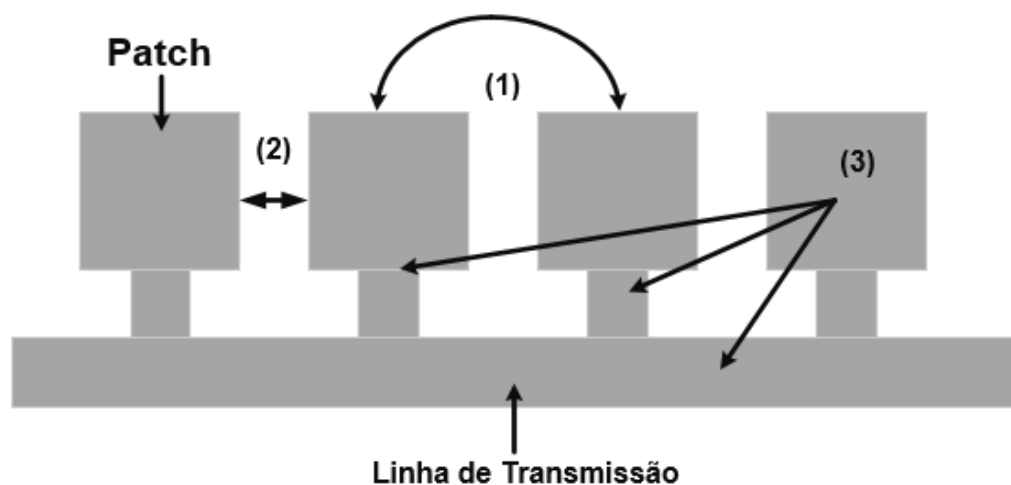
Figura 17 – Processo de acoplamento mútuo.



Fonte: (Balanis, 2005)

É de grande importância o estudo de acoplamento mútuo em arranjos de antenas de microfita, assim como os demais acoplamentos, devido a avaliação errada de impedância de entrada, deformação no padrão de radiação e perda da eficiência. A Figura 18 representa o tipo de acoplamento mútuo que ocorrem em um arranjo de antena (Pereira T. T., 2018).

Figura 18 – Tipo de acoplamentos mútuos presentes em um arranjo de antenas.



Fonte: (Ezquerro, 2015)

- i. Radiação livre onda e acoplamento de onda de superfície entre os elementos.
- ii. Acoplamento de franjamento entre elementos adjacentes.
- iii. Acoplamento entre um elemento e a rede de alimentação da estrutura da antena.

3.1.11 Métodos de Análise de Projeto

De acordo com os padrões físicos da antena de microfita, são indispensáveis mecanismos que ajudem a reproduzir parâmetros numéricos a respeito dos seus atributos. São inúmeros métodos encontrados para a caracterização da antena, dependendo do quão preciso e a simplicidade pretendida é possível escolher o melhor método para suprir a necessidade. Podendo ser dividido em três grupos (Filho, 2010).

O primeiro grupo são encontrados os modelos de onda completa, tendo como base a divisão de corrente no *patch* e no plano de terra. Esse grupo apresenta definições matemáticas difíceis, por esse motivo, apresentando menor dificuldade computacional, apresentando resultado mais precisos, principalmente em alta frequência (Araújo, 2018).

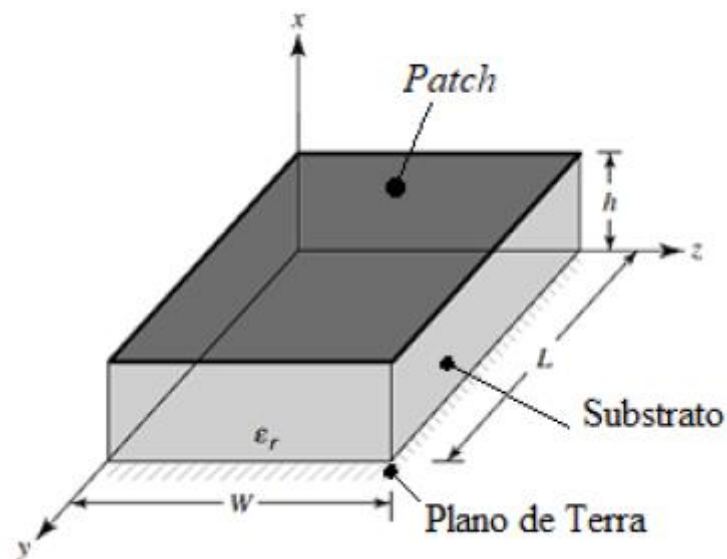
No segundo grupo, estão os métodos numéricos com uma menor precisão, faz necessário um maior esforço computacional e menor analítico. Entre os métodos de onda completa estão destacados: Método de Momento (*MoM – Method Of Moments*), Métodos dos elementos (*FEM – Finite Element Method*), Diferença Final do Domínio do Tempo (*FDTD – Finite Difference Time Domain*) e o Método Iterativo baseado nos Conceitos das Ondas (*WCIP – Wave Concept Iterative Procedure*) (Castro, 2018).

Por fim, o terceiro grupo sendo descrito pelos modelos aproximados, que são formados na distribuição de correntes magnéticas correspondente próximo das margens do *patch*. Dessa forma o mecanismo de radiação da antenas é simplificado e as perdas vinculadas a propagação de onda e a dispersão, são ignoradas (Brito, 2018). Entre os principais modelos aproximados estão: Modelo de Linha de Transmissão (*TLM – Transmission Line Method*), Modelo de Rede Multipolar (*MNM – Multiport Network Model*) e o Modelo de Cavidade.

3.1.12 Modelo de Cavidade

O modelo de cavidade é de grande importância, quando se deseja prever os resultados das características de radiação, pois em boa parte dos casos ele assemelha a antena como uma cavidade composta por paredes elétricas e por paredes magnéticas em volta do *patch*, fazendo com que o campo no interior do substrato possa ser calculado com uma maior precisão (Castro, 2018). A Figura 19, ilustra esse modelo.

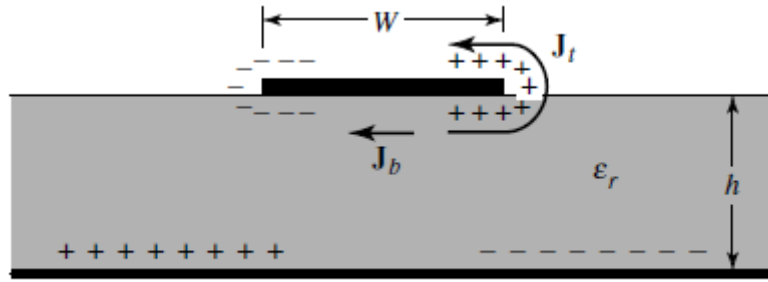
Figura 19 – Geometria retangular de microfita para os modelos de cavidade.



Fonte: (Castro, 2018).

Quando o *patch* é energizado, é estabelecida uma distribuição de carga nas superfícies inferior (J_B) e superior (J_T) do *patch*, o mesmo ocorre na superfície do plano de terra. Ilustrada na Figura 20.

Figura 20 – Distribuição de cargas e densidade de correntes na antena.



Fonte: (Castro, 2018)

A distribuição de carga é controlada por dois mecanismos, atração e repulsão, o atrativo ocorre através das cargas de sinal opostos entre o aterramento e a parte inferior do *patch*, já o repulsivo entre as cargas de mesmo sinal na superfície inferior do *patch*, que direciona as cargas para as bordas de sua face superior. Esse movimento de cargas cria a densidade de corrente (J_b e J_t), na superfície do *patch*. Devido a pequena espessura e largura em grande parte das microfitas, o mecanismo atrativo se destaca e a maior parte da concentração se estabelece na parte inferior do *patch* (Magno, 2016).

Utilizando o método de cavidade, é representado o vetor potencial A_x , atendendo a Equação 36.

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 , \quad (36)$$

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] , \quad (37)$$

Onde k_x , k_y e k_z são números de ondas ao longo das direções x , y e z , respectivamente, sendo determinada a partir das situações de contorno apresentada na Equações 41, 42 e 43. Os campos elétricos e magnéticos no interior da cavidade são associados pelo potencial vetorial, por meio das Equações 38, 39 e 40

$$E_x = j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x , (H_x = 0) , \quad (38)$$

$$E_y = j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial_x \partial_y} \right), \left(H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial_z} \right), \quad (39)$$

$$E_z = j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial_x \partial_y} \right), \left(H_z = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial_y} \right), \quad (40)$$

$$E_y(X' = 0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = E_y(x' = h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) \quad (41)$$

$$= 0,$$

$$H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = 0) = H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = W) \quad (42)$$

$$= 0,$$

$$H_z(0 \leq x' \leq h, y' = 0, 0 \leq z' \leq W) = H_z(0 \leq x' \leq h, y' = L, 0 \leq z' \leq W) \quad (43)$$

$$= 0,$$

As coordenadas x' , y' e z' , são usadas para simbolizar o interior da cavidade. Aplicando as condições de contorno, é possível encontrar o número de onda, determinado pelas Equações 44, 45 e 46.

$$k_x = \left(\frac{m\pi}{h} \right), m = 0, 1, 2, \dots, \quad (44)$$

$$k_z = \left(\frac{p\pi}{W} \right), p = 0, 1, 2, \dots, \quad (45)$$

$$k_y = \left(\frac{n\pi}{L} \right), n = 0, 1, 2, \dots, \quad (46)$$

Onde m , n , p são diferentes de zero e representam, nessa ordem, o número de mudanças do campo em meio período ao decorrer da orientação x , y e z . Como o número de ondas são sujeitas as separações, as frequências de ressonância é da cavidade é representada pela Equação 47 (Pereira T. T., 2018).

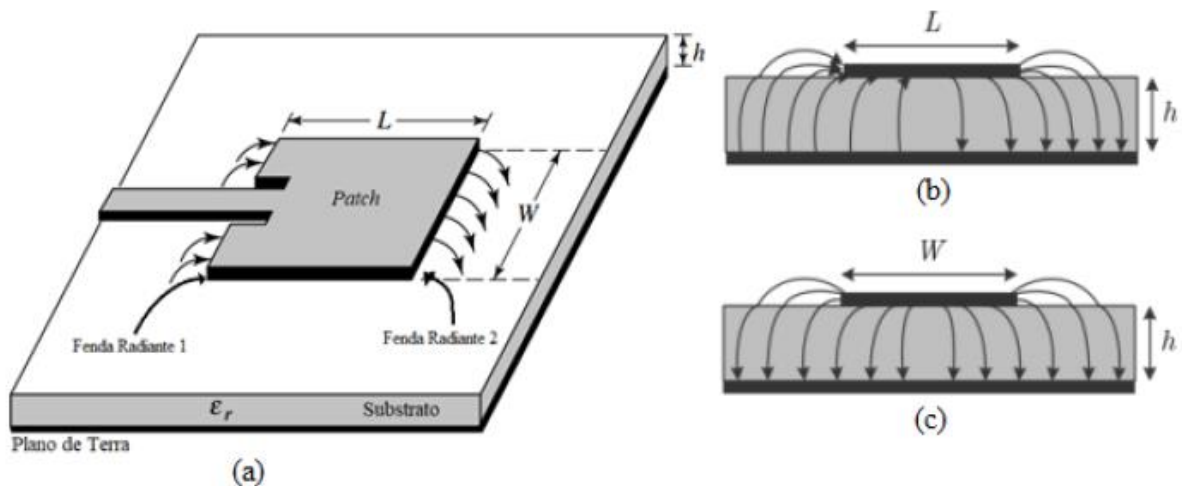
(47)

$$(f_r)_{mmp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2},$$

3.1.13 Modelo de linha de transmissão

O modelo de linha de transmissão apresenta uma das formas mais simples de ser desenvolvido e menos preciso, contudo fornecendo uma boa proximidade física, sendo possível a determinação de vários critérios da antena, sendo eles a frequência de ressonância, diagrama de radiação e a impedância de entrada. Com tudo esse modelo representa a antena por duas fendas separadas pela linha de transmissão, sendo ilustrada na Figura 21-a, esse método avalia o efeito das bordas nas fendas radiantes. Quando os campos eletromagnéticos que se propagam na linha, encontram uma descontinuidade, assim gerando o franjamento em razão da mudança de dimensão da microfita (Silva J. L., 2015).

Figura 21 – Antena de microfita. (a) fenda radiada separada por L, (b) vista ao longo do comprimento e (c) visto ao longo da largura.

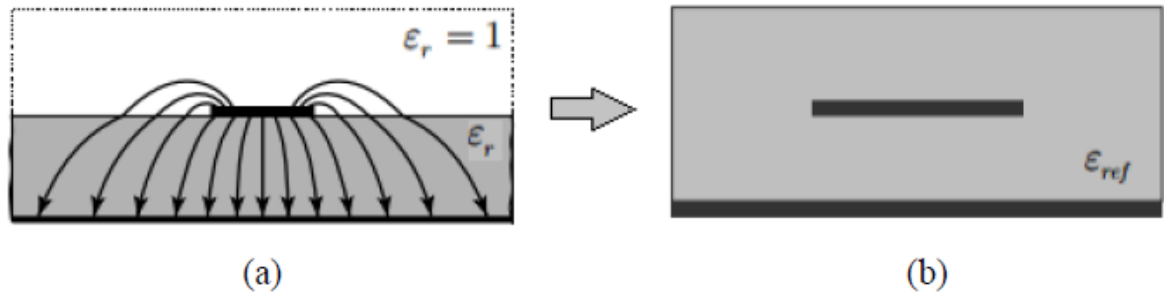


Fonte: (Pereira T. T., 2018).

O efeito de franjamento faz com que as linhas de campo circulem tanto o substrato como no ar, dessa forma faz com que aumente o volume de das dimensões elétricas na antena de microfita. Dessa maneira, esse efeito requer a modelagem de

uma permissividade efetiva (ϵ_{ref}), que leva em consideração a relatividade de todos os meios, representado na Figura 22 (Castro, 2018).

Figura 22 – Modelagem da permissividade efetiva (a) meios distintos (ar e substrato), (b) meio uniforme.



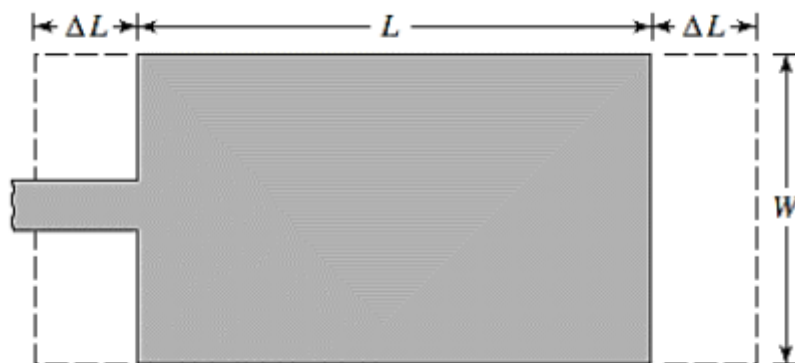
Fonte: (Pereira T. T., 2018).

Considerando a largura do patch maior que a do substrato ($W/h > 1$), dessa forma a permissividade é calculada pela Equação 48.

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}, \quad (48)$$

Devido ao efeito de franjamento o *patch*, tem dimensões elétricas maiores que as físicas. Sendo representada na Figura 23, observando o aumento das dimensões do *patch*, ao longo do seu comprimento e incrementando uma distância ΔL em cada extremidade.

Figura 23 – Comprimento físico e efetivo de um patch retangular.



Fonte: (Maia A. S., 2016).

A extensão normalizada do comprimento é calculado da seguinte forma, Equação 49.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\varepsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\varepsilon_{ref} + 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)}, \quad (49)$$

Tento ciência da Equação 48 e 49, é possível calcular os demais critérios do projeto de antena de microfita, considerando os seguintes fatores: frequência de ressonância (f_r), espessura do substrato (h) e constante dielétrica do substrato (ε_r). Os valores de comprimento e largura, são expressos nas Equações 50 e 51.

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}}, \quad (50)$$

$$L = \frac{1}{(2f_r \sqrt{\varepsilon_{ref}})(\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0})} - 2\Delta L, \quad (51)$$

Especificando: comprimento de *patch* (L), frequência de ressonância (f_r), permeabilidade magnética no vácuo (μ_0), permissividade elétrica no vácuo (ε_0).

Existem várias formas para utilizar o casamento de impedância, em outras palavras, diminuir ao máximo a perda do sinal aplicado a uma linha de transmissão. Sendo essa baseadas no teorema de máxima transferência de potência entre a alimentação e o elemento radiador. Dentre essas várias técnicas, podemos citar: acoplamento por proximidade, linha de microfita por *inset feed*. Com tudo, serão abordados a seguir, linha de microfita e *inset feed* (Silva I. B., 2014).

3.1.13.1 Linha de Microfita

Em boa parte dos sistemas, são encontrados problemas com a distinção dos valores da impedância de entrada e saída, tendo a necessidade de diminuir essa diferença. Dessa forma, é utilizado o casamento de impedância. Com tudo, o

comprimento de linha de alimentação deve ter um valor menor ou igual a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda com maior frequência de ressonância da antena (Pereira T. T., 2018), sendo representado na Equação 52.

$$L_0 = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_{ref}}} , \quad (52)$$

Indicando: velocidade da luz no vácuo ©, comprimento da linha microfita (L_o).

A Equação 53, exibe como se pode encontrar a largura W_0 da linha de microfita.

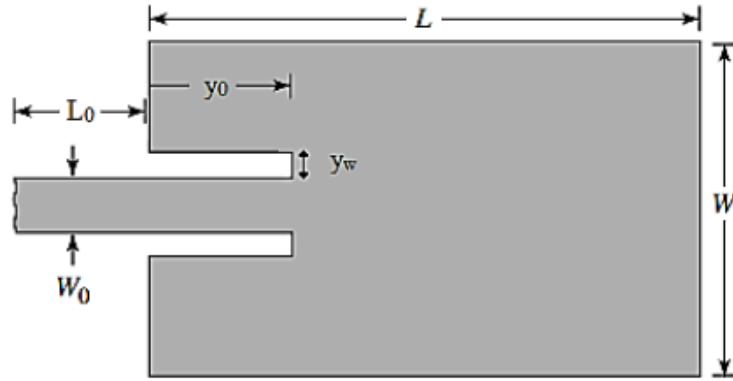
$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \ln \left(\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right), & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{(\sqrt{\epsilon_{ref}}) \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} , \quad (53)$$

Definindo: impedância da linha de microfita (Z_0), largura da linha de microfita (W_0).

3.1.13.2 Inset feed

Esse é mais um método de casamento de impedância, que é usado nas antenas de microfita, onde são implantadas um par de slot paralelos a linha de alimentação, sendo demonstrada na Figura 24. As fendas são determinadas com a espessuras iguais a da camada condutora do ressoador e com comprimento e largura definida de acordo com a modelagem aplicada (Guerra, 2016).

Figura 24 – *Inset feed*, aplicado ao patch de uma antena de microfita.



Fonte: (Pereira T. T., 2018).

A distância do *inset feed* pode ser estipulada de acordo com a Equação 54, para valores de permissividade $2 \leq \epsilon_r \leq 10$, com o interesse de aproximar a impedância de entrada da linha de microfita do valor de 50Ω (M. Ramesh, 2003).

$$y_0 = 10^4(0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,69\epsilon_r^3 + 256,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697)\frac{L}{2}, \quad (54)$$

As dimensões da largura (y_w) do *inset feed* podem ser encontrada com a Equação 44.

(55)

$$y_w = \frac{c}{\sqrt{2\epsilon_{ref}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f_r},$$

4. Veículos aéreos não tripulados

4.1 História dos veículos aéreos não tripulados

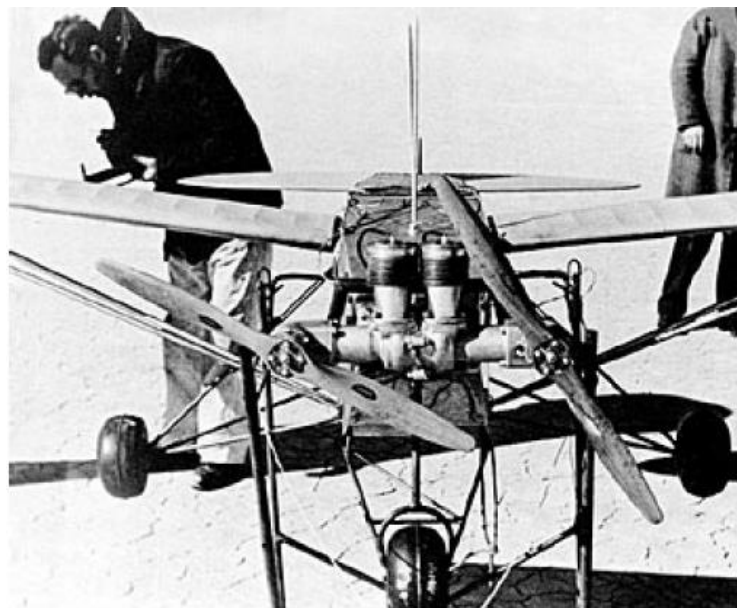
Os Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT's, são muitas vezes descritos pelo seu tamanho sendo eles, pequenos aparelhos aéreos, apesar de contemplar diversos tamanhos e pesos, essas características fazem com que eles tenham papéis distintos,

atuando em funções diferentes, podem ser construído por inúmeros matérias e formatos, sendo utilizado tanto para fins militares como civil. (Neris, 2001).

Varios são os relatos sobre a criação e a utilização dos VANT's, ao longo da história, mas o seu real uso como um VANT sendo ele controlado via rádio, ainda que, apresentasse uma forma rústica, assim como uma baixa operação. É iniciado com Elmer Sperry, que em 1914 inicia seu trabalho apresentando a Marinha dos Estados Unidos da América, o primeiro voo sem a necessidade da utilização de um piloto, usando um torpedo aéreo naval, minimizando adversidades já apresentadas em outros teste, como estabilidades de voo, controle (Costa A. G., 2015).

Com o decorrer dos anos e a apresentação dessa plataforma de sistema, é desenvolvida em 1935, por Reginald Denny o RP-1, estando ilustrado na Figura 25, com isso o investimento nesse setor passa a crescer, sendo ainda desenvolvidos o RP-2, 3 e 4, sendo esse último demandado pelo exército dos EUA, requerendo 53 exemplares. Pois o mesmo apresenta um melhor desempenho se comparados aos demais, com uma melhor duração de voo, assim como precisão e entre outros aspectos (Rasi, 2008).

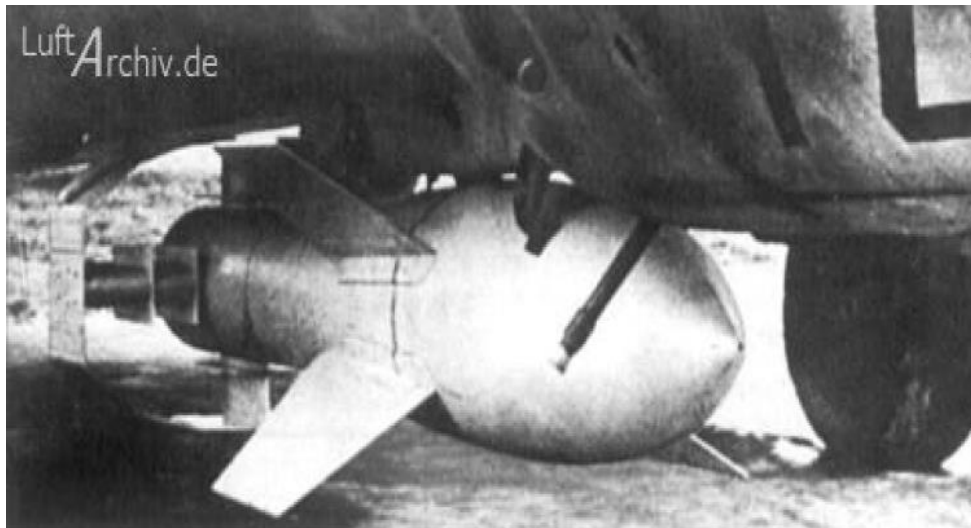
Figura 25 – Modelo projetado por Reginald Deny.



FONTE: (Medeiros, 2007).

Durante a segunda guerra mundial, foram desenvolvidas pela Alemanha bombas planadora guiadas “*Fritz X*”, ilustrada na Figura 26, sendo implementado um motor foguete de 300 kg de carga explosiva, sendo ela utilizada para ataques a navios couraçados (Rasi, 2008). Assim como a “*Buzz Bomb*”, mostrado na Figura 27, também conhecida como V-1, tinha o objetivo de atacar alvos não militares, na tentativa de trazer medo e pânico a essas áreas, seu sistema de orientação era baseado por barômetro e giroscópios (Costa A. G., 2015).

Figura 26 – Fritz x



FONTE: (Rasi, 2008).

Figura 27 – Modelo do V-1, Buzz Bomb.



FONTE: (Costa A. G., 2015).

Com a observação do desempenho estabelecido com o uso dos VANT's, para trabalhos que colocam a vida humana em risco, assim como a diminuição dos gastos para manutenção, reposição de aparelhos e entre outros aspectos financeiros, foi observada a necessidade de investimento nesse setor, dessa forma podendo ser produzidos novos aparelhos, com tecnologias ainda mais avançadas. Como é o caso do *MQ-1 Predator* ilustrado na Figura 28, que em 1995 passa a entrar em operação na força aérea americana (USAF), podendo operar tanto em controle autônomo ou remoto (Paula, 2012).

Figura 28 – Aeronave MQ-1 Predator.



FONTE: (Paula, 2012).

Por fim, nas últimas décadas os VANT's, passaram a ser comercializados no setor civil, ocorrendo inovações na utilização dos mesmos em diversos setores, sendo eles mencionados na Tabela 1.

Tabela 1 – Algumas utilizações dos VANT's no setor civil.

Setor	Uso
Agrícola	Monitoramento do crescimento de pragas, aplicação de pesticidas e fertilizantes
Pesquisa Climáticas	Coleta de dados atmosféricos
Exploração de Minerais	Reconhecimento aéreo em locais de difícil acesso
Guarda costeira e Policiamento urbano	Monitoramento aéreo de fronteira, costas e vias públicas
Energia	Monitoramento da linha de Transmissão
Televisão e cinema	Tomadas aéreas
Entreterimento	Brinquedo, aeromodelismo, etc
Telecomunicações	Plataforma retransmissora de sinais

FONTE: (Paula, 2012).

4.2 Classificações dos VANT's

Com o surgimento de diversos tipos de VANT's, sendo eles empregados em várias funções, apresentando inúmeras estruturas, modelos e características de voo e entre outros aspectos, faz necessário a classificação do mesmo, assim como sua regulamentação para uma melhor operação desses aparelhos. Dessa forma sendo representando na Tabela 2, as categorias que esses aparelhos são classificados (José María Peral Pecharromán, 2016).

Tabela 2 – Categorias de VANT's.

Categoria	Sigla Inglês	Alcance (Km)	Altitude (m)	Autonomia (horas)	Peso (Kg)
Micro	MUAV	<10	250	1	<5
Mini	Mini UAV	<10	150-300	<2	<30
Alcance Curto	SR UAV	10-30	3000	3-6	200
Alcance Médio	MR UAV	30-70	5000	6-10	1250
Baixa Altitude Alta	LASDP UAV	>250	50-9000	0,5-1	350
Velocidade Baixa					
Altitude Longa	LAL UAV	>500	14000	>24	<30
Autonomia Alta					
Altitude Longa	HALE UAV	>2000	20000	24-48	4500- 12000
Autonomia					

FONTE: (Pereira T. T., 2018)

Apesar de contemplar todas essas categoriais, os VANT's ainda podem ser divididos de acordo com o seu principio de voo e modo de propulsão. Ao todo há duas classes, os mais leves que o ar e os mais pesados que o ar, agregando ainda uma subclasse, motorizados e não motorizados (Paula, 2012)

Já no Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), aprova em 2 de maio de 2017, a regulamentação na utilização dos VANT's, para a regulamentação dos mesmos tendo como foco a segurança das pessoas. Com tudo, esses aparelhos devem seguir as normas da ANAC, sendo essa complementar as normas do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Por fim, os VANT's são divididos em três categorias de

acordo com seu peso, classe 1 contempla naves acima de 150 Kg de carga, para operar nessa classe, é necessário a o registro da mesma na ANAC e o piloto deve possuir licença, habilitação e certificado médico. Classe 2, engloba aeronaves entre 25 Kg e 150 Kg, não havendo a necessidade de licença do aparelho, mas sua fabricação deve cobrir os requisitos exigidos. E classe 3 são aquelas que não se combinam com as classes anteriores (ANAC, 2017).

4.3 Quadrotor

Os quadrotor ou quadrirrotor, são classificados como aeronaves mais pesadas que o ar, assim como os demais veículos aéreos já mencionados, podem ser controlados remotamente, também sendo nomeado de VANT, possui a capacidade de decolar ou aterrissar verticalmente, VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*), possuindo também a habilidade de realizar voos pairados. Possuem uma estrutura em forma de cruz, portando em cada uma de suas extremidades um motor fixo, e em seu centro possuindo a estrutura e equipamentos necessários para a automação do aparelho, sendo ilustrada na Figura 29. Por depender apenas das velocidades das hélices, faz com que esse veículo não precise mudar seu ângulo de ataque, ocasionando uma menor dificuldade na sua mecânica e um maior grau de manobrabilidade (Costa S. E., 2008).

Figura 29 – Exemplo de um quadrotor.



FONTE: (Pereira T. T., 2018).

Para que esse aparelho possa voar sem a necessidade de um piloto faz necessário a utilização da comunicação entre o veículo e o controlador, através de uma estação base, ocorrendo a ligação entre os dois módulos, sendo um de transmissão e o outro de recepção dos dados, operando na mesma frequência. Para que aja uma melhor qualidade na comunicação, o ganho deve ser a característica que será levada em conta, pois quanto maior for esse parâmetro maior será o alcance, garantindo assim uma melhor comunicação, sem a perda desse sinal (Costa A. G., 2015).

Em relação as frequências, a ANATEL disponibiliza algumas faixas que podem ser usadas livremente, sem a necessidade de serem licenciadas, porém devem ser respeitadas os limites de potência imposta por ela (ANATEL, 2008), sendo elas representadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Faixas de radiofrequências disponíveis.

Frequência Inicial	Frequência Final
902 MHz	907,5 MHz
905 MHz	928 MHz
2400 MHz	2483,5 MHz
5725 MHz	5850 MHz

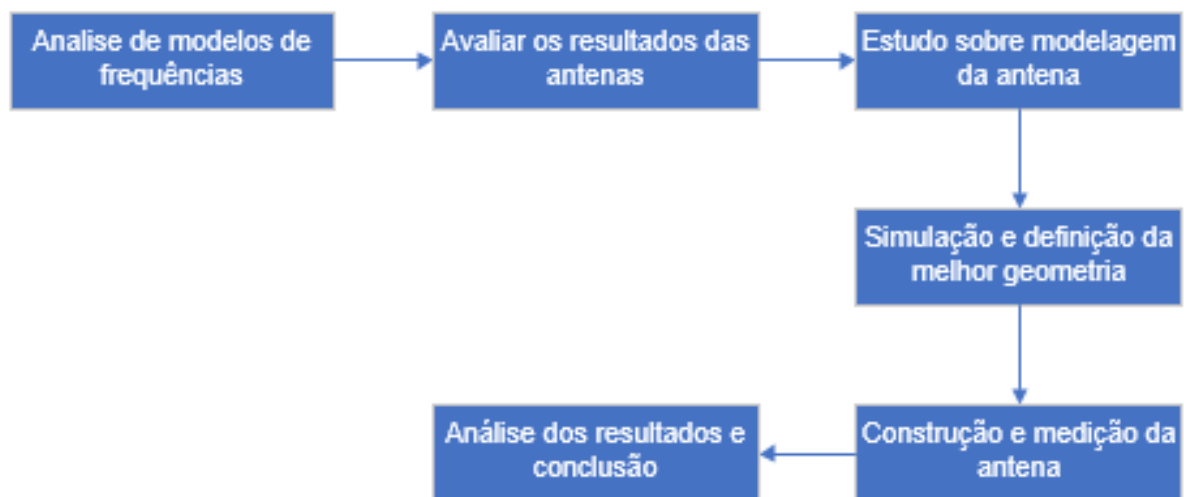
FONTE: (ANATEL, 2008)

Obtemos algumas características referente a essas frequências, entre 5725 – 5850 MHz, ocorre a comunicação do sistema de obtenção de imagens, o *FPV (First personal View)*, caso o VANT tenha uma câmera instalada, transmitindo ao operador em sono. Frequência entre 2400 – 2483,5 MHz, é utilizado para o envio de comandos pelo controle remoto para executar seus movimentos. E por fim entre 902 – 928, em boa parte dos casos atribuída a análise de dados e informações a distância, a telemetria (Pereira T. T., 2018).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda a organização desenvolvida para elaboração do trabalho, alcançando os objetivos propostos no mesmo. O fluxograma da Figura 30, resume os passos escolhidos. Essas etapas foram elaboradas para atender os objetivos do trabalho, sendo aplicado os conceitos teóricos sobre a construção da antena. Primeiramente são estudadas e pesquisadas as melhores frequências que mais se aproximam do objetivo do trabalho. Em segundo lugar, são analisados os resultados adquiridos com essas frequências, para uma melhor adaptação na parte de construção das antenas. O terceiro e quarto passo, são analisados as melhores geometrias observando também as características que elas apresentam, como: aterramento, escolha do material, usando o *software* para simulação das mesmas. O penúltimo passo condiz com os procedimentos aplicados na construção da antena. E para finalizar, o sexto e último passo é utilizado para averiguar os resultados adquiridos com a simulação e teste prático da antena, realizando melhores observações dos dois resultados.

Figura 30 – Fluxograma dos passos da metodologia.

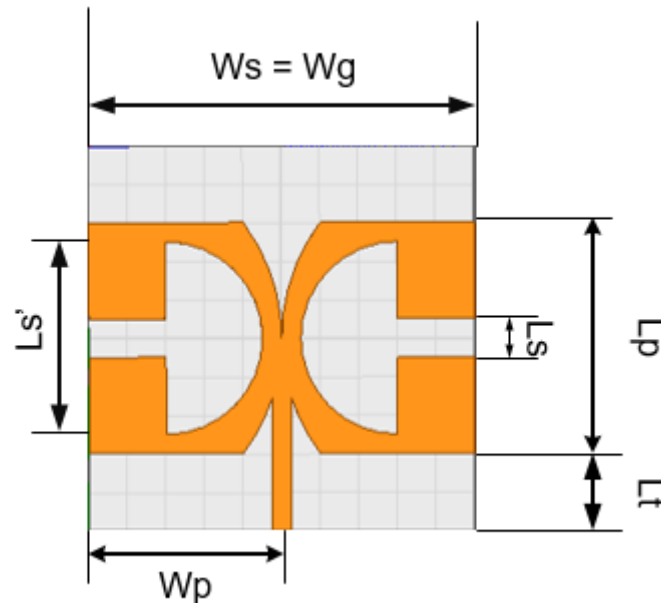


FONTE: Autoria própria.

No projeto das antenas, para uma possível aplicação das mesmas na recepção do sinal, foram apresentadas resultados diferentes entre elas, tendo em vista que sua criação tinha como objetivo a instalação no VANT, onde o espaço é reduzido e tendo

a necessidade de uma alta permissividade, dessa forma apresentam dimensões limitadas, sendo apresentada as geometrias da antena, na Figura 31. Tendo em vista que o plano de terra tem o mesmo valor de 20mm só será abatido 25%, 30% e 35%, de cada uma delas. Na Tabela 4, são representados os valores das dimensões.

Figura 31 – Geometria da antena.



FONTE: Autoria própria.

Tabela 4 – Valores das dimensões da antena.

Dimensões	Valor (mm)	Dimensões	Valor (mm)
Ws	20	Lp	12
Wp	10	Lt	4
Ls'	10	Ls	2

FONTE: Autoria própria.

Obtendo as dimensões do projeto, as antenas foram desenhadas e simuladas no *software* HFSS, para obter os resultados e extrair dados como: frequência, largura de banda, diagrama de radiação 3D.

Em seguida com a escolha da geometria da antena no *software*, foram fabricadas as antenas, sendo elas produzidas manualmente por corte e lixa para aproximar ao máximo da geometria requerida, assim como o uso de um paquímetro para ajudar a medir o substrato e deixar o valor o mais próximo possível do aceitável,

sendo representada na Figura 32-a o corte da placa de FR4, Figura 32-b a máquina para moldar a geometria da antena e Figura 32-c o paquímetro usado para medir os parâmetros.

Figura 32 – Corte da placa. (b) Moto Esmeril 360w – 220v – Motomil – MMI50. (c) Paquímetro.



(a)



(b)



(c)

FONTE: Autoria própria.

Com o desenho das antenas com o *software* HFSS, foi possível a impressão das geometrias das antes na gráfica para serem colados na placa de FR4, sendo representada na Figura 33. Com o intuito da permanência do desenho no *patch* e a retirado do excesso de cobre, na corrosão pelo percloroeto de ferro (F_eCl_3), tendo em vista que o adesivo não reage com a solução, apresentando a substancia na Figura 34.

Figura 33 – Adesivo colado na placa.



FONTE: Autoria própria.

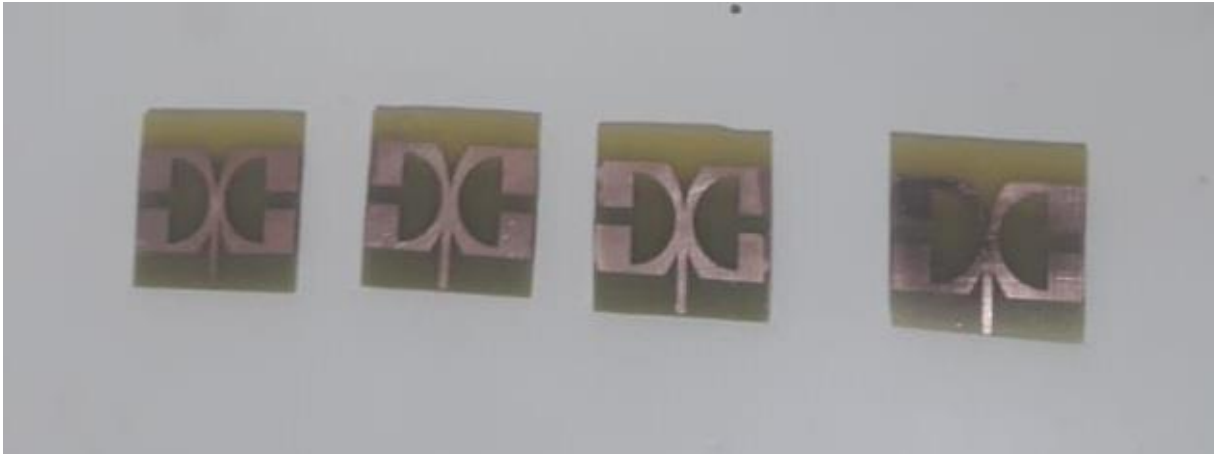
Figura 34 – Solução de percloroeto e recipiente.



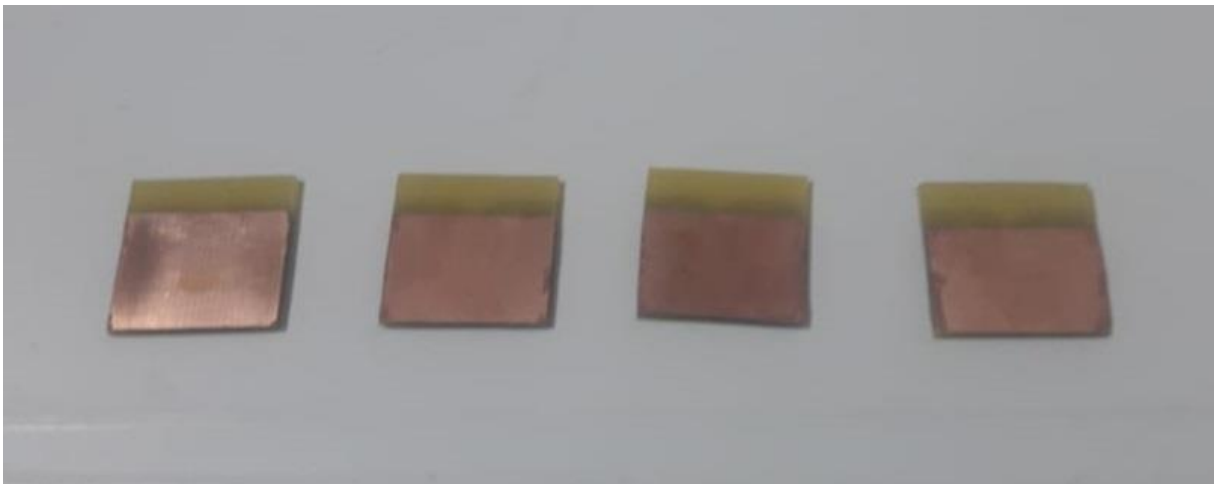
FONTE: Autoria própria.

Na Figura 35 são mostradas as antenas confeccionadas após o processo de corrosão, sendo a Figura 35-a a parte frontal da antena e Figura 35-b sua parte posterior.

Figura 35 – Antenas proposta, (a) Patch, (b) plano de terra.



(a)



(b)

FONTE: Autoria própria.

Posteriormente foi soldado à linha de transmissão e ao plano de terra para promover uma alimentação e testar as antenas, sendo o conector SMA fêmea reto de cobre banhado a ouro, com impedância de $50\ \Omega$, sendo representando na Figura 36.

Figura 36 – Conector SMA fêmea reto de quatro pinos.



FONTE: Autoria própria.

Após a construção das antenas, os coeficientes de reflexão das mesmas foram medidos em Analisador de Redes Vetoriais – *Rhode e Schwarz* (ARV), tendo a capacidade de medir na faixa de 10 Mhz até 20 Ghz, Apresentando na Figura 37.

Figura 37 – Analisador de Redes Vetoriais.



FONTE: Autoria própria.

6. Resultados e Discussão

Nesse capítulo são apresentados os resultados simulados e experimentais referentes ao trabalho, tendo como base os conceitos já mencionados nos capítulos anteriores.

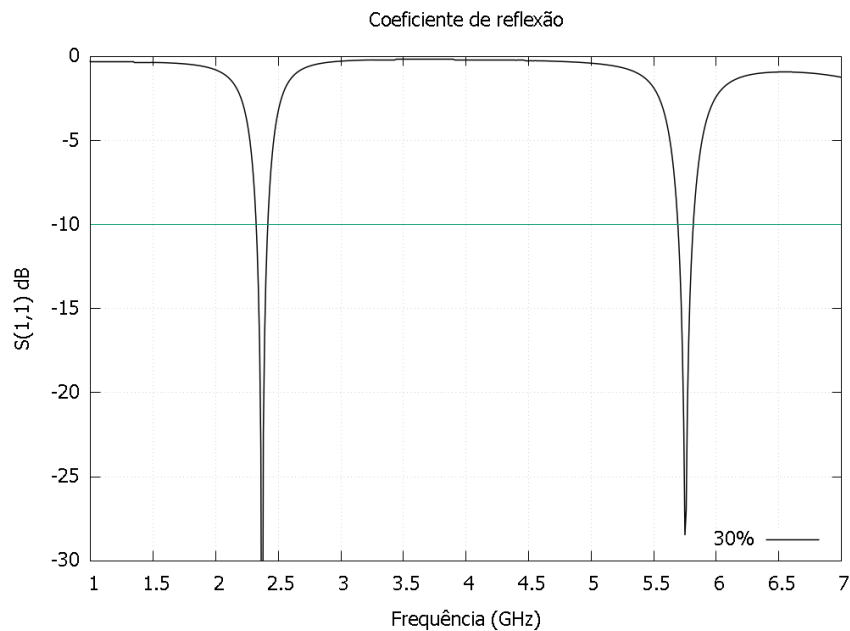
6.1 Análise dos Dispositivos Propostos

A princípio foram realizadas as simulações com relação aos dispositivos de microfita apresentados, em seguida, com a intenção de validar os resultados obtidos, foram construídas as antenas e simuladas.

6.1.1 Resultados Computacionais

Os resultados computacionais foram obtidos em um primeiro momento para a antena *dualband* considerando um truncamento de 30%, o coeficiente de reflexão dessa antena foi extraído em um intervalo de frequência de 1 a 7 GHz, esse resultado é apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Frequência com truncamento de 30%.

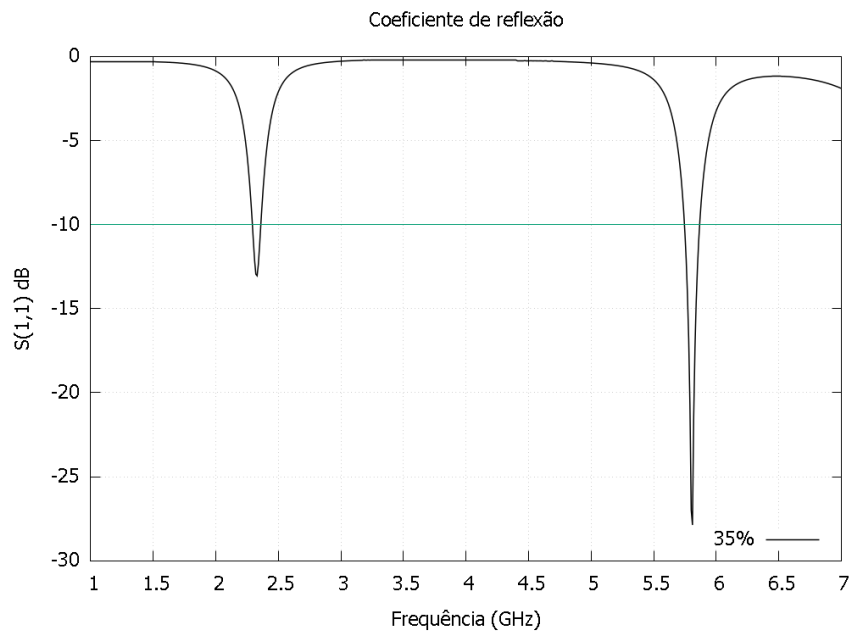


FONTE: Autoria própria.

Com o avanço dos teste e simulações das antenas, foi possível encontrar um parâmetro que melhor representasse os resultados requeridos. Porém, essa antena apresentava uma largura de banda estreita, demonstrando uma situação preocupante, quando a antena fosse construída. Pois, poderia ocorrer de não ser representada a frequência, na tentativa de contornar essa situação, foram criados truncamentos no seu aterramento para colher melhores resultados em relação a largura de banda, sendo simulado no *software* HFSS.

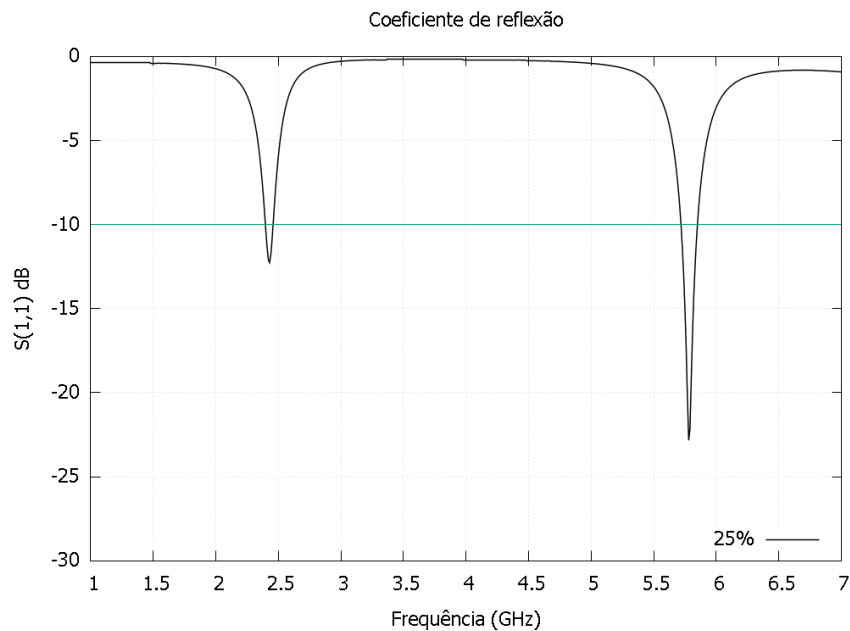
A Figura 38, 39 e 40 apresentam as frequências adquiridas com os truncamentos de 30%, 35% e 25%, tendo a primeira apresentando o melhor desempenho quanto ao casamento de impedância, porém sustenta o problema antes dito, por esse motivo foram feitos os truncamentos com menor e maior proporção respectivamente simulados, para serem observadas seus resultados.

Figura 39 – Frequência com truncamento de 35%.



FONTE: Autoria própria.

O truncamento de 35% resultou em um leve aumento da largura de banda, se comparada com o truncamento de 25%. Contudo, resultou também na diminuição do casamento de impedância da frequência de 2,45 GHz. Esse resultado indica que a antena irá funcionar nas frequências desejadas quanto suas frequências centrais e suas frequências de corte inferior e superior.

Figura 40 – Frequência com truncamento de 25%.

FONTE: Autoria própria.

O truncamento de 25% resultou em um casamento de impedância considerado satisfatório, com a ressalva de que as áreas que ultrapassam os -10 dB em ambas as frequências é pequena, sendo necessário assim, melhorar o casamento de impedância.

Tabela 5 – Resultados obtidos em relação a largura de banda (MHz).

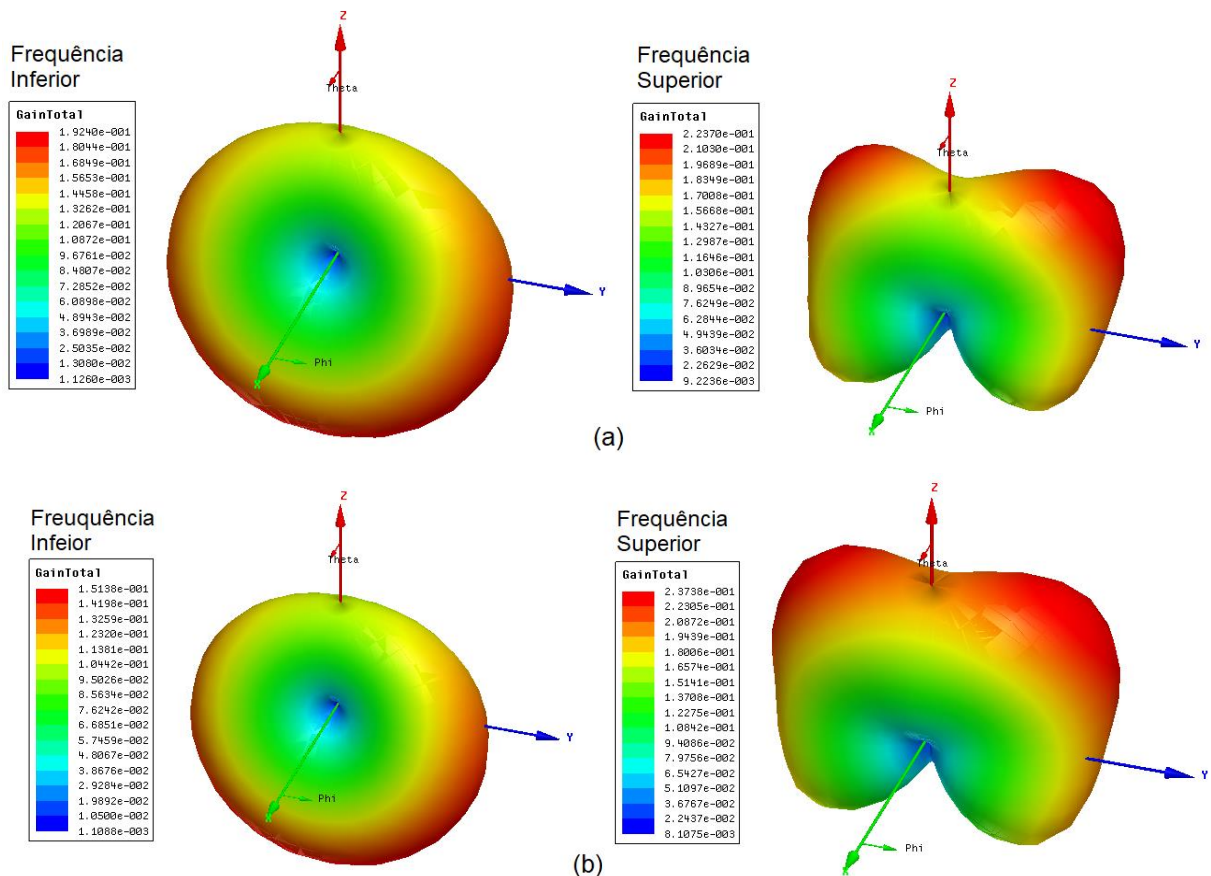
Porcentagem do truncamento	Frequência inferior	Frequência superior
25%	70	121
30%	88	131
35%	73	130

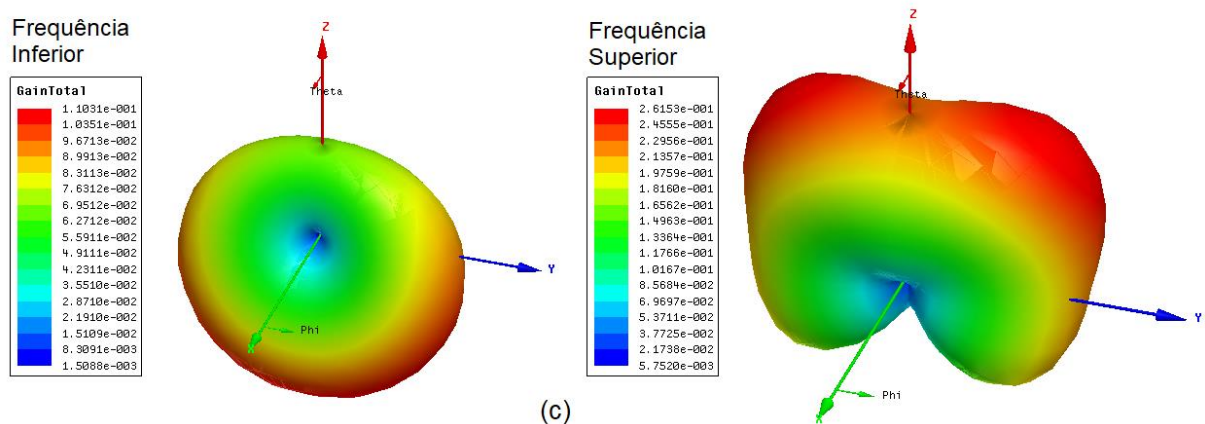
FONTE: Autoria própria

Com o resultado da Tabela 5 é observado que mesmo com os valores de truncamento variando a largura de banda não foi superior a antena padrão escolhida, apesar desses resultados, essas foram as antenas que apresentaram um melhor resultado tanto para proximidade da frequência quanto o coeficiente de reflexão (dB). Por esse motivo essas antenas foram escolhidas para serem confeccionadas e testadas com o intuito de adquirir e analisar os resultados práticos.

Para a Figura 41 pode ser observado os diagramas de radiação em 3D para as frequências de projeto das antenas, tendo sua unidade em dBs, sendo elas representadas com frequência inferior, próximo a 2,4GHz e superior com valor próximo a 5,8GHz, na teoria estudada, é observado que, à medida que o truncamento ocorre com o plano de terra diminuindo, a potência passando a ser omnidirecional, partindo para o sentido oposto a forma padrão adotada. O mesmo pode ser visto na Figura 41-a, b e c, que apresentam um truncamento menor para maior valor, podendo ser observado seu deslocamento, sendo radiada na parte superior e passar a ser radiada na parte inferior.

Figura 41 – Diagrama de radiação em 3D (a) 25%, (b) 30% e (c) 35%.





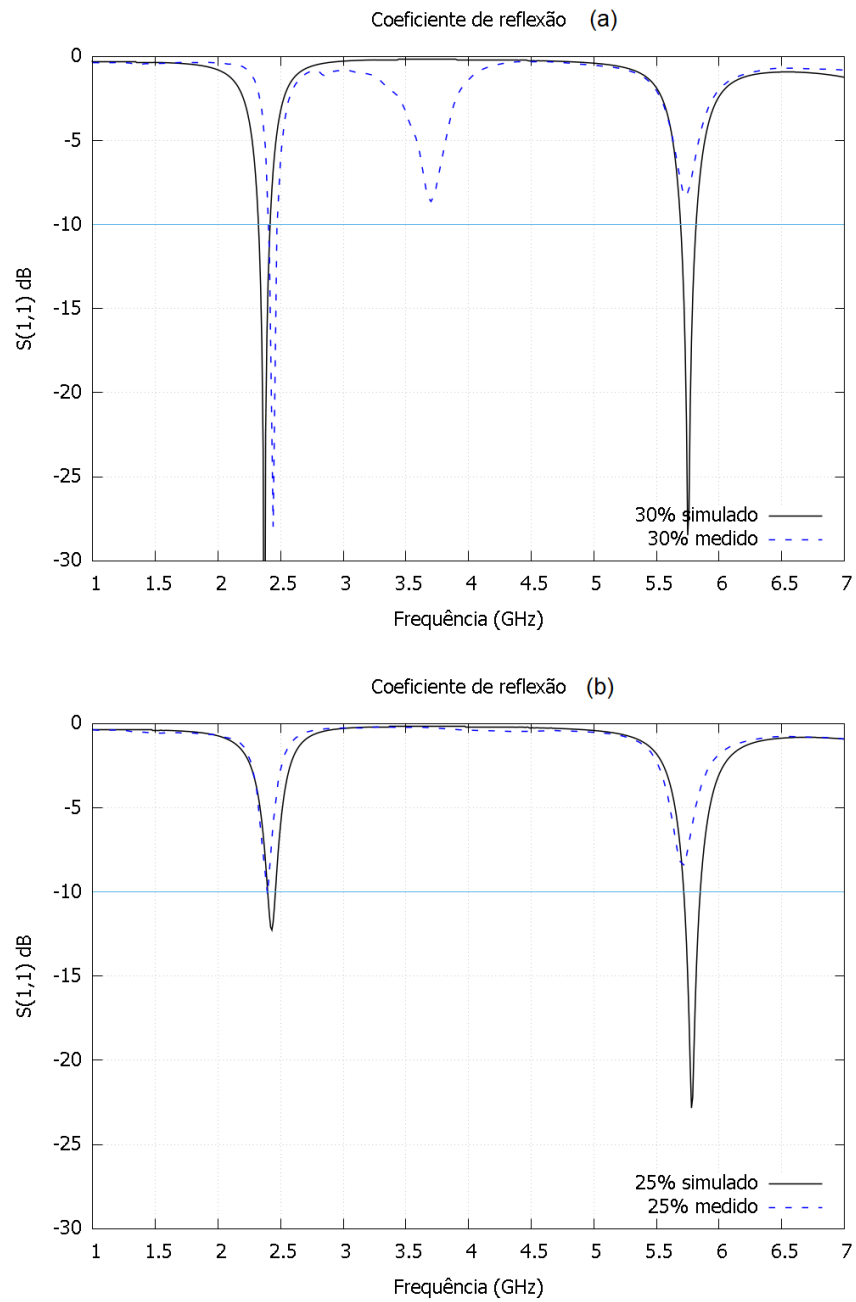
FONTE: Autoria própria.

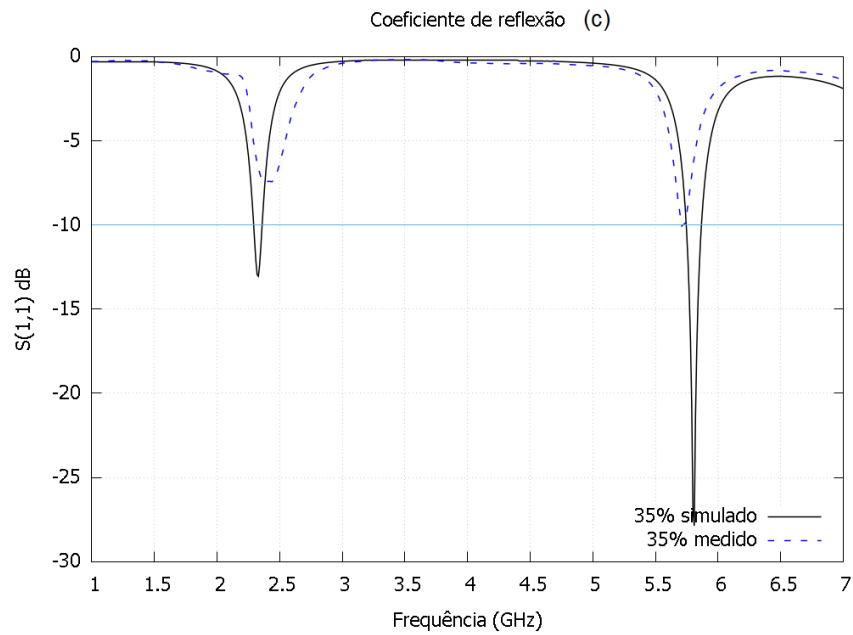
6.1.2 Resultados Experimentais

Todas as antenas foram testadas levando em consideração os valores que elas apresentaram com o *software* HFSS, na tentativa de alcançar os valores próximos dos computacionais, dessa forma os resultados colhidos com o *software*, são representando nas Figuras 38, 39 e 40.

De acordo com a Figura 42, pode ser observada a combinação dos valores computacionais e experimentais sendo observado que eles não alcançaram os melhores resultados, já que o ideal seria a antena ressoar nas duas frequências. Alguns parâmetros podem justificar essa falha, seja o corte pouco preciso, o percloroeto de ferro que possa ter corroído mesmo superficialmente a parte da antena e/ou substrato ou até mesmo um descasamento de impedância gerado pela soldagem. Com tudo pode ser observado que os valores foram próximos, demonstrando que os passos adotados estavam no caminho certo para se obter os resultados planejados, mas por alguma das falhas citadas não foi alcançado.

Figura 42 - Comparação dos dois resultados de frequência, das antenas simuladas e as construídas, seguindo a sequência (a) 30%, (b) 25% e (c) 35%.

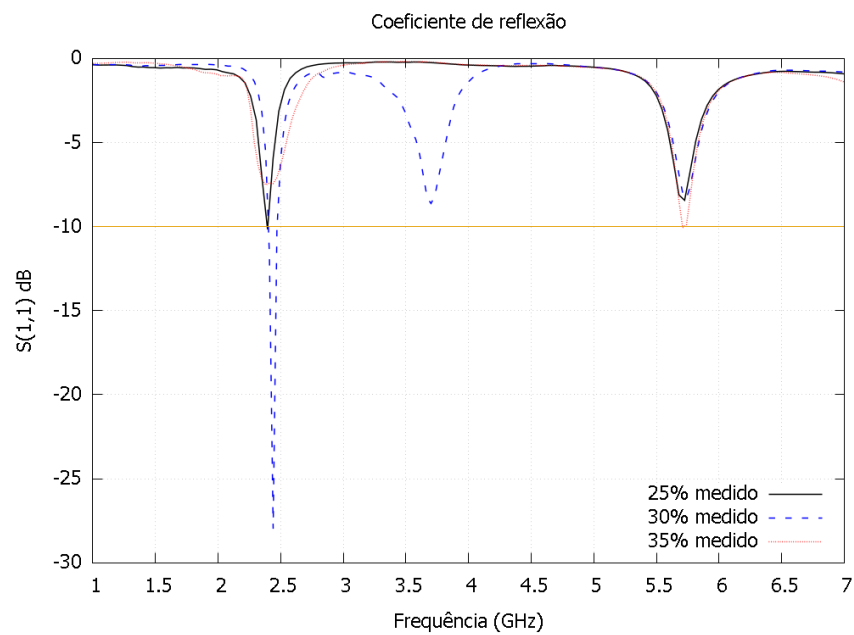
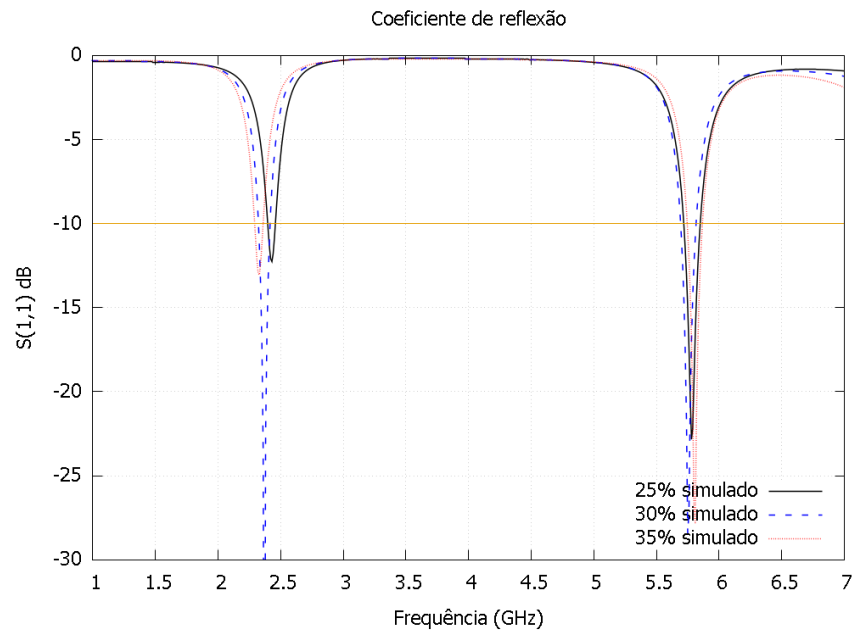




FONTE: Autoria própria.

Por fim tem-se o agrupamento dos resultados das três antenas, sendo ela na forma computacional assim como no teste prático, podendo ser observado que, a melhor antenna para atender ao estudo seria a que ocorre 30% de truncamento, representando melhores resultados nos dois testes. A Figura 43, apresenta o agrupamento dos dois testes, sendo ele a Figura 43-a computacional e a Figura 43-b o texto experimental.

Figura 43 - Agrupamento dos dois resultados (a) computacional e (b) experimental.



FONTE: Autoria própria.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para esse trabalho, foram realizados o estudo e o desenvolvimento de antenas de microfita, sendo ele pensado e projetado para funcionar em um VANT, através dos princípios teóricos utilizados no trabalho, com a intenção de construir e elaborar as ideias aplicadas no desenvolvimento das antenas. Dessa forma, foi possível implementar os conceitos básicos a serem adotados no desenvolvimento da pesquisa, partindo do esquema de busca de dados, comparação dos resultados, teste computacionais e os testes práticos.

Com esse conhecimento e auxílio do *software* HFSS, foi possível produzir a antena de microfita, com os parâmetros desejados, levando em consideração que o truncamento do plano de terra foi implementado, na tentativa de aumentar o valor do ganho, assim como, minimizar possíveis erros nos testes práticos. Com os valores dos testes computacionais, foi viável a observação dos efeitos de variação nas dimensões de plano de terra, sendo constatado o efeito que esse implemento exerce sobre o diagrama de radiação na antena.

A fabricação das antenas, foi de grande importância para compreender os resultados reais, assim como uma forma de comparar com valores computacionais, sendo possível observar, a proximidades entre esses valores, mas levando em consideração que esses padrões não tiveram maior proximidade devido aos possíveis erros de construção da antena.

Dessa maneira, é necessário deixar claro que os resultados não foram satisfatórios, pois não atingiram os valores mínimos necessários para cobrir os requisitos de frequência. Dessa maneira, em 5.8 GHz, a faixa de frequência não ultrapassou o valor -10dB em $st(1,1)$, dessa forma ele não ressoa nessa frequência, deixando evidente a necessidade do uso mais preciso no procedimento de fabricação da antena, assim como no momento de soldagem, na tentativa de reduzir ao máximo as consequências geradas por esses parâmetros e conseguir a equivalência nos resultados.

7.1 Considerações para trabalhos futuros

Algumas recomendações são necessárias, para melhorar trabalhos futuros tendo esse trabalho como base, as recomendações são:

- I. A utilização de uma forma mais precisa de corte na etapa de confecção da antena, como o uso de Comando Numérico Computadorizado CNC;
- II. Determinação de um arranjo para melhorar o alcance desejado;
- III. Construção de uma antena que opere em três bandas (*triband*), para que ela possa contemplar mais funções (915 MHz, 2.4 GHz e 5.8Ghz);
- IV. A construção de uma antena com acoplamento mútuo, utilizando a mesma como transmissor;
- V. Aplicação das duas antenas, receptor e transmissor, sendo elas testadas no VANT e no seu controle, para um melhor teste prático.

8. Referências Bibliográficas.

- ANAC. (2017). **Requisitos Gerais para Aeronaves não Tripuladas de Uso Civil**. São Paulo: SAR/SPO.
- ANATEL. (1 de Julho de 2008). **Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008**. Fonte: Legislação AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/23-2008/104-resolucao-506>
- ARAÚJO, A. d. (28 de Fevereiro de 2018). **Projeto de antena de microfita com polarização circular para aplicação em veículos aéreos não tripulados**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- BALANIS, C. A. (2005). **Antenna Theory - Analysis and Design**. New Jersey.
- BRITO, B. M. (23 de Fevereiro de 2018). **Desenvolvimento de antena de microfita baseada no fractal de cantor com plano de terra truncado**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- CASTRO, K. V. (22 de Fevereiro de 2018). **Antenas de microfita sobre substrato de ferrita de níquel dopadas com zinco**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- COSTA, A. G. (2015). **Sistema de rádio comunicações para UAV**. Aveiro, Portugal : Universidade de Aveiro.
- COSTA, S. E. (Setembro de 2008). **Controlo e Simulação de um Quadrirotor Convencional** . Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico.
- EZQUERRO, V. S. (24 de Junho de 2015). **Estudo de um arranjo de nanoantenas para comunicação óptica sem fio** . Campinas , São Paulo, Brasil.
- FILHO, V. A. (Junho de 2010). **Arranjo Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Kock**. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
- GUERRA, J. R. (20 de Maio de 2016). **Projeto de antena de microfita flexível utilizando de tecido malha a base de fibras naturais e sintéticas**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- HOLANDA, S. M. (1 de Dezembro de 2016). **Estudo e desenvolvimento de antenas de microfita utilizando tecido de malha a base de fibras têxteis compostas**. Mossoró , Rio Grande do Norte, Brasil.
- JOSÉ MARÍA PERAL PECHARROMÁN, R. V. (2016). **Estudo Sobre a Indústria Brasileira e Europeia de Veículos Aéreos Não Tripulados**. DIÁLOGO SETORIAL UNIÃO EUROPEIA-BRASIL.
- M. RAMESH, K. Y. (1 de Dezembro de 2003). **Design Inset-Fed Microstrip Patch Antennas**. Fonte: <http://mwrf.com/components/design-inset-fed-microstrip-patch-antennas>

- MAGNO, J. D. (1 de Dezembro de 2016). **Análise da aplicação de estruturas metassuperfície em antenas de microfita** . Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- MAIA, A. S. (19 de Maio de 2016). **Estudo do comportamento dos parâmetros de antenas de microfita utilizando diferentes configurações de arranjos de estruturas ebg/pbg**. Mossoró, Rio Grande do Norte , Brasil .
- MAIA, H. M. (30 de Julho de 2013). **Arranjo de Antenas de Microfita com Substrato Anisotrópico com Patch Supercondutor e Aplicações em Nanotecnologia**. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
- MEDEIROS, F. A. (27 de Fevereiro de 2007). **Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado Para Aplicação em Agricultura de Precisão**. Santa Maria , Rio Grande do Sul, Brasil: Universidade de Santa Maria.
- NERIS, L. d. (06 de 12 de 2001). **Um piloto automático para as aeronaves do projeto ARARA**. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- PAULA, J. C. (25 de Maio de 2012). **Dsesenvolvimento de um VANT do Tipo Quadrirrotor Para Obtenção de Imagens Aéreas em Alta Definição**. Curitiba, Paraná, Brasil: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.
- PEREIRA, J. P. (10 de Junho de 2016). **Estruturas PBG periódicas e quase periódicas em Antenas de Microfita com aplicação em Veículos Aéreos Não Tripulados** . Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
- PEREIRA, T. T. (7 de Fevereiro de 2018). **Estudo e desenvolvimento de antena de microfita aplicada à veículos aéreos não tripulados para inspeção em linhas de transmissão**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- RASI, J. R. (28 de Abril de 2008). **Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado Para Aplicação Em Pulverização Agrícola**. Perolas, Rio grande do Sul, Brasil : Universidade Federal de Perolas .
- SILVA, I. B. (19 de Dezembro de 2014). **Projeto e análise de antena de microfita com utilização de metamaterial do tipo csrr**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- SILVA, J. L. (24 de Abril de 2015). **Estudo do compotamento de antena de microfita com substrato metamaterial**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- SILVEIRA, J. H. (27 de Fevereiro de 2015). **Antena Discreta com Patch Circular Confeccionada Sobre Substrato Dielétrico Cerâmico à Base de Pentóxido de Nióbio - Nb₂O₅**. Mossoró , Rio grande do Norte , Brasil .
- SOBRINHO, F. M. (28 de Fevereiro de 2018). **Estudo da aplicação de estruturas quase periódicas em antenas de microfita baseada na simetria de penrose**. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.