



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E
AUTOMAÇÃO
MESTRADO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO

THOMAS TADEU DE OLIVEIRA PEREIRA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENA DE MICROFITA APLICADA À
VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA INSPEÇÃO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

MOSSORÓ – RN

2018

THOMAS TADEU DE OLIVEIRA PEREIRA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENA DE MICROFITA APLICADA À
VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA INSPEÇÃO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Linha de Pesquisa: Antenas e Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof^o. Dr. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA

Co-orientador: Prof^o. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA

MOSSORÓ – 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.

P436e Pereira, Thomas Tadeu de Oliveira.
Estudo e desenvolvimento de antena de microfita aplicada à
veículos aéreos não tripulados para inspeção em linhas de
transmissão / Thomas Tadeu de Oliveira Pereira. - 2018.
131 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio Andrade.
Coorientador: Idalmir de Souza Queiroz Jr..
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Sistemas de Comunicação e Automação, 2018.

1. Antenas de Microfita. 2. VANT's. 3. Inspeção Visual
Linhas de Transmissão. I. Andrade,
Humberto Dionísio, orient. II. Queiroz Jr., Idalmir de Souza,
co-orient. III. Título.


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

THOMAS TADEU DE OLIVEIRA PEREIRA

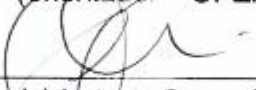
**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENA DE MICROFITA APLICADA À
VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA INSPEÇÃO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

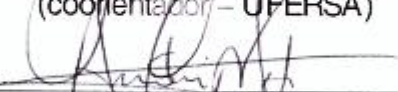
Defendida em: 07 /02 /2018.



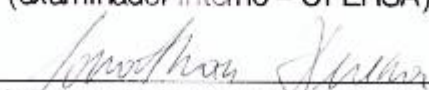
Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade
(orientador – UFERSA)



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior
(coorientador – UFERSA)



Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto
(examinador interno – UFERSA)



Prof. Dr. Jonathan Paulo Pinheiro Pereira
(examinador externo – IFRN)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por tudo que ele me proporciona, me dando forças para vencer todas as dificuldades e lutar pelos meus objetivos.

Aos meus pais, que contribuíram infinitamente para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje, sou grato à educação que eles me deram. Obrigado pelo grande exemplo de vida.

A minha namorada Ataandra Vieira, pelo amor, incentivo, compreensão e apoio em todos os momentos e a sua família, pelo carinho e confiança.

A toda a minha família, por acreditar na minha capacidade e por me ajudar em tudo sempre que preciso.

A meu orientador Prof^o Dr. Humberto Dionísio de Andrade e ao meu co-orientador Prof^o Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, pela orientação, dedicação, comprometimento, apoio e sugestões, tornando possível a realização deste trabalho e aos demais membros da banca. O meu muito obrigado.

Ao Prof^o Dr. Glauco Fontgalland pela assistência ao ter disponibilizado o Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para realização das medições referentes a este trabalho.

A Alexandre Araújo, Alexandre Henrique, Anamaria Sena, Arimateia Magno, Bruno Marcel, Felipe Bastos, Francisco Magno, Herik Talles, Isaac Barros, Juan Guerra, Kaíck Viana, Matheus Tavares, Pablo Lucian, Samanta Holanda, Talles Amony, pelo apoio prestado, pela companhia, pelas dúvidas compartilhadas e pelos momentos de descontração.

Enfim, a todos que contribuíram de uma forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

*“Pensar é o trabalho mais difícil que existe.
Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele.”*
(Henry Ford)

RESUMO

Em comunicações sem fio, existe uma crescente necessidade por sistemas mais compactos e portáteis. Nesse contexto, as pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de antenas têm se intensificado nos últimos anos, em especial, as relacionadas às antenas de microfita, visto que estas possuem propriedades singulares, bem como diversas aplicações. Neste trabalho foram projetadas duas configurações distintas de antenas, um arranjo de antenas de microfita para o dispositivo transmissor e um elemento simples com padrão omnidirecional para o receptor, de acordo com as necessidades da aplicação. As antenas são projetadas pela Teoria da Linha de Transmissão de acordo com a frequência de operação do rádio e as propriedades elétricas e físicas dos substratos utilizados. Os resultados foram obtidos através de simulações no *software* ANSYS HFSS®, e os melhores resultados foram utilizados para fabricação dos dispositivos a fim de validar as simulações realizadas. Os resultados das simulações atingiram as características da aplicação, pois as perdas de retorno de ambas antenas apresentaram conformidade com a faixa de frequências da aplicação na banda *ISM* em 2,4 GHz, no que diz respeito ao comportamento da radiação, a antena proposta ao transmissor teve ganho de 6,1 dB, aproximadamente três vezes maior do que a antena dipolo/monopolo comumente utilizada. O resultado experimental do coeficiente de reflexão se mostrou concordante com o padrão simulado, apesar do deslocamento de frequência, ambas antenas construídas se adequaram para aplicação no rádio controle do VANT, tendo o arranjo de microfita 7,5 MHz de largura de banda na faixa de aplicação e o elemento simples proposto ao receptor 58,5 MHz. Em seguida, as antenas foram implementadas no sistema de radiofrequência e foi realizado um teste de alcance a fim de averiguar a comunicação dos dispositivos, apresentando resultados satisfatórios. Desse modo, um voo foi realizado para inspeção visual de linhas de transmissão, visando a coleta de imagens para análise.

Palavras-Chave: Antenas de Microfita, VANT's, Inspeção Visual em Linhas de Transmissão

ABSTRACT

In wireless communications, there is a growing need for more compact and portable systems. In this context, research related to the development of antennas has intensified in recent years, especially those related to microstrip antennas, since these have unique properties as well as several applications. In this work, two different antenna configurations were designed, an array of microstrip antennas for the transmitting device and a single element with an omnidirectional pattern for the receiver, according to the needs of the application. The antennas are designed by the Transmission Line Theory according to the frequency of radio operation and the electrical and physical properties of the substrates used. The results were obtained through simulations in the ANSYS HFSS® software, and the best results were used to fabricate the devices in order to validate the simulations performed. The results of the simulations reached the characteristics of the application, as the return losses of both antennas were in accordance with the frequency band of the application in the band ISM in 2.4 GHz, with respect to the behavior of the radiation, the antenna proposed to the transmitter had a gain of 6.1 dB, approximately three times greater than the commonly used dipole / monopole antenna. The experimental result of the loss of return was shown to be in agreement with the simulated standard, in spite of the frequency displacement, both antennas constructed were suitable for application in the radio control of the UAV, having the microstrip array 7.5 MHz of bandwidth in the band of application and the simple element proposed to the 58.5 MHz receiver. The antennas were then implemented in the radiofrequency system and a range test was performed in order to verify the communication of the devices, presenting satisfactory results. Thus, a flight is performed via software for visual inspection of transmission lines, aiming the collection of images for analysis.

Keywords: Microstrip Antennas, UAV's, Visual Inspection in Transmission Lines.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Classificação das faixas de microondas.....	21
Tabela 2- Aplicações dos VANT's	62
Tabela 3- Categorias dos VANT's	63
Tabela 4- Classificação dos RPA's	64
Tabela 5- Faixas de radiofrequência disponíveis para comunicação.	72
Tabela 6- Classes do sistema de transmissão e distribuição.....	76
Tabela 7- Vantagens e Desvantagens do materiais utilizados na fabricação de isoladores.	79
Tabela 8-Definição dos conceitos para as faixas da linha de transmissão.	81
Tabela 9- Infraestrutura e situações analisadas.	84
Tabela 10-Valores das dimensões da antena receptora.	92
Tabela 11-Valores Dimensões do Arranjo de Antenas de Microfita.....	93
Tabela 12- Resultados obtidos da Figura 79.	100
Tabela 13- Resultados obtidos da Figura 80	101
Tabela 14- Resultados obtidos da Figura 82	103
Tabela 15- Resultados obtidos da Figura 81	105
Tabela 16- Resultados da Figura 84	107
Tabela 17- Resultados obtidos da Figura 85.	107
Tabela 18- Resultados obtidos da Figura 87	109
Tabela 19- Resultados obtidos da Figura 88.	110
Tabela 20- Resultados da Figura 93.	114
Tabela 21- Resultados da Figura 94.	115
Tabela 22- Dados da estrutura inspecionada.	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Espectro de frequência <i>ISM</i> no Brasil.....	22
Figura 2- (a) Elementos da antena de microfita. (b) Vista lateral da antena de microfita.....	22
Figura 3- Formatos comuns do <i>patch</i>	23
Figura 4- Diagrama de radiação representado no sistema de coordenadas.	24
Figura 5- Diagramas de radiação. (a) forma linear, (b) forma polar.	25
Figura 6-Arranjo geométrico para definir um esferorradiano.	26
Figura 7- Modelo de duas portas da antena (quadripolo).....	29
Figura 8- Distribuição dos parâmetros de espalhamento no quadripolo.	30
Figura 9 - Gráfico do coeficiente de reflexão em função da frequência mostrando as frequências e a largura de banda de uma antena.	31
Figura 10- Conjunto de Círculos (a) Resistivos e (b) de Reatância.	34
Figura 11- Ilustração de uma Carta de Smith.	34
Figura 12- Alimentação por linha de microfita.	35
Figura 13- Alimentação por cabo coaxial de uma antena de microfita. (a) Vista Superior. (b) Vista Lateral.	36
Figura 14 - Alimentação por acoplamento por abertura de uma antena de microfita.	37
Figura 15 - Alimentação por acoplamento por proximidade de uma antena de microfita.	38
Figura 16- (a) Diagrama unitário. (b) Diagrama do arranjo. (c) Diagrama resultante.	39
Figura 17- Arranjos de antenas de microfita.(a) aplicada em WLAN para 5.8 GHz, (b) utilizada na banda Ku.	40
Figura 18-Exemplo de Arranjos Lineares. (a) arranjo 1x2, (b) arranjo 2x1.....	41
Figura 19- Arranjo linear com N elementos.....	41
Figura 20-Exemplo de Arranjos Planares. (a) arranjo 4x4, (b) arranjo 3x3.....	43
Figura 21- Geometria de um arranjo planar com MxN elementos.....	44
Figura 22- (a) Alimentação em linha. (b) Alimentação fora de linha.	45
Figura 23- Alimentação em paralelo.	47
Figura 24- Ilustração do divisor de potência de 3 portas e seu circuito equivalente.	48
Figura 25- Condução de corrente em curvas de microfita. (a) sem chanfro, (b) 50% chanfrado, (c) 70% chanfrado.	48
Figura 26- Processo de acoplamento mútuo.....	50
Figura 27- Tipos de acoplamento mútuo presentes em um arranjo de antenas.	50
Figura 28 - Geometria de uma plaqueta retangular de microfita para o modelo da cavidade..	52

Figura 29 - Distribuição de cargas e densidade de corrente na antena de microfita.	52
Figura 30- Modos de operação TM^x , (a) TM^x_{010} , (b) TM^x_{001} , (c) TM^x_{020} , (d) TM^x_{002}	55
Figura 31- Antena de microfita retangular. (a) fendas radiantes separadas por L, (b) vista ao longo do comprimento e (c) vista ao longo da largura.	56
Figura 32- Modelagem da permissividade efetiva. (a) meios distintos (ar e substrato), (b) meio uniforme.	56
Figura 33 - Comprimento físico e efetivo de um <i>patch</i> retangular.	57
Figura 34 - Inset Fed aplicado ao <i>patch</i> de uma antena de microfita.	59
Figura 35- RP-1, primeiro VANT rádio controlado.	61
Figura 36 - Modelo Buzz Bomb, Paris, Museu do Exército	62
Figura 37- Classificação das aeronaves segundo princípio de voo e propulsão.	63
Figura 38- Quadrotor Bréguet-Richet em 1907.	65
Figura 39- Quadrotor Convertawings Model A.	66
Figura 40- Exemplos de multirotores. (a) hexarotor, (b) quadrotor.	66
Figura 41- Descrição das rotações dos motores e resultante do movimento.	67
Figura 42- Diagrama em blocos dos componentes de um quadrotor.	68
Figura 43- Tela inicial do <i>software Mission Planner</i>	70
Figura 44- Processo da operação remota de um VANT.	72
Figura 45- Componentes do <i>FPV</i>	73
Figura 46- (a) Ligação do <i>DVR</i> no receptor, (b) Ligação do <i>DVR</i> no transmissor.	73
Figura 47- Componentes de um módulo de telemetria.	74
Figura 48- Sistema de Radiocomunicação entre Estação Base e VANT.	74
Figura 49- (a) Exemplo de uma antena dipolo. (b) Diagrama de radiação característico de um dipolo.	75
Figura 50- Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.	76
Figura 51- Sistema de Transmissão de Energia Elétrica.	77
Figura 52- Tipos de torres de linha de transmissão quanto aos esforços para o solo. (a) autoportante, (b) estaiada.	77
Figura 53- Estrutura de linhas de transmissão com destaque na localização dos isoladores. ..	78
Figura 54- Isoladores em cadeia utilizados na amarração em linhas de transmissão.	78
Figura 55- Classificação dos cabos condutores de alumínio.	80
Figura 56- Acessórios das Linhas de Transmissão. (a) amortecedor, (b) espaçadores, (c) estabilizador vertical.	80

Figura 57- Larguras das faixas de segurança para diferentes tensões.	81
Figura 58- Fluxograma das ações de manutenção.....	83
Figura 59- Inspeção aérea tripulada.....	85
Figura 60- Inspeção robotizada com o uso de: (a) VANT's, (b) robôs escaldadores.	86
Figura 61- Fluxograma dos processos.	87
Figura 62- Chassi do <i>DJI Flame Wheel</i> F450.	87
Figura 63- Sistema de rádio <i>FlySky</i> FS-IA6. (a) receptor, (b) transmissor.	88
Figura 64- <i>ArduPilot Mega 2.6</i>	88
Figura 65- (a) Motor <i>brushless</i> A2212–1000 kv- 1 kW. (b) <i>ESC</i> Simonk 30A.....	89
Figura 66- (a) carregador de balanceamento imax B6AC,(b) bateria Li-Po ZIPPY 5000 mAh.	89
Figura 67- Módulo <i>GPS Ublox</i> M8N.	90
Figura 68- (a) <i>Kit FPV</i> para registro de imagens captadas pelo VANT. (b) Bateria Li-Po RHINO 2350 mAh para alimentação do módulo em terra.....	90
Figura 69-Dimensões da antena receptora, (a) vista frontal, (b) vista posterior.	91
Figura 70 - Dimensões do arranjo de antenas de microfita.	93
Figura 71-(a) Impressora UV Mimaki UJF-6042. (b) Solução de percloroeto e recipiente.....	94
Figura 72- Antenas propostas para sistema de rádio, (a) do receptor, (b) do transmissor.	94
Figura 73- Conector <i>SMA</i> fêmea reto de quatro pinos.	95
Figura 74- Analisador de Redes Vetoriais.....	95
Figura 75- Antenas implementadas no sistema de rádio do VANT. (a) no receptor, (b) no transmissor.....	96
Figura 76- Antenas instaladas no VANT.	96
Figura 77- (a) Adaptador <i>SMA</i> macho para <i>RP-SMA</i> macho. (b) Cabo <i>pigtail MMCX</i> fêmea para <i>RP-SMA</i> fêmea.....	97
Figura 78- (a) VANT F450, (b) conjunto do transmissor com receptor de vídeo.....	97
Figura 79- Coeficiente de reflexão da antena receptora padrão em comparação com as modificações realizadas.....	99
Figura 80- Diagrama de radiação linear da antena receptora padrão em comparação com as modificações realizadas, (a) Plano E, (b) Plano H.	100
Figura 81- Diagramas de Radiação 2D e 3D das modificações realizadas na antena receptora: (a) sem truncamento, (b) 20% truncado, (c) 60% truncado, (d) 80% truncado.	101
Figura 82- Coeficiente de reflexão do arranjo em comparação com as modificações realizadas.	103

Figura 83-Diagramas de Radiação 2D e 3D das modificações realizadas na antena transmissora: (a) sem chanfro, (b) 25% chanfrado, (c) 50% chanfrado, (d) 70% chanfrado.	104
Figura 84- Comparação entre os coeficientes de reflexão simulado e medido da antena proposta para o receptor.	106
Figura 85- Carta de Smith medida da antena proposta para o receptor.....	107
Figura 86- Diagramas de Radiação 2D e 3D para antena receptora proposta nas frequências: (a) 2,425 GHz, (b) 2,4835 GHz.	108
Figura 87- Comparação entre os coeficientes de reflexão simulado e medido da antena proposta para o transmissor.....	109
Figura 88- Carta de Smith medida da antena proposta para o transmissor.	110
Figura 89- Diagramas de radiação 2D e 3D para antena transmissora proposta nas frequências: (a) 2,476 GHz, (b) 2,4835 GHz.....	111
Figura 90- Câmara anecoica ETS Lindgren, (a) vista exterior, (b) vista interior.....	112
Figura 91- Medições na câmara anecoica, (a) no plano E, (b) no plano H.	112
Figura 92- Diagrama de radiação 2D medido da antena proposta ao transmissor.	113
Figura 93- Comparação entre os coeficientes de reflexão da antena proposta ao receptor com o dipolo.....	114
Figura 94- Comparação entre os coeficientes de reflexão da antena proposta ao transmissor com o dipolo.....	115
Figura 95- Localização da linha inspecionada.	116
Figura 96- Imagens da linha inspecionada, (a) vista geral da estrutura, (b) topo da estrutura, (c) detalhes da vista lateral e superior.....	117
Figura 97- Realização da inspeção, (a) controle em solo, (b) VANT distanciado a 3 metros da estrutura, (c) VANT realizando a inspeção.	118
Figura 98- Imagens obtidas do vídeo gravado na inspeção.....	119

NOMECLATURA

Letras Latinas

- BW – Largura de banda da antena
- c – Velocidade da luz no vácuo
- d – Distância entre os elementos do arranjo
- d_x – Distanciamento dos elementos do arranjo no eixo x
- d_y – Distanciamento dos elementos do arranjo no eixo y
- D – Diretividade
- E – Campo elétrico
- f_{inf} – Frequência inferior
- f_r – Frequência de ressonância ou central
- f_{sup} – Frequência superior
- G – Ganho da antena
- G_1 – Autocondutância da antena
- G_{12} – Condutância mútua
- H – Intensidade de campo magnético
- h – Espessura do substrato
- J_0 – Função de Bessel de primeira ordem
- J_b – Densidade de corrente inferior
- J_t – Densidade de corrente superior
- k_0 – Número de onda no espaço livre
- k_x, k_y e k_z – Número de onda nas direções x, y e z , repectivamente.
- L – Comprimento do *patch*
- L_0 – Comprimento da linha de microfita
- M – Número de elementos do arranjo no eixo x
- N – Número de elementos do arranjo no eixo y
- P_E – Potência total fornecida (entrada)
- P_P – Potência dissipada (perdas ôhmicas)
- P_R – Potência total radiada
- r – resistência normalizada da carga
- RL – Perda de retorno
- S – Vetor de Poynting (densidade de potência)

S_{11} – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1 do quadripolo
 S_{12} – Isolação do quadripolo
 S_{21} – Ganho de tensão direta do quadripolo
 S_{22} – Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 2 do quadripolo
 t – espessura do *patch*
 $U(\theta, \varphi)$ – Intensidade de radiação numa dada direção
 $U_{\text{máx}}$ – Intensidade de radiação máxima
 U_{med} – Intensidade de radiação média
 W – Largura do *patch*
 W_0 – Largura da linha de microfita
 x – reatância normalizada da carga
 y_0 – Comprimento do *inset fed*
 y_w – Largura do *inset fed*
 Z – Impedância do transformador de um quarto de onda
 Z_L – Impedância de carga
 Z_0 – Impedância característica da linha de transmissão
 Z_E – Impedância de entrada da antena

Letras Gregas

Γ – Coeficiente de reflexão
 β – Deslocamento de fase
 β_x – Deslocamento de fase dos elementos do arranjo no eixo x
 β_y – Deslocamento de fase dos elementos do arranjo no eixo y
 ε – Permissividade elétrica complexa
 ε' – Constante dielétrica
 ε_0 – Permissividade elétrica do vácuo
 ε_r – Permissividade elétrica relativa do material
 ε_{ref} – Permissividade elétrica efetiva
 η_{rad} – Eficiência de radiação
 η_{ref} – Eficiência de reflexão
 η – Eficiência total
 θ – Ângulo plano horizontal (azimutal)
 λ – Comprimento de onda

λ_0 – Comprimento de onda no espaço livre

μ – Permeabilidade magnética

μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo

φ – Ângulo plano vertical (elevação)

Siglas

AAAC – *All Aluminun Alloy Cable* (Cabo de Liga de Alumínio)

AAC – *All Aluminun Cable* (Cabo de Alumínio)

ACAR – *Aluminun Cable Alloy Reinforced* (Cabo de Alumínio Reforçado com Liga de Alumínio)

ACSR – *Aluminun Cable Stell Reinforced* (Cabo de Alumínio com Alma de Aço)

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APM – *ArduPilot Mega*

ARV – Analisador de Rede Vetorial

BEC – *Battery Eliminator Circuit* (Circuito Eliminador de Bateria)

BVLOS – *Beyond Visual Line of Sight* (Além da Linha de Visão Visual)

CMA – Certificado Médico Aeronáutico

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DIY – *Do It Yourself* (Faça Você Mesmo)

DVR – *Digital Video Recorder* (Gravador de Vídeo Digital)

ESC – *Eletronic Speed Control* (Controlador de Velocidade Eletrônico)

FB – *Front to Back Ratio* (Relação Frente - Costas)

FCC – *Federal Communications Commission* (Comissão Federal de Comunicação)

FDTD – *Finite Difference Time Domain* (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)

FEM – *Finite Element Method* (Métodos dos Elementos Finitos)

FNBW – *First Null Beam Width* (Largura do Feixe do Primeiro Nulo)

FPV – *First Person View* (Visão em Primeira Pessoa)

GCS – *Ground Control Station* (Estação de Controle Terrestre)

GSM – *Global System for Mobile Communications* (Sistema Global para Comunicações Móveis)

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

HIL – Hardware in the Loop

HPBW – Half Power Beam Width (Largura do Feixe de Meia Potência)

ISM – Industrial Scientific and Medical (Industrial Científica e Médica)

LEMA – Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados

LT – Linha de Transmissão

MMCX – Micro Miniature Coaxial

MNM – Multiport Network Model (Modelo de Rede Multiporta)

MoM – Method of Moments (Método dos Momentos)

MoM – Method Of Moments (Métodos dos Momentos)

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal)

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

RFID – Radio-Frequency Identification (Identificação por Radiofrequência)

RPA – Remotely Piloted Aircraft (Aeronave Pilotada Remotamente)

RP-SMA – Reverse Polarity SubMiniature Version A

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SIL – Software in the Loop

SMA – SubMiniature Version A

SS – Spread Spectrum (Espalhamento Espectral)

TEM – Transversal Eletromagnético

TLM – Transmission Line Method (Modelo de Linha de Transmissão)

TM – Transversal Magnético

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

UV – Ultravioleta

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

USB – Universal Serial Bus (Barramento em Série Universal)

UWB – Ultra Wide Band (Ultra Banda Larga)

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

VLOS – Visual Line of Sight (Linha de Visão Visual)

VTOL – Vertical Take-Off and Landing ()

WCIP – Wave Concept Iterative Procedure (Método Iterativo baseado no Conceito das Ondas)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 ANTENAS DE MICROFITA	20
2.1.1 Parâmetros das Antenas	23
2.1.1.1 Diagrama de Radiação.....	23
2.1.1.2 Densidade de Potência e Intensidade de Radiação.....	25
2.1.1.3 Diretividade, Ganho e Eficiência.....	27
2.1.1.4 Perda de Retorno	29
2.1.1.5 Largura de Banda.....	31
2.1.1.6 Carta de Smith	32
2.1.2 Métodos de Alimentação	35
2.1.2.1 Linha de Microfita.....	35
2.1.2.2 Cabo Coaxial	36
2.1.2.3 Acoplamento por Abertura	37
2.1.2.4 Acoplamento por Proximidade.....	37
2.1.3 Arranjo de Antenas	38
2.1.3.1 Configuração Geométrica dos Arranjos de Antenas	40
2.1.3.2 Formas de Alimentação	44
2.1.3.3 Acoplamento Mútuo	49
2.1.4 Métodos de Análise e Projeto	51
2.1.4.1 Modelo da Cavidade.....	51
2.1.4.2 Modelo da Linha de Transmissão.....	55
3 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS	61
3.1 HISTÓRIA DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS.....	61
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS VANT'S	63
3.3 QUADROTOR	65
3.3.1 Dinâmica do Sistema	67
3.3.2 Estrutura e Funcionamento	68
3.3.3 Sistema de Comunicação	70
4 LINHAS DE TRANSMISSÃO	76

4.1 MANUTENÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	82
4.2 INSPEÇÃO VISUAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	84
5 MATERIAIS E MÉTODOS	87
5.1 PROJETO DAS ANTENAS PROPOSTAS.....	91
5.2 IMPLEMENTAÇÃO DAS ANTENAS NO VANT E REALIZAÇÃO DA INSPEÇÃO VISUAL	95
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
6.1 ANÁLISE DOS DISPOSITIVOS PROPOSTOS	99
6.1.1 Resultados Computacionais.....	99
6.1.2 Resultados Experimentais.....	106
6.2 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL.....	115
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
REFERÊNCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

O avanço dos sistemas de comunicação sem fio e o crescimento de suas aplicações nos últimos anos, tornaram o uso de antenas compactas um grande atrativo e de suma importância em aplicações comerciais. O surgimento de diferentes tecnologias sem fio, a exemplo do *GSM*, *RFID*, *bluetooth*, *Wi-Fi* e *WiMAX*, tem servido para impulsionar as pesquisas na busca por dispositivos mais leves, compactos e de custo reduzido, essas características tornam as antenas de microfita atrativas para tais aplicações.

As pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de antenas de microfita têm se intensificado nos últimos anos, visto que estas possuem propriedades particulares e uma gama de aplicações. Essas antenas foram desenvolvidas inicialmente na década de 1950 por George A. Deschamps (DESCHAMPS, 1953) com intuito de constituir circuitos integrados monolíticos de micro-ondas. No entanto, seu potencial só foi explorado a partir de 1970 por pesquisadores como Robert E. Munson (MUNSON, 1974).

Em seguida, houve um aumento nos trabalhos que descreviam os aspectos importantes sobre o comportamento de antenas planares. No final da década de 70, tais antenas se difundiram por diversos sistemas de comunicação e, desde então, tem havido um interesse crescente por novos meios de utilizá-las. A partir de 1980 foi determinada a modelagem dos elementos constituintes de uma antena de microfita, e as pesquisas se intensificaram com aplicações práticas. Desde então diversas técnicas, métodos de análises, algoritmos e materiais foram desenvolvidos com o objetivo de estudar, compreender e produzir estas antenas (BRINHOLE, 2005).

As antenas de microfita vêm se tornando cada vez mais disseminadas no segmento de comunicações sem fio, devido as suas características como baixo peso, fácil fabricação, adaptável a superfícies planas. Por serem inicialmente utilizadas em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais por suas características, tornaram-se uma interessante opção para utilização em VANT's (PEREIRA, 2016). Já que o desenvolvimento de sistemas sem fio aumentou o número de estações base em ambientes urbanos e rurais, acarretando na interferência da comunicação desses veículos, e para a frequência da aplicação não há um controle do número de transmissores. Em vista disso, as antenas comumente utilizadas (dipolos e monopolos) podem não ser suficientes para manter a comunicação, devido a algumas dessas estações base possuírem operação na mesma frequência que a do VANT, como por exemplo, redes sem fio que adotam protocolos IEEE 802.11b e 802.11g, já outras possuírem frequências próximas com uma elevada potência de transmissão, como é o caso do serviço 4G.

Os veículos aéreos não tripulados são utilizados principalmente para a captura de imagens, possuindo diversas aplicações, como a inspeção em linhas de transmissão, construção civil, gasodutos, agricultura de precisão, segurança pública, georreferenciamento. No que diz respeito as inspeções nas linhas de transmissão, as mesmas são feitas regularmente em terra por vistorias terrestres ou com escalada da estrutura e também de forma aérea por meio de aeronaves tripuladas. As inspeções buscam verificar a integridade física dos componentes das linhas, em termos de fissuras, corrosão e eventuais danos que venham a prejudicar o fornecimento de energia elétrica. As aeronaves executam voos em baixa altitude e muito próximos das linhas de transmissão. Em alguns casos, devido às intempéries da região, que venham a dificultar o sobrevoo, há a exposição dos tripulantes a riscos associados ao trabalho. Na inspeção em linhas de transmissão de energia utilizando VANT não há exposição aos riscos do trabalho, sendo também menos oneroso aos prestadores do serviço de inspeção.

Para realização do projeto será feito um embasamento teórico, abordado no Capítulo 2, acerca de parâmetros importantes no estudo de antenas de microfita, bem como uma abordagem sobre as características e funcionamento dos VANT's e uma conceituação a respeito das linhas de transmissão, tipos de manutenções realizadas.

Ao final da revisão de literatura será apresentado no Capítulo 5 os materiais e métodos de estudo utilizado durante o decorrer deste trabalho. Posteriormente, no Capítulo 6 os resultados baseados na metodologia adotada, e por fim, no Capítulo 7 as considerações finais acerca de todo processo descrito.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar e desenvolver antenas de microfita para um sistema de rádio controle de um VANT, aplicado a inspeção em linhas de transmissão.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e simular as antenas;
- Confeccionar e testar as antenas;
- Comparar e analisar os resultados experimentais e os simulados;
- Implementar as antenas no transmissor e receptor do rádio do VANT;
- Realização da inspeção visual aérea.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ANTENAS DE MICROFITA

As antenas podem ser definidas como dispositivos que transformam a energia das ondas eletromagnéticas guiadas em linhas de transmissão em energia eletromagnética radiada e vice-versa. Assim sendo a antena uma estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento, essencial em qualquer comunicação realizada por radiofrequência, tendo como principal função transmitir ou receber dados em certas faixas de frequência (PEREIRA, 2016).

O desenvolvimento ao longo dos anos das comunicações sem fio acarretou um aumento no interesse de pesquisadores na elaboração de antenas de dimensões reduzidas que possam ser integradas facilmente e que forneçam um bom desempenho. As antenas de microfita por apresentarem características próximas com essas necessidades, tornaram-se atrativas para utilização em dispositivos sem fio (MORAIS, 2011).

As antenas de microfita possuem aspectos desejáveis para diversas aplicações, principalmente as que requerem adequação em qualquer tipo de superfície, são simples de fabricar utilizando tecnologia de circuito impresso. As características elétricas dessas antenas também são importantes do ponto de vista de aplicações por serem versáteis em frequência de ressonância, polarização e impedância (BALANIS, 2009).

Os primeiros conceitos de antenas de microfita foram propostos por Deschamps em 1953 e com Guton e Baissot em 1955. Posteriormente, com o avanço tecnológico na área de telecomunicações as antenas de microfita receberam uma atenção especial, no entanto, antenas práticas vieram a ser desenvolvidas por Muson e Howell na década de 70 (KUMAR; RAY, 2003).

Entre as várias características das antenas de microfita, podem-se destacar suas pequenas dimensões, facilidade na produção, adaptabilidade a superfícies planas ou curvas, compatibilidade com circuitos integrados, possibilidade de polarização circular e linear, fabricação de linhas de alimentação e circuitos de casamento de impedâncias com a própria estrutura do dispositivo. Mas estes dispositivos possuem alguns fatores limitantes em relação as antenas convencionais, como largura de banda estreita, radiação indesejável pelas estruturas de alimentação, excitação de ondas de superfície, baixa radiação *end-fire* (ANDRADE, 2013).

As antenas de microfita operam na faixa de frequência de micro-ondas (0,3 – 300 GHz). A maioria das aplicações em engenharia de microondas estão compreendidas na faixa de frequência entre 1 GHz e 40 GHz. Na Tabela 1 são mostradas as faixas de frequência e suas

respectivas bandas que de acordo com o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) possui a maior parte das aplicações em microondas (WENTWORTH, 2006).

Tabela 1– Classificação das faixas de microondas.

Banda	Faixa de Frequência	Aplicações
L	1 – 2 GHz	Comunicação pessoal e <i>GPS</i>
S	2 – 4 GHz	Comunicação pessoal (<i>Wifi</i> , <i>Bluetooth</i> , etc.) e forno de microondas
C	4 – 8 GHz	Comunicação via satélite
X	8 – 12 GHz	Radar terrestre para navegação aérea
Ku	12 – 18 GHz	Radar e rádio ponto a ponto
K	18 – 26,5 GHz	Radar e rádio ponto a ponto
Ka	26,5 – 40 GHz	Radar e rádio ponto a ponto

Fonte: EZQUERRO, 2015.

Em 1985 o *FCC (Federal Communications Commission)*, que é um órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão fundado em 1934 nos Estados Unidos, desenvolveu parte do espectro de frequência para desenvolvimentos livres, sem a necessidade de licenciamento de utilização de frequência, e introduziu normas para limitação de potência de transmissão e técnicas de modulação dentro destas faixas. Entre elas estão as faixas de frequência *ISM (Industrial Scientific and Medical)*, que abrangem as faixas de 900 MHz, 2,4 GHz e 5 GHz existentes dentro das bandas L, S e C, são reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico. Este padrão foi adotado e difundido em diversos países, inclusive no Brasil, onde na Figura 1 é mostrado as faixas disponíveis e suas respectivas larguras de bandas (SOARES, 2004).

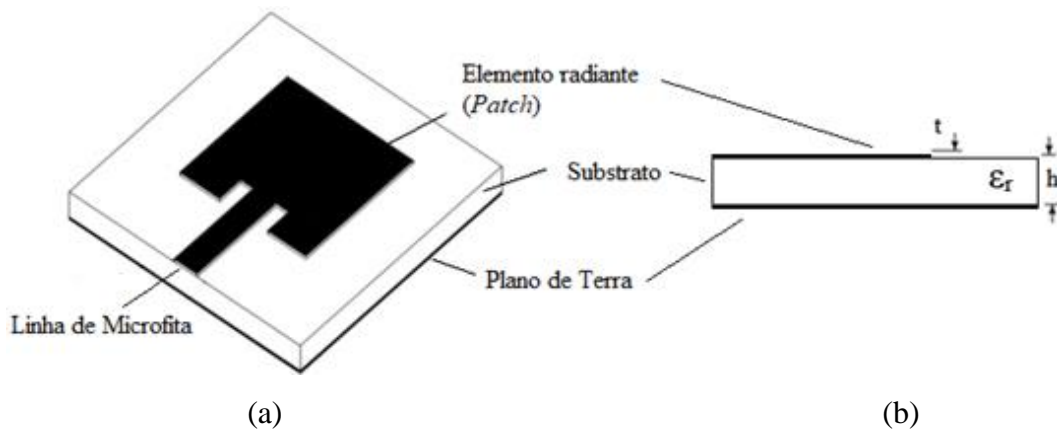
Os serviços de radiocomunicação operando nestas faixas de frequência devem aceitar a interferência prejudicial que possa resultar de dispositivos operando nesta mesma faixa de frequência. A confiabilidade das comunicações de dados não pode ser assegurada com técnicas simples, porque não existem restrições ao número de transmissores, nem existem protocolos definidos. Na banda *ISM* os dispositivos têm de dividir o espaço com outros serviços, e a existência de outras fontes de interferência pode ser inevitáveis (TELECO, 2017).

Figura 1- Espectro de frequência *ISM* no Brasil.

Fonte: SOARES, 2004.

As antenas de microfita em sua configuração mais simples são constituídas de um *patch* radiante em uma das faces do substrato dielétrico, enquanto na outra existe um plano de terra, como pode ser visto na Figura 2-a. O *patch* possui uma espessura (t) muito menor do que o comprimento de onda no espaço livre (λ_0) na frequência de operação, já o substrato dielétrico possui uma pequena espessura geralmente na faixa de $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$, na Figura 2-b é apresentada essas dimensões em uma vista lateral de uma antena de microfita. O plano de terra situa-se abaixo da antena tornando sua máxima radiação normal à superfície (BALANIS, 2009).

Figura 2- (a) Elementos da antena de microfita. (b) Vista lateral da antena de microfita.



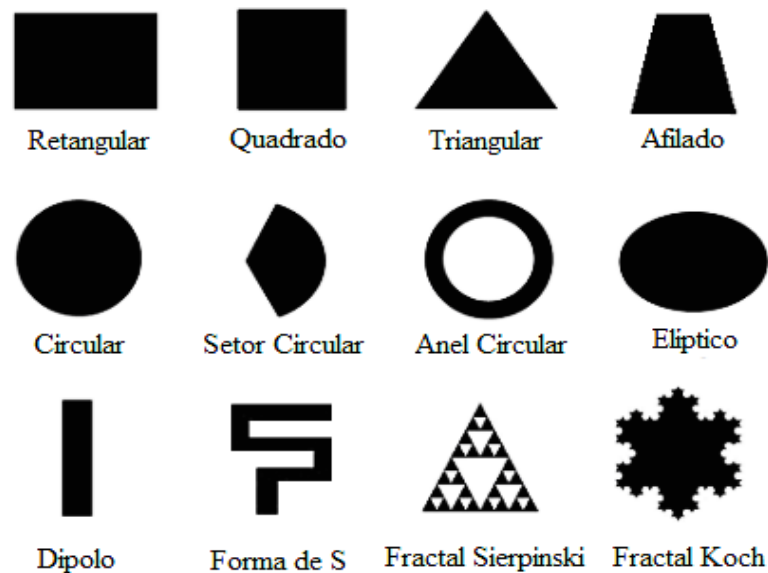
Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2016.

A espessura do substrato e sua permissividade relativa afetam o desempenho da antena. A permissividade relativa geralmente possui valores na faixa de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. O uso de substratos mais espessos e que tenham uma permissividade elétrica baixa proporcionam uma melhor eficiência, maior largura de banda e campos mais desprendidos, facilitando a radiação no espaço, contudo, à medida que a espessura aumenta acarreta em uma maior geração de ondas

de superfície que encurta a faixa de operação (BALANIS, 2009). Substratos mais delgados com altos valores de permissividade são apropriados para circuitos de microondas, visto que os campos estão mais confinados para minimizar a radiação e acoplamentos indesejáveis, devido as maiores perdas deste tipo de substrato resultam em uma largura de banda menor.

De acordo com a Figura 3, o *patch* pode assumir diversos formatos, incluindo arranjos de diferentes geometrias. Porém, para diferentes formatos do *patch*, são obtidos diferentes resultados de operação e diferentes modelagens matemáticas utilizadas para análise. Os formatos mais comuns geralmente são utilizados como referência quando se deseja variar os parâmetros da antena a fim de se obter as características desejadas (BALANIS, 2009).

Figura 3- Formatos comuns do *patch*.



Fonte: ANDRADE, 2013.

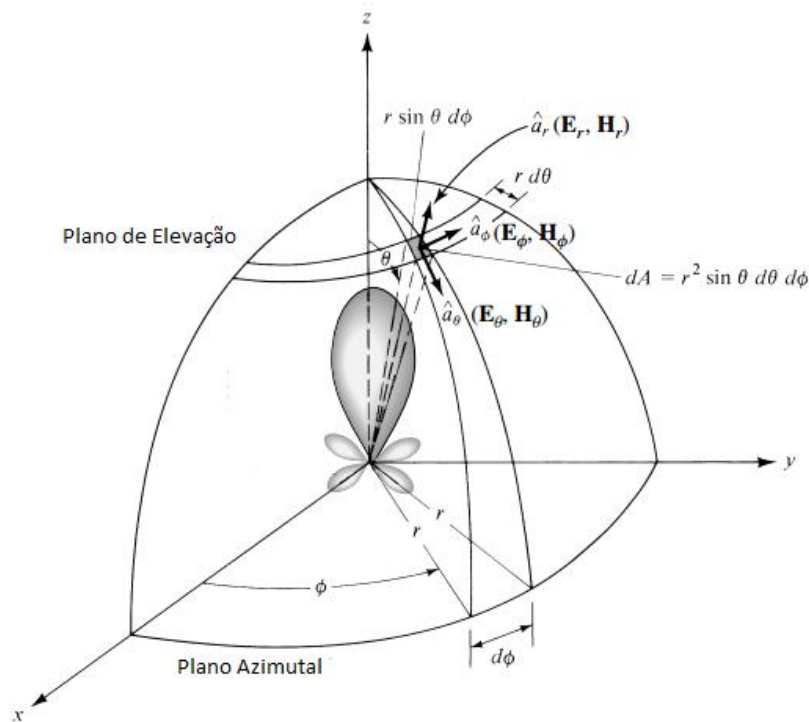
2.1.1 Parâmetros das Antenas

Nesta seção estão descritos os principais parâmetros das antenas de microfita, o conhecimento dos mesmos fornecerá um entendimento sobre o desempenho das antenas, objetivando um melhor projeto e de suas dimensões e configurações. A apresentação dos parâmetros será tem por fim prover uma base teórica para os estudos e análise dos resultados obtidos neste trabalho.

2.1.1.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação é a representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função de coordenadas espaciais, sendo obtido através dos módulos dos campos distantes em relação à posição em torno da antena. O mesmo também exibe a amplitude do campo magnético, do campo elétrico ou da potência radiada (comumente normalizados em relação ao seu valor máximo) em função dos ângulos ϕ e θ na região de campo distante (BALANIS, 2009). Na Figura 4 é possível observar uma representação gráfica tridimensional do diagrama de radiação no sistema de coordenadas, bem como os principais planos de corte, o de elevação (x-z e y-z) e o azimutal (x-y).

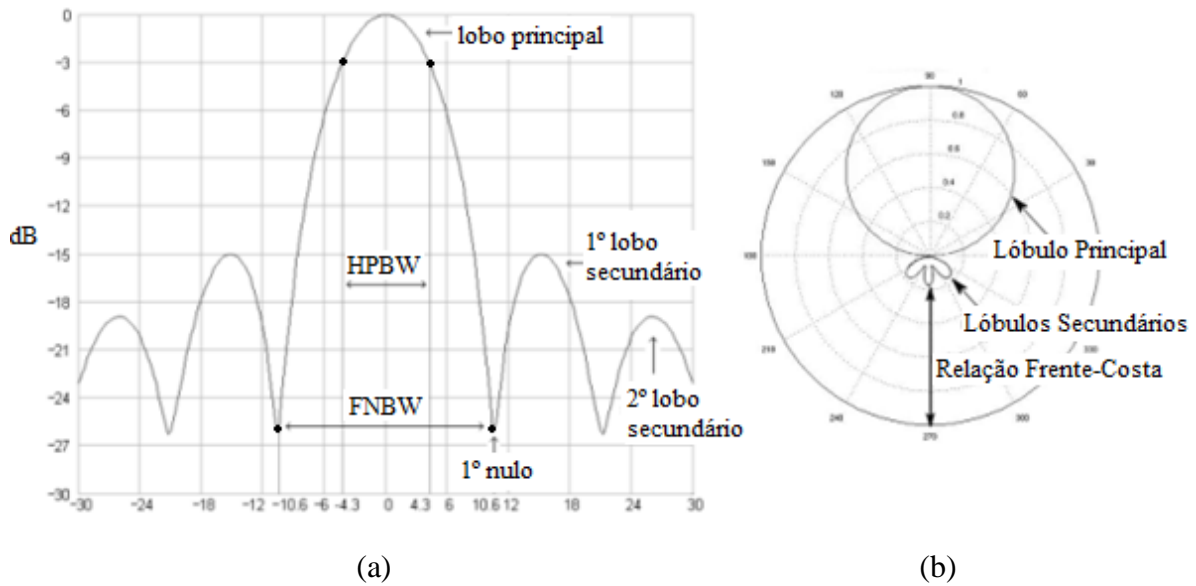
Figura 4- Diagrama de radiação representado no sistema de coordenadas.



Fonte: BALANIS, 2009.

Na maioria dos casos o diagrama é uma figura tridimensional, mas devido à dificuldade de reproduzi-los em medição, são geralmente representados como figuras bidimensionais (planos de corte). Os planos de corte principais são o plano vertical ou de elevação (geralmente $\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 90^\circ$) e o horizontal ou azimutal ($\theta = 90^\circ$) e podem ser representados na forma linear ou polar, como é mostrado na Figura 5-a e 5-b, respectivamente.

Figura 5- Diagramas de radiação. (a) forma linear, (b) forma polar.



Fonte: Adaptado ANDRADE, 2013.

Através da análise do diagrama de radiação da Figura 5, pode-se obter parâmetros importantes para caracterizar a antena como: (AQUINO, 2008)

- **Lóbulo principal** – ocorre na direção que contém a maior concentração de potência radiada; lóbulos secundários – todos que não são o principal;
- **HPBW (Half Power Beam Width)** – abertura angular definida pelos feixes nos quais a potência radiada é metade do valor de potência na máxima direção de radiação. Esta largura de feixe é definida somente para um plano;
- **FNBW (First Null Beam Width)** – largura de feixe com centro na máxima intensidade de radiação, para qual a potência radiada cai a seu valor mínimo.
- **FB (Front to Back Ratio)** – do português relação frente-costas, significa a relação do ganho entre o lóbulo principal e a do lóbulo diametralmente oposto.

2.1.1.2 Densidade de Potência e Intensidade de Radiação

A densidade de potência é representada pelo vetor de Poynting, que é uma quantidade usada para descrever a potência associada a ondas eletromagnéticas. Assim sendo, o vetor de Poynting é dado pelo produto vetorial da intensidade de campo elétrico (V/m) e campo magnético (A/m), conforme mostrado na Equação 1 (POZAR, 2012).

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

Como o vetor de Poynting representa densidade de potência, a potência radiada total que atravessa uma superfície fechada pode ser obtida por integração da componente normal do vetor de Poynting ao longo de toda superfície. Em regiões de campo distante, a densidade de potência associada aos campos eletromagnéticos de uma antena é predominantemente real, sendo referida como densidade de radiação. A potência radiada por uma antena pode ser escrita como mostrado na Equação 2 (BALANIS, 2009).

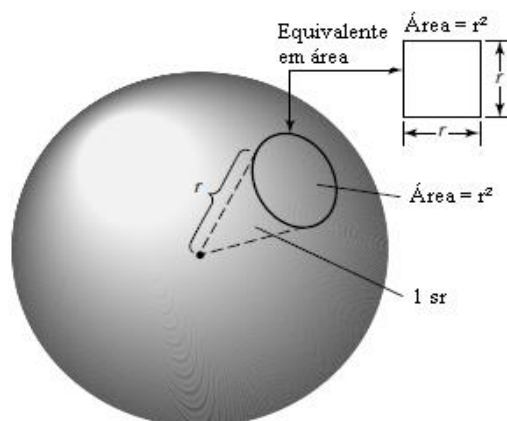
$$P_R = \oiint_S \mathbf{S} \cdot d\mathbf{s} = \oiint_S \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{n}} da = \frac{1}{2} \oiint_S \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) ds \quad (2)$$

A intensidade de radiação, $U(\theta, \phi)$, em uma determinada direção pode ser descrita como sendo a potência radiada por unidade de ângulo sólido (W/sr), sendo obtida pela multiplicação da densidade de radiação pelo quadrado da distância (r) correspondente, desse modo a Equação 3 formula a intensidade de radiação (SANTOS, 2016).

$$U(\theta, \phi) = r^2 \mathbf{S} \quad (3)$$

O esferorradiano é um ângulo sólido, com vértice no centro de uma esfera, que corresponde a uma área numericamente igual ao quadrado da distância do vértice a superfície da esfera, como mostra a Figura 6.

Figura 6-Arranjo geométrico para definir um esferorradiano.



Uma intensidade média de radiação pode ser obtida considerando que uma fonte radia igualmente em todas as direções, ou seja, um radiador isotrópico. Dessa forma, para uma fonte isotrópica a intensidade de radiação pode ser descrita conforme a Equação 4 e 5.

$$P_R = \oiint_S \mathbf{S} \cdot d\mathbf{s} = 4\pi U_{\text{méd}} \quad (4)$$

$$U_{\text{méd}} = P_R/4\pi \quad (5)$$

2.1.1.3 Diretividade, Ganho e Eficiência

Segundo Pozar (2012), a diretividade (D) é um índice que mede a capacidade da antena em concentrar potência radiada em uma determinada direção, descrevendo o quão bem um elemento radiador direciona a energia. A diretividade, também denominada de ganho diretivo máximo, corresponde à razão entre a intensidade de radiação máxima ($U_{\text{máx}}$) e a intensidade de radiação média ($U_{\text{méd}}$), sendo expressa pela Equação 6.

$$D = \frac{U_{\text{máx}}}{U_{\text{méd}}} \quad (6)$$

A diretividade considera o comportamento da distribuição de potência e não têm em conta as perdas da antena. Por outro lado, o ganho leva em consideração as perdas e expressa o quanto uma antena é melhor que outra em relação à transferência de potência para o meio (ALVES, 2008). Sendo definido como o produto da diretividade pela eficiência da antena, de acordo com a Equação 7.

$$G = D \cdot \eta \quad (7)$$

A eficiência de uma antena é calculada considerando as perdas nos terminais de entrada e no interior da estrutura, sendo expressa pela Equação 8.

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

Onde:

η = eficiência;

η_{rad} = eficiência de radiação;

η_{ref} = eficiência de reflexão.

As antenas possuem perdas relacionadas aos materiais metálicos e dielétricos, essas perdas reduzem a potência que seria entregue a antena e posteriormente radiada pela mesma. Dessa forma, a eficiência de radiação de uma antena é definida como mostrado na Equação 9 (POZAR, 2012):

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

Onde:

P_R = potência radiada;

P_E = potência fornecida à antena;

P_P = potência perdida nos materiais da antena.

Quando a impedância da antena não é igual à da linha de alimentação, ocorre o descasamento de impedâncias e conseqüentemente perda de potência no sinal. Dessa forma é possível descrever a eficiência de reflexão, podendo ser obtida através da Equação 10 (BALANIS, 2009):

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

Onde o coeficiente de reflexão da antena (Γ) é dado a partir da Equação 11:

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

Onde:

Z_E = impedância de entrada da antena;

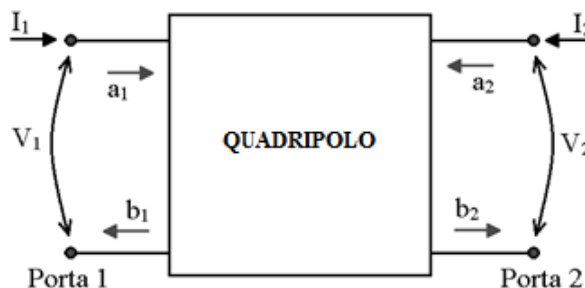
Z_0 = impedância característica da linha de transmissão.

2.1.1.4 Perda de Retorno

A perda de retorno (RL) indica a relação entre a potência fornecida e a potência refletida na antena, sendo um dos principais parâmetros a ser avaliado na etapa do projeto. Segundo Pozar (2012), uma maneira de se obter esse parâmetro é através da matriz de espalhamento (matriz S), sendo a representação mais adequada para medições diretas de ondas incidentes, refletidas e transmitidas. Essa técnica é eficaz para avaliação de sistemas de micro-ondas, pois facilita as medições e funciona em circuitos de altas frequências, proporcionando uma descrição completa da rede e relacionando as ondas de tensão nas portas (ANDERSON, 1967).

As antenas são circuitos de microondas e podem ser caracterizadas como redes de duas portas, sendo uma delas a entrada da antena, e outra uma porta de radiação. Na Figura 7 é ilustrado esse modelo de duas portas em um quadripolo, onde as ondas de tensões normalizadas incidentes e refletidas são representadas por a_1 e a_2 , b_1 e b_2 , respectivamente (POZAR, 2012).

Figura 7- Modelo de duas portas da antena (quadripolo).



Fonte: Autoria própria.

Com base nos sinais de entrada (V_1 e I_1) e saída (V_2 e I_2), as variáveis independentes (a_1 e a_2) e dependentes (b_1 e b_2) são definidas através das seguintes equações (ANDERSON, 1967):

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente na porta 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (12)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência incidente na porta 2}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência refletida na porta 1}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (14)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{onda de potência refletida na porta 2}}{2\sqrt{Z_0}} \quad (15)$$

Onde:

Z_o = impedância de referência.

A partir das Equações 12, 13, 14 e 15 é possível obter um sistema linear entre os termos dependentes e independentes, representados na forma matricial pela Equação 16:

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

Onde os termos S_{ij} , são denominados de parâmetros de espalhamento do quadripolo e representam (ANDERSON, 1967). Na Figura 8 é ilustrada a distribuição dos parâmetros de espalhamento no quadripolo.

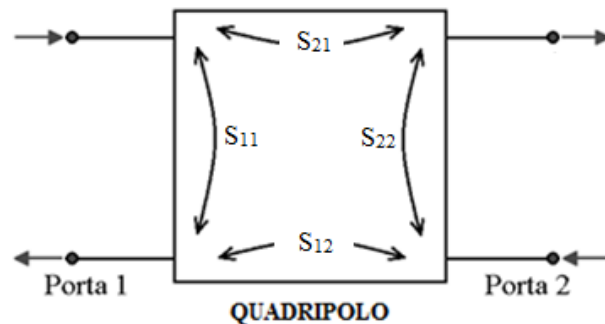
S_{11} = coeficiente de reflexão na porta 1

S_{12} = representa o ganho de tensão reversa,

S_{21} = ganho de tensão direta

S_{22} = coeficiente de reflexão na porta 2.

Figura 8- Distribuição dos parâmetros de espalhamento no quadripolo.



Fonte: Autoria Própria.

O primeiro termo da matriz de espalhamento possui uma relação com a perda de retorno, tendo a mesma definição do coeficiente de reflexão (Γ). Assim, a partir da Equação 17 é possível obter a perda de retorno através do termo S_{11} de acordo com seguinte equação (POZAR, 2012):

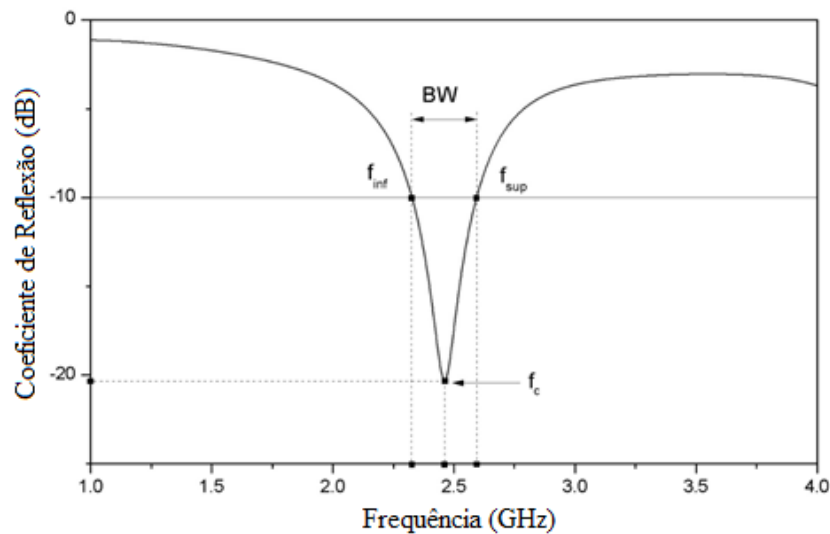
$$RL = -20 \log |S_{11}| \quad (17)$$

Na prática um coeficiente de reflexão é considerado aceitável quando seus valores são menores que -10 dB (SILVA, 2014).

2.1.1.5 Largura de Banda

A largura de banda pode ser definida como o intervalo de frequências em torno de sua frequência central de operação, a qual a antena deve funcionar satisfatoriamente. A Figura 9 ilustra um gráfico do coeficiente de reflexão em função da frequência, onde o procedimento de medição da largura de banda pode ser feito através da definição de uma banda de frequências, onde estas possuem potências radiadas de pelo menos metade da máxima potência radiada, o que significa uma faixa de frequências que possuem coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB (CAPOVILLA, 2004).

Figura 9 - Gráfico do coeficiente de reflexão em função da frequência mostrando as frequências e a largura de banda de uma antena.



Fonte: HOLANDA, 2016.

Assim, a largura de banda de uma antena (BW) pode ser definida como sendo a faixa de frequências em torno de sua frequência de operação, considerando-se os dois pontos com coeficiente de reflexão igual a -10 dB, podendo ser expressa pela Equação 18 (CARNEIRO FILHO, 2010):

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

Onde:

f_{sup} = frequência superior;

f_{inf} = frequência inferior.

A largura de banda sofre influência dos seguintes fatores: impedância de entrada, ganho, espessura do substrato, largura de feixe, posição do lobo principal, nível dos lobos secundários e polarização (BALANIS, 2009).

Na prática, a largura de banda pode ser classificada sob forma percentual e calculada com base na Equação 19 (GHAVAMI, 2004):

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

A Equação 19 é a forma mais usual de se calcular a largura de banda de uma antena. De acordo com Filho (2010), as antenas que possuem determinados valores de largura de banda percentual podem ser classificadas da seguinte forma:

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

Dependendo das exigências do sistema na qual a antena é utilizada, têm-se a necessidade de uma largura de banda otimizada, para isso existem técnicas que visam incrementar a largura de banda de uma antena de microfita, destacando-se: a utilização de material dielétrico de baixa permissividade, aumento na espessura do substrato, a redução nas dimensões do plano de terra (YARMAN, 2008).

2.1.1.6 Carta de Smith

De acordo com Pozar (2012), a carta de Smith é uma representação gráfica baseada no coeficiente de reflexão. Sua utilidade reside no fato de converter coeficientes de reflexão para impedâncias (ou admitâncias) e vice-versa, analisar impedância da linha de transmissão e coeficientes de reflexão. Como também usá-la no projeto de uma antena para obter a impedância da linha de transmissão e os compensadores que são usados com o intuito de melhorar o casamento de impedância entre a carga e a alimentação.

Uma carta de Smith é desenvolvida através da análise da carga no ponto em que a impedância deve ser casada. Desse modo, em vez de considerar a própria impedância, a descrição por meio dos coeficientes de reflexão se torna mais adequada para a representação

gráfica da relação entre a impedância da carga e seu coeficiente de reflexão (CHAN e HARTER, 2000).

A carta de Smith é construída no interior de um círculo de raio unitário ($\Gamma \leq 1$). Com a finalidade de se obter uma carta que atenda qualquer impedância característica da linha de transmissão, a normalização da impedância da carga é realizada, sendo assim representada pela Equação 20 (POZAR, 2012):

$$\frac{Z_L}{Z_0} = z_L = r + jx \quad (20)$$

Onde:

Z_L = impedância da carga;

z_L = impedância normalizada da carga;

r = resistência normalizada da carga;

x = reatância normalizada da carga.

Substituindo a Equação 20 na Equação 11, obtêm-se a Equação 21 que relaciona o coeficiente de reflexão com a impedância normalizada.

$$\Gamma_L = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{r + jx - 1}{r + jx + 1} \quad (21)$$

Rearranjando a Equação 21 em termos de suas componentes reais e imaginárias da impedância normalizada, é possível obter equações distintas para a resistência e reatância normalizada, como pode ser observado Equações 22 e 23:

$$r = \frac{1 - \Gamma_r^2 - \Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \quad (22)$$

$$x = \frac{2\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \quad (23)$$

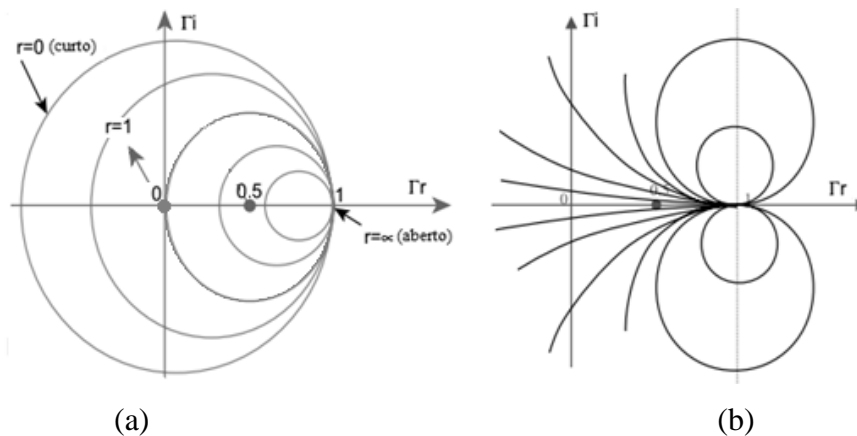
Reescrevendo as Equações 22 e 23, pode-se obter as seguintes relações:

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{1+r}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2 \quad (24)$$

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left(\Gamma_i - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (25)$$

Com a análise da Equação 24 é possível gerar sua solução na forma de uma circunferência, com origem nas coordenadas $[r/1+r; 0]$ de raio igual a $1/1+r$, no plano complexo $(\Gamma_r; \Gamma_i)$. Já a Equação 25 fornece uma solução no mesmo plano complexo, mas com centro nas coordenadas $[1; 1/x]$ e um raio igual a $1/x$. Ambas soluções, para diferentes valores de resistência e reatâncias normalizadas geram um conjunto de circunferências, como é ilustrado na Figura 10.

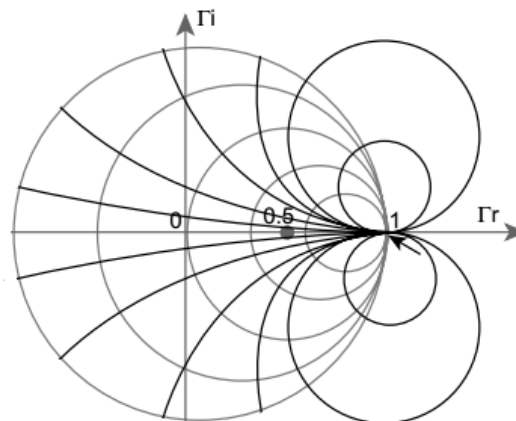
Figura 10- Conjunto de Círculos (a) Resistivos e (b) de Reatância.



Fonte: CHAN e HARTER, 2000.

A sobreposição dos círculos resistivos e de reatância formam a carta de Smith, sendo ilustrada na Figura 11.

Figura 11- Ilustração de uma Carta de Smith.



Fonte: CHAN e HARTER, 2000.

A construção gráfica da Equação 24 e Equação 25 demonstra o processo para se obter a carta de Smith para um determinado valor de impedância normalizada da carga, este por sua vez depende da impedância característica que se adota (SILVA, 2014).

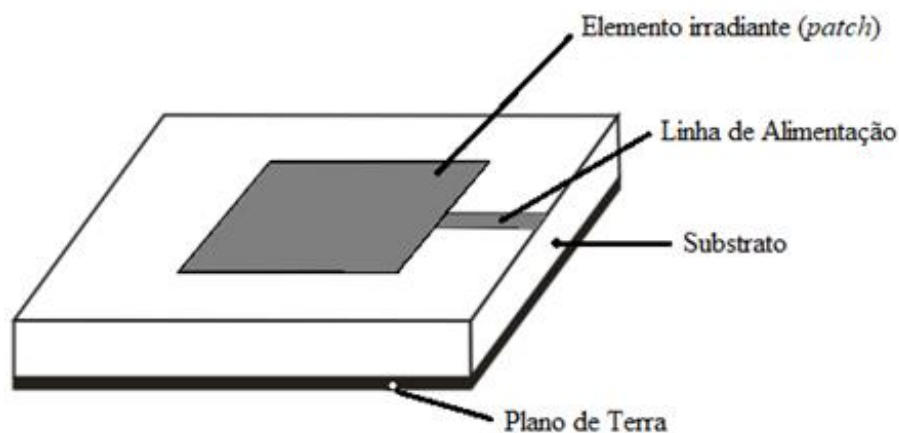
2.1.2 Métodos de Alimentação

No processo de construção da antena de microfita a escolha de um método de alimentação implica em fatores importantes, como por exemplo: a transferência de potência entre o *patch* e a alimentação, efeitos da radiação espúria e ondas de superfície que provocam alterações diagrama de radiação. Os métodos de alimentação utilizados para antenas de microfita, podem ser classificados em duas formas: diretos e indiretos. Dentre as formas de alimentação direta destacam-se: a linha de microfita ou cabo coaxial. Enquanto que, as técnicas indiretas utilizadas são: acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade. Todos esses métodos foram descritos nas seções a seguir (AQUINO, 2008).

2.1.2.1 Linha de Microfita

A linha de alimentação de microfita consiste em uma fita condutora impressa sobre o plano do substrato, conectando o *patch* a extremidade da antena, dessa forma a estrutura se mantém planar. É possível observar na Figura 12 um exemplo deste tipo de alimentação.

Figura 12- Alimentação por linha de microfita.



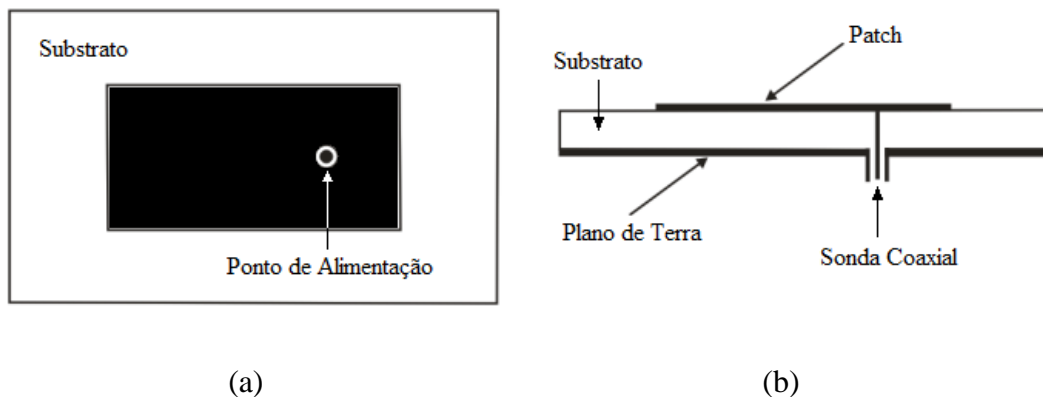
Fonte: FILHO, 2010.

Neste tipo de alimentação, uma linha de impedância característica é projetada para alimentar a antena casando sua impedância com a da fonte. Este método apresenta vantagens em relação a outros no que diz respeito ao processo de fabricação, sendo de fácil implementação, além de ser possível ajustar a impedância da linha de microfita variando sua largura. Por outro lado, quando este tipo de alimentação é utilizado em substratos mais espessos, aumentam-se as ondas de superfícies e radiações indesejadas (MORAIS, 2011).

2.1.2.2 Cabo Coaxial

Nesta forma de alimentação, o condutor interno do conector coaxial transpassa o plano de terra e o substrato, sendo conectado ao *patch*, enquanto o condutor externo é ligado ao plano de terra (SANTOS, 2016). Esse esquema está representado na Figura 13.

Figura 13- Alimentação por cabo coaxial de uma antena de microfita. (a) Vista Superior. (b) Vista Lateral.



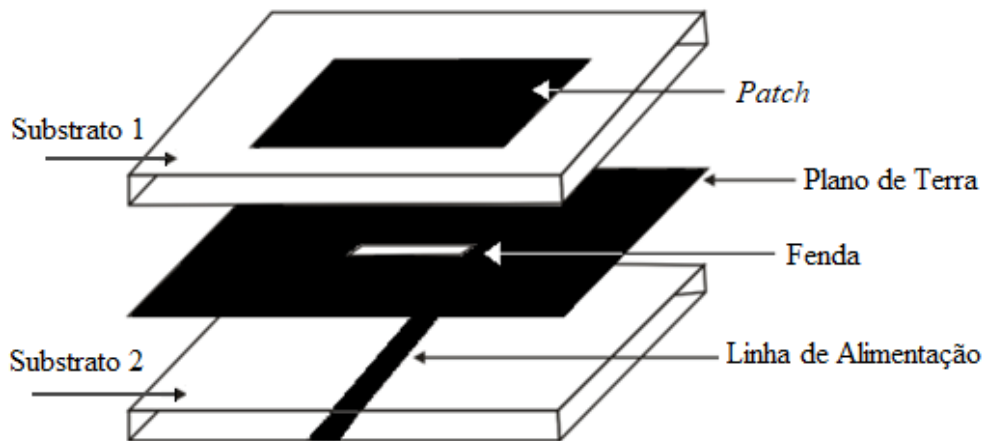
Fonte: FILHO, 2010.

Essa alimentação possui como vantagem o casamento da impedância de entrada, ocorrendo através do posicionamento do ponto de alimentação. Entretanto, apresenta largura de banda estreita, e para a implementação de arranjos demanda um grande número de conexões de solda, tornando sua produção difícil e comprometendo seu desempenho. Para substratos mais espessos, este tipo de alimentação apresenta difícil modelagem e fabricação, gerando um problema, pois aumenta a radiação espúria e as ondas de superfície (MEDEIROS, 2013).

2.1.2.3 Acoplamento por Abertura

Diferente dos métodos anteriores que utilizam uma conexão física direta entre as estruturas, o uso de acoplamento suprime a produção de radiação espúria causada pelos modos de ordens superiores. O acoplamento por abertura é constituído por dois substratos separados por um plano de terra que possui uma abertura, como é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Alimentação por acoplamento por abertura de uma antena de microfita.



Fonte: FILHO, 2010.

Na face inferior do substrato 2 existe uma linha de microfita, cuja energia é acoplada ao *patch* por meio de uma fenda existente no plano de terra que separa os dois substratos. Esta forma de alimentação permite um desenvolvimento independente da alimentação e do elemento de radiação, sendo o nível de acoplamento determinado através do formato e localização da fenda. Em geral, o substrato 2 é composto por um material de alta permissividade relativa (ϵ_r), enquanto o substrato 1 é mais espesso e possui uma baixa ϵ_r (AQUINO, 2008).

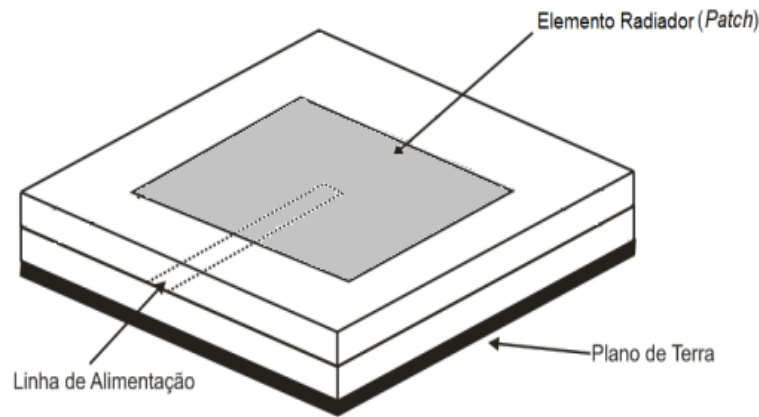
O plano de terra entre os dois substratos isola a alimentação do *patch*, minimizando a radiação espúria e garante pureza de polarização. No entanto, esse método possui uma difícil implementação e estreita largura de banda (SANTOS, 2016).

2.1.2.4 Acoplamento por Proximidade

Esse método de alimentação diferentemente do acoplamento por abertura, não apresenta uma fenda no plano de terra. O *patch* se localiza na parte superior da estrutura, sendo acoplado

a linha de microfita que se encontra inserida entre duas camadas dielétricas, como é mostrado a Figura 15 (AQUINO, 2008).

Figura 15 - Alimentação por acoplamento por proximidade de uma antena de microfita.



Fonte: FILHO, 2010.

O uso da dupla camada de substratos resulta num aumento da espessura total, além de proporcionar um efeito capacitivo na antena, possibilitando maiores larguras de bandas e reduzindo a radiação espúria (EZQUERRO, 2015). Segundo Moraes (2011), dentre as quatro técnicas de alimentação mencionadas, a de acoplamento por proximidade apresenta a maior largura de banda, possuindo uma modelagem simples. No entanto, os substratos precisam ser alinhados corretamente dificultando a montagem da estrutura.

2.1.3 Arranjo de Antenas

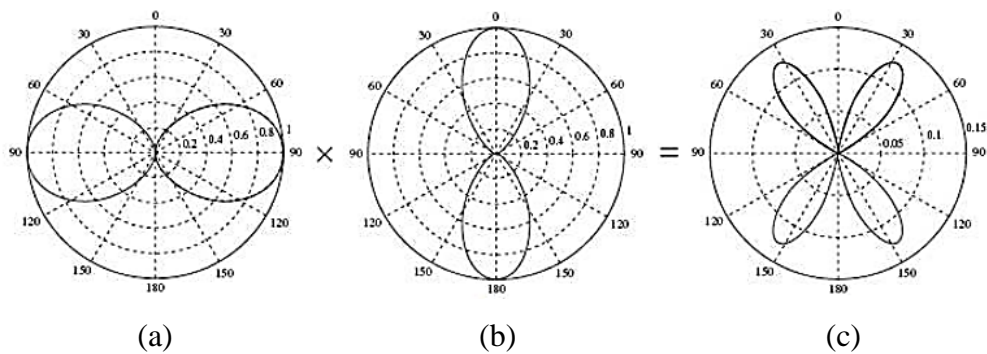
Em elementos simples (um único *patch*), quando certas características como ganho, diretividade e largura de feixe de meia-potência nem sempre são adequados para aplicações práticas, utiliza-se arranjos para tal problema (ALVES, 2008).

Arranjo de antenas é um conjunto formado por duas ou mais antenas iguais entre si (elementos do arranjo), que associa os sinais destes elementos para formar a saída. O campo total do arranjo é determinado pela soma dos vetores dos campos radiados de cada elemento, assumindo que a corrente é igual a todos. Para produzir padrões de radiação mais diretivos é preciso que os campos interfiram construtivamente na direção desejada e destrutivamente nas demais direções. Na realidade isto pode ser somente aproximado, logo que há interferências entre os próprios elementos e entre eles e o restante da estrutura da antena (FILHO, 2010).

A direção de máxima radiação do arranjo, e por consequência seu ganho máximo, pode ser controlada eletronicamente pelo ajuste da fase do sinal de alimentação nos diferentes elementos. Esta fase induzida é ajustada de forma que os sinais em uma dada direção, na qual se deseja máximo ganho, são somados em fase. Isso resulta em um ganho do arranjo, que é aproximadamente a soma dos ganhos individuais dos elementos naquela direção (MAIA, 2013).

A obtenção do diagrama de radiação resultante de um arranjo de antenas é um processo conhecido por multiplicação de diagramas, que consiste na multiplicação do diagrama de um único elemento pelo fator de arranjo (FA). Sendo uma ferramenta a ser utilizada no projeto de antenas. Enquanto o diagrama unitário depende do tipo de elemento radiante que é usado no arranjo, o diagrama do arranjo independe do tipo do elemento, desde que o espaçamento entre elementos, a diferença de fase e a orientação dos elementos se mantenham constantes (MILLIGAN, 2005). A multiplicação de diagramas é ilustrada na Figura 16, onde na Figura 16-a é observado o diagrama de potência para o dipolo isolado. Na Figura 16-b é apresentado o diagrama de potência para o fator de arranjo e pela Figura 16-c a multiplicação dos dois diagramas.

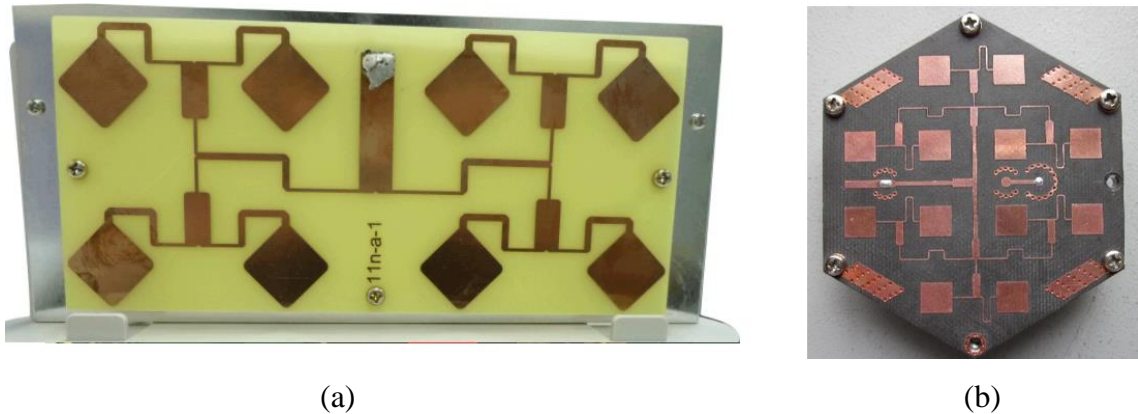
Figura 16- (a) Diagrama unitário. (b) Diagrama do arranjo. (c) Diagrama resultante.



Fonte: Adaptado ALVES, 2008

Na Figura 17 são ilustrados arranjos de antenas de microfita, a Figura 17-a têm-se um arranjo composto por oito elementos projetado para operar em uma frequência de 5,8 GHz, a antenna em questão é aplicada na tecnologia *WLAN* (*Wireless Local Area Network*) e se encontra comercializada. No que concerne a Figura 17-b, é apresentado um arranjo com doze elementos disposto em um substrato hexagonal, o mesmo projetado para faixas de frequência da banda Ku (12 – 18 GHz).

Figura 17- Arranjos de antenas de microfita.(a) aplicada em WLAN para 5.8 GHz, (b) utilizada na banda Ku.



Fonte: (a) WLAN ANTENNA, 2017, (b) LIU *et al.*, 2012

2.1.3.1 Configuração Geométrica dos Arranjos de Antenas

Os arranjos podem ser classificados de acordo com as configurações geométricas, nesta seção será abordado os arranjos lineares e planares. No arranjo linear seus elementos radiadores estão dispostos ao longo de uma linha, enquanto que, no arranjo planar seus elementos estão dispostos em uma grade retangular. Em todos os casos os elementos são constituídos do mesmo material e possuem espaçamento constante entre os elementos adjacentes.

Arranjo Linear

Quando todos os elementos estão espaçados sobre uma linha reta e geralmente apresenta um espaçamento uniforme entre os elementos têm-se um arranjo linear, como apresentado na Figura 18. Para um arranjo linear de N elementos, em um campo distante de fontes isotrópicas ao longo do eixo “z”, exemplificado na Figura 19. O fator de arranjo pode ser obtido considerando os elementos como uma fonte pontual, sendo determinado pela Equação 26. Onde o fator de arranjo é uma função da geometria e da fase da corrente de excitação (BAHL, BHARTIA, 1982).

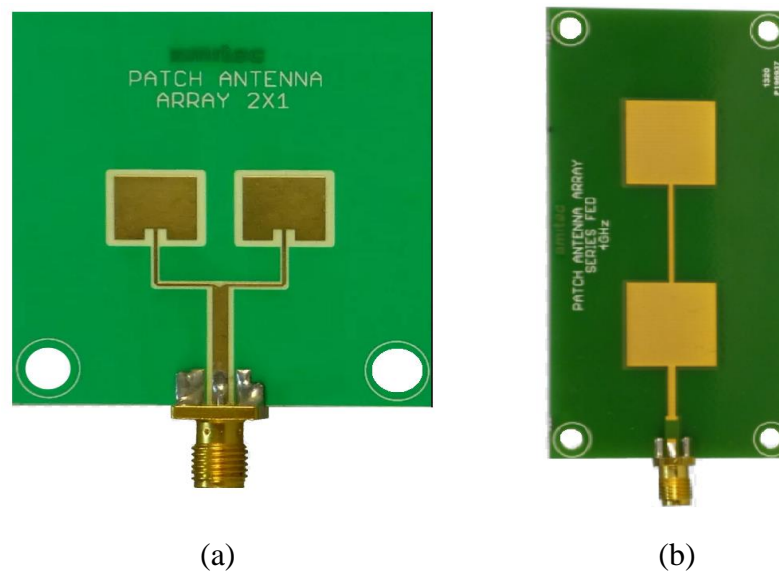
$$FA = 1 + e^{j(kd\cos\theta + \beta)} + e^{j2(kd\cos\theta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd\cos\theta + \beta)} \quad (26)$$

A Equação 26, por sua vez pode ser reescrita como descrito pela Equação 27.

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kdcos\theta+\beta)} \quad (27)$$

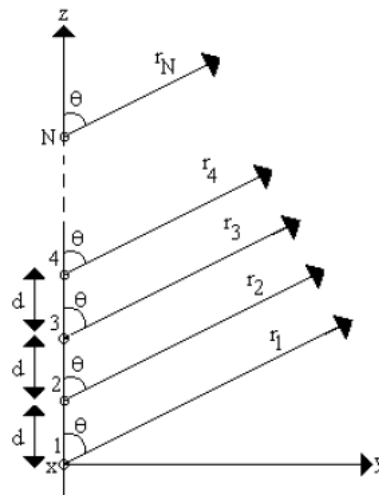
Sendo $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda, d e β são, respectivamente, o espaçamento e o deslocamento de fase entre cada elemento.

Figura 18-Exemplo de Arranjos Lineares. (a) arranjo 1x2, (b) arranjo 2x1.



Fonte: AMITEC, 2015.

Figura 19- Arranjo linear com N elementos.



Fonte: MAIA, 2013.

Realizando-se uma normalização em relação ao número máximo de elementos e tomando como referência um ponto localizado no centro físico do arranjo, o fator de arranjo pode ser reduzido para a Equação 28 (BAHL, BHARTIA, 1982).

$$FA = \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{N}{2} (k d \cos \theta + \beta) \right)}{\text{sen} \left(\frac{1}{2} (k d \cos \theta + \beta) \right)} \right] \quad (28)$$

Supondo que cada elemento do arranjo possui uma corrente de excitação com amplitude unitária, o comportamento do arranjo é dado pela diferença de fase entre os elementos. A fase é diretamente proporcional ao espaçamento entre os elementos em comprimento de onda (ALVES, 2008).

Geralmente é utilizado um espaçamento de no mínimo metade do comprimento de onda ($\lambda/2$), centro a centro de cada elemento para reduzir os efeitos do acoplamento mútuo entre elementos (GARG *et al.*, 2001). Já a fase dos elementos de um arranjo, como mencionado anteriormente, é responsável pelo controle do ganho. Sendo assim, a direção de máxima radiação pode ser ajustada conforme se varia a fase β . Essa mudança na localização do feixe é obtida adicionando deslocadores de fase (*phase shifters*) em cada elemento do arranjo, ou pela assimetria na alimentação (ANDRADE, 2014).

Arranjo Planar

Para a obtenção de ângulos de radiação em duas dimensões, deve ser usado um arranjo planar de elementos radiadores, exemplificado pela Figura 20. Esta geometria de arranjo proporciona maior simetria nos campos radiados, bem como uma maior flexibilidade por dispor de outras variáveis de controle (ALVES, 2008).

O fator de arranjo, em arranjos planares, é feito da seguinte forma. Se M elementos estão dispostos ao longo do eixo x , então o fator de arranjo é dado conforme a Equação 29.

$$FA = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(k d_x \text{sen} \theta \cos \varphi + \beta_x)} \quad (29)$$

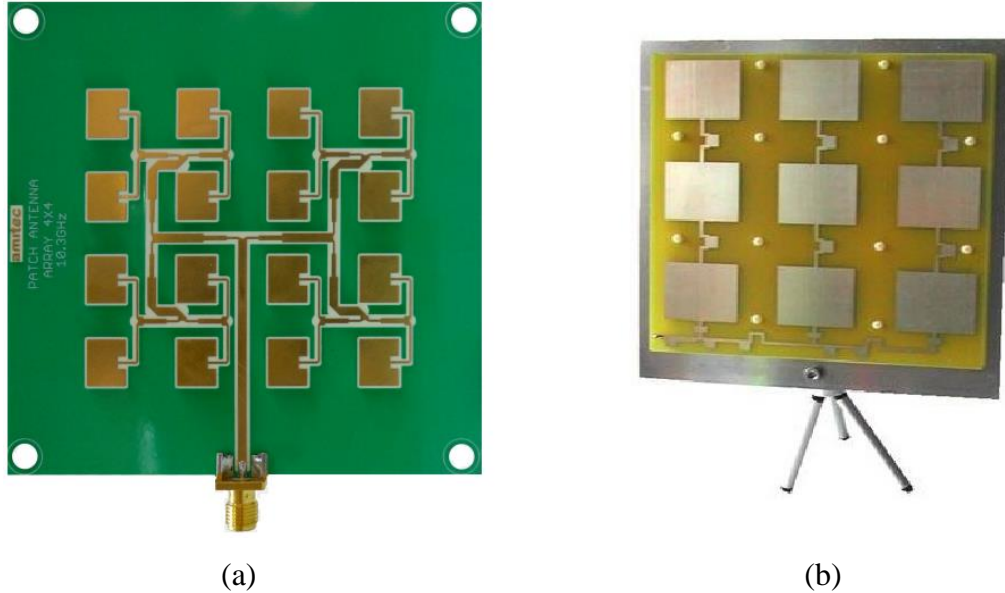
Onde:

I_{m1} = coeficiente de excitação para cada elemento;

d_x = distanciamento entre elementos no eixo x ;

β_x = deslocamento de fase no eixo x.

Figura 20-Exemplo de Arranjos Planares. (a) arranjo 4x4, (b) arranjo 3x3.



Fonte: (a) AMITEC, 2015, (b) FPVHOBBY.COM, 2017.

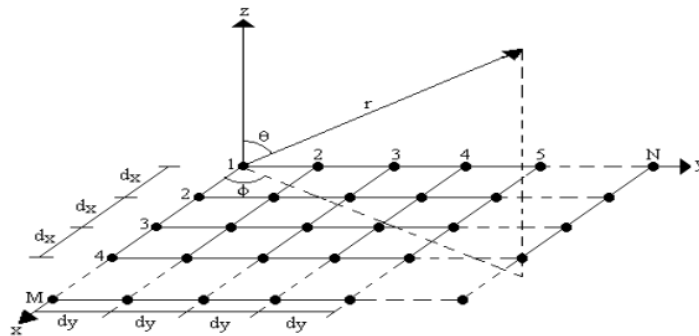
Agora na direção do eixo y, se forem adicionados N arranjos lado a lado, juntamente com seus respectivos distanciamentos d_y e deslocamento fases β_y , um arranjo planar é formado, conforme mostrado na Figura 21, possuindo um fator de arranjo expresso pela Equação 30.

$$FA = \sum_{n=1}^N I_{n1} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} \quad (30)$$

Rearranjando os termos da Equação 50, obtêm-se a Equação 51.

$$FA = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} \quad (31)$$

Figura 21- Geometria de um arranjo planar com MxN elementos.



Fonte: MAIA, 2013.

Onde os índices “x” e “y” representam as variáveis nos correspondentes eixos, pela Equação 31 é mostrado que o fator de arranjo em um arranjo planar é o produto dos fatores nas direções dos eixos “x” e “y” (FILHO, 2010).

Realizando-se uma normalização em relação ao número máximo de elementos nos eixos, obtêm-se uma forma reduzida do fator de arranjo planar, mostrada na Equação 32

$$FA = \left[\frac{1 - \sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{M \sin\left(\frac{1}{2}\psi_x\right)} \right] \left[\frac{1 - \sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{N \sin\left(\frac{1}{2}\psi_y\right)} \right] \quad (32)$$

$$\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x \quad \psi_y = kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y$$

Para obtenção do fator de arranjo nesta configuração foi considerado que cada elemento é uma fonte isotrópica, caso o arranjo possua elementos idênticos, o campo total pode ser obtido pela regra da multiplicação de diagramas.

O lóbulo principal é a forma como se refere o máximo principal, os outros feixes de maior radiação são ditos lóbulos secundários. No arranjo planar o espaçamento entre os elementos, dx e dy, ao longo de seus respectivos eixos, devem ser menores que a metade do comprimento de onda ($\lambda/2$) para evitar a formação de lóbulos secundários (ANDRADE, 2014).

2.1.3.2 Formas de Alimentação

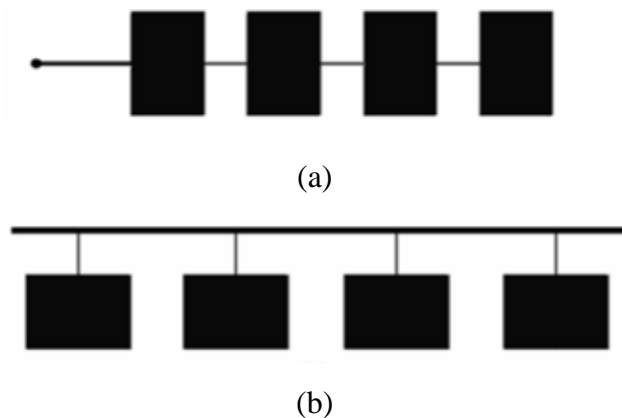
No que diz respeito à alimentação, existem duas maneiras principais de se alimentar os elementos de um arranjo, sendo em paralelo ou em série, bem como também poder ser a combinação das duas.

Alimentação em Série

Consiste em uma linha de transmissão contínua onde a energia se distribui sucessivamente pelos elementos radiantes dispostos ao longo de uma linha. Considerando o comprimento da linha que separa os elementos, o comprimento elétrico variará com a frequência e, posteriormente a defasagem da corrente de alimentação entre elas ocorrerá. Por isto, estas antenas são utilizadas em muitas ocasiões onde a direção do feixe principal varie com a frequência (BHARTIA *et al.*, 2001).

Existem duas formas de alimentação em série, como pode ser observado na Figura 22. A alimentação simétrica, ou em linha, representada na Figura 22-a, todos os elementos são alimentados com a mesma potência e fase, e é independente da frequência. Na Figura 22-b é ilustrado a alimentação assimétrica, ou fora de linha, nesta configuração é permitido o controle da defasagem entre os elementos, e, por conseguinte a direção do feixe principal (EZQUERRO, 2015).

Figura 22- (a) Alimentação em linha. (b) Alimentação fora de linha.



Fonte: EZQUERRO, 2015.

Na alimentação em linha, a conexão entre os *patches* pode ser feita pelo emprego dos transformadores de impedância de um quarto de onda ($\lambda/4$), onde o projeto dos mesmos é abordado na alimentação em paralelo. Calculando a impedância de entrada conforme as Equações 33, 34 e 35, pode-se dimensionar um transformador de um quarto de onda para o casamento de impedâncias entre os elementos.

$$R_E = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (33)$$

$$G_1 = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \text{sen}^3\theta}{120\pi^2} d\theta \quad (34)$$

$$G_{12} = \int_0^\pi \frac{\left[\frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \text{sen}^3\theta}{120\pi^2} J_0(K_0 L \text{sen}\theta) d\theta \quad (35)$$

Onde:

R_E = impedância de entrada;

G_1 = autocondutância da antena;

G_{12} = condutância mútua;

k_0 = número de onda no espaço livre;

J_0 = função de Bessel de primeira ordem e argumento x .

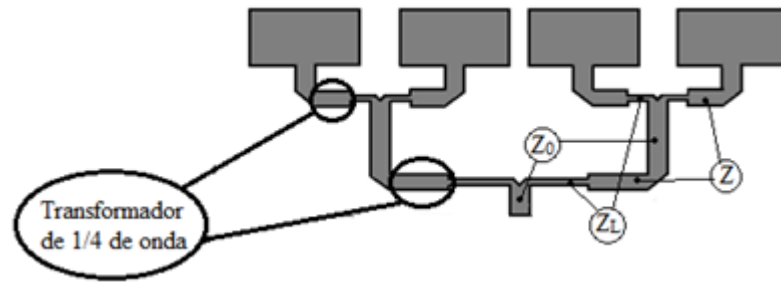
As soluções para essas equações podem ser obtidas através da implementação computacional de métodos numéricos, tais como integração por retângulos, por exemplo. Dessa forma, o valor de R_E , conseqüentemente, possuirá um erro associado em decorrência da aproximação usada pelo método escolhido (JAMES, 1989).

Alimentação em Paralelo

Por outro lado, pode-se alimentar arranjos de antenas microfita em paralelo, sendo de fácil implementação, permitindo ajustar a defasagem entre os elementos do arranjo com uma grande precisão. Para acoplar a impedância da antena à porta de entrada, é comum utilizar transformadores de impedância de um quarto de onda ($\lambda/4$), além dele proporcionar o controle de fase de cada elemento. Na Figura 23 é representada a alimentação em paralelo utilizando linha de microfita.

O projeto do transformador de impedância de um quarto de onda que compõe a rede de alimentação em paralelo é calculado conforme as Equações 37 a 41. Onde para uma dada impedância do transformador de um quarto de onda, a relação entre a largura do mesmo e a espessura do substrato (w/h) pode ser determinada, bem como seu comprimento em função da frequência de projeto e material utilizado (ESTAVÃO; FERREIRA JÚNIOR, 2014).

Figura 23- Alimentação em paralelo.



Fonte: Adaptado ALVES, 2008.

$$Z = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (37)$$

$$\begin{cases} \frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, Z \geq 40\Omega \\ \frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right], Z \leq 40\Omega \end{cases} \quad (38)$$

$$A = \frac{Z\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{120} + 0.5 \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left[\ln\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{\epsilon_r} \ln\left(\frac{4}{\pi}\right) \right] \quad (39)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z\sqrt{\epsilon_r}} \quad (40)$$

$$l = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (41)$$

Onde:

Z = impedância do transformador de um quarto de onda;

Z_0 = impedância característica da linha;

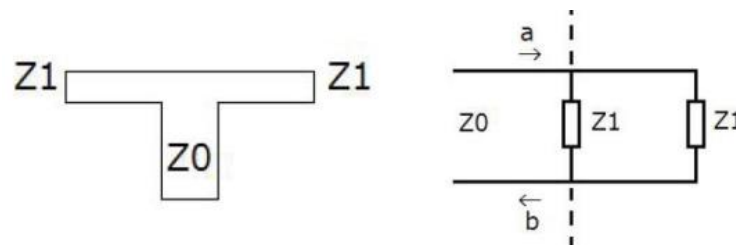
Z_L = impedância da linha a ser casada;

w = largura da linha de alimentação;

l = comprimento do transformador de um quarto de onda.

Para distribuição da energia eletromagnética nos elementos do arranjo em paralelo, faz-se necessário o uso de um divisor de potência de três portas (junção em T), como ilustrado na Figura 24. Com o intuito de dividir a potência igualmente, as impedâncias das linhas a serem casadas (Z_L) devem cumprir a relação demonstrada na Equação 42, conseqüentemente as linhas de microfita terão a mesma largura calculada pela Equação 38 (EZQUERRO, 2015). Por exemplo, se a impedância de entrada (Z_0) for 50Ω , as impedâncias da saída do divisor são de 100Ω , pelo fato de que a impedância equivalente do paralelo seja de 50Ω para máxima transferência de potência.

Figura 24- Ilustração do divisor de potência de 3 portas e seu circuito equivalente.



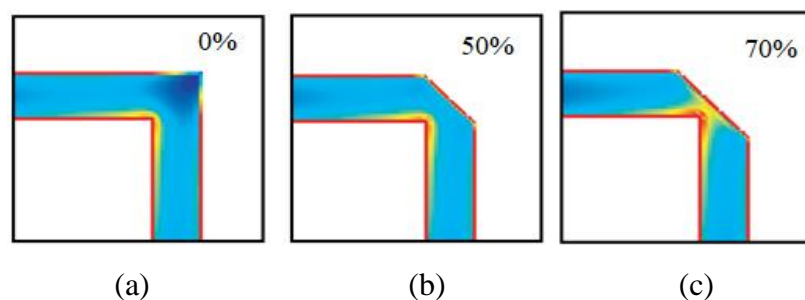
Fonte: EZQUERRO, 2015

$$S_{11} = \frac{b}{a} = \frac{Z_1 \parallel Z_1 - Z_0}{Z_1 \parallel Z_1 + Z_0} = 0 \rightarrow Z_1 \parallel Z_1 = Z_0 \quad (42)$$

Na rede de alimentação, os locais onde se tem uma curva na linha de microfita, o fluxo de corrente em torno do canto é crítico. Segundo Swanson e Hoefler (2003), na curva da linha de microfita, a corrente tende a ir pelo caminho mais curto, incrementando o fluxo na borda interna da curva tornando o fluxo na borda externa quase nulo, como pode ser visto na Figura 25-a. Desse modo, para um melhor casamento de impedância entre a rede de alimentação e a entrada, chanfros são inseridos nos cantos a fim de minimizar os efeitos capacitivos e o franjamento, reduzindo o aumento do comprimento elétrico e consequentemente uma diminuição da impedância da linha de alimentação (EDWARDS; STEER, 2016).

De acordo com as Figuras 25-b e 25-c, à medida que o tamanho do chanfro aumenta, a densidade de corrente na curva aumenta, isso devido a remoção do metal que reduz a capacitância e intensifica o efeito indutivo (SWANSON; HOEFER, 2003).

Figura 25- Condução de corrente em curvas de microfita. (a) sem chanfro, (b) 50% chanfrado, (c) 70% chanfrado.



Fonte: SWANSON; HOEFER, 2003.

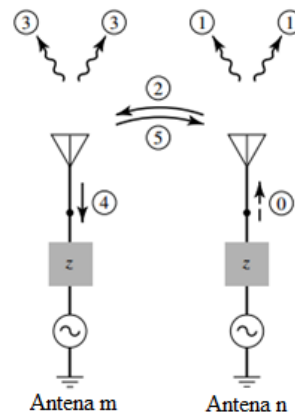
2.1.3.3 Acoplamento Mútuo

Quando duas antenas estão próximas umas das outras, e uma ou ambas estão transmitindo ou recebendo algum sinal eletromagnético, parte da energia radiada de cada uma será recebida pela outra por causa das características direcionais não orientadas, que intervêm nas características da outra antena, esta permuta de energia é conhecida como acoplamento mútuo, e em muitos casos complica a análise e o projeto de uma antena. Esta interferência depende das características de radiação de cada elemento, a separação relativa entre os elementos, a orientação relativa de cada e a alimentação dos mesmos. Esses parâmetros influenciam o desempenho do arranjo variando a impedância do elemento, os coeficientes de reflexão e o padrão geral da antena (BALANIS, 2009).

Na Figura 26 é demonstrado de forma simplificada o processo de acoplamento mútuo, supondo que duas antenas “m” e “n” de um arranjo estão posicionadas uma em relação à outra como mostrado. O mecanismo pode ser entendido no momento que uma fonte for anexada à antena “n”, o sinal gerado (0) em direção à antena, será radiado para o espaço (1) e em direção à antena “m” (2). O incidente de energia na antena “m” gera correntes que tendem a refletir uma parte da energia (3) e permitem que o restante se mova em direção ao gerador da antena “m” (4). Alguma parte da energia refletida (3) pode ser redirecionada de volta em direção à antena “n” (5). Esse processo pode continuar indefinidamente, o mesmo processo ocorreria se a antena “m” estiver excitada e a antena “n” for o elemento parasita (BALANIS, 2009).

Se ambas as antenas, m e n, são excitadas simultaneamente, os campos radiados e refletidos por cada um devem ser adicionados vetorialmente para chegar ao campo total em qualquer ponto. Assim, a contribuição total para o campo distante de um elemento particular no arranjo depende não apenas da excitação fornecida por seu próprio gerador (excitação direta), mas também sobre a excitação parasita total, que depende dos outros geradores (ALLEN; DIAMOND, 1966).

Figura 26- Processo de acoplamento mútuo

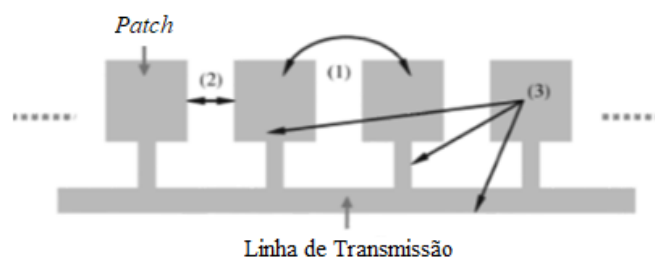


Fonte: BALANIS, 2009.

No projeto de arranjos de antenas de microfita, deve-se considerar os efeitos e um estudo do acoplamento mútuo entre os elementos de antena microfita, bem como o restante dos componentes do arranjo, pois estes efeitos produzem uma avaliação errada da impedância de entrada, deformação do padrão de radiação e perda da eficiência. Na Figura 27 é ilustrado os tipos de acoplamento mútuo que ocorrem em um arranjo de antenas (LEE; LUCK, 2011).

- 1- Radiação livre onda e acoplamento da onda de superfície entre os elementos.
- 2- Acoplamento de franjamento entre elementos adjacentes.
- 3- Acoplamento entre um elemento e a rede de alimentação da estrutura da antena

Figura 27- Tipos de acoplamento mútuo presentes em um arranjo de antenas.



Fonte: EZQUERRO, 2015

O efeito do acoplamento mútuo pode ser bastante prejudicial em determinadas aplicações. Conforme Gupta e Ksienski (1983), o efeito do acoplamento mútuo é bem evidenciado quando o espaçamento entre os elementos de um conjunto de antenas reduz para menos de meio comprimento de onda.

2.1.4 Métodos de Análise e Projeto

Dados os parâmetros físicos de uma antena de microfita é necessário utilizar métodos que produzam uma aproximação numérica a respeito de suas propriedades. Diversos são os métodos de análise relatados na literatura para caracterização da antena, dependendo da precisão e a simplicidade desejada é possível selecionar o método que mais se ajuste às necessidades. Esses métodos podem ser divididos em três grupos (FILHO, 2010).

No primeiro grupo se encontram os modelos de onda completa, baseados na distribuição de corrente elétrica no *patch* e no plano de terra. Esse modelo possui formulações matemáticas complexas e, por consequência, menor esforço computacional, fornecendo resultados mais precisos, principalmente em altas frequências (VASCONCELOS, 2006; FEITOZA, 2005). No segundo grupo estão os de métodos numéricos que são menos precisos, exigem maior esforço computacional e menor analítico. Entre os métodos numéricos relacionados aos modelos de onda completa se destacam: Método dos Momentos (*MoM – Method Of Moments*), Métodos dos Elementos Finitos (*FEM – Finite Element Method*), Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*FDTD – Finite Difference Time Domain*) e Método Iterativo baseado no Conceito das Ondas (*WCIP – Wave Concept Iterative Procedure*).

No terceiro grupo estão os modelos aproximados, que são fundados na distribuição de corrente magnética equivalente ao redor das margens do *patch*. Dessa maneira, o mecanismo de radiação nas antenas de microfita é simplificado e as perdas associadas à propagação de ondas de superfície e a dispersão são desconsideradas (FILHO, 2010). Estes modelos podem atingir um bom nível de precisão para uma faixa de frequência de operação menor que 30 GHz (EZQUERRO, 2015). Entre os principais modelos aproximados estão: Modelo de Linha de Transmissão (*TLM – Transmission Line Method*), Modelo de Rede Multiporta (*MNM – Multiport Network Model*) e o Modelo da Cavidade.

Dentre os modelos citados, foram brevemente descritos dois dos modelos aproximados mais usuais devido sua simplicidade de cálculo e resultados satisfatórios para as faixas de frequência abordadas neste trabalho, são eles o *TLM* e o Modelo da Cavidade.

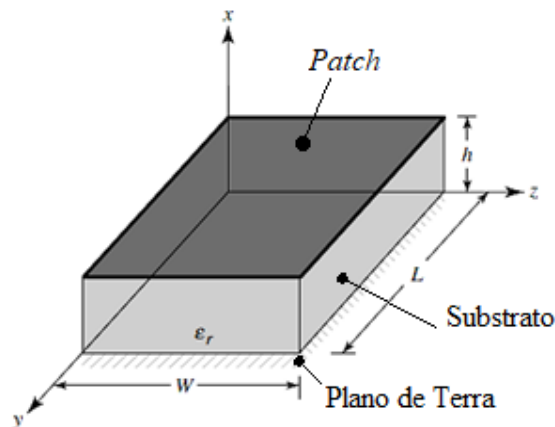
2.1.4.1 Modelo da Cavidade

Um modelo útil na predição das características de radiação é o modelo da cavidade, que basicamente assemelha a antena como uma cavidade composta por paredes elétricas, na face superior e inferior, e por paredes magnéticas nos contornos laterais do *patch*, dessa forma os

campos no interior do substrato podem ser determinados com maior precisão (BALANIS, 2008). Os campos nas antenas são considerados como os campos da cavidade, sendo expandidos em termos de modos ressonantes na cavidade, cada um com sua frequência de ressonância. Este modelo pode ser utilizado para diversas geometrias regulares até determinados valores de frequência, pois à medida que a frequência aumenta, a precisão desses modelos é reduzida (FILHO, 2010).

Pelo modelo da cavidade é possível demonstrar que uma antena de microfita retangular pode ser representada como um conjunto de duas estreitas aberturas (fendas) radiantes, cada uma com largura W e altura h , separadas por uma distância L , como é ilustrado na Figura 28.

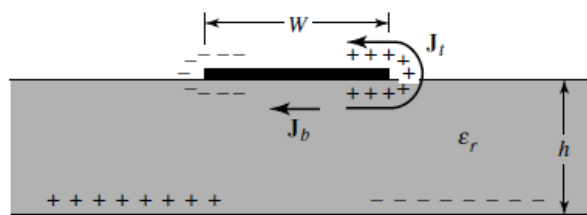
Figura 28 - Geometria de uma plaqueta retangular de microfita para o modelo da cavidade.



Fonte: BALANIS, 2009.

A partir do momento em que a antena é energizada, estabelece-se uma distribuição de cargas nas superfícies inferior (J_b) e superior (J_t) do *patch*, da mesma forma que na superfície do plano de terra, como ilustra a Figura 29.

Figura 29 - Distribuição de cargas e densidade de corrente na antena de microfita.



Fonte: BALANIS, 2009.

Essa distribuição é controlada por dois mecanismos: um atrativo, entre as cargas de sinais opostos existentes entre o plano de terra e a parte inferior do *patch*; e um repulsivo, entre as cargas de mesmo sinal na superfície inferior do *patch*, que direciona as cargas para as bordas de sua face superior (RICHARDS, 1988). Essa movimentação de cargas cria densidades de corrente (J_t e J_b) nas superfícies do *patch*. Segundo Balanis (2009), devido a pequena razão entre a espessura e a largura da maioria das microfita, o mecanismo atrativo se sobressai, e a maior parte da concentração de cargas se estabelece na superfície inferior do *patch*. No entanto, uma pequena parte flui das bordas para a face superior do *patch*, mas esse fluxo reduz a medida que a relação entre espessura e largura diminui, se aproximando de um modelo ideal onde não existiria componentes tangenciais de campo magnético.

Se a antena de microfita fosse modelada apenas tratando-a como uma cavidade, não seria capaz de determinar as amplitudes dos campos elétrico e magnético, pois feitas as considerações sobre as paredes da cavidade, bem como um dielétrico sem perdas dentro dela, a cavidade não radiaria e sua impedância seria puramente reativa. O método evita esse problema adicionando um mecanismo de perda, levando em consideração uma tangente de perdas efetiva (δ_{reff}) escolhida apropriadamente de modo que represente as perdas da cavidade (BALANIS, 2009).

Devido à estreita espessura da microfita, os campos ao longo dessa espessura são considerados constantes e o efeito de franjamento dos campos nas bordas são mínimos, desse modo o campo elétrico é quase normal a superfície do *patch*. Assim, apenas as configurações de modo TM_x são consideradas no interior da cavidade (BALANIS, 2009).

O perfil dos campos no interior da cavidade pode ser descrito aproximadamente através do potencial vetorial, considerando o material dielétrico do substrato truncado e não estendido além das bordas do *patch*. O potencial do vetor A_x deve satisfazer a equação de onda homogênea (Equação 43) utilizando a técnica de separação de variáveis.

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (43)$$

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \text{sen}(k_x x)] [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \text{sen}(k_y y)] [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \text{sen}(k_z z)] \quad (44)$$

Onde k_x , k_y e k_z são os números de onda ao longo das direções x , y e z , respectivamente, que são determinados a partir das condições de contorno apresentadas nas Equações 48, 49 e

50. Os campos elétricos e magnéticos no interior da cavidade são relacionados pelo potencial vetorial através das Equações 45, 46 e 47 (BALANIS, 2009):

$$E_x = j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x \quad H_x = 0 \quad (45)$$

$$E_y = j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right) \quad H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \quad (46)$$

$$E_z = j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \right) \quad H_z = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (47)$$

$$E_y(x'=0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = E_y(x'=h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (48)$$

$$H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=0) = H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=W) = 0 \quad (49)$$

$$H_z(0 \leq x' \leq h, y'=0, 0 \leq z' \leq W) = H_z(0 \leq x' \leq h, y'=L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (50)$$

Onde os termos x' , y' e z' , são usados para representar os campos no interior da cavidade. Aplicando-se as condições de contorno, é possível encontrar os números de onda, determinados pelas Equações 51, 52 e 53.

$$k_x = \left(\frac{m\pi}{h} \right), m = 0, 1, 2, \dots \quad (51)$$

$$k_z = \left(\frac{p\pi}{W} \right), p = 0, 1, 2, \dots \quad (52)$$

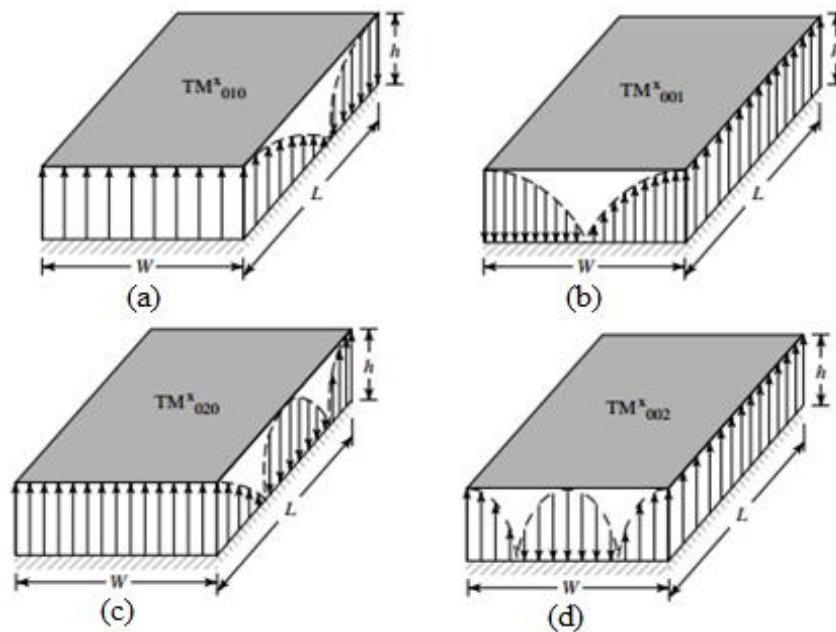
$$k_y = \left(\frac{n\pi}{L} \right), n = 0, 1, 2, \dots \quad (53)$$

Onde m , n , p são diferentes de zero e representam, nessa ordem, o número de variações do campo em meio período ao longo das direções x , y , z . Segundo Balanis (2009), como os números de onda são sujeitos a equação de separação, as frequências de ressonância da cavidade são dadas pela Equação 54.

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W} \right)^2} \quad (54)$$

Com a variação dos valores de m , n e p , a frequência de ressonância também varia, possibilitando diversos modos de operação relacionados a cavidade. Na Figura 30 é ilustrado os modos para os casos TM^x_{010} , TM^x_{001} , TM^x_{020} e TM^x_{002} , podendo ser observado o comportamento do campo elétrico no perímetro da cavidade, considerando que nenhum efeito de franjamento ocorra durante a alimentação da antena (BALANIS, 2009).

Figura 30- Modos de operação TM^x , (a) TM^x_{010} , (b) TM^x_{001} , (c) TM^x_{020} , (d) TM^x_{002} .



Fonte: BALANIS, 2009

2.1.4.2 Modelo da Linha de Transmissão

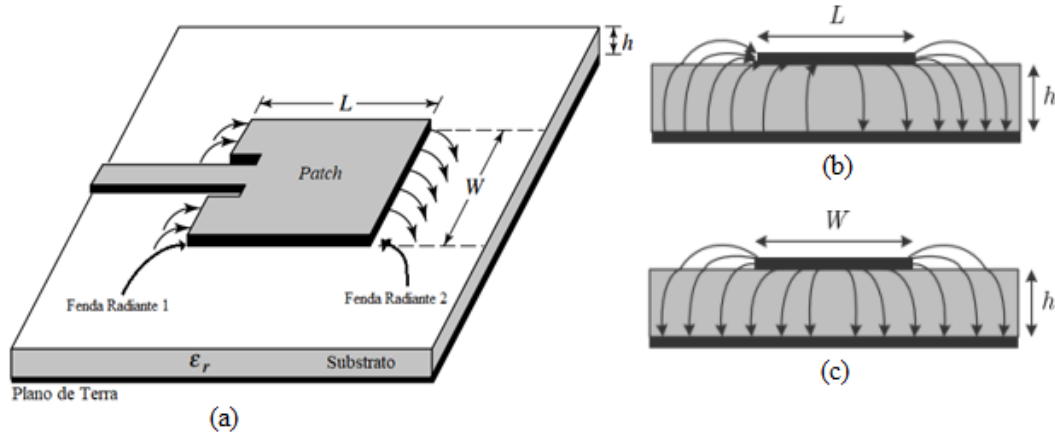
O Modelo da Linha de Transmissão é o método mais simples dos listados e menos preciso, porém o mesmo provê uma boa aproximação física, possibilitando a determinação de diversos parâmetros da antena, tais como a frequência de ressonância, o diagrama de radiação e a impedância de entrada (FILHO, 2010).

Neste modelo, o *patch* e a alimentação são modelados por seções de linha de transmissão, proporcionando uma facilidade em obter-se o casamento de impedância da estrutura, sendo mais recomendado para antenas que tenham o *patch* quadrado ou retangular (SANTOS, 2016).

O modelo da linha de transmissão representa a antena de microfita por duas fendas separadas por uma linha de transmissão de comprimento L , como ilustra a Figura 31-a. Este método leva em consideração os efeitos de borda nas fendas radiantes, causado pelo *patch*

possuir dimensões finitas, a quantidade deste efeito é função das dimensões da antena (*patch* e substrato) e do material do substrato (SILVA, 2014).

Figura 31- Antena de microfita retangular. (a) fendas radiantes separadas por L , (b) vista ao longo do comprimento e (c) vista ao longo da largura.

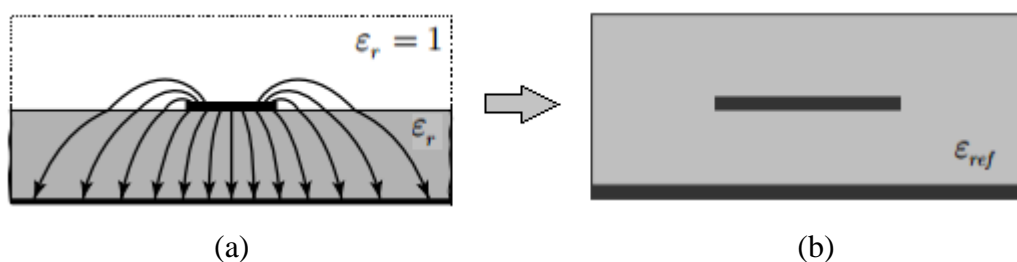


Fonte: Adaptado de BALANIS, 2009.

Considerando a antena alimentada por linha de microfita da Figura 31, quando os campos eletromagnéticos que se propagam na linha encontram uma descontinuidade (início do *patch*), assim são gerados campos de fuga (françamento) em razão da mudança de largura da microfita. Esses efeitos de franja armazenam energia e são modelados por susceptâncias (B), como também, parte desses campos radia potência o que é representado por uma condutância (G) (SANTOS, 2016).

O efeito de françamento faz com que as linhas de campos circulem tanto pelo substrato como o ar, ocasionando um aumento nas dimensões elétricas da antena de microfita. Desse modo, esse efeito requer a modelagem de uma permissividade efetiva (ϵ_{ref}) que leva em consideração as permissividades de ambos os meios, como visto na Figura 32.

Figura 32- Modelagem da permissividade efetiva. (a) meios distintos (ar e substrato), (b) meio uniforme.



Fonte: Adaptado BALANIS, 2009.

Considerando que a largura do *patch* é maior que a espessura do substrato ($W/h > 1$), a permissividade efetiva é calculada conforme a Equação 55 (BALANIS,2009).

$$\epsilon_{\text{ref}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (55)$$

Onde:

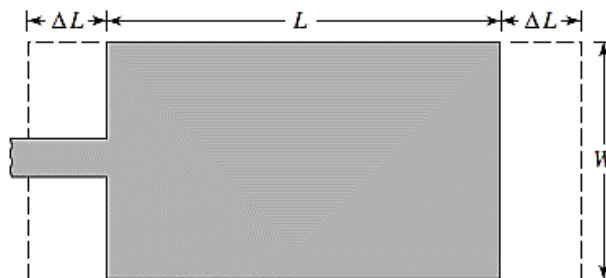
ϵ_r = permissividade relativa do substrato;

h = espessura do substrato;

W = largura do *patch*.

Devido do efeito de franjamento, o *patch* tem suas dimensões elétricas maiores que as dimensões físicas. Na Figura 33 é possível observar as dimensões acrescidas no *patch*, ao longo do seu comprimento é incrementado uma distância ΔL em cada extremidade.

Figura 33 - Comprimento físico e efetivo de um *patch* retangular.



Fonte: BALANIS, 2009.

Segundo Hammerstad (1975), a extensão normalizada do comprimento pode ser calculada através da Equação 56.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{ref}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{ref}} + 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (56)$$

Onde:

ΔL = variação do comprimento da antena.

Com base nas Equações 55 e 56, pode-se calcular os demais parâmetros de projeto de antenas de microfita de *patch* retangular, assumindo que se tenha as seguintes especificações:

frequência de ressonância (f_r), espessura do substrato (h) e constante dielétrica do substrato (ϵ_r). Assim, para valores de largura e comprimento são utilizadas as Equações 57 e 58 (BAHL; BHARTIA, 1980).

$$W = \frac{1}{2f_r \cdot \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (57)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \cdot \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (58)$$

Onde:

L = comprimento do *patch*;

f_r = frequência de ressonância;

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo;

ϵ_0 = permissividade elétrica no vácuo.

De modo a evitar perdas no sinal aplicado em uma linha de transmissão, ou seja, para evitar reflexão do sinal emitido, um fator fundamental é o casamento de impedância. As diversas técnicas para essa avaliação são baseadas no teorema de máxima transferência de potência entre a alimentação e o elemento radiante (BOYLESTAD, 2010). Há diversas técnicas que podem ser utilizadas em antenas de microfita para minimizar os efeitos do descasamento de impedância, como por exemplo: acoplamento por proximidade, por linha de microfita, através da utilização de *inset fed*, inserção de elementos parasitas na antena, entre outras técnicas (SILVA, 2014). As técnicas de casamento de impedância por linha de microfita e *inset fed* são abordadas a seguir.

Linha de Microfita

A alimentação através de linha de microfita pode ser usada como técnica para o casamento de impedância (SILVA, 2014). Desde que se considere a permissividade elétrica efetiva, o comprimento da linha de alimentação deve ser menor ou igual a 1/4 do comprimento de onda da maior frequência de ressonância da antena (POZAR, 2012), sendo obtida através da Equação 59.

$$L_0 = \frac{c}{4f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (59)$$

Onde:

c = velocidade da luz no vácuo;

L_0 = comprimento da linha de microfita.

A Equação 60, mostra, como é determinada, a largura W_0 da linha de microfita segundo Balanis (2009).

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

Onde:

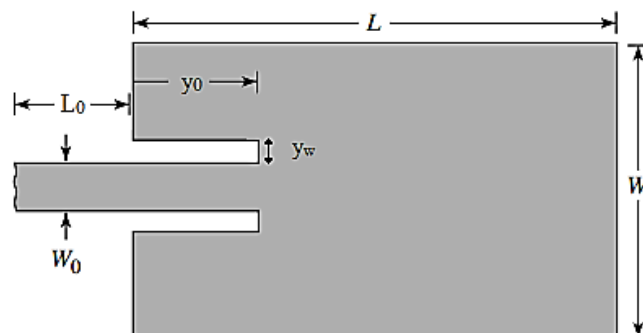
Z_0 = impedância da linha de microfita;

W_0 = largura da linha de microfita.

Inset Fed

O *inset fed*, é um método de casamento de impedância aplicado às antenas de microfita onde são inseridas duas fendas retangulares paralelas à linha de alimentação, como ilustra a Figura 34. Essas fendas são dimensionadas com espessuras iguais a da camada condutora do ressoador e com comprimentos e larguras definidas de acordo com a modelagem aplicada (GUERRA, 2016).

Figura 34 - *Inset Fed* aplicado ao *patch* de uma antena de microfita.



Fonte: Adaptado de BALANIS, 2009.

O comprimento y_0 do *inset fed*, pode ser determinado através da Equação 61, para valores de permissividade $2 \leq \epsilon_r \leq 10$, a fim de aproximar a impedância de entrada da linha de microfita ao valor de 50Ω (RAMESH e YIP, 2003).

$$y_0 = 10^4 (0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697) \frac{L}{2} \quad (61)$$

A dimensão da largura (y_w) do *inset fed* pode ser calculada de acordo com a Equação 62 (MATIN e SAYEED).

$$y_w = \frac{c}{\sqrt{2\epsilon_{ref}}} \frac{4,65 \times 10^{-12}}{f_r} \quad (62)$$

No entanto, a largura da fenda pode variar de acordo com o projeto, sendo utilizada a mesma largura da linha de transmissão (W_0) (ARAÚJO *et al.*, 2011), a metade da largura W_0 (LUNA *et al.*, 2013) ou até a quadragésima parte da largura da linha de transmissão ($W_0/40$) (MATIN e SAYEED, 2010). A estimativa de qual proporção utilizar geralmente é feita através de simulações em *softwares* utilizando como base os resultados encontrados na literatura ou através da Equação 45.

3 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

3.1 HISTÓRIA DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

A ideia de se desenvolver aeronaves não tripuladas para as mais diversas aplicações surgiu, inicialmente, das necessidades militares, visando a execução de missões que ofereciam riscos à vida humana. Somente com o progresso nas áreas de processamento de dados e miniaturização dos componentes eletrônicos foi possível desenvolver Veículos Aéreos Não Tripulados (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicles - UAV's*) para aplicações militares (ARMADA, 2004).

Os modelos iniciais dos VANT's eram rudimentares e operacionalmente limitados, pois o seu desenvolvimento estava focado nos aspectos mecânicos. Em 1914, Elmer Sperry ficou conhecido por demonstrar a Marinha dos Estados Unidos da América o primeiro voo não tripulado utilizando um torpedo aéreo naval, controlando os problemas como estabilização, navegação automática e controle remoto (COSTA, 2015).

Em 1935, foi desenvolvido por Reginald Denny o RP-1, como pode ser visto na Figura 35, o primeiro VANT rádio controlado. Também desenvolvidos no período entre guerras, o DH.82B *Queen Bee* foi outro dos VANT's rádio controlados com o propósito de servir de alvo para missões de treinamento de atiradores da Real Marinha Britânica (MEDEIROS, 2007).

Figura 35- RP-1, primeiro VANT rádio controlado.



Fonte: MEDEIROS, 2007

Durante a Segunda Guerra Mundial, surgiu o Buzz Bomb, mostrado na Figura 36, tinha como objetivo atacar alvos não militares, possuindo um sofisticado sistema de orientação construído por barômetros e giroscópios (COSTA, 2015).

Figura 36 - Modelo Buzz Bomb, Paris, Museu do Exército



Fonte: COSTA, 2015.

Nesta área, os propósitos militares proporcionaram os maiores avanços, como por exemplo, o próprio início da aerofotogrametria e do sensoriamento remoto de forma geral. O uso militar motivou o desenvolvimento dos primeiros VANT's para sensoriamento remoto, visto que os mesmos coletavam informações privilegiadas de forma rápida e sorrateira (IEEE, 2009). Com o contínuo crescimento dos VANT's, nos dias atuais, usos científicos e civis têm sido desenvolvidos com os mesmos, nos quais podem apresentar vantagens, tanto técnicas como econômicas, em relação a diferentes campos de desempenho. Na maioria destas aplicações desenvolvidas, os VANT's são projetados como suporte para embarcar sensores remotos para obtenção de imagens e dados da superfície terrestre (LONGHITANO, 2010). Algumas destas aplicações em que estão sendo empregados são listados na Tabela 2.

Tabela 2- Aplicações dos VANT's

Setor	Uso
Agrícola	Monitoramento do crescimento de pragas, aplicação de pesticidas e fertilizantes
Pesquisas Climáticas	Coleta de dados atmosféricos
Exploração de Minérios	Reconhecimento aéreo em locais de difícil acesso
Guarda costeira e policiamento urbano	Monitoramento aéreo de fronteiras, costas e vias públicas
Energia	Monitoramento de linhas de transmissão
Televisão e cinema	Tomadas aéreas
Entretenimento	Brinquedo, aerodelismo, etc
Telecomunicações	Plataforma retransmissora de sinais

Fonte: PAULA, 2012

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS VANT'S

Os VANT's assim como outras aeronaves tripuladas possuem diversas classificações, formatos, tamanhos dependendo da aplicação em que ele é empregado. Em questão de peso, autonomia, alcance e altitude, eles podem ser divididos como demonstrado na Tabela 3.

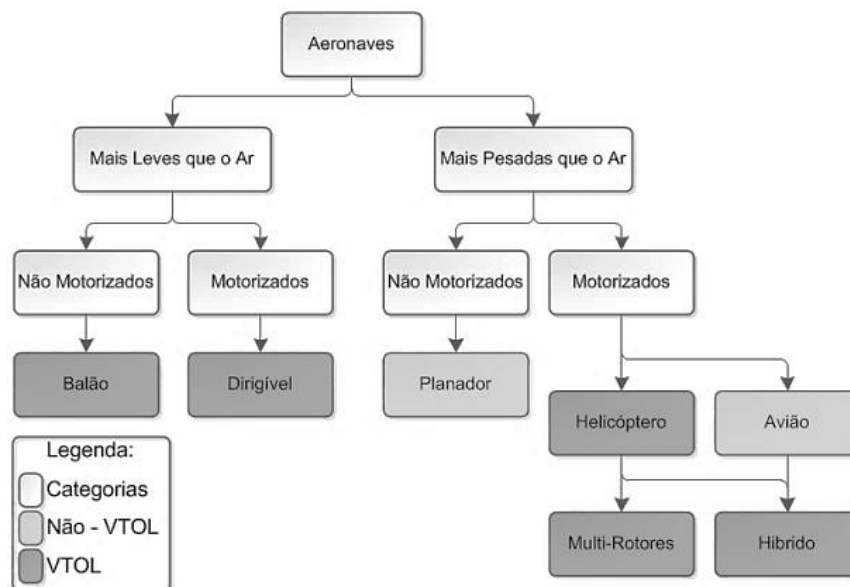
Tabela 3- Categorias dos VANT's

Categorias	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 Velocidade	LADP UAV	>250	50-9000	0,5-1	350
Baixa Altitude Longa Autonomia	LALE UAV	>500	14000	>24	<30
Alta Altitude Longa Autonomia	HALE UAV	>2000	20000	24-48	4500-12000

Fonte: RC GROUPS, 2010.

Os VANT's também podem ser classificados de acordo com o princípio de voo e modo de propulsão. De modo geral há duas classes, os mais leves que o ar e os mais pesados que o ar, e dentro delas existem as subclasses, motorizados e não motorizados. A Figura 37 mostra um diagrama das classificações baseado no princípio de voo e modo de propulsão (BOUABDALLAH *et al.*, 2004).

Figura 37- Classificação das aeronaves segundo princípio de voo e propulsão.



Fonte: PAULA, 2012

Aeronaves classificadas como *VTOL* (*Vertical Take-Off and Landing*) possuem a capacidade de decolar ou aterrissar verticalmente, possuindo baixa velocidade de cruzeiro. As que não possuem tal capacidade necessitam atingir uma certa velocidade horizontal mínima para poder decolar ou aterrissar, necessitando assim de um maior espaço para isso, entretanto possuem uma alta velocidade de cruzeiro. Aeronaves híbridas podem decolar e aterrissar de maneira vertical (*VTOL*) e durante o voo mudar o modo de operação para obter uma maior velocidade de cruzeiro, contudo possuem sistemas mecânicos complexos e caros (PAULA, 2012).

No quesito de utilização civil, comercial ou experimental, os VANT's têm de cumprir com certas condições a fim de não interferirem com a aviação atual. Os fabricantes deste tipo de tecnologia têm que cumprir normas de segurança de maneira a não interferirem com outros utilizadores e têm de ser emitidas licenças que autorizem a utilização dos VANT's (COSTA, 2015).

No Brasil, a ANAC aprovou em 2 de maio de 2017, o regulamento especial para utilização de aeronaves não tripuladas, tendo como objetivo tornar viável as operações, preservando-se a segurança das pessoas. As operações com aeronaves não tripuladas devem seguir as novas normas da ANAC que são complementares aos normativos do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) e ANATEL. Esta nova norma dividiu as aeronaves não tripuladas em aeromodelos, drones utilizados para fins recreativos, e aeronaves remotamente pilotadas (*RPA*), drones utilizados para operações comerciais, corporativas ou experimentais. Os *RPA*'s foram divididos em três classes, de acordo com o peso máximo de decolagem, na Tabela 4 está descrita a classificação dos mesmos.

Tabela 4- Classificação dos *RPA*'s

Classe	Peso de Decolagem	Exigências de Aeronavegabilidade
1	Acima de 150 Kg	Equipamentos desse porte deverão ser certificados, registradas no Registro Aeronáutico Brasileiro e pilotos deverão possuir Certificado Médico Aeronáutico (CMA), licença e habilitação.
2	Maior do que 25 Kg e menor igual do que 150 Kg	Aeronaves não precisam ser certificadas, os fabricantes devem observar os requisitos exigidos e ter projeto aprovado pela agência.
3	Abaixo ou igual a 25 Kg	A norma determina que as <i>RPA</i> Classe 3 que operem além da linha de visada visual (<i>BVLOS</i>) ou acima de 400 pés (120m) deverão ser de um projeto autorizado pela ANAC e precisam ser registradas e identificadas. Drones dessa classe que operarem em até 400 pés acima da linha do solo e em linha de visada visual (<i>VLOS</i>) não precisarão ser de projeto autorizado, mas deverão ser cadastradas na ANAC. Os drones com até 250 gramas não precisam ser cadastrados ou registrados, independentemente de sua finalidade.

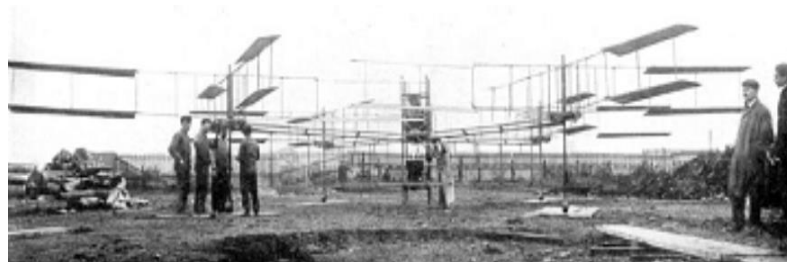
Fonte: ANAC, 2017.

Outras exigências são requeridas como o registro de voos que é obrigatório as aeronaves não tripuladas, exceto as *RPA* de classe 3. Já para os operadores é obrigatório licença e habilitação emitidas pela ANAC aos que pilotam aeronaves não tripuladas *RPA* classe 1, 2 ou 3 que pretendam voar acima de 120 metros, assim como deverão possuir ainda o Certificado Médico Aeronáutico (CMA) os pilotos de *RPA* classe 1 e 2 (ANAC, 2017).

3.3 QUADROTOR

O conceito de quadrotor não é atual, surgindo no início do século XX com Charles Richet e os irmãos Bréguet em 1907, o primeiro quadrotor que se tem registro denominado de “*Bréguet-Richet Quad-Rotor Helicopter*”, a potência fornecida aos motores era por meio da queima de gasolina e a transmissão por correias. Este modelo precisava de um piloto embarcado e seu sistema de controle era manual, o protótipo não obteve sucesso, apesar disso os irmãos Bréguet e Richet descreveram a teoria de que os pares de hélices têm de girar em sentidos opostos para evitar o torque de giroscópio, o modelo abordado se encontra na Figura 38 (LEISHMAN, 2001).

Figura 38- Quadrotor Bréguet-Richet em 1907.



Fonte: LEISHMAN, 2001.

Em 1956 o protótipo chamado “*Convertawings Model A*” foi desenvolvido para propósitos militares e civis. Este protótipo era semelhante aos modelos atuais, pois possuía quatro rotores e quatro hélices e controlado pela variação da rotação das hélices. Apesar dos testes terem sido satisfatórios, devido à falta de demanda o projeto foi encerrado, na Figura 39 é apresentado o modelo (AVIASTAR, 2017).

Figura 39- Quadrotor Convertawings Model A.



Fonte: AVIASTAR, 2017.

A contribuição histórica dos quadrotores em relação aos demais tipos de aeronaves não foi relevante, particularmente pela dificuldade de operação causada pela instabilidade, mas nos dias atuais com o avanço da tecnologia os multirotores estão ressurgindo sob a forma de VANT's, nas Figuras 40-a e 40-b estão exemplificados modelos de multirotores.

Figura 40- Exemplos de multirotores. (a) hexarotor, (b) quadrotor.



(a)

(b)

Fonte: SKILLEDFLYER, 2017

O quadrotor é uma aeronave mais pesada que o ar, possui decolagem e aterrissagem vertical, além de poder realizar voos pairados. Esta aeronave é derivada dos helicópteros, pois o meio de propulsão é o empuxo vertical, eles possuem quatro rotores dispostos nas extremidades da estrutura e ao centro são embarcados os componentes para controle do veículo. Por necessitarem somente de controlar a velocidade individual de cada rotor, não havendo necessidade de variar o ângulo das pás, isso acarreta em uma menor complexidade mecânica e boa manobrabilidade frente aos helicópteros (COSTA, 2008).

3.3.1 Dinâmica do Sistema

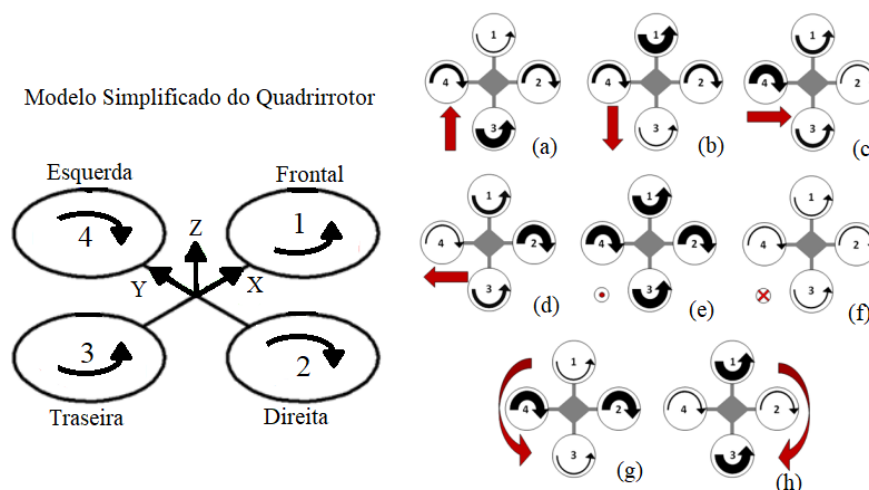
O movimento do quadrotor é feito variando a velocidade angular de seus rotores, sendo este constituído de quatro motores e dois pares de hélices, um para girar no sentido horário e outro no anti-horário. As hélices adjacentes devem girar em sentidos opostos, dessa forma um motor elimina o efeito do torque do outro motor. Na Figura 41 é mostrado os possíveis movimentos para o quadrotor, as indicações em vermelho mostram a direção resultante da combinação dos movimentos dos rotores, as setas pretas exibem o sentido de giro das hélices e sua largura indica a intensidade com que giram (SÁ, 2012).

Os movimentos em torno dos eixos do sistema de coordenadas cartesiano são três:

- *Pitch*: movimento para frente ou para trás, exemplificado pelas Figuras 41-a e 41-b, há a rotação em torno do eixo y.
- *Roll*: movimento para a direita ou para a esquerda, mostrado nas Figuras 41-c e 41-d, inclinando-se nas respectivas direções do eixo y, rotacionando o quadrotor em torno do eixo x;
- *Yaw*: movimento de rotação para a direita ou para a esquerda, movimento realizado pela rotação em torno do eixo z, como pode ser visto nas Figuras 41-g e 41-h.

Quando ocorre a variação da velocidade dos quatro motores igualmente, o quadrotor se move na vertical, transladando no eixo z, esse movimento é denominado de *throttle*. Aumentando simultaneamente as velocidades nos motores o veículo se move para cima e a redução faz com o que se mova para baixo, nas Figuras 41-e e 41-f, respectivamente, são ilustrados os movimentos.

Figura 41- Descrição das rotações dos motores e resultante do movimento.



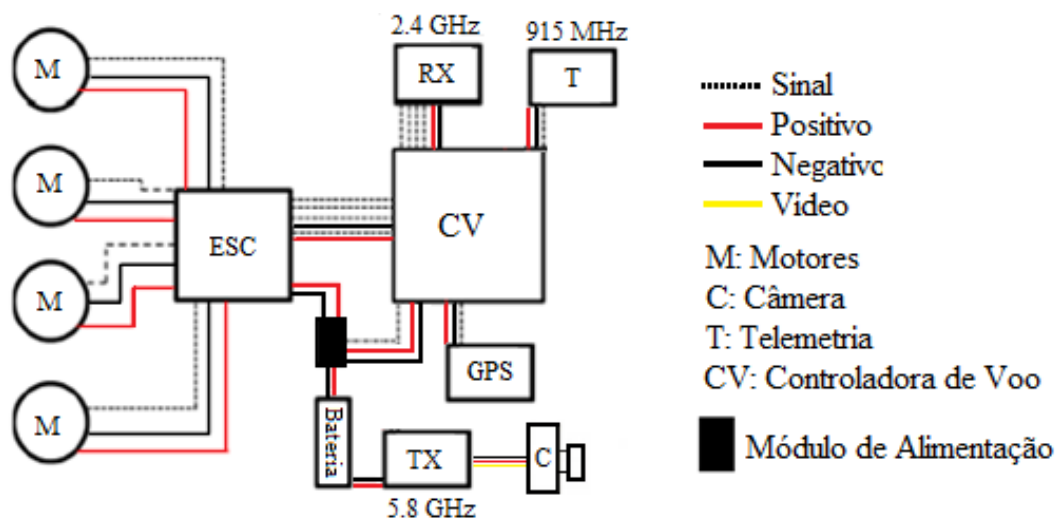
3.3.2 Estrutura e Funcionamento

O quadrotor possui uma eletrônica embarcada sofisticada, permitindo que ele seja capaz de uma boa performance. Dentro dos recursos que são utilizados, estão os sensores como, giroscópios, acelerômetros, magnetômetros, barômetros, sensor de altitude, sonares, bem como microcontroladores, *GPS*, *ESC (Eletronic Speed Controller)*, sistemas de comunicação.

A energia do sistema é fornecida por uma bateria, alimentando os quatro motores, módulo de transmissão de vídeo, controladora de voo, dentre outros componentes. Os motores utilizados em quadrotores geralmente possuem de 800 a 1100 kv (1000 rpm/V) e não possuem escovas no comutador (*brushless*), estes por sua vez estão ligados a controladores *ESC*, que são responsáveis por controlarem a velocidade dos motores. Os *ESC's* controlam a energia transmitida aos motores por modulação de largura de pulso (*PWM*), processo que se dá por meio da variação do valor médio da tensão aplicada aos motores (PAULA, 2012).

O transmissor de rádio do controle remoto envia os comandos para o VANT, onde os sinais são captados pelo receptor (RX – 2.4 GHz) que encaminha os sinais para uma placa controladora de voo. A placa tem como função processar os sinais recebidos por parte do receptor, juntamente com os dados dos outros sensores e enviar os sinais para os *ESC's*, que irão fazer mover os motores, de acordo com o desejado, na Figura 42 é ilustrado um diagrama destes elementos (ANDRADE, 2012).

Figura 42- Diagrama em blocos dos componentes de um quadrotor.



Fonte: Autoria Própria.

As controladoras variam muito de especificações entre várias marcas, algumas apresentam somente as funções mais básicas do voo, como leitura dos canais de controle do rádio, outras possuem sensores auxiliares instalados em seu circuito, como os sensores inerciais e o *GPS* ou podem possuir os sensores implementados externamente. Algumas controladoras de voo permitem a expansão de suas funções com a instalação de módulos de telemetria, controle da câmera e demais dispositivos capazes de serem acoplados, justamente por possuírem *software* e *hardware* de código aberto (*open source*), possibilitam a personalização do VANT, um exemplo é a plataforma *APM (ArduPilot Mega)*. A *APM* foi desenvolvida para controle de veículos aéreos e terrestres não tripulados, baseia-se na plataforma Arduino e na concepção *DIY (Do It Yourself, do português, Faça Você Mesmo)* (CERBARO, 2016).

A placa *APM* é formada por sensores, algumas versões podem possuir um *GPS* interno, gerando um veículo aéreo capaz de ser pilotado automaticamente. Os pilotos automáticos não substituem na totalidade os operadores humanos, mas ajudam no controle da estabilidade e navegação, enquanto eles focam em outras questões da missão, como por exemplo: monitorar trajetória ou imagens recebidas, informações da telemetria e outros equipamentos (FAA, 2009).

Visando a automação dos voos e coleta dos dados dos VANT's, o piloto automático em cooperação com um *software Ground Control Station (GSC)* assegura voos autônomos, seguindo coordenadas pré-programadas, incrementando suas utilidades e reduzindo a complexidade física e mecânica existente (CERBARO, 2016). O *software GSC* é tipicamente executado sobre um computador localizado em solo que é utilizado para o planejamento e voo da missão, oferecendo uma tela mapa, onde o usuário pode definir os pontos de passagem (*waypoints*) para o voo, e ver o andamento da missão. Dentre os *softwares GSC* mais populares atualmente compatíveis com a *APM* estão o *QGroundcontrol, Mission Planner, APM Planner, UgSC, AndroPilot* (ARDUPILOT, 2016).

O *software Mission Planner* é o que possui a maior quantidade de colaboradores ativos, é desenvolvida utilizando como base a linguagem C, sendo de código aberto para uso em computadores com sistema operacional *Windows* (MISSION PLANNER, 2016). Fornece uma gama de utilidades, dentre suas funções está:

- Carregar e atualizar o firmware da controladora de voo instalada;
- Configurar e calibrar o veículo, analisar e salvar *logs*;
- Planejar, salvar e carregar missões autônomas no VANT com *waypoints* configurados no *Google Maps* ou outro mapa de geolocalização;

- Simuladores, *SIL (Software in the Loop)* que permite o usuário simular o comportamento do veículo sem a necessidade de *hardware*.
- Suporta telemetria, monitorando o veículo em operação, como também analisa e salva os *logs* de telemetria.

Na Figura 43 é apresentada a tela inicial do *Mission Planner*, onde é possível observar o estado dos motores, o horizonte virtual, alguns parâmetros da telemetria, como também advertências caso os sensores não estejam configurados corretamente. Nas abas superiores indicadas na Figura 43 é possível configurar os parâmetros da controladora, calibrar os sensores, programar o voo e monitorar o veículo.

Figura 43- Tela inicial do *software Mission Planner*.



Fonte: Autoria Própria.

3.3.3 Sistema de Comunicação

Os VANT's são plataformas de voo capazes de operar sem a presença de pilotos embarcados, seu modo de operação pode ser feito de maneira remota, autônoma ou uma combinação entre eles (PADILHA; ZAIONS; SPULDARO, 2012). Para um VANT estabelecer um voo de forma remota, uma estação base é necessária para a interface com o usuário, sendo este um conjunto de sistemas localizados em solo para controle do VANT, composto do *software GSC* executado em um computador, radiotransmissor e receptor de vídeo.

A estação base tem por função enviar comandos ao sistema embarcado, bem como receber informações sobre seus sensores e câmera. De acordo com Austin (2010), a comunicação existe nos dois sentidos, contendo algumas funções, sendo da seguinte maneira:

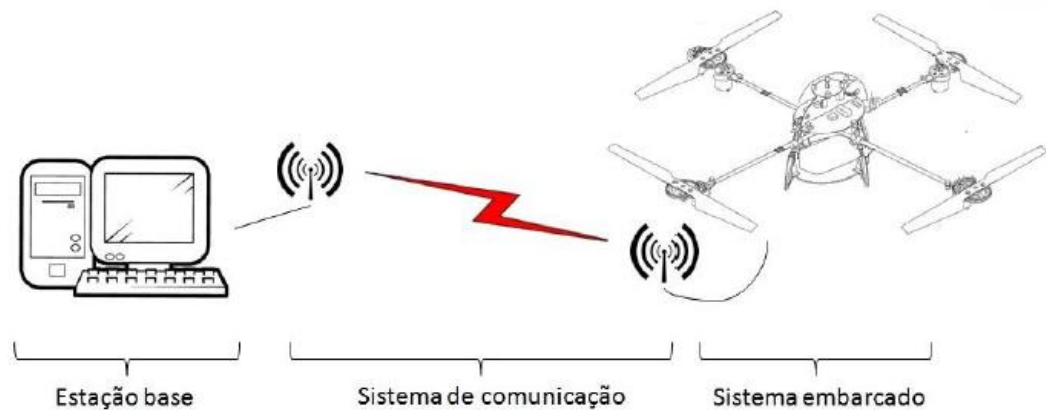
- *Uplink* (Comunicação da estação base para o VANT):
 - Transmitir trajetórias de voo que são armazenadas no sistema de controle da aeronave;
 - Transmitir os comandos de controle de voo em tempo real;
 - Transmitir comandos para o sistema embarcado na aeronave;
 - Transmitir informações da posição da estação base quando necessário.
- *Downlink* (Comunicação do VANT para estação base):
 - Enviar os dados da posição da aeronave;
 - Enviar imagens e dados do sistema embarcado;
 - Enviar dados da aeronave, como distância do ponto de lançamento, altura do solo, velocidade dos motores, etc.

Dessa forma os dois módulos (receptor e transmissor) devem operar na mesma frequência a fim de minimizar as perdas na comunicação. O ganho das antenas é um parâmetro a ter em conta, pois quanto maior o ganho maior será o alcance, garantindo que a qualidade da comunicação com o VANT não se comprometa para maiores distâncias (COSTA, 2015).

O sistema de comunicação é responsável pela troca de informações (comando e controle) entre estação base e sistema embarcado, pode variar de acordo com a aeronave. Para efetuar uma comunicação estável e segura entre um ponto e outro, os *links* de comunicação exercem uma combinação de diferentes tipos de mecanismos de comunicação, como, micro-ondas, rádio modens e comunicação via satélite (AUSTIN, 2010). Na Figura 44 é exemplificado o processo de comunicação entre o VANT e a estação base.

A comunicação pode ser conseguida através de ondas rádio e frequências óticas. O método de comunicação usando frequências óticas atualmente ainda representa limitações devido à alta taxa de absorção atmosférica, reduzindo o alcance e a confiabilidade. Portanto, atualmente o único meio conhecido para realizar a comunicação segura entre o VANT e a estação terrestre diretamente, com o uso de satélites ou outros meios de retransmissão, é por via rádio (AUSTIN, 2010).

Figura 44- Processo da operação remota de um VANT.



Fonte: BALBO *et al.*, 2014.

No tocante as faixas de radiofrequência utilizadas em VANT's, as mesmas são regulamentadas pela ANATEL que disponibiliza algumas faixas para comunicação digital por rádio sem a necessidade de licenciamento, desde que respeitem o limite de potência imposta pela agência e utilizem técnicas de modulação determinados por ela, como por exemplo, o espelhamento espectral (*SS – Spread Spectrum*), *OFMD (Orthogonal Frequency Multiplexing Division)*, dentre outras técnicas de modulação digital em sistemas de acesso sem fio em redes locais (ANATEL, 2008). Na Tabela 5 encontram-se estas faixas de frequências disponíveis para comunicação.

Tabela 5- Faixas de radiofrequência disponíveis para comunicação.

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

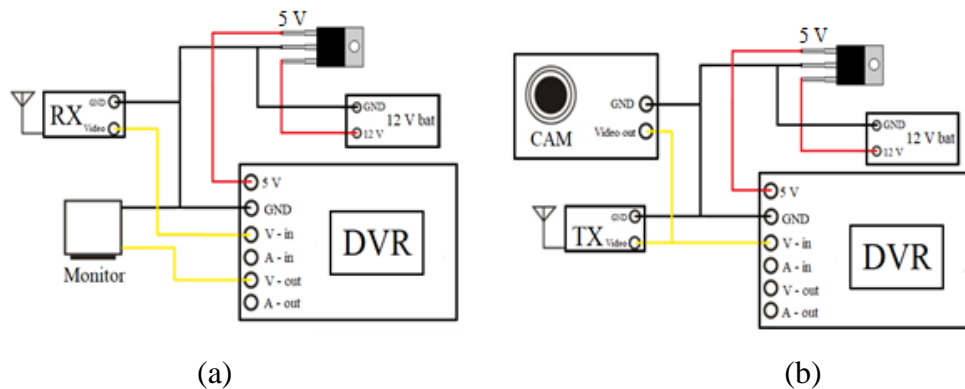
Fonte: ANATEL, 2008

Na faixa de frequência compreendida entre 5725 – 5850 MHz, ocorre a comunicação com o sistema de aquisição de imagens, o *FPV (First Personal View)*, onde o VANT transmite imagens da câmera instalada em sua estrutura ao receptor em solo, proporcionando uma visualização das imagens em tempo real para o usuário. Na Figura 45 são mostrados os principais componentes de um sistema *FPV*.

Figura 45- Componentes do *FPV*.

Fonte: Autoria Própria.

Caso haja a necessidade de uma posterior visualização das imagens transmitidas pelo *FPV*, é imprescindível o uso de um *DVR* (*Digital Video Recorder*), o mesmo permite gravar imagens geradas por câmeras, armazená-las para reprodução e *backup*. Na Figura 46 é esquematizado as conexões necessárias para implementar um *DVR* a um sistema *FPV*, podendo ser instalado tanto no receptor, como visto na Figura 46-a, bem como no transmissor ilustrado na Figura 46-b. Geralmente são alimentados por 5V, para isso o uso de um regulador de tensão ou um *BEC* (*Battery Eliminator Circuit*) de 5V é necessário para prover a energização do equipamento.

Figura 46- (a) Ligação do *DVR* no receptor , (b) Ligação do *DVR* no transmissor.

Fonte: Autoria Própria

A faixa de frequência compreendida entre 2400 – 2483,5 MHz, é comumente utilizada para envio de comandos ao VANT pelo controle remoto para execução de seus movimentos, estabelecer modos de voo, controle do *guimbal* e zoom da câmera, onde um rádio transmissor é posto no controle remoto e um receptor é embarcado na estrutura da aeronave. Comumente o controle remoto destina quatro de seus canais para envio dos comandos básicos, referentes aos movimentos do quadróptero, o restante dos canais as demais utilidades (ANDRADE, 2012).

A faixa compreendida entre 902 – 928 MHz, com frequência central de 915 MHz, na maior parte dos casos é destinada a telemetria nos VANT's. Existem rádios de telemetria que operam na faixa de 433 MHz, mas no Brasil tal faixa não é disponível. Na Figura 47 é apresentado um módulo de telemetria.

Figura 47- Componentes de um módulo de telemetria



Fonte: DEAL EXTREME, 2017.

Na Figura 48 é mostrado como se realiza a comunicação dos elementos da estação base com o VANT, nas faixas de frequência de 2,4 GHz e 5,8 GHz o processo é unidirecional, só ocorrendo o envio de comandos e transmissão de imagens, respectivamente. O processo de telemetria se dá de maneira bidirecional, os módulos tanto enviam como recebem informações, podendo ser denominados de transceptores.

O *software GCS* conectado com a controladora reduz o grau de dependência do VANT de operadores, para esse fim parte do processo é autocontrolado pelo veículo, que utilizando meios computacionais envia comandos de orientação para o piloto automático. Neste ponto o módulo computacional precisa se comunicar com o piloto automático, para isso se faz uso de um protocolo de comunicação. O *MAVLink (Micro Air Vehicle Link)* é um dos principais protocolos adotados, principalmente utilizados para comunicação bidirecional, como no caso da telemetria, bem como na intercomunicação do subsistema do VANT (MEIER, 2009).

Figura 48- Sistema de Radiocomunicação entre Estação Base e VANT.

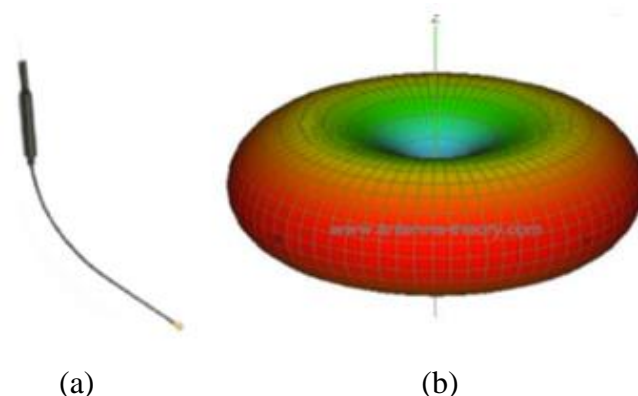


Fonte: Autoria Própria.

Para realização da comunicação, o elemento responsável pela transmissão e recepção de dados, são as antenas, comumente as mais utilizadas são os monopolos ou dipolos, pois apresentam uma cobertura omnidirecional, radiando energia igualmente no plano horizontal, no entanto somente a energia que transmitida a antena receptora é aproveitada. São utilizadas para estabelecer ligação em várias direções, em contrapartida sofrem interferência e ruídos de todos os lados, prejudicando a qualidade do sinal. A energia que não estabelece comunicação é perdida no espaço não tendo nenhuma finalidade (COSTA, 2015).

Visto que o VANT está em constante movimento, os monopolos ou dipolos são uma boa alternativa, podendo receber os comandos em várias direções, mas não são adequadas quando o VANT está a sobrevoar o ponto onde é controlado. Estas antenas podem ser instaladas tanto em receptores quanto em transmissores comerciais e geralmente possuem um ganho de 2,15 dB. Na Figura 49 é representada a antena dipolo e seu característico diagrama de radiação.

Figura 49- (a) Exemplo de uma antena dipolo. (b) Diagrama de radiação característico de um dipolo.



Fonte: FLYING TECH, 2017.

Para se obter maiores ganhos e um padrão de radiação mais diretivo, recorre-se as antenas diretivas ou arranjo de antenas lineares e planares (*patches*). Atualmente os arranjos são mais utilizados nos sistemas de comunicação dos VANT's. As antenas planares começaram a ter grande aplicabilidade no campo dos VANT's por demonstrarem certas vantagens em relação as convencionais, como por exemplo: estruturas mais leves, fabricação simples e econômica, não causam distúrbios a aerodinâmica da aeronave (MARQUES, 2016).

4 LINHAS DE TRANSMISSÃO

A dependência da sociedade moderna em relação ao fornecimento da energia elétrica, em suas variadas formas, é satisfeita pelas fontes energéticas tradicionais como combustíveis fósseis e as energias renováveis. O setor energético é parte integrante da economia, estruturando-se em diversas esferas, compreendendo centenas de equipamentos interligados entre si por longas áreas territoriais. Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é formado por várias estações geradoras, sendo a energia elétrica gerada nas usinas interligadas as unidades consumidoras por um sistema de transmissão e distribuição (BLUME, 2007). Na Figura 50 é exibido uma representação generalizada de um SEP.

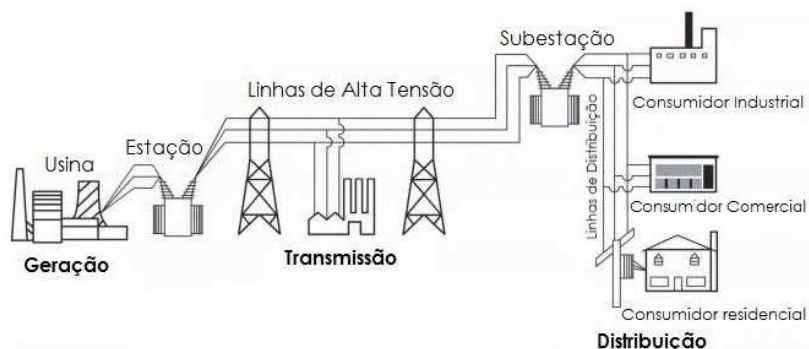
As linhas de transmissão (LT) de energia elétrica que fazem este papel de transporte de energia elétrica, e são classificadas de acordo com o nível de tensão que operam (MOREIRA, 2008). A Tabela 6 é descrito a classificação desse sistema e suas respectivas tensões.

Tabela 6- Classes do sistema de transmissão e distribuição

Geração	Transmissão	Distribuição			
		Sub-transmissão	Primária	Secundária	
Tensão (kV)	2,2 - 22	138 - 1000	22 - 138	3,8 - 22	0,11 - 0,44

Fonte: MOREIRA, 2008

Figura 50- Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.



Fonte: Adaptado BLUME, 2007.

As estruturas de transmissão de energia elétrica caracterizam-se por serem obras de grande extensão linear, geralmente com difíceis condições de acesso, são constituídas por fios condutores (feitos de alumínio ou ligas com aço) suportadas por torres, que podem ser

fabricadas em material metálico, madeira ou concreto armado, com a finalidade de sustentar os cabos elétricos, e estes são isolados da estrutura por meio de isoladores ou outros materiais isolantes (LIMA, 2012). Na Figura 51 é mostrado um trecho de um sistema de transmissão.

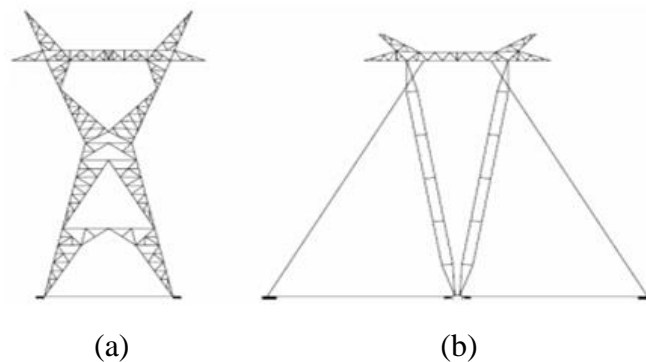
Figura 51- Sistema de Transmissão de Energia Elétrica.



Fonte: EBC, 2012.

Uma das formas de classificar as estruturas das linhas de transmissão é quanto à transferência dos esforços das torres para o solo, sendo autoportantes ou estaiadas. Quando a torre é capaz de se sustentar através da transmissão dos esforços diretamente para as fundações (pé da torre) a estrutura é autoportante. Nas torres estaiadas, os esforços são transmitidos ao terreno através das fundações dos cabos de estais e mastros, A Figura 52 ilustra ambas classificações, a autoportante e estaiada, respectivamente nas Figura 52-a e Figura 52-b (VELOZO, 2010).

Figura 52-Tipos de torres de linha de transmissão quanto aos esforços para o solo.(a) autoportante, (b) estaiada.



Fonte: VELOZO, 2010.

O desempenho da linha de transmissão está diretamente ligado com o comportamento de seus isoladores, cabos condutores, espaçadores e demais acessórios. Os isoladores são responsáveis por sustentar os cabos para mantê-los isolados das estruturas e evitarem descargas de contornamento. Eles estão sujeitos a esforços tanto elétricos como mecânicos, devendo suportar a tensão de operação, sobretensões, oscilações de manobras e transitórios oriundos da atmosfera, para as exigências mecânicas os isoladores devem sustentar as forças verticais do peso dos cabos e as horizontais devido as forças do vento e a sustentação dos cabos (LIMA, 2012). É destacado na Figura 53 a disposição dos isoladores em linhas de transmissão.

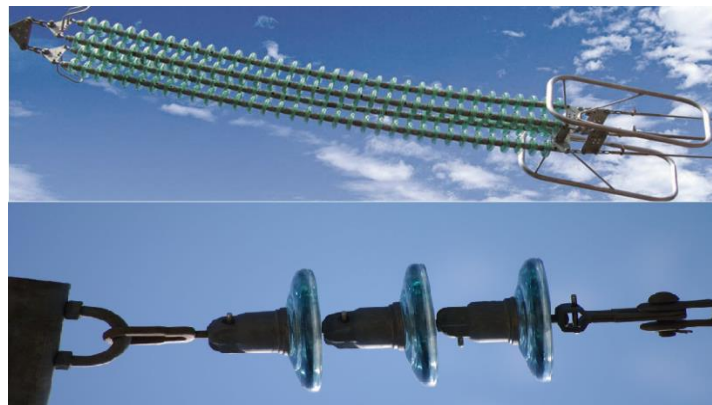
Figura 53- Estrutura de linhas de transmissão com destaque na localização dos isoladores.



Fonte: CHAVEZ, 2014; TUPÃ, 2017.

Na Figura 54 é mostrado uma visão aproximada dos isoladores, os mesmos são comumente utilizados em agrupamentos (cadeias), dessa forma há um aumento no caminho para corrente de fuga e conseqüentemente da resistividade, além de haver o aumento na rigidez dielétrica.

Figura 54- Isoladores em cadeia utilizados na amarração em linhas de transmissão.



Fonte: NANJING, 2013.

Os isoladores apresentam elevada resistividade para as correntes de fuga de superfície, são espessos para assim possuírem uma alta rigidez dielétrica e suportar a tensão de operação, surtos no sistema e demais intempéries. Os mesmo podem ser fabricados de porcelana, vidro ou polímeros, estando sujeitos a corrosão devido a fenômenos da natureza, a exposição à poluição ambiental e também pelo excesso de corrente elétrica, na Tabela 7 é descrito vantagens e desvantagens referentes ao tipo de material utilizado nos isoladores (MOREIRA, 2008).

Tabela 7- Vantagens e Desvantagens do materiais utilizados na fabricação de isoladores.

Material	Vantagens	Desvantagens
Porcelana	Durável, desempenho calculado, de fácil troca.	Peso elevado, dificuldade na localização de falhas, defeitos escondidos e sujeito ao vandalismo.
Vidro	Durável, desempenho calculado, de fácil troca e facilidade na localização de falhas	Fragilidade, peso acentuado e sujeito ao vandalismo.
Polímero	Menor faixa de servidão, leve, bom desempenho na contaminação e menores custos de instalação.	Dificuldade na troca, pode apresentar defeitos escondidos, são frágeis, envelhecem devido à natureza do material.

Fonte: ANDRADE, 2011.

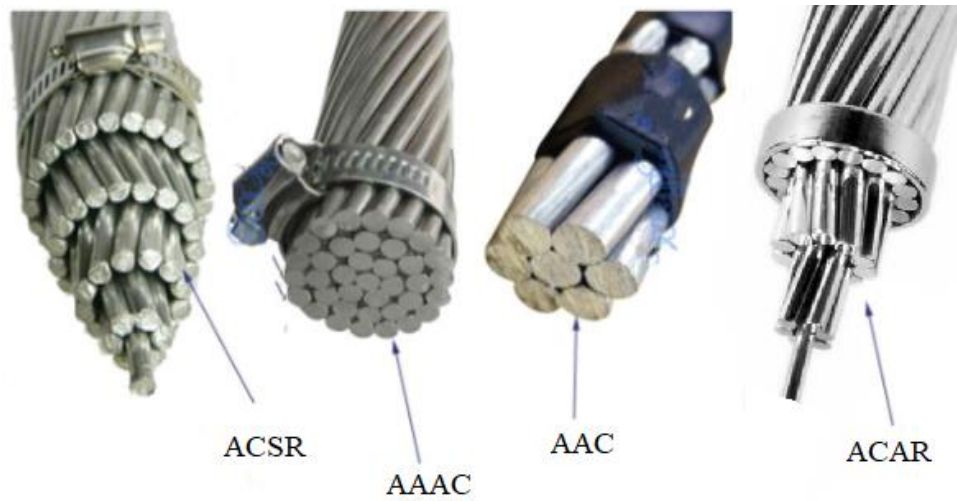
Os cabos condutores têm a função de transportar a energia elétrica. Existem também condutores na parte superior das torres, acima dos cabos condutores, denominados cabos guardas, também chamados de cabos de terra, têm como função proteger os cabos condutores de descargas elétricas. Atualmente o material que compõe os condutores são feitos de alumínio, pois em comparativo com o cobre, para uma mesma resistência o condutor de alumínio se apresenta mais leve, além de menos dispendioso (RYAN, 1994).

Os cabos são formados por condutores torcidos de maneira a manter a seção reta uniforme, esses fios podem ser de alumínio, liga de alumínio ou de aço. Segundo Moreira (2008) se classificam em quatro categorias, sendo elas:

- AAC: cabos formados apenas por fios de alumínio;
- AAAC: são formados por fios de uma liga de alumínio composta com magnésio ou silício, possuindo maior resistência mecânica que os cabos AAC;
- ACSR: cabos formados por fios de alumínio, com o centro formado por alma de aço;
- ACAR: cabos formados por fios de alumínio, com a alma de liga de alumínio.

Na Figura 55 é exemplificado as classes dos cabos de alumínio utilizados em linhas de transmissão.

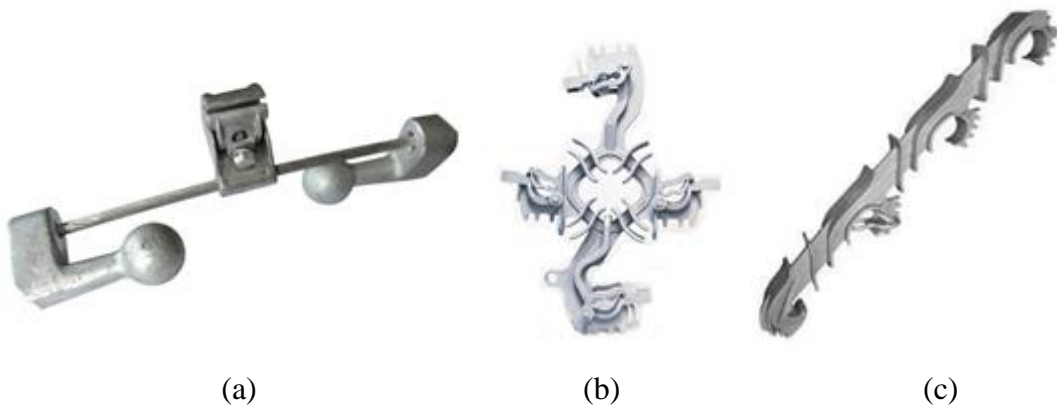
Figura 55- Classificação dos cabos condutores de alumínio.



Fonte: JYTOP, 2017.

Para limitar os efeitos da ação do vento sobre os condutores são utilizados espaçadores, amortecedores, estabilizadores verticais instalados às linhas de transmissão. Mantendo uma distância segura, impedindo o contato e absorvendo a vibração dos cabos, contudo, tais acessórios estão sujeitos a falhas, podendo ser separados do contato. Na Figura 56 é mostrado o exemplo destes acessórios

Figura 56- Acessórios das Linhas de Transmissão. (a) amortecedor, (b) espaçadores, (c) estabilizador vertical.



Fonte: ELETRIC, 2017

No projeto de linhas de transmissão alguns conceitos básicos devem ser levados em conta para um bom funcionamento, tais conceitos estão definidos na Tabela 8.

Tabela 8-Definição dos conceitos para as faixas da linha de transmissão.

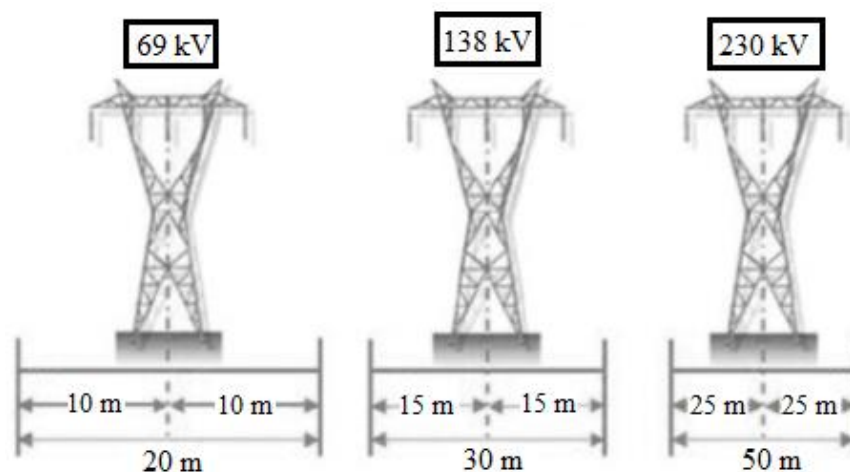
Tipos de faixas	Conceitos
Faixa de Domínio	-Faixa de terra ao longo do eixo da LT, declarada de utilidade pública, adquirida pelo expropriante através de acordo por instrumento público extrajudicial, decisão judicial ou prescrição aquisitiva, devidamente inscrita no cartório de registro de imóveis.
Faixa de Passagem	-Área ao longo da LT onde são estabelecidos limites para o seu uso e ocupação com o intuito de minimizar riscos, garantir a segurança da sua operação e manutenção e a convivência harmoniosa com o meio ambiente.
Faixa de Segurança	-Afastamento mínimo recomendado do condutor e seus acessórios energizados a quaisquer partes, energizadas ou não, da própria linha, e ao solo ou obstáculos próximos à LT. Necessária para garantir o desempenho da LT e a segurança das instalações e de terceiros.
Faixa de Servidão	-Faixa de terra ao longo do eixo da LT. O domínio permanece com o proprietário com restrições ao uso, de utilidade pública e instituída através de instrumento público e decisão judicial inscritos no cartório.

Fonte: LIMA, 2012

A área da faixa de segurança é necessária ser mantida desocupada, para propiciar a segurança das pessoas e instalações em relação à transmissão de energia elétrica, bem como o controle de todo e qualquer risco, em relação aos aspectos eletromagnéticos e de balanço dos cabos condutores pela ação do vento (LIMA, 2012).

Para tanto, existem documentos que visam normatizar o que deve ser restringido nas linhas de transmissão, assim como qual a largura que deve existir como faixa de segurança. Os critérios de distâncias são baseados principalmente pelo balanço dos cabos devido a ação dos ventos, a tensão da linha de transmissão, onde calcula-se os efeitos elétricos, na Figura 57 é apresentada as larguras das faixas de segurança para diferentes tensões. O propósito é definir uma área nos lados das torres que limitem onde possam existir danos ou acidentes envolvendo a linha de transmissão e assim restringir toda ocupação nesta faixa (CUCCO, 2011).

Figura 57- Larguras das faixas de segurança para diferentes tensões.



Fonte: Adaptado CUCCO, 2011.

4.1 MANUTENÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Pela grande importância que as linhas de transmissão representam em um SEP, as concessionárias têm voltado sua atenção a manutenção desses elementos que o compõe. Os planos de manutenção são baseados em dados estatísticos e análise do sistema, minimizando a realização de uma intervenção. Devido a influência por uma alta produção e o cumprimento dos indicadores de continuidade, definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as concessionárias se preocupam em satisfazer seus clientes, eliminando falhas e possíveis interrupções, e controlando a qualidade da energia fornecida (VERISSÍMO, 2016).

A atividade de manutenção em linhas de transmissão é regulamentada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), através de Procedimentos de Rede referentes ao submódulo, titulado de Acompanhamento da Manutenção dos Sistemas Elétricos, que tem como objetivo a padronização das operações. Esta regulamentação objetiva possibilitar um serviço de fornecimento de energia elétrica em níveis e padrões de qualidade e confiabilidade aos requeridos dos consumidores e aprovados pela ANEEL (ONS, 2009)

O conceito de manutenção segundo a NBR – 5462 é apontada como um conjunto de ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, destinadas a manter ou repor um item em um estado no qual possa desempenhar seu papel (ABNT, 1994). O empenho relativo a manutenção depende de fatores tecnológicos associados a frequência de falhas e duração do tempo de serviço de manutenção. Dessa forma a manutenção, deve administrar a imprecisão com a qual trata, pois não sabe ao certo a ocorrência de uma falha. Sendo o tratamento estatístico das falhas uma ferramenta para se solucionar este problema (VAZ, 1998).

Para uma melhor distinção dos tipos de manutenção, faz-se necessário distinguir falha e defeito. Uma falha corresponde ao termino da capacidade de um equipamento exercer sua função, já o defeito não torna o equipamento incapacitado. A Figura 58 mostra os tipos de manutenção que podem ser desempenhadas e quando se deve aplicar as mesmas (FIDALGO, 2007). Desta forma, pode-se observar três formas particulares de se realizar a manutenção, sendo estas:

- **Manutenção Corretiva:** todo trabalho de manutenção após ocorrência de uma falha do equipamento, visando restabelecê-lo a sua finalidade. Se a falha for eliminada permanentemente será uma manutenção curativa, se de maneira provisória é denominado manutenção paliativa.
- **Manutenção Preventiva:** definida quando a condição de falha não é identificada, mas existe defeito. Dessa forma a manutenção é prevista (sistemática) ou programada,

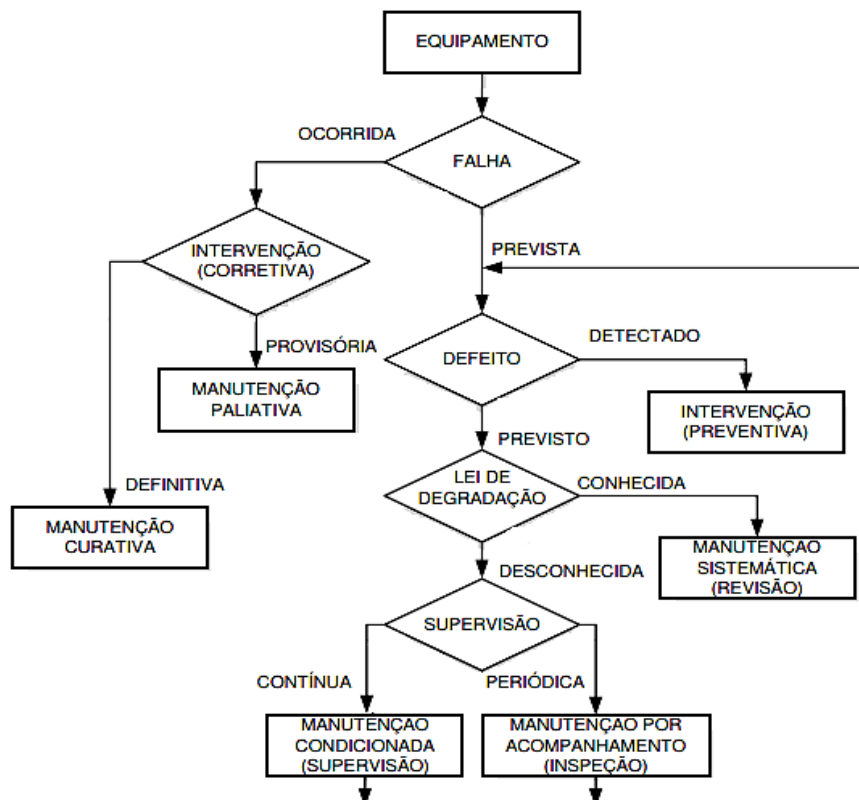
realizada em um equipamento com o intuito de diminuir a chance de ocorrer defeito e o mesmo tornar uma falha. A manutenção prevista é programada uma vez que se conhece as leis de degradação do equipamento.

- **Manutenção Preditiva:** aplicada em situações de supervisão contínua dos parâmetros de controle e nas inspeções periódicas das condições dos equipamentos e dos parâmetros de controle obtidos. Tendo em vista que a lei de degradação do equipamento é desconhecida.

Por sua vez, segundo a NBR IEC 60079-17 as inspeções periódicas são classificadas conforme o nível em que são realizadas, sendo três os tipos (ABNT, 2015):

- **Inspeção Visual:** as desconformidades são constatadas sem uso de ferramentas específicas, portanto, somente os defeitos são observados;
- **Inspeção Apurada:** inclui todos os pontos verificados na inspeção visual, além de perceber defeitos que somente se tornam visíveis com o uso de equipamentos, não demandando a desenergização;
- **Inspeção Detalhada:** inclui todos os aspectos destacados nas inspeções anteriores, além de detectar defeitos somente com abertura e desenergização do sistema.

Figura 58- Fluxograma das ações de manutenção.



4.2 INSPEÇÃO VISUAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A inspeção visual é uma das técnicas de engenharia de manutenção mais simples de ser realizada, e de menor custo operacional. Ela depende da capacidade de observação do indivíduo e a técnica do mesmo em compreender o significado da falha ou evento. Por sua simplicidade, não há nenhum processo industrial em que ela não esteja presente, sendo utilizada normalmente na verificação de alterações dimensionais, desgastes, corrosão, deformação, alinhamento, trincas e outros (COMITTI, 2012). Nesse sentido, a inspeção visual é um procedimento que ajuda a detectar rapidamente os pontos problemáticos do sistema.

As inspeções em linhas de transmissão objetiva identificar as irregularidades e danos existentes no sistema de transmissão e servem de auxílio para avaliação das condições da instalação e elaboração do programa de manutenção, e que se não corrigidas a tempo resultariam em interrupções no fornecimento de energia elétrica. Na Tabela 9 é descrito as principais situações que se procuram identificar em uma inspeção. Ao avaliar as condições do sistema de transmissão, a inspeção conduz ao estabelecimento das prioridades para a execução da manutenção. É nesse sentido, que a inspeção constitui etapa fundamental do processo de manutenção do sistema elétrico (VERISSÍMO, 2016).

Tabela 9- Infraestrutura e situações analisadas.

Infraestrutura	O que se inspeciona
Armações de apoios	Estado do tratamento anticorrosivo, eventuais sinais de desgaste, existência de rachaduras.
Isoladores	Integridade dos isoladores, fixação dos isoladores e travessas, verificar a verticalidade da cadeia de isoladores.
Descarregadores de Sobreensões	Estado da fixação a linha, de sua ferragem e suporte e da ligação a terra.
Condutores	Estado das pinças de suspensão e amarração, existência de condutores com alma desfiada, uniões mal montadas, existência de aquecimento, flechas irregulares dos condutores. Distância dos condutores ao solo, da vegetação e de construções circunvizinhas.

Fonte: LOPES, 2013.

Segundo a Resolução Normativa nº 669/2015 deliberada pela ANEEL, regulamenta os requisitos mínimos para manutenção e o monitoramento da manutenção de instalações de transmissão de rede básica, as inspeções de rotina são a atividade mínima de manutenção que deve ser realizada a cada doze meses. E a partir dos resultados obtidos das inspeções terrestres e aéreas deve ser avaliada a necessidade de inspeções terrestres mais detalhadas com escalada das estruturas, inspeções termográficas, noturnas ou específicas. Nos relatórios de inspeção

deve consistir no registro fotográfico dos pontos de interesse, da data e hora da fotografia e as coordenadas geográficas dos pontos em que foram adquiridas as imagens (ANEEL, 2015).

As inspeções podem ser de natureza terrestre, onde os técnicos percorrem o trecho a pé ou de carro, dependendo do acesso a faixa de passagem da linha, observando os componentes com ou sem a ajuda de binóculos, as vezes escalam até uma distância segura dos condutores da linha. Alguns defeitos encontrados na parte superior das estruturas podem se tornar de difícil detecção nas vistorias terrestres e se torna a consequência de desligamentos acidentais da rede elétrica. Estes desligamentos levam tempo até o restabelecimento, devido à dificuldade de localização das falhas e manutenção corretiva do defeito (DIAS, 2004).

Outra categoria são as inspeções aéreas, tiveram início em 1995 realizadas por helicópteros que sobrevoavam as linhas em estudo permitindo diferentes análises simultâneas, logo que estes se encontravam equipados com diferentes sensores e instrumentos de inspeção (câmera térmica, filmadoras, câmera ultravioleta, sensor de laser), como pode ser visto na Figura 59 (LOPES, 2013).

Figura 59- Inspeção aérea tripulada



Fonte: AVIATIONHUMOR, 2017

As inspeções aéreas realizadas em campo por operadores humanos coletam e registram informações para que futuramente possam ser analisadas e realizadas manutenções preventivas e corretivas. Esta inspeção está sujeita a riscos, tendo em vista que são comuns os locais de difícil acesso, expondo os operadores (RANGEL, KIENITZ E BRANDÃO, 2009).

Devido ao desenvolvimento da eletrônica, bem como dos sistemas de comunicação, a automação das inspeções aéreas se tornou algo tangível. Esta automatização possui algumas vantagens associadas, como a diminuição dos riscos humanos e materiais relacionados a inspeção, elas ocorrem mais rápido permitindo inspeções com maior frequência, tem menores custos. Na Figura 60 é mostrada utilização de robôs na inspeção de linhas de transmissão. Na

Figura 60-a, um VANT é utilizado para inspeções, eles são uma evolução no processo de inspeção aérea tripulada, visto que podem se aproximar mais das linhas por ter uma boa manobrabilidade e manter um controle da posição decorrente do uso de *GPS*, mas os mesmos não substituem na totalidade as aeronaves tripuladas, visto que não carregam um operador para que seja efetuada uma manutenção (LOPES, 2013). Já na Figura 60-b é mostrado uma inspeção feita por um robô escalador (*climb robot*), estes robôs possuem uma construção complexa, no que se diz respeito ao grau de controle e automação do mesmo requer muitas exigências para contornar os obstáculos encontrados na linha, visto que a inspeção é realizada percorrendo a linha suspensos nos condutores (LUDAN *et al.*, 2006).

Figura 60- Inspeção robotizada com o uso de: (a) VANT's, (b) robôs escaladores.



(a)



(b)

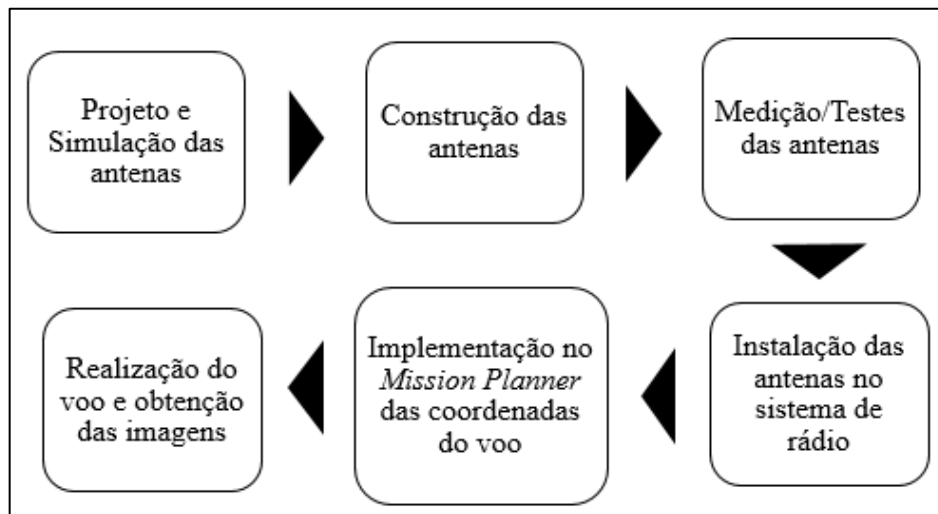
Fonte: (a) GOSELFIE, 2016; (b) LOPES, 2013.

A utilização dos veículos aéreos não tripulados pode fazer parte de um sistema efetivo de prevenção de problemas. Os VANT's podem percorrer grandes áreas tornando o trabalho de inspeção ágil e garantindo a segurança dos inspetores. Imagens são obtidas por câmeras, possibilitando a visualização em tempo real da filmagem, como também o registro das imagens para análise mais detalhada (DOCTOR DRONE, 2015). Atualmente, devido a existência de câmeras digitais de grande capacidade para armazenamento de fotos e vídeos, bem como uma boa resolução gráfica, tais câmeras, permitem a confecção de relatórios que demonstrarão as ocorrências, sendo um meio eficaz para registro e confecção de históricos de manutenção, bem como de suporte para análise e tomadas de decisões (COMITTI, 2012).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico estão descritos os materiais e métodos empregados na realização deste trabalho, desde a etapa de construção e testes das antenas, até a implementação no VANT e voo do mesmo. A Figura 61 ilustra de forma resumida os processos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

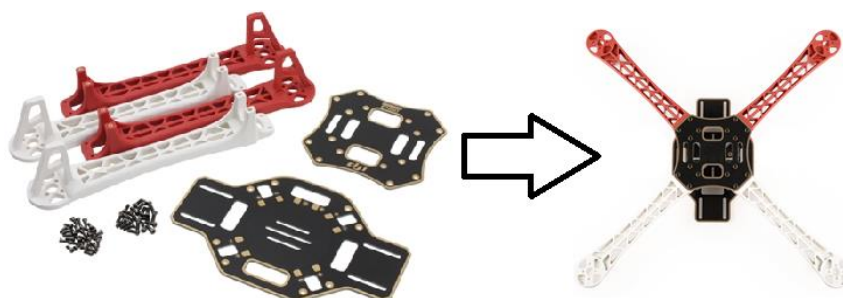
Figura 61- Fluxograma dos processos.



Fonte: Autoria Própria.

Precedente ao projeto das antenas propostas, foi feita uma descrição dos componentes utilizados para montagem do VANT em estudo, os mesmos foram adquiridos com recurso próprio. O modelo utilizado foi o DJI *Flame Wheel* F450, mostrado na Figura 62 sua estrutura (chassi), comumente denominado de *frame*. Sendo seus equipamentos montáveis, dessa maneira há liberdade para escolha do rádio, motores e hélices, como também a controladora de voo.

Figura 62- Chassi do DJI *Flame Wheel* F450.



Fonte: GLOBE FLIGHT, 2017

Então para o projeto das antenas do receptor e transmissor do rádio do VANT, as mesmas têm que estar de acordo com o rádio utilizado, apresentado na Figura 63. Os comandos de movimento e a habilitação dos modos de voo são realizados pela ação do sistema de rádio controle *FlySky FS-iA6*. O rádio contém seis canais, sendo quatro utilizados no controle pelos *sticks* e os outros dois para as chaves de seleção do controle remoto, servindo para seleção dos modos de voo.

Figura 63- Sistema de rádio *FlySky FS-IA6*. (a) receptor, (b) transmissor.



Fonte: Autoria Própria.

A controladora de voo utilizada foi a *APM 2.6*, a qual adquire os dados dos sensores e do rádio receptor e o sinal de saída resultante é enviado aos controladores eletrônico de velocidade (*ESC*) antes de irem aos motores, a fim de se ajustar a velocidade dos motores. Na Figura 64 é mostrada a controladora utilizada neste trabalho.

Figura 64- *ArduPilot Mega 2.6*

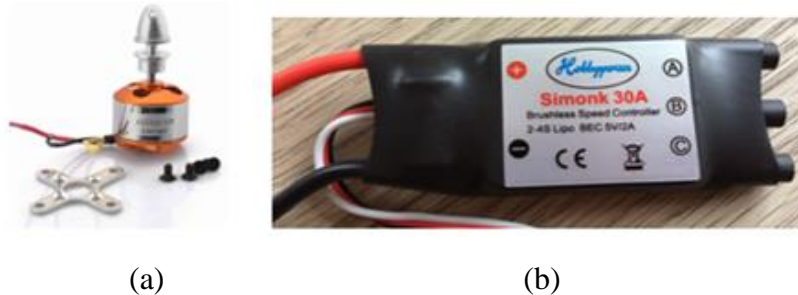


Fonte: Autoria Própria.

Os motores utilizados são do tipo *brushless A2212 – 1000 KV* com potência de 1 kW e tensão de alimentação de 5,6 V – 16,8 V. Um *ESC* é utilizado para cada motor, sendo do modelo

Hobbypower Simonk 30A. Na Figura 65 são ilustrados o motor *brushless* e o *ESC* utilizado no VANT em estudo.

Figura 65- (a) Motor *brushless* A2212–1000 kv- 1 kW. (b) *ESC* Simonk 30A.



Fonte: Autoria Própria.

Para o fornecimento de carga contínua aos componentes do VANT foi utilizado uma bateria Li-Po ZIPPY 5000 mAh, mostrada na Figura 66-b, e para carga da bateria um carregador de balanceamento é necessário afim de carregar todas células por igual, sendo assim, foi utilizado o carregador imax B6AC mostrado na Figura 66-a.

Figura 66- (a) carregador de balanceamento imax B6AC,(b) bateria Li-Po ZIPPY 5000 mAh.



Fonte: Autoria Própria.

A versão da *APM* utilizada não possui uma bússola interna, no entanto foi utilizado o *GPS Module Ublox M8N* conectado a placa controladora, o mesmo sendo ilustrado na Figura 67. O *GPS* é essencial para realização do voo autônomo pelo *software GCS Mission Planner*.

Figura 67- Módulo GPS *Ublox M8N*.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 68 é mostrado *kit FPV* utilizado no F450, tendo como componentes uma câmera, monitor *TFT LCD*, transmissor TS832 e receptor RC832 5.8 G, bem como a bateria Li-Po RHINO 3500 mAh para suprir a energia do módulo de recepção em terra (monitor, receptor e *DVR*).

Figura 68- (a) *Kit FPV* para registro de imagens captadas pelo VANT. (b) Bateria Li-Po RHINO 2350 mAh para alimentação do módulo em terra.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

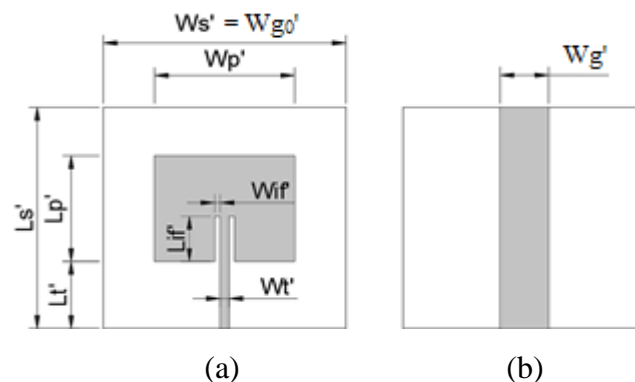
5.1 PROJETO DAS ANTENAS PROPOSTAS

As antenas propostas para o sistema de rádio controle foram projetadas para uma frequência central de 2.45 GHz utilizando o Método da Linha de Transmissão, Equações 38 a 45, visto que o sistema de rádio FlySky FS-iA6 utilizado no VANT opera na faixa *ISM* em 2.4 GHz.

O projeto das antenas para o transmissor e o receptor tiveram características distintas, de modo que a antena embarcada no receptor deve apresentar dimensões reduzidas e um padrão de radiação omnidirecional. Visto que a antena deve ser instalada em um VANT, onde o espaço é confinado, utilizou-se material de alta permissividade de modo a proporcionar menores dimensões. Em questão a omnidirecionalidade, como uma antena de microfita é de característica *broadside*, ou seja, a radiação é perpendicular a antena, foi realizada a modificação do diagrama de radiação através da aplicação da técnica do truncamento do plano de terra, permitindo a formação dos lóbulos traseiros no diagrama de radiação. Com a finalidade de se conseguir tal comportamento de radiação foi realizado uma série de truncamentos na largura do plano de terra (Wg'), de 20%, 60% e 80% do seu valor inicial (Wg_0').

Na antena receptora, foi utilizado como substrato o material RT Duroid 6010 ($\epsilon_r = 10,2$) com espessura de 2,5 mm e desenvolvido um elemento simples. O plano de terra foi truncado em sua largura em 80% do seu valor original, 40% do lado esquerdo e do direito, sendo mantido em uma posição central abaixo do substrato. Na Figura 69 é ilustrada a antena receptora projetada e suas respectivas dimensões de largura e comprimento do *patch*, substrato, linha de transmissão e *inset fed*. Na Tabela 10 são descritos os valores das dimensões projetadas da antena receptora.

Figura 69-Dimensões da antena receptora, (a) vista frontal, (b) vista posterior.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10-Valores das dimensões da antena receptora.

Dimensões	Valor (mm)	Dimensões	Valor (mm)
Ws'	35,5	Wif'	0,8
Ls'	34,3	Lif'	7
Wp'	20,5	Wt'	1,3
Lp'	16,4	Lt'	10,4
Wgo'	35,5	Wg'	7,1

Fonte: Autoria Própria

No transmissor, têm-se uma maior liberdade de espaço onde foi projetado um arranjo linear de antenas com dois elementos a fim de proporcionar um acréscimo ganho, bem como compensar o ganho perdido das antenas do receptor devido ao truncamento do plano de terra.

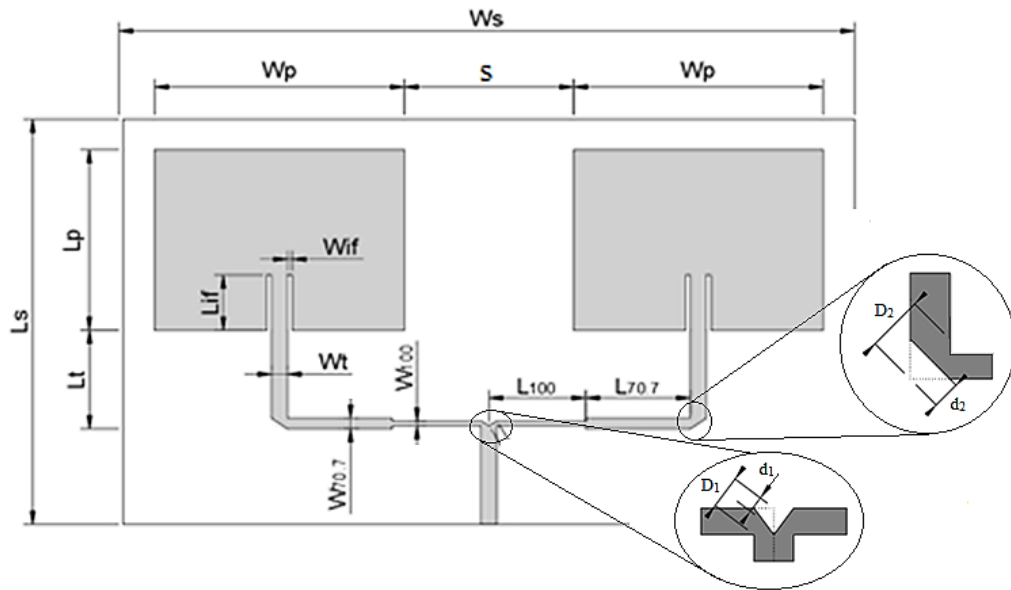
Com relação a alimentação do arranjo linear foi desenvolvido uma rede de alimentação em paralelo, cujo sinal é dividido por uma junção em T, onde uma linha de 50Ω deriva em duas de 100Ω , para manter a rede de alimentação acoplada a linha de alimentação. Dessa forma o sinal é distribuído de maneira igual entre os elementos, pois a impedância equivalente vista a partir da entrada da antena deve ser igual a 50Ω , de modo que proporcione o casamento de impedâncias, em razão da utilização de um conector SMA (*SubMiniature version A*) de 50Ω na fabricação das antenas.

Para acoplar a impedância de entrada aos *patches* é utilizado adaptadores de um quarto de onda ($\lambda/4$) dimensionados conforme a Equação 57 a Equação 61. Os *patches* foram distanciados centro a centro pela metade do comprimento de onda ($\lambda/2$) da frequência de projeto a fim de minimizar os efeitos do acoplamento mútuo.

Nos locais da rede de alimentação onde o sinal incide perpendicularmente, foram feitas variações de chanfros de 25%, 50% e 70%, a fim de investigar por simulações o melhor efeito desse parâmetro estrutural no tocante ao coeficiente de reflexão e propriedades de radiação.

No arranjo, o material empregado no substrato foi a fibra de vidro (FR4-epoxi) com espessura de 1.54 mm e permissividade relativa (ϵ_r) de 4,4. Na Figura 70 é mostrado o arranjo de antenas de microfita projetado e suas respectivas dimensões.

Figura 70 - Dimensões do arranjo de antenas de microfita.



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 11 os dados das dimensões de comprimento e largura do *patch*, substrato, linhas de alimentação e chanfros são detalhados.

Tabela 11-Valores Dimensões do Arranjo de Antenas de Microfita.

Dimensões	Valor (mm)	Dimensões	Valor (mm)	Dimensões	Valor (mm)
Ws	107	Wt	2,3	D1	1,34
Ls	61,7	Lt	15	D2	2,8
Wp	36,5	W _{70.7}	1,6	d1	0,67
Lp	27,5	L _{70.7}	15,31	d2	1,4
Wif	0,7	W ₁₀₀	0,7	s	24,7
Lif	8,4	L ₁₀₀	14,16		

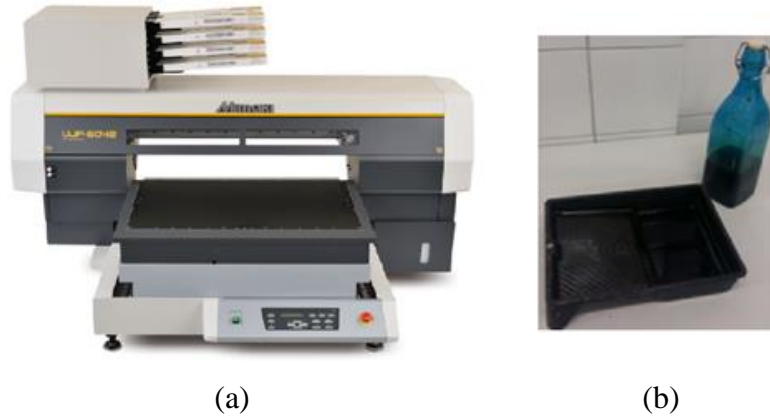
Fonte: Autoria Própria

Com a obtenção das dimensões do projeto, as antenas foram desenhadas e posteriormente simuladas no *software* HFSS® para obtenção dos resultados e extraídos dados como o coeficiente de reflexão, largura de banda, ganho e diagramas de radiação 2D e 3D.

Em seguida as antenas foram fabricadas, processo que foi dado por meio da utilização de uma impressora a jato de tinta com cura ultravioleta, para tiragem dos desenhos das antenas propostas. Após a realização das impressões, as placas são imersas em uma solução de percloro de ferro (FeCl₃) para remoção do excesso do cobre, visto que a tinta não reage com a solução e protege o cobre da corrosão. Na Figura 71-a é ilustrada a impressora UV Mimaki

UJF-6042 utilizada para tiragem das antenas. A Figura 71-b mostra o material utilizado para o processo de corrosão das antenas.

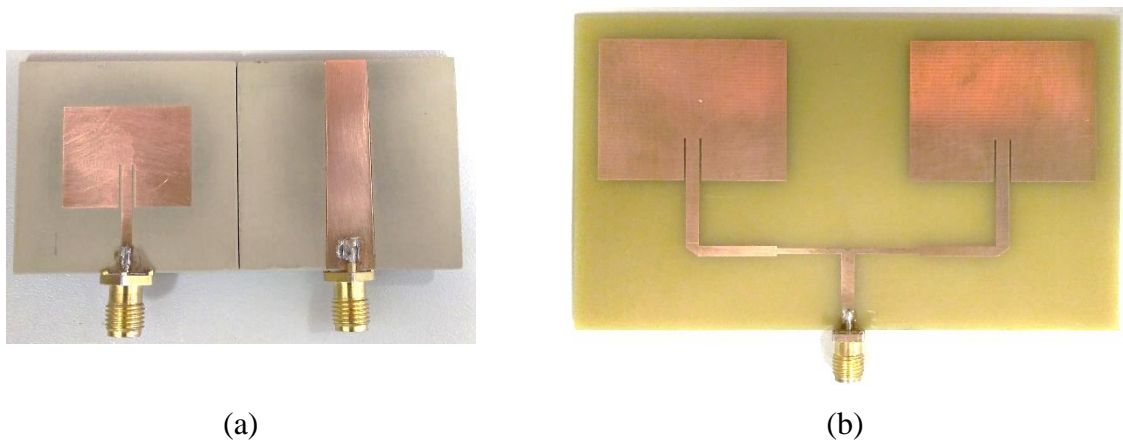
Figura 71-(a) Impressora UV Mimaki UJF-6042. (b) Solução de percloroeto e recipiente.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 72 são mostradas as antenas confeccionadas após o processo de corrosão e com seus devidos conectores, a antena receptora na Figura 72-a e o arranjo na Figura 72-b.

Figura 72- Antenas propostas para sistema de rádio, (a) do receptor, (b) do transmissor.



Fonte: Autoria Própria.

Foi soldado à linha de transmissão e ao plano de terra para promover uma alimentação e posteriores testes das antenas, o conector SMA fêmea reto de cobre banhado a ouro, com impedância de 50Ω e faixa de operação de 0 a 6 GHz, apresentado na Figura 73.

Figura 73- Conector SMA fêmea reto de quatro pinos.



Fonte: Autoria Própria.

Depois das antenas construídas, os coeficientes de reflexão das mesmas foram medidos em um Analisador de Redes Vetoriais – Rhode & Schwarz (ARV), possuindo capacidade de medir na faixa de 10 MHz até 20 GHz. Na Figura 74 é mostrado o ARV R&S ZVB 20 disponibilizado pelo Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados (LEMA) da UFCG.

Figura 74- Analisador de Redes Vetoriais.

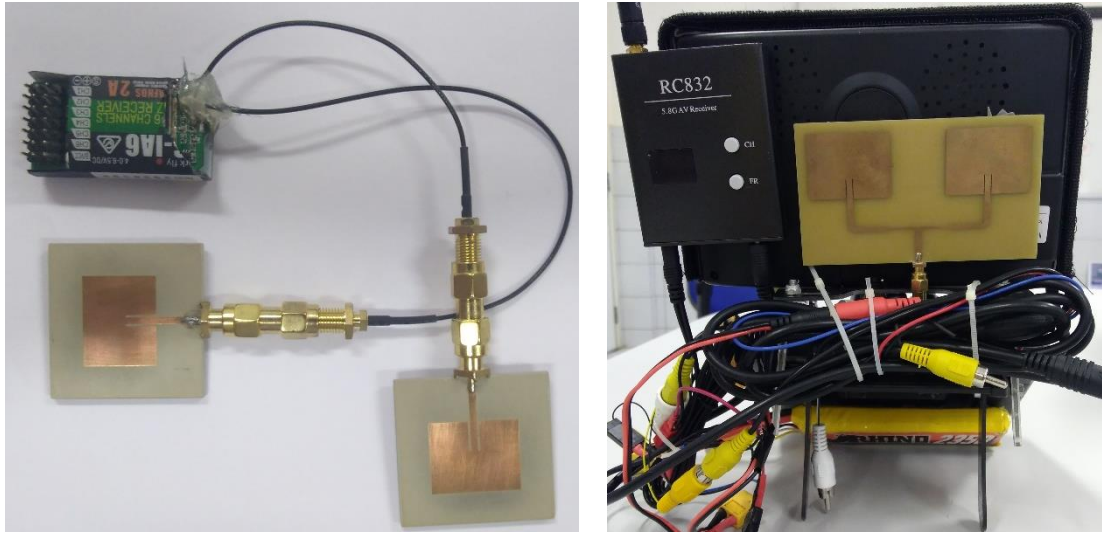


Fonte: Autoria Própria.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DAS ANTENAS NO VANT E REALIZAÇÃO DA INSPEÇÃO VISUAL

Após a aquisição dos parâmetros medidos os dados foram analisados de acordo com a literatura embasada e as antenas implementadas no sistema de rádio controle, como pode ser visto na Figura 75, tanto no receptor, Figura 75-a, quanto no transmissor visto na Figura 75-b.

Figura 75- Antenas implementadas no sistema de rádio do VANT. (a) no receptor, (b) no transmissor.



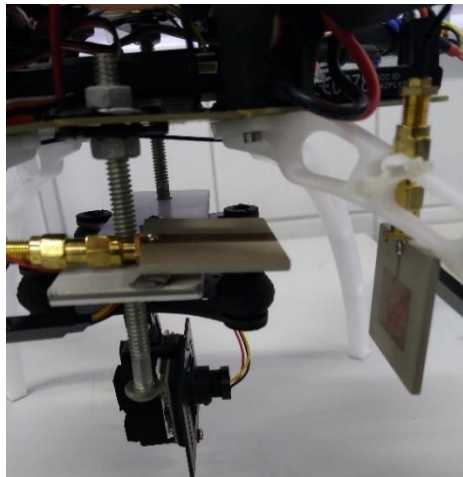
(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 76 é possível observar as antenas do receptor instaladas na estrutura do VANT, uma acoplada ao trem de pouso e outra no suporte da câmera.

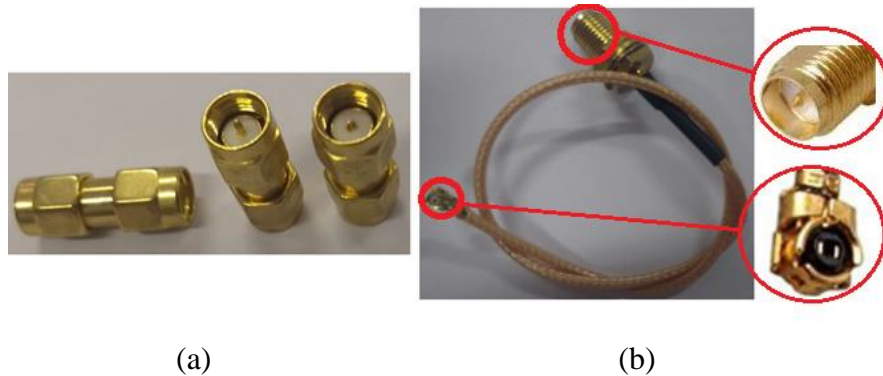
Figura 76- Antenas instaladas no VANT.



Fonte: Autoria Própria.

Para prover a conexão entre a antena e os módulos de recepção e transmissão foram utilizados um adaptador *SMA* macho para *RP-SMA* macho em conjunto com um cabo *pigtail MMCX (Micro Miniature Coaxial)* fêmea para *RP-SMA* fêmea, como mostrado na Figura 77-a e Figura 77-b, respectivamente.

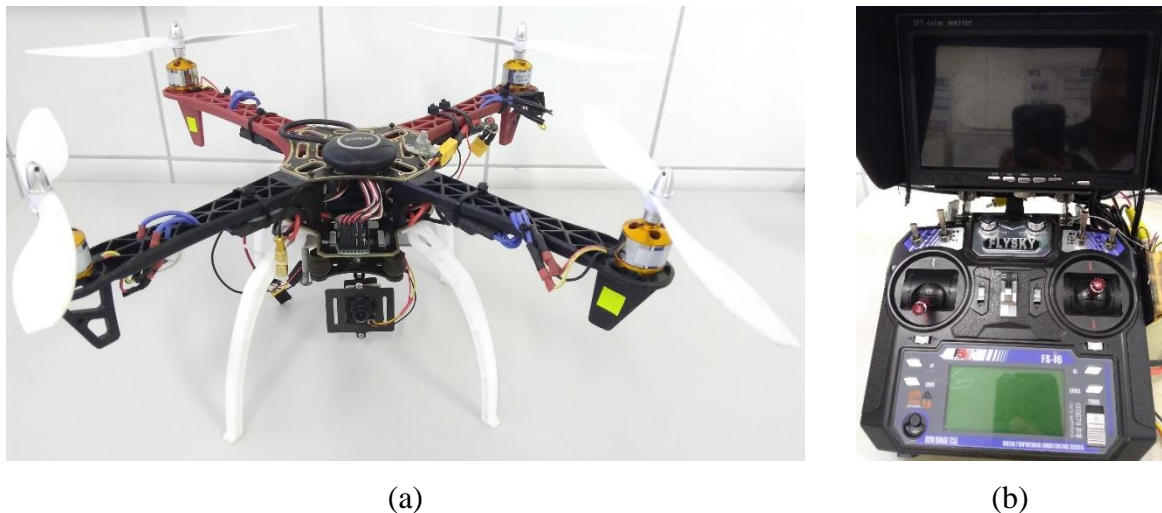
Figura 77- (a) Adaptador *SMA* macho para *RP-SMA* macho. (b) Cabo *pigtail MMCX* fêmea para *RP-SMA* fêmea.



Fonte: Autoria Própria.

Visto que o modelo F450 é um equipamento robusto proporcionando voos *outdoor*, suporta uma carga de até 1,2 kg na decolagem sem que prejudique sua estabilidade, sendo assim instalado a câmera e o transmissor de vídeo no VANT para aquisição de imagens como visto na Figura 78-a. O dispositivo de recepção de vídeo foi acoplado ao controle transmissor, mostrado na Figura 78-b.

Figura 78- (a) VANT F450, (b) conjunto do transmissor com receptor de vídeo.



Fonte: Autoria Própria.

Neste trabalho por ser utilizado a controladora de voo *APM 2.6*, optou-se por utilizar o *software Mission Planner* que é compatível com a controladora de voo e o sistema operacional *Windows*, já que o *software* é instalado em *notebook*. Dessa forma o *Mission Planner* em conjunto com a *APM* permite a configuração, monitoramento, estruturação do voo, calibração

dos sensores e do rádio do VANT, além de ser possível executar missões de modo autônomo por coordenadas pré-programadas.

Para realizar a inspeção na linha de transmissão de forma autônoma, faz-se necessário conhecer a localidade da linha e sua estrutura, pois baseado em suas coordenadas e nas dimensões da estrutura como, altura, engastamento, espaçamento entre condutores e distanciamento dos condutores do centro da estrutura, é possível descrever uma trajetória no *Mission Planner*, de modo que o VANT realize a inspeção.

Um ponto significativo no uso dos VANT's para esta aplicação é a interferência eletromagnética que a rede elétrica pode provocar no seu funcionamento. Sendo obrigatório que o VANT esteja sobrevoando as linhas de transmissão de energia em uma dada distância, de modo que a interferência eletromagnética não venha a prejudicar. O distanciamento adequado que será utilizado no trabalho será dado de acordo com Veríssimo (2016), que na experiência de voo pela COSERN realizou voos a distâncias na faixa de 1,5 a 3 metros sem evidenciar problemas no voo.

Então para determinar os pontos a serem implementados no software é necessário medir o distanciamento da estrutura que o VANT deve estar e posteriormente com o auxílio do GPS registrar a latitude e longitude do ponto escolhido. Para definir a altitude é preciso identificar o tipo de estrutura pela consulta da nota técnica nº304/2010-SER/ANEEL, a mesma aborda em seu Anexo II os módulos construtivos de linhas de distribuição aéreas inferiores a 230 kV.

Após determinadas as coordenadas do local, as mesmas são implementadas no *Mission Planner* para organizar o plano de voo a ser executado. Como o VANT usado não possui telemetria sem fio, mas para aplicação estudada o veículo se manterá numa linha visada, então o carregamento dos dados das missões é feito via cabo *USB* para controladora, e a mesma executa o voo autônomo pela mudança do modo de voo configurado. A principal missão do VANT é manter a rota previamente estabelecida e programada na *APM 2.6*, que com o auxílio do *GPS* para leitura das coordenadas, e dos sensores inerciais da controladora, é possível a navegação automática pelos pontos demarcados e o retorno ao solo em caso de perda de sinal com transmissor, o nível baixo de bateria ou término da missão. Após o término da rota programada por *waypoints*, o VANT retorna ao ponto de decolagem e as imagens obtidas através do monitoramento são gravadas para uma posterior análise.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo traz os resultados simulados e experimentais referentes a este trabalho, com base nos conceitos abordados nos capítulos anteriores, bem como os resultados da aplicação experimental no VANT para inspeção visual.

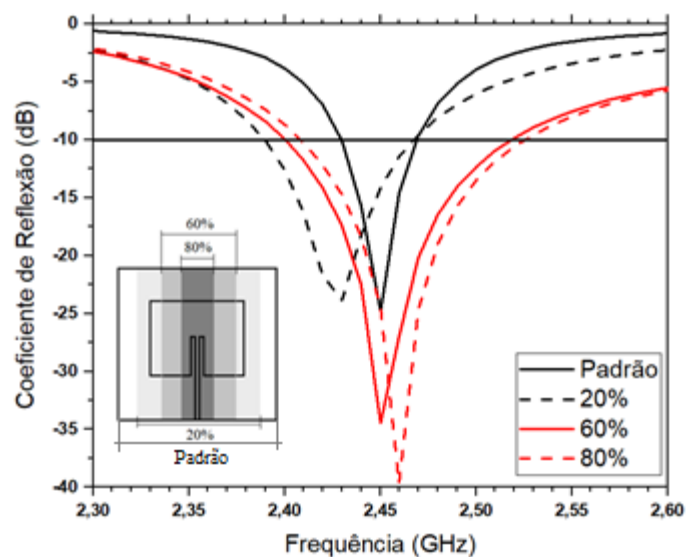
6.1 ANÁLISE DOS DISPOSITIVOS PROPOSTOS

Inicialmente foram realizadas simulações relacionadas aos dispositivos de microondas propostos e posteriormente com o intuito de validar os resultados obtidos, os protótipos foram construídos e medidos.

6.1.1 Resultados Computacionais

Para o receptor do sistema utilizado foi proposta uma antena padrão com plano de terra inicialmente completo, no qual foi modificada a fim de proporcionar omnidirecionalidade. Com as dimensões da antena padrão da antena receptora foram realizadas simulações utilizando o software ANSYS HFSS®, bem como para as modificações realizadas em sua estrutura. Os resultados dos coeficientes de reflexão para cada antena simulada podem ser observados na Figura 79 e na Tabela 12 é resumido os dados das mesmas.

Figura 79- Coeficiente de reflexão da antena receptora padrão em comparação com as modificações realizadas.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 12- Resultados obtidos da Figura 79.

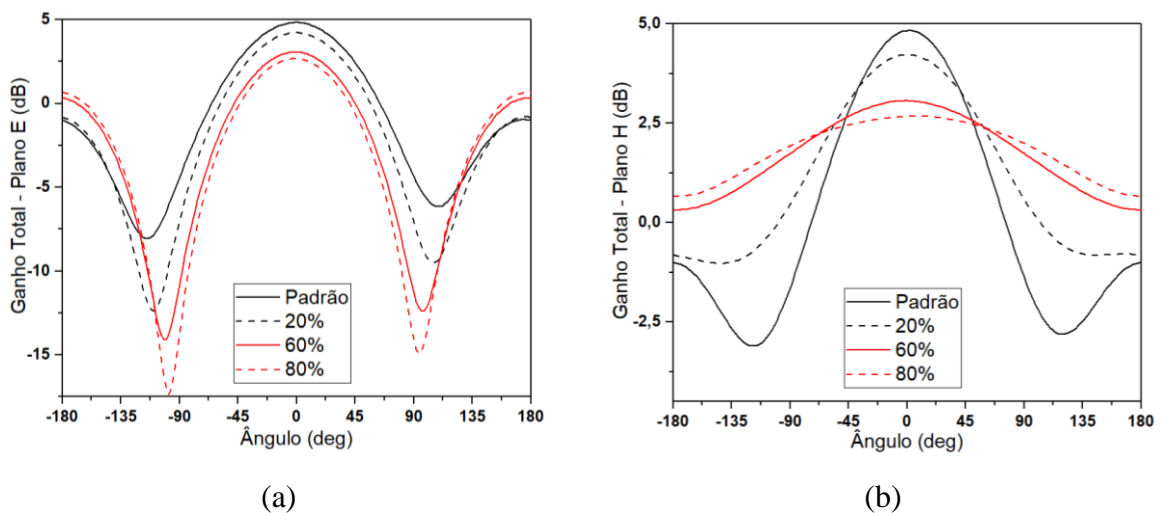
Geometria da Antena	Frequência de Ressonância (GHz)	Coefficiente de Reflexão (dB)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Superior (GHz)	Largura de Banda (MHz)
Padrão	2,450	-24,820	2,430	2,470	40
20%	2,430	-23,890	2,390	2,470	80
60%	2,450	-34,460	2,40	2,510	110
80%	2,460	-39,680	2,405	2,525	120

Fonte: Autoria Própria.

Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 79, observa-se que a largura de banda é incrementada à medida que se reduz o plano de terra, tendo como consequência um deslocamento de frequência. A antena padrão se mostrou com valor de coeficiente de reflexão de -24,82 dB para a frequência de ressonância em 2,45 GHz, possuindo uma largura de banda de 40 MHz. Assim sendo uma largura de banda estreita para aplicação, pois não abrange todas frequências da faixa *ISM* em 2,4 GHz. A geometria da antena receptora que teve 80% de truncamento ressoou em 2,46 GHz com coeficiente de reflexão de -39,68 dB, apresentando o melhor casamento de impedância e largura de banda dentre todas as modificações realizadas.

A Figura 80 ilustra os diagramas de radiação linear para frequência de projeto das antenas receptora e as modificações realizadas. Onde são notórios, a redução do ganho na direção de máxima radiação e o aumento da radiação na direção diametralmente oposta a esta.

Figura 80- Diagrama de radiação linear da antena receptora padrão em comparação com as modificações realizadas, (a) Plano E, (b) Plano H.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 80, a antena que teve 80% da largura do plano de terra truncado apresenta o maior grau de omnidirecionalidade, como consequência teve o ganho reduzido de

quase 50% em relação a antena padrão e uma variação na direção de máxima radiação. Na Tabela 13 se encontram resumidos os resultados da Figura 80.

Tabela 13- Resultados obtidos da Figura 80

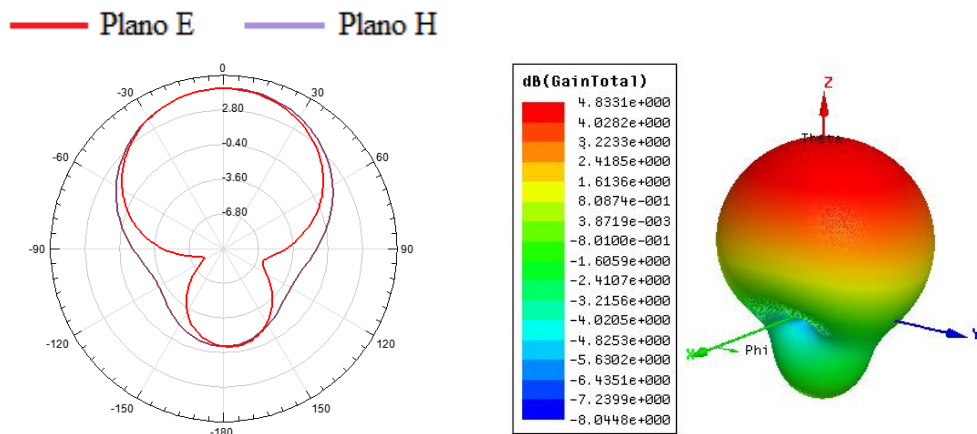
Geometria da Antena	Ganho – Campo E (dB) / Ângulo do ganho máx. (graus)	Ganho – Campo H (dB) / Ângulo do ganho máx. (graus)
Padrão	4,831 / 0°	4,833 / 2°
20%	4,224 / 0°	4,224 / 0°
60%	3,065 / -2°	3,064 / -2°
80%	2,675 / -2°	2,677 / 6°

Fonte: Autoria Própria.

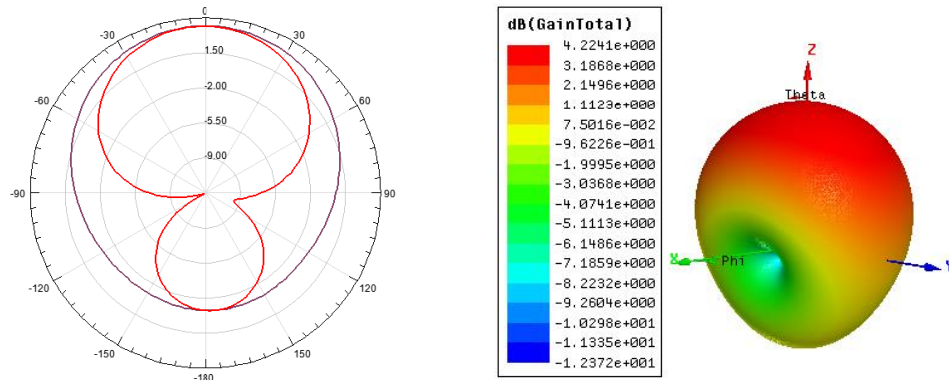
Na Figura 81 é possível observar os diagramas de radiação 2D e 3D para frequência de projeto das antenas receptora padrão e os truncamentos nela realizados. Sendo a antena padrão caracterizada com um padrão de radiação *broadside*, ou seja, devido ao plano de terra ter a dimensão completa as dimensões do substrato da antena, toda potência é radiada na direção do vetor normal ao plano do *patch* da antena. A medida que os truncamentos na largura do plano de terra são incrementados, como se pode observar nas Figuras 81-b, 81-c e 81-d, a potência é radiada no sentido oposto em relação a antena padrão, pois a dimensão reduzida do plano de terra permite esta propagação do campo elétrico.

Figura 81- Diagramas de Radiação 2D e 3D das modificações realizadas na antena receptora:

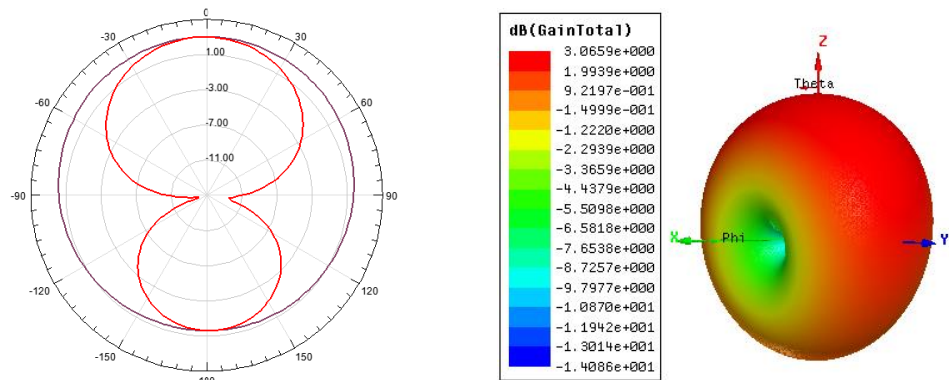
(a) sem truncamento, (b) 20% truncado, (c) 60% truncado, (d) 80% truncado.



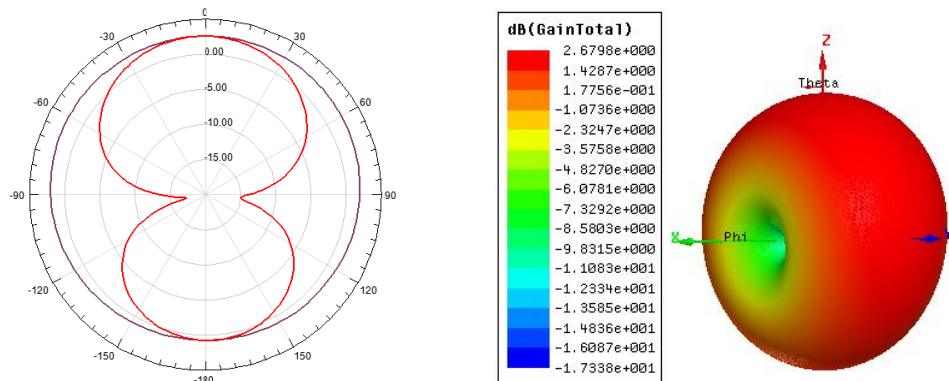
(a)



(b)



(c)

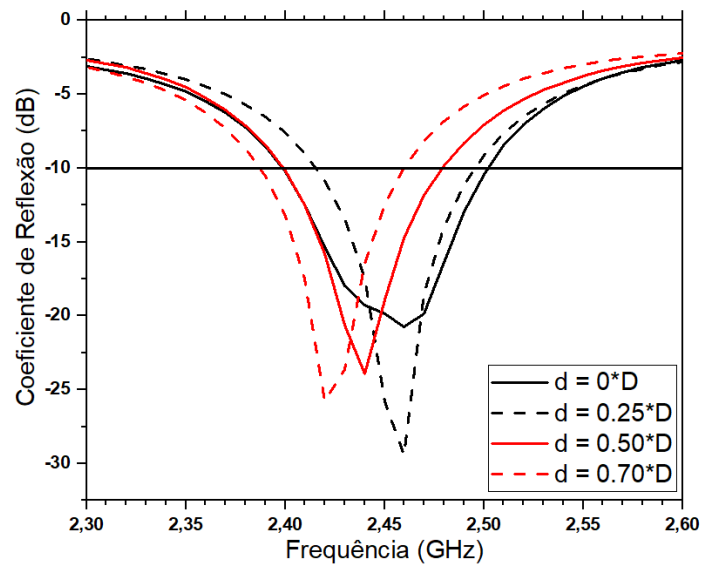


(d)

Fonte: Autoria Própria.

Para a configuração do arranjo proposto ao transmissor, inicialmente foi projetado um único elemento do qual é constituído o arranjo linear paralelo. Com as dimensões do arranjo foram realizadas simulações utilizando o software ANSYS HFSS®, bem como para as modificações propostas em sua estrutura que se encontram na rede de alimentação. O resultado dos coeficientes de reflexão de cada configuração do arranjo pode ser observado na Figura 82 e na Tabela 14 é resumido os dados das mesmas.

Figura 82- Coeficiente de reflexão do arranjo em comparação com as modificações realizadas.



Fonte: Autoria Própria.

Onde o “D” na legenda da Figura 82 representa a distância total entre os cantos da borda interior e a borda exterior da rede de alimentação, já o “d” indica o percentual que foi chanfrado, ou seja, a distância a partir da borda exterior adentrando na estrutura.

Tabela 14- Resultados obtidos da Figura 82

Geometria do Chanfro	Frequência de Ressonância (GHz)	Coeficiente de Reflexão (dB)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Superior (GHz)	Largura de Banda (MHz)
0%	2,46	-20,76	2,40	2,50	100
25%	2,46	-29,38	2,415	2,495	80
50%	2,44	-23,9	2,40	2,480	80
70%	2,42	-25,74	2,385	2,455	70

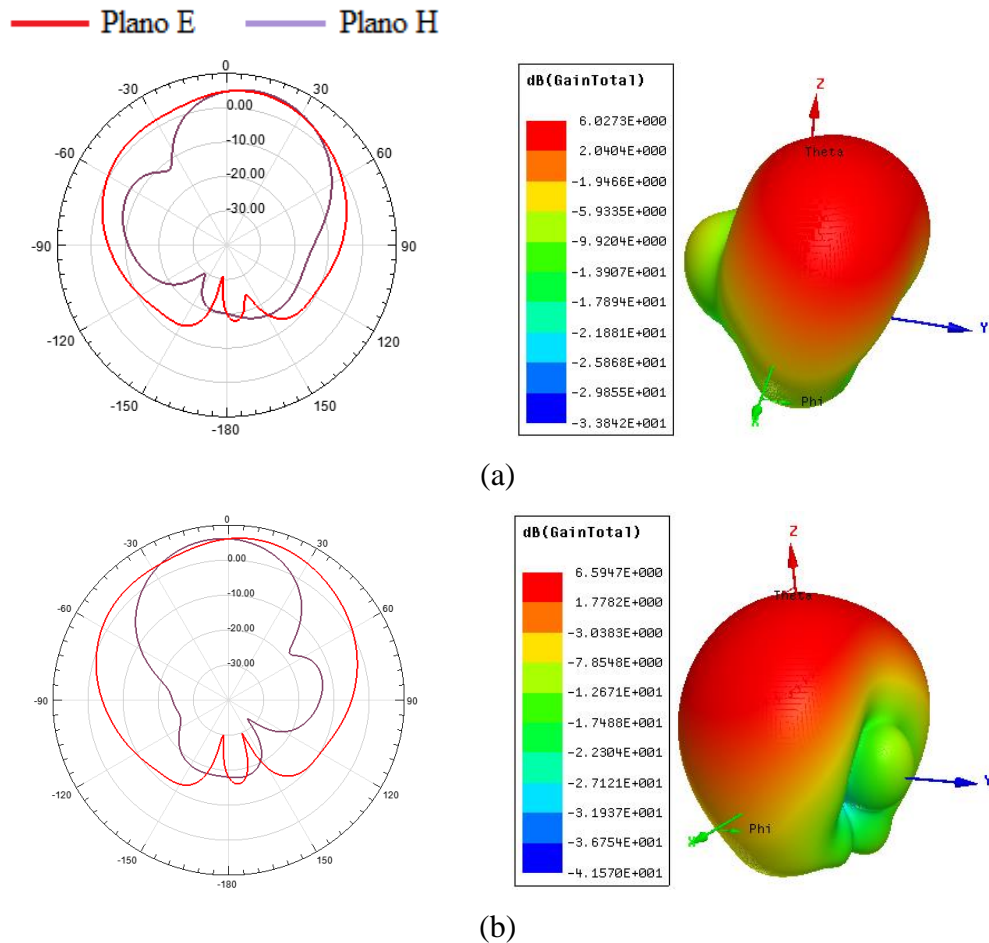
Fonte: Autoria Própria.

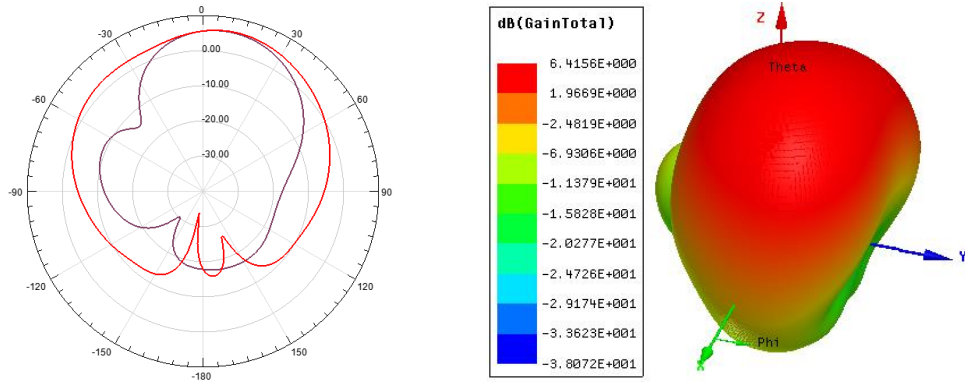
De acordo com os resultados da Figura 82, observa-se que as configurações para o arranjo apresentaram uma média de deslocamento de frequência de 15 MHz em relação a frequência de projeto. Dentre elas, a que obteve menor coeficiente de reflexão para sua frequência de ressonância foi a que possui chanfro de 25%, com valor de -29,38 dB em 2,46 GHz, porém teve a largura reduzida em 20 MHz quando comparada com a geometria inicial sem chanfro que possui 100 MHz de largura de banda. Conforme a Tabela 14, a antena com 70% de chanfro apresentou o maior deslocamento de frequência e menor largura de banda sendo, respectivamente, 30 MHz e 70 MHz.

Entre as antenas que apresentaram chanfro em sua estrutura, a que teve 50% de truncamento apresentou melhor concordância para aplicação, possuindo a maior largura de banda dentro da faixa de aplicação. A configuração do arranjo transmissor com 50% de chanfro ressoou em 2,44 GHz com -23,9 dB de perda retorno, abrangendo quase que na totalidade as frequências da faixa *ISM* para 2,4 GHz possuindo 80 MHz de largura de banda.

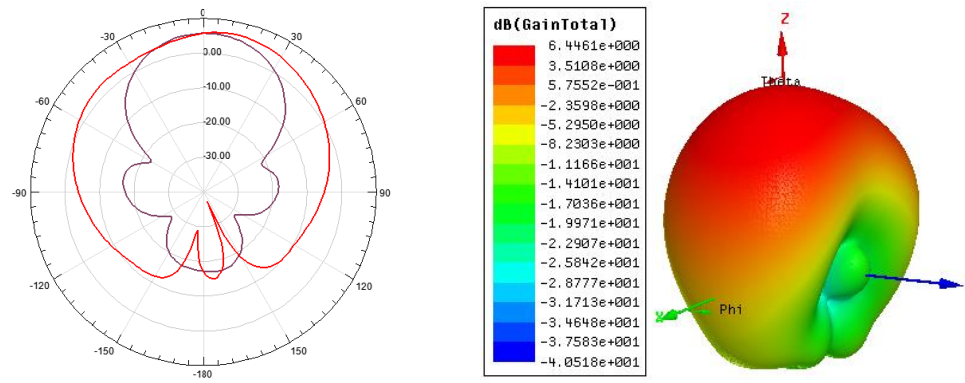
Na Figura 83 é possível observar os diagramas de radiação 2D e 3D para frequência de projeto da antena transmissora padrão e os chanfros nela realizados. Onde todas são caracterizadas por um padrão de radiação *broadside*, visto que não houve alterações no plano de terra.

Figura 83-Diagramas de Radiação 2D e 3D das modificações realizadas na antena transmissora: (a) sem chanfro, (b) 25% chanfrado, (c) 50% chanfrado, (d) 70% chanfrado.





(c)



(d)

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 15 são descritos de forma resumida os resultados da Figura 83, no que diz respeito ao ganho na direção de máxima radiação e sua direção tanto do campo elétrico como do magnético. De acordo com as informações extraídas dos dados, a aplicação dos chanfros na estrutura da rede de alimentação acarretou em um incremento no ganho elétrico e magnético da antena, bem como no casamento de impedância. A antena com geometria chanfrada de 25% apresentou um ganho total maior dentre as antenas possuindo 6,5 dB e 6,154 dB, na direção do campo elétrico e magnético, respectivamente.

Tabela 15- Resultados obtidos da Figura 81

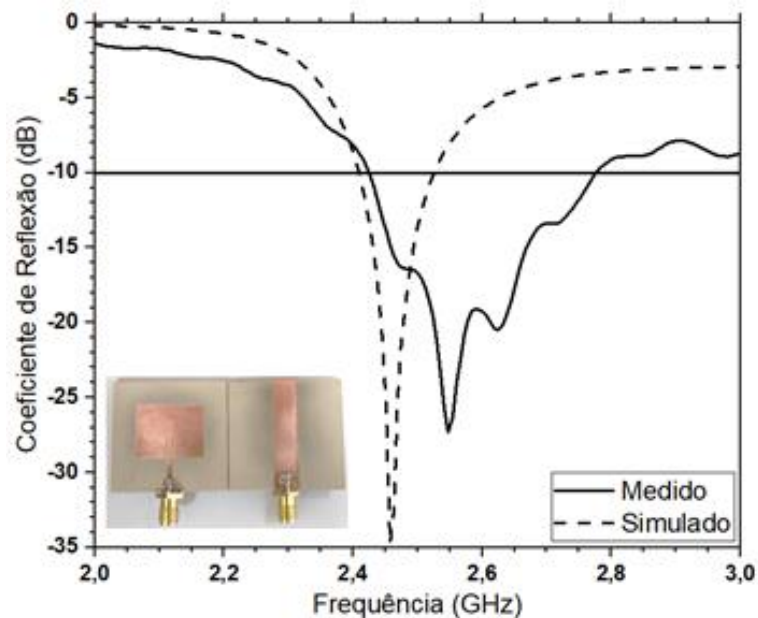
Geometria do Chanfro	Ganho – Campo E (dB) / Ângulo do ganho máx. (graus)	Ganho – Campo H (dB) / Ângulo do ganho máx. (graus)
0%	5,239 / 10°	4,633 / 12°
25%	6,5 / 10°	6,154 / -4°
50%	6,1 / 10°	5,935 / 8°
70%	6,44 / 12°	5,87 / 0°

Fonte: Autoria Própria.

6.1.2 Resultados Experimentais

Dentre as antenas propostas para o receptor do rádio, foi selecionada para fabricação a antena que teve 80% de truncamento na largura do plano de terra, isso devido às características de largura de banda, coeficiente de reflexão, ganho e disponibilidade de material para uso como substrato. O coeficiente de reflexão obtido no ARV desta antena comparada com seu valor simulado é observada na Figura 84.

Figura 84- Comparação entre os coeficientes de reflexão simulado e medido da antena proposta para o receptor.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 84, é possível observar que houve um deslocamento da frequência de 88 MHz para esquerda, isso devido a um descasamento de impedância ocasionado pela solda do conector e pelo cabo utilizado na medição no ARV, o que provocou também um aumento do coeficiente de reflexão em sua frequência de ressonância, sendo de -27,318 dB. A largura de banda da antena construída teve um valor superior ao da simulada, de aproximadamente 292%, possuindo 350 MHz. Os resultados deste comparativo se encontram resumidos na Tabela 16.

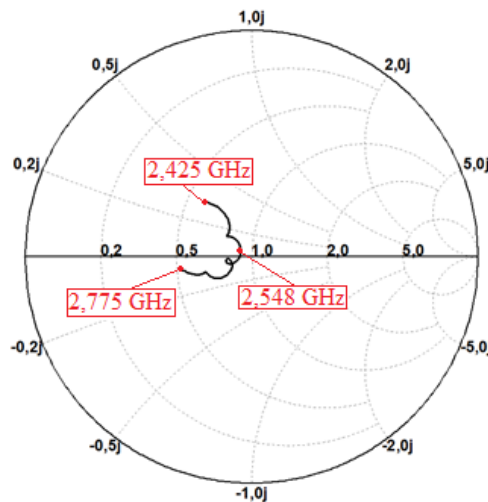
Tabela 16- Resultados da Figura 84

Característica da Antena	Frequência de Ressonância (GHz)	Coefficiente de Reflexão (dB)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Superior (GHz)	Largura de Banda (MHz)
Simulada	2,460	-39,680	2,405	2,525	120
Medida	2,548	-27,318	2,425	2,775	350

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 85 é apresentada a Carta de Smith para antena proposta ao receptor, onde a curva foi construída para os valores situados entre a frequência inferior (2,425 GHz) e superior (2,775 GHz) da antena normalizados para 50 Ω .

Figura 85- Carta de Smith medida da antena proposta para o receptor.



Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 17 são apresentados pontos de interesse da Carta de Smith, sendo três deles indicados na Figura 85, mais o ponto referente a frequência de 2,4835 GHz condizente a frequência superior da faixa *ISM* para 2.4 GHz mostrado na Figura 1. É possível observar que para frequência de ressonância, 2,548 GHz, a impedância de entrada é de 45,26 Ω , o que implica no menor fator reflexão, em razão de ser a mais próxima de 50 Ω .

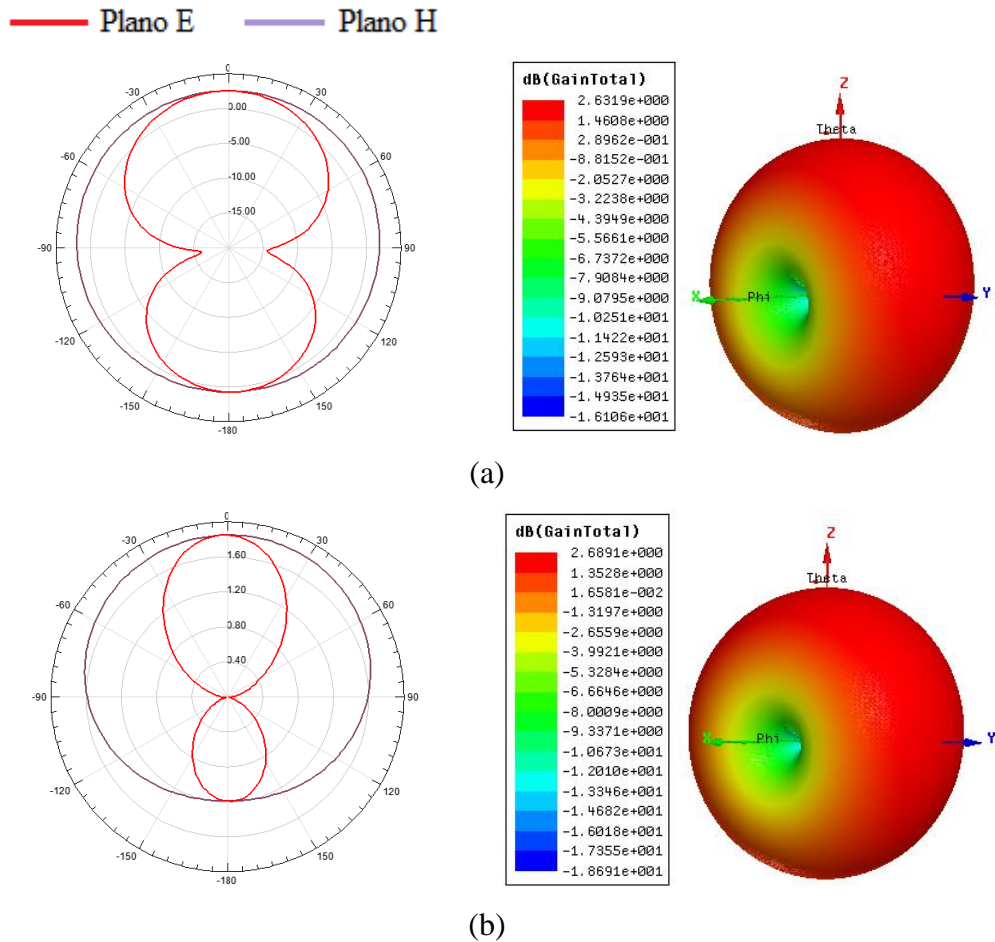
Tabela 17- Resultados obtidos da Figura 85.

Frequência (GHz)	Resistência Normalizada	Reatância Normalizada	Resistência (Ω)	Reatância ($j\Omega$)
2,425	0,59818	0,32313	29,909	16,157
2,4835	0,79257	0,15172	39,629	7,586
2,548	0,90495	0,02205	45,248	1,103
2,775	0,52019	-0,05951	26,009	-2,976

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os resultados evidenciados da antenna proposta para o receptor, observa-se que apesar de possuir uma largura de banda considerável, somente 58,5 MHz de largura de banda atende a aplicação no receptor, correspondente à faixa de frequências entre 2,425 – 2,4835 GHz. Em função dessa faixa de frequência, foram obtidos os diagramas de radiação 2D e 3D para cada uma delas, a fim de verificar os mesmos mantinham uma certa omnidirecionalidade, bem como um ganho considerável que se mantivesse igual ou superior aos dipolos comerciais, que possuem um ganho em torno de 2 dB. Dessa forma, na Figura 86 é mostrado os diagramas de radiação 2D e 3D simulados para as frequências de 2,425 GHz e 2,4835 GHz, no qual se observa uma preservação do comportamento omnidirecional, bem como do ganho.

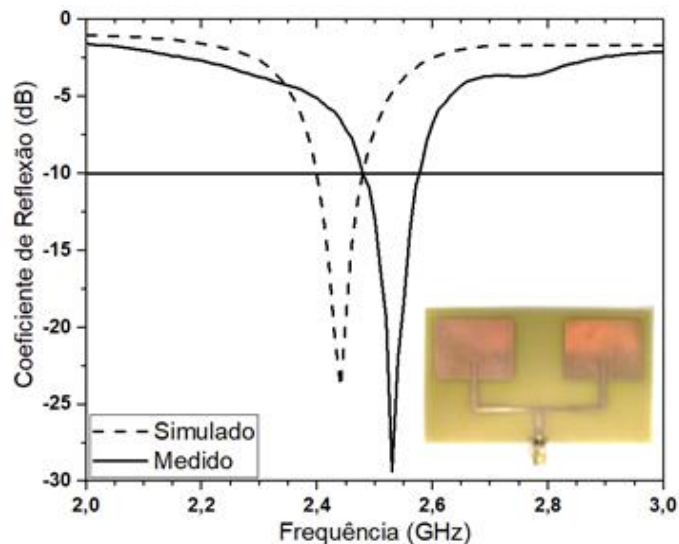
Figura 86- Diagramas de Radiação 2D e 3D para antenna receptora proposta nas frequências: (a) 2,425 GHz, (b) 2,4835 GHz.



Fonte: Autoria Própria.

Dentre as antenas propostas para o transmissor do rádio, foi selecionada para fabricação o arranjo de antenas que teve 50% de chanfro na estrutura da rede de alimentação, isso devido ao mesmo possuir um ganho maior do que o arranjo sem modificação, apresentando um aumento de quase 1 dB, como também ter a maior largura de banda dentro da faixa de frequências *ISM* em 2,4 GHz entre os arranjos modificados. Na Figura 87, é demonstrado o comparativo dos coeficientes de reflexão referente a antena simulada e construída proposta ao transmissor do rádio.

Figura 87- Comparação entre os coeficientes de reflexão simulado e medido da antena proposta para o transmissor.



Fonte: Autoria Própria.

Segundo os resultados da Figura 87, verifica-se que a antena construída para o transmissor teve sua frequência deslocada em relação a simulada no primeiro modo de ressonância de 90 MHz, possuindo um coeficiente de reflexão de -29,37 dB para frequência de ressonância em 2,53 GHz. Já a largura de banda apresentou um valor de 96 MHz, um incremento de 20% em relação a antena simulada. Na Tabela 18 se encontra resumido os resultados referentes a Figura 87.

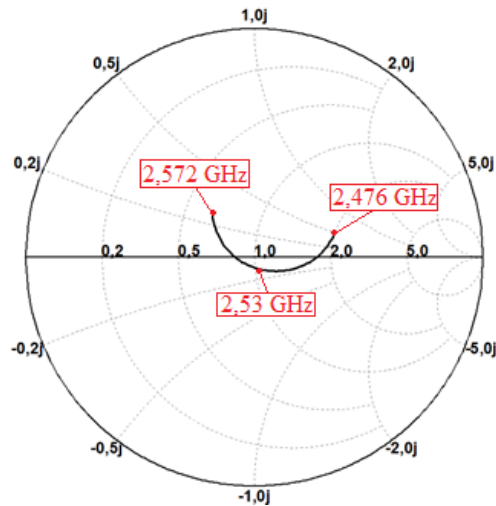
Tabela 18- Resultados obtidos da Figura 87

Característica da Antena	Frequência de Ressonância (GHz)	Coefficiente de Reflexão (dB)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Superior (GHz)	Largura de Banda (MHz)
Simulada	2,44	-23,9	2,40	2,480	80
Medida	2,53	-29,37	2,476	2,572	96

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 88 é apresentada a Carta de Smith para antenna proposta ao transmissor, onde a curva foi construída para os valores situados entre a frequência inferior (2,476 GHz) e superior (2,572 GHz) da antenna normalizados para 50 Ω .

Figura 88- Carta de Smith medida da antenna proposta para o transmissor.



Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 19 são apresentados pontos de interesse da Carta de Smith, sendo três deles indicados na Figura 88, mais o ponto referente a frequência de 2,4835 GHz condizente a frequência superior da faixa *ISM* para 2.4 GHz mostrado na Figura 1. No tocante as impedâncias de entrada medidas da antenna proposta para o transmissor, nota-se a proximidade da impedância de entrada ao valor utilizado em projeto para a linha de transmissão (50 Ω), tendo impedância equivalente a 50,38 Ω para frequência de ressonância.

Tabela 19- Resultados obtidos da Figura 88.

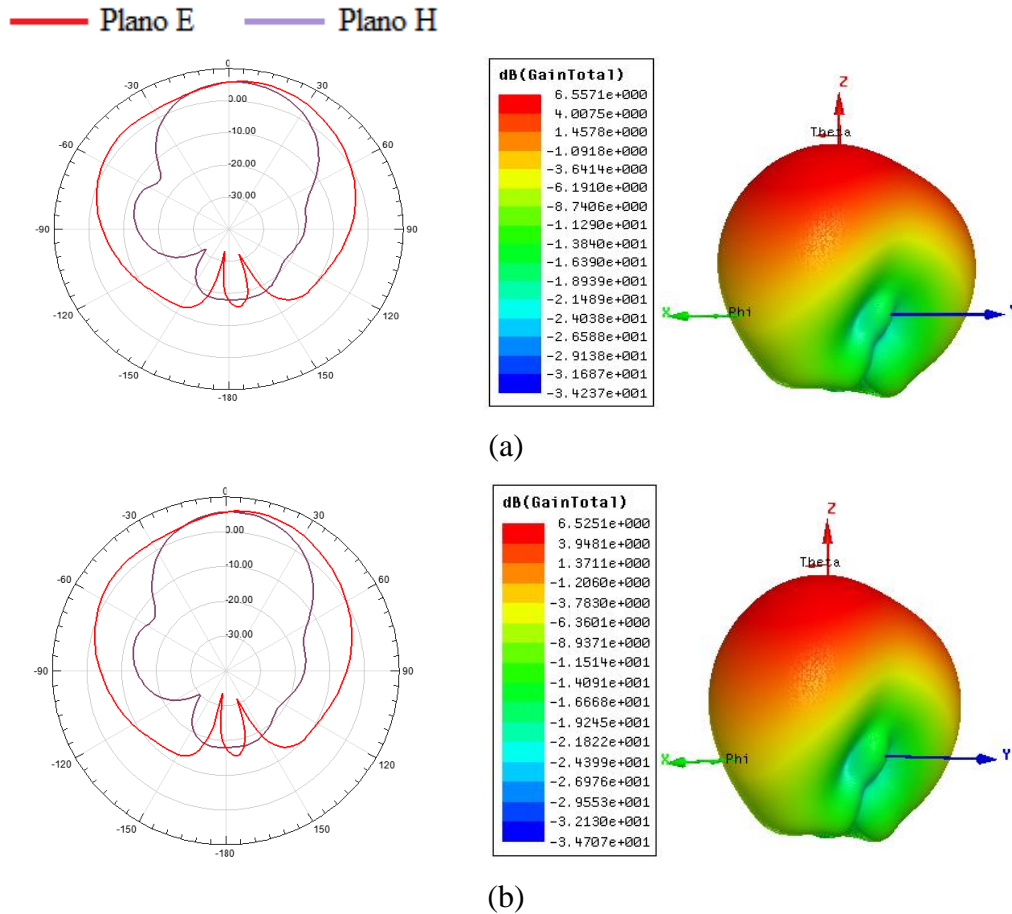
Frequência (GHz)	Resistência Normalizada	Reatância Normalizada	Resistência (Ω)	Reatância ($j\Omega$)
2,476	2,00366	0,52702	100,183	26,351
2,4835	1,96165	0,30098	98,0825	15,049
2,53	1,00329	-0,09267	50,165	-4,634
2,572	0,64123	0,27797	32,062	13,899

Fonte: Autoria Própria.

Conforme os resultados evidenciados da antenna proposta para o transmissor, verifica-se que somente 7,5 MHz de largura de banda apresentada pela antenna atende a aplicação no transmissor, correspondente à faixa de frequências entre 2,476 – 2,4835 GHz. Em razão dessa faixa de frequência, foram obtidos os diagramas de radiação 2D e 3D simulados para cada uma

delas, com o objetivo de verificar a congruência com os parâmetros envolvidos. No entanto, os diagramas se apresentaram semelhantes em padrão de radiação e magnitude do ganho, como pode ser visto na Figura 89.

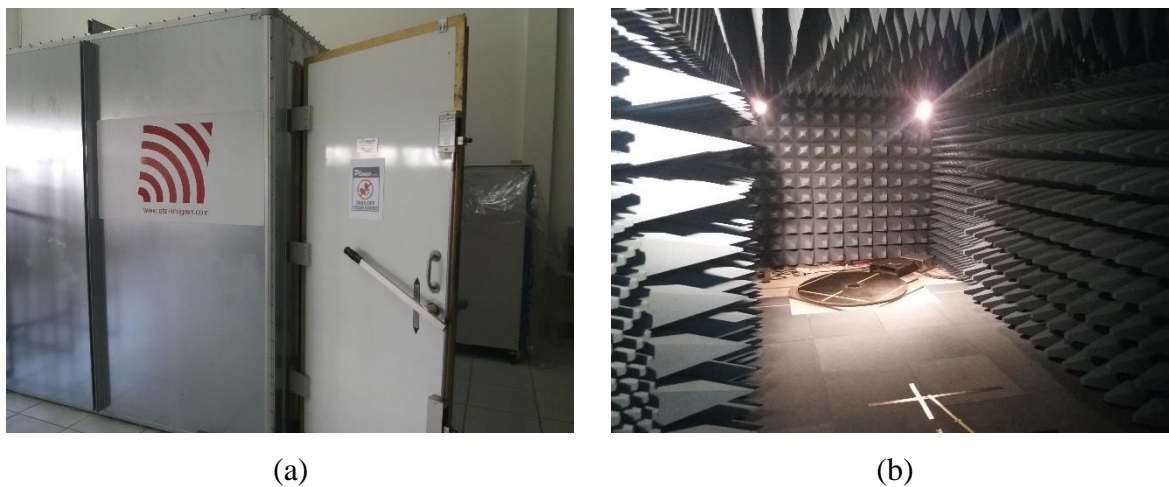
Figura 89- Diagramas de radiação 2D e 3D para antena transmissora proposta nas frequências: (a) 2,476 GHz, (b) 2,4835 GHz.



Fonte: Autoria Própria.

Para o arranjo proposto ao transmissor, também foram medidos os diagramas de radiação 2D para o plano E e plano H em uma câmara anecoica, apresentada na Figura 90, a mesma é da marca ETS Lindgren com capacidade de medição na faixa de 9 kHz a 7 GHz. O equipamento conta com um analisador de espectro, o qual foi configurado para frequência de ressonância da antena, em 2,53 GHz. As antenas foram fixadas no tripé e o conjunto posto acima de uma mesa giratória, no qual foi variado o ângulo da antena em relação a antena transmissora na câmara.

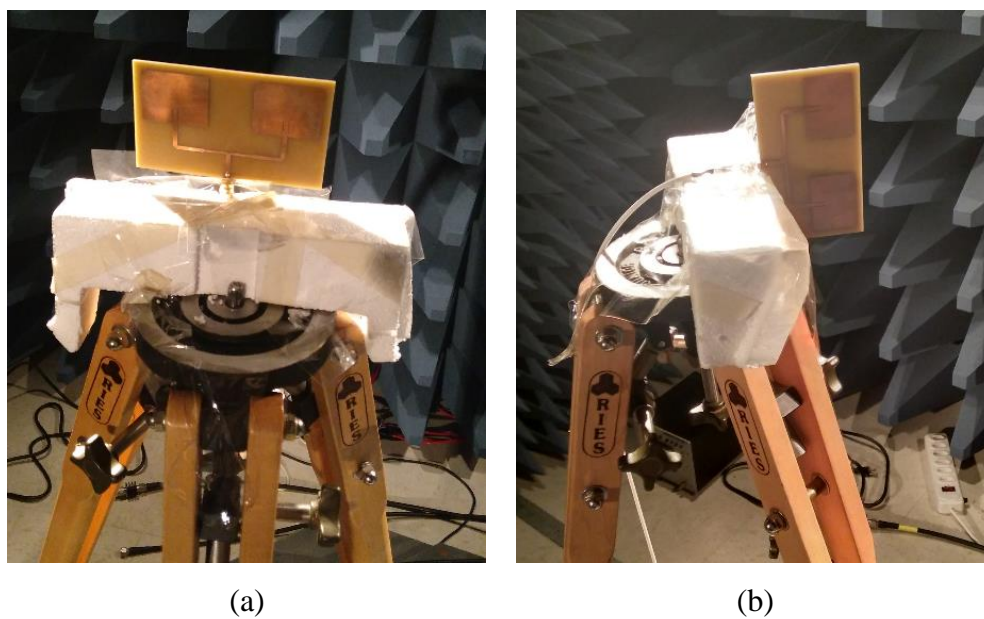
Figura 90- Câmara anecoica ETS Lindgren, (a) vista exterior, (b) vista interior.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 91 é mostrada a disposição da antena para medição de ambos planos, no total foram mensurados 18 pontos para cada plano, variando-se o ângulo do motor a cada 10° , abrangendo uma faixa de 0° a 180° , os valores obtidos são medidos em decibéis miliwatts (dbm).

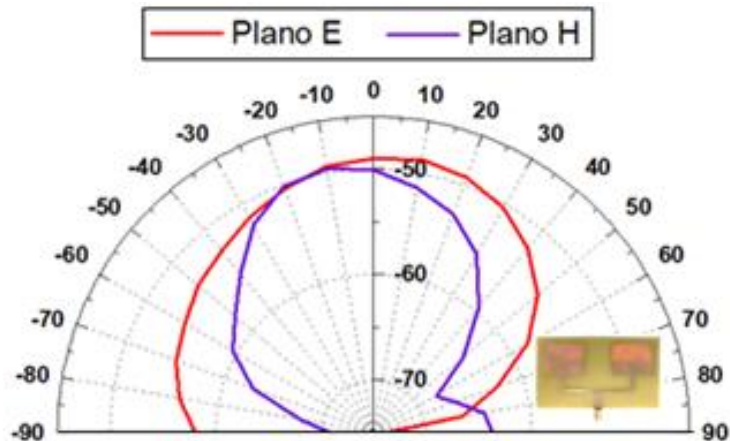
Figura 91- Medições na câmara anecoica, (a) no plano E, (b) no plano H.



Fonte: Autoria Própria.

Os pontos são apresentados na Figura 92, onde é possível observar uma concordância com o padrão de radiação simulado, no qual o plano E apresenta maior ganho em uma direção de 10°, possuindo o maior valor medido, de -48,7 dbm, que no caso significa uma maior recepção de potência nesta direção.

Figura 92- Diagrama de radiação 2D medido da antena proposta ao transmissor.

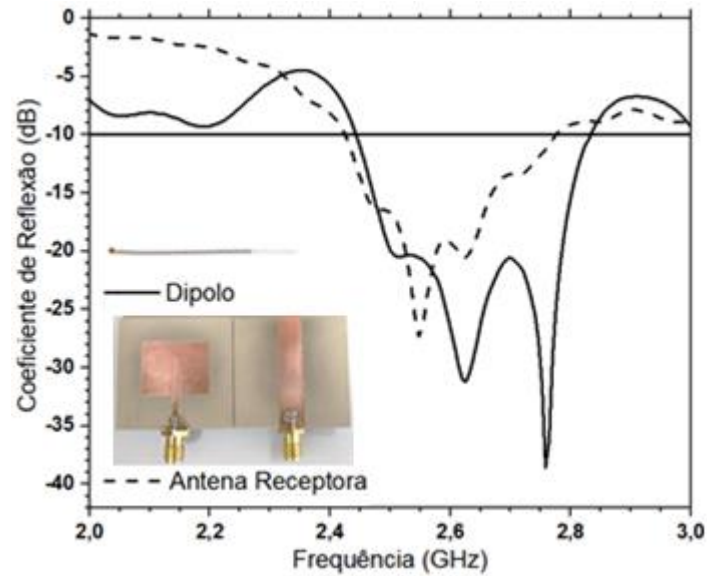


Fonte: Autoria Própria.

Segundo os resultados mostrados para as antenas propostas ao receptor e transmissor, foi realizado um comparativo do resultado do coeficiente de reflexão das mesmas com o dipolo advindo no rádio.

De acordo com a Figura 93, é notado que o dipolo conta com uma largura de banda maior do que a antena proposta ao receptor, possuindo 396 MHz, mas somente 38,5 MHz de sua largura de banda é admissível para aplicação na faixa *ISM* em 2,4 GHz, menor do que o da antena proposta ao receptor. O mesmo apresenta frequência de ressonância em 2,758 GHz com coeficiente de reflexão de -38,63 dB. Os resultados referentes a Figura 93 são resumidos na Tabela 20.

Figura 93- Comparação entre os coeficientes de reflexão da antenna proposta ao receptor com o dipolo.



Fonte: Autoria Própria.

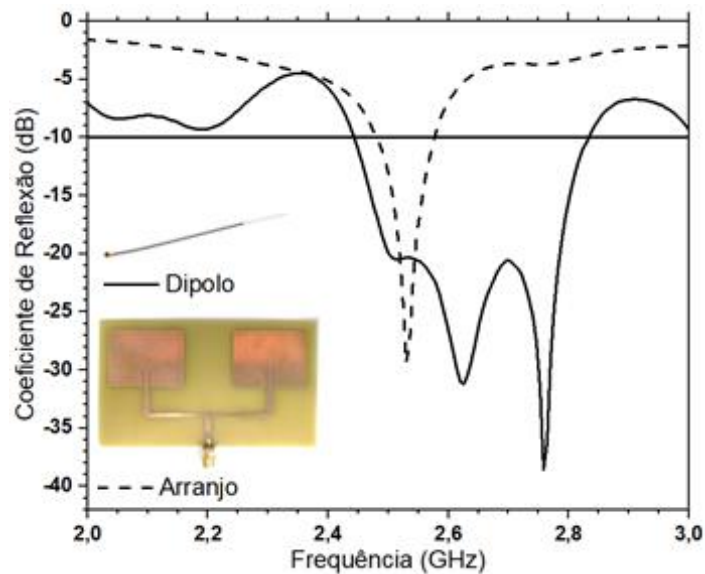
Tabela 20- Resultados da Figura 93.

Característica da Antena	Frequência de Ressonância (GHz)	Coeficiente de Reflexão (dB)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Superior (GHz)	Largura de Banda (MHz)
Dipolo	2,758	-38,63	2,445	2,832	387
Receptora	2,548	-27,318	2,425	2,775	350

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 94 é apresentado um comparativo dos resultados dos coeficientes de reflexão para o dipolo e o arranjo proposto ao transmissor. O arranjo possui uma largura de banda estreita em relação ao dipolo, cerca de quatro vezes menor, mas o mesmo apresentou uma largura de banda de 7,5 MHz admissível para aplicação. Em contrapartida o arranjo proposto apresentou um ganho superior ao dipolo, evidenciado no teste realizado para verificar a comunicação dos dispositivos propostos.

Figura 94- Comparação entre os coeficientes de reflexão da antena proposta ao transmissor com o dipolo.



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados da Figura 94 se encontram resumidos na Tabela 21, onde se observa os parâmetros relativos ao comparativo das antenas, no tocante ao coeficiente de reflexão.

Tabela 21- Resultados da Figura 94.

Característica da Antena	Frequência de Ressonância (GHz)	Coeficiente de Reflexão (dB)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Superior (GHz)	Largura de Banda (MHz)
Dipolo	2,758	-38,63	2,445	2,832	387
Arranjo	2,53	-29,37	2,476	2,572	96

Fonte: Autoria Própria.

Após a aquisição dos resultados das antenas propostas e verificado que possuem faixas de frequências suportáveis com a faixa de frequências da aplicação, as mesmas foram implementadas no sistema de rádio controle.

6.2 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL

Depois de instaladas e verificada a comunicação dos dispositivos, foi realizada a inspeção visual de uma estrutura aérea de alta tensão, no entanto foi selecionada uma estrutura de subtransmissão de 69 kV, a qual se encontra no município de Mossoró – RN, bairro Barrocas,

na Avenida Alberto Maranhão, situada a aproximadamente 300 metros da subestação de Barrocas 69/13,8 kV, como pode ser vista na Figura 95.

Figura 95- Localização da linha inspecionada.



1 – Linha Inspeccionada 2 – Subestação Barrocas

Fonte: Autorial Própria

A estrutura é classificada como sendo autoportante de ancoragem compacta sem cabo de para raios, com classe de tensão 72,5 kV de circuito simples. Na Figura 96 é mostrada a linha em estudo, uma visão geral na Figura 96-a e uma aproximação do topo da estrutura na Figura 96-b. A localidade da linha em termos de coordenadas e sua altura são descritas na Tabela 22, cujos valores são dados em graus decimais (DD).

Tabela 22- Dados da estrutura inspecionada.

Latitude (DD)	Longitude (DD)	PG da estrutura	Altura Nominal (m) / Esforço (N/m)	Engastamento (m)
-5,1630821	-37,3269705	Lt12 432	20,00 / 2500	2,60

Fonte: Autorial Própria

Na Figura 96-c é apresentado o módulo construtivo correspondente a estrutura, onde os espaçamentos dos elementos são mostrados em sua vista lateral, bem como o esgastamento que é dado por 10% da altura nominal acrescido de 0,6 metros. Também pode ser observado o detalhe da vista superior, onde a linha é isolada da estrutura por dois isoladores de ancoragem e um do tipo pilar.

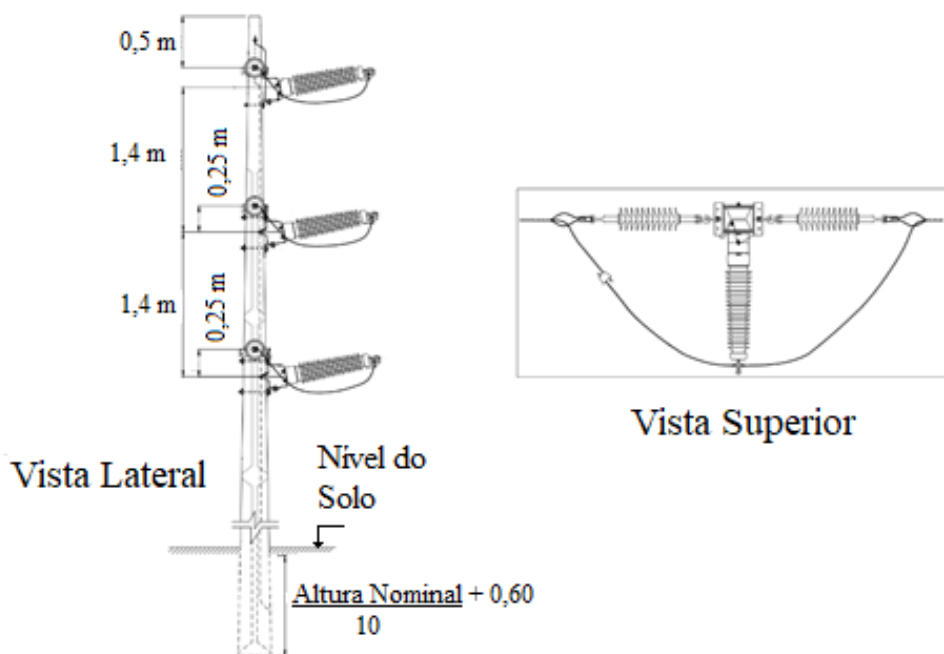
Figura 96- Imagens da linha inspecionada, (a) vista geral da estrutura, (b) topo da estrutura, (c) detalhes da vista lateral e superior.



(a)



(b)



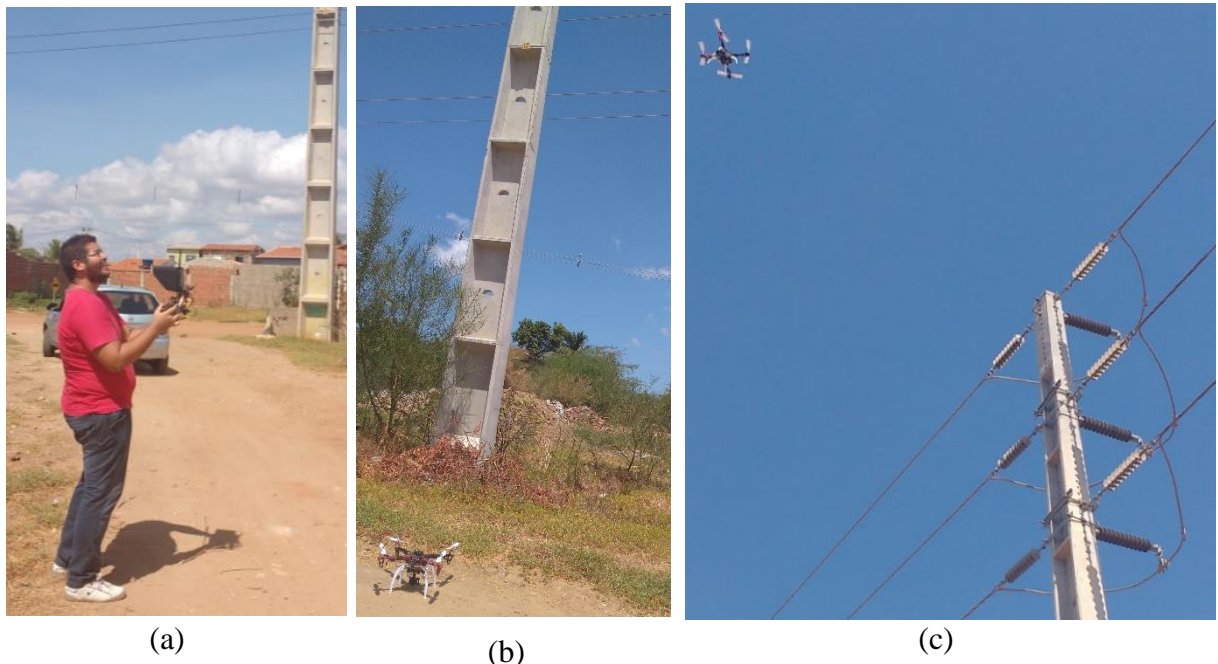
(c)

Fonte: (a) Autoria Própria, (b) Autoria Própria; (c) COELCE, 2005

Dentre os modos de utilização do VANT para inspeção, foi necessário a operação manual do equipamento, pois o *GPS* do mesmo não se encontrava em pleno funcionamento, visto que não possuía a precisão devida para aplicação. Na Figura 97 é ilustrado o momento em que foi realizada a inspeção, o VANT foi decolado com sua frente em direção a estrutura, facilitando o controle e a tomada das imagens.

A ação do vento é o principal obstáculo na realização da inspeção, pois o mesmo aproximava ou distanciava a aeronave, como também provocava vibração prejudicando a transmissão do vídeo. Em vista disso, o voo foi realizado no período da manhã, devido a menor velocidade dos ventos neste período.

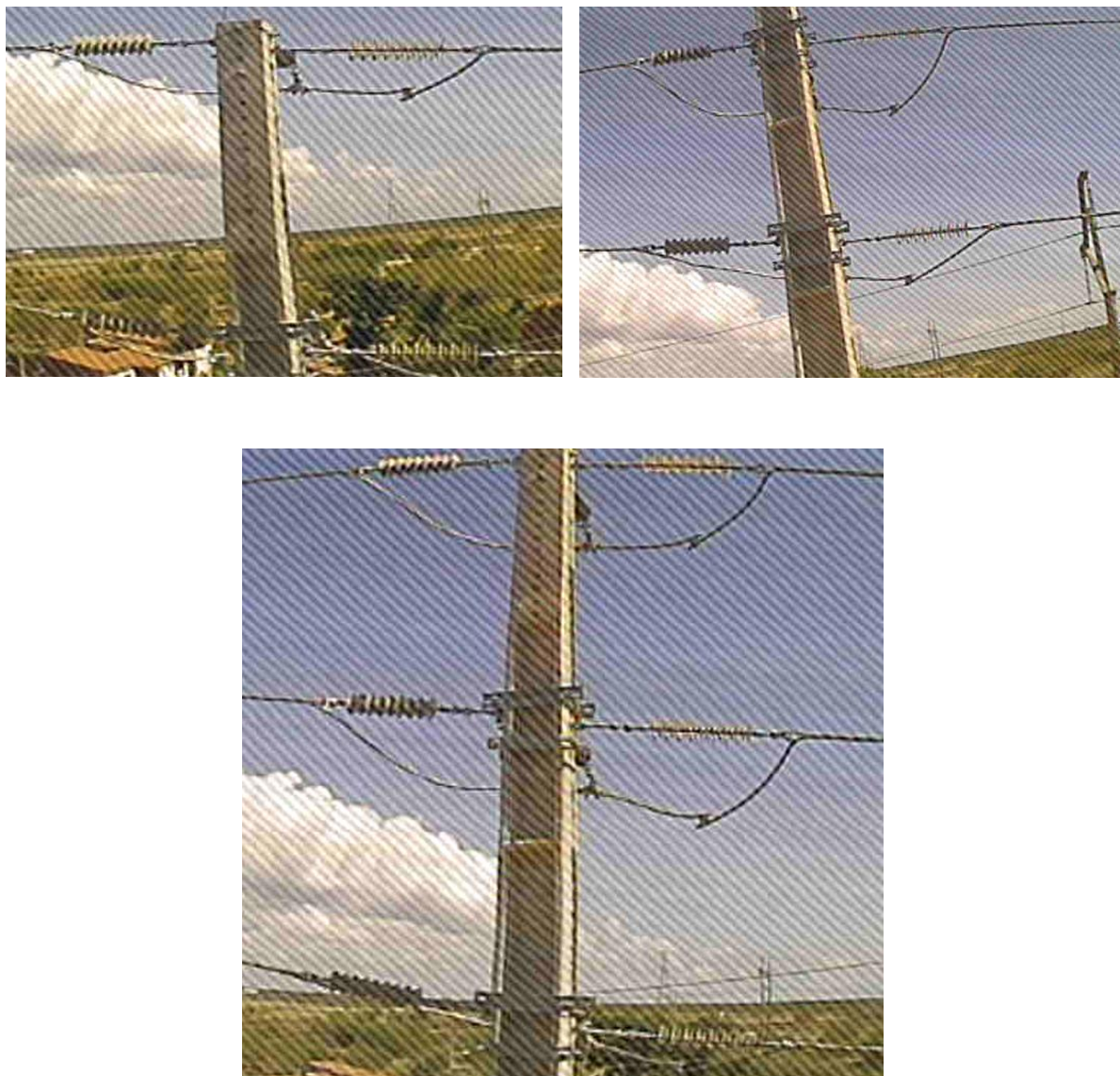
Figura 97- Realização da inspeção, (a) controle em solo, (b) VANT distanciado a 3 metros da estrutura, (c) VANT realizando a inspeção.



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 98 é mostrada as imagens do vídeo gravado pela câmera do VANT no momento da inspeção da estrutura. Devido a qualidade da câmera utilizada e as adversidades encontradas na transmissão do vídeo em voo, as imagens não são tão nítidas, porém é possível verificar a integridade dos componentes da estrutura.

Figura 98- Imagens obtidas do vídeo gravado na inspeção.



Fonte: Autoria Própria

De acordo com as imagens obtidas, pode ser visto o grupo de isoladores de ancoragem tomado na vista frontal da estrutura, não sendo obtidas imagens mais detalhadas do isolador do tipo pilar que se encontra na outra face da estrutura. Pelas imagens obtidas foi possível observar que as antenas propostas ao sistema rádio do VANT funcionaram satisfatoriamente ao permitir a navegabilidade para tomada de imagens.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho realizou-se um estudo e o desenvolvimento de antenas de microfita aplicadas ao sistema de rádio controle de um VANT, onde o mesmo é aplicado a inspeção de linhas de transmissão. Para este fim foram descritos conceitos importantes para o desenvolvimento do trabalho, contribuindo em um bom embasamento teórico sobre o conteúdo.

Com a aplicação da técnica do truncamento do plano de terra na estrutura da antena de microfita projetada proposta ao receptor, foi possível observar sua influência tanto no coeficiente de reflexão quanto nos diagramas de radiação da antena com o auxílio do software ANSYS HFSS®. A atuação do truncamento ficou evidente nos gráficos apresentados bem como o resultado de sua aplicação para melhorar o valor da largura de banda da antena. A variação de suas dimensões tornou possível o entendimento de como o truncamento na largura do plano de terra atua nos diagramas de radiação da antena de microfita.

Os resultados obtidos por simulação a fim de verificar a influência dos chanfros na rede de alimentação do arranjo de antenas de microfita proposto ao transmissor se mostraram satisfatórios, no tocante ao coeficiente de reflexão e ganho. Com a aplicação dos diferentes chanfros, é possível alterar a impedância de entrada da antena, e como as dimensões utilizadas na antena não se alteram, há variações em seus parâmetros que são desejáveis. A principal alteração que ocorre na utilização de chanfros é o deslocamento da frequência de ressonância da antena, como também um incremento no ganho total da antena.

O procedimento de fabricação das antenas se mostrou importante por ter a possibilidade de observar o comportamento real do dispositivo e comparar com as simulações realizadas. Os resultados encontrados nas medições das antenas se mostraram semelhantes aos resultados simulados, o que enfatiza a importância de as simulações antecederem a fabricação do dispositivo. Apesar de haver deslocamento de frequência nos dispositivos propostos e a largura de banda não atender toda a faixa de aplicação, os mesmos apresentaram comunicação no espectro em estudo devido a técnica de codificação para transmissão do sinal, sendo por espalhamento espectral ou OFDM, na qual fazem uso eficiente da largura de banda.

Para aplicação experimental, as antenas foram desenvolvidas para serem integradas no sistema de rádio controle (receptor/transmissor) de um VANT para o fornecimento de comandos, as mesmas apresentaram uma boa performance, sendo de fácil fabricação e adaptação no sistema. A utilização do VANT na inspeção em estruturas de transmissão de energia elétrica se mostrou realizável, onde é possível ter um monitoramento da situação das estruturas, analisar os dados coletados, elaborar um banco de dados e fornecer auxílio para

manutenção preventiva dessas estruturas, minimizando custos de falhas nas linhas de transmissão e interrupção no fornecimento de energia, por problemas não identificados em inspeções visuais convencionais.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas recomendações são necessárias para trabalhos futuros com base neste trabalho desenvolvido. As principais recomendações são:

- Projeto ou aquisição de um sistema de telemetria sem fio para o VANT;
- Projetar antenas para um sistema de telemetria sem fio;
- Aplicar técnicas para tornar as antenas multibanda, fazendo assim o dispositivo operar nas três faixas de frequências pretendidas (915 MHz, 2.4 GHz e 5.8 GHz);
- Aplicar técnicas de polarização circular nas antenas instaladas no sistema de rádio;
- Otimizar a antena proposta ao receptor, aplicando estruturas DGS no plano de terra;
- Implantar um guimbal de três eixos no suporte da câmera, bem como um controle de zoom;
- Instalar uma câmera térmica para realização de inspeções mais detalhadas.

REFERÊNCIAS

- ANAC, **RBAC-E N° 94**, Requisitos Gerais para Aeronaves não Tripuladas de Uso Civil, Resolução n° 419, São Paulo: SAR/SPO, 2017
- ANEEL. **Resolução n° 669, 14 de julho de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/022/resultado/ren2015669.pdf>>. Acesso em 11 out 2017.
- ALLEN, J. L., DIAMOND, B. L. **Mutual coupling in array antennas**. Technical Report EDS-TR-66-443, Lincoln Lab., MIT, 1966.
- ALVES, M. J. L.. **Efeitos do acoplamento mútuo em arranjos de antenas adaptativos para televisão digital**. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2008.
- AMITEC, 2015 .Disponível em: <<http://training.amitec.co/home/antenna-positioner-transmission-line>>. Acesso em: 21 out 2017.
- ANATEL, **Resolução N ° 506, 1 de Julho de 2008**. ANATEL, 2008. Disponível em: <<http://legislacao.anatel.gov.br/resolucoes/2008/104-resolucao-506>>. Acesso em: 07 Nov 2016.
- ANEEL, **Módulos construtivos de linhas de distribuição aéreas**: catálogo referencial de módulos padrões de construção de subestações, linhas e redes de distribuição de energia elétrica. Nota Técnica n° 304/2010, 24 de Setembro de 2010.
- ANDERSON, R. W. **S-Parameter techniques for faster, more accurate network design**. Hewlett-Packard Journal. p. 13-24, 1967.
- ANDRADE, B. O.. **Estudo de arranjos de antena de microfita com patch quase-fractal para comunicações sem fio**. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, UFRN, Natal, 2014.
- ANDRADE, F. F. **Linhas de transmissão de linhas de transmissão de energia: cabos condutores, isoladores e estruturas de LT's**. 2011. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/fabiano/materiais/LTE_Aula_02.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2017.
- ANDRADE, H. D.. **Desenvolvimento de um ressoador retangular de fenda com múltiplas camadas de substrato e com utilização de material PBG para sistema de comunicação sem fio**. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, UFRN, Natal, 2013.
- ANDRADE, R. D. N.. **Criação de uma estação de testes para um micro-helicóptero autônomo**. 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Informática, UMA, Funchal, 2012.
- AQUINO, M. do B. L.. **Antenas de microfita com substrato metamaterial**. 107 f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da UFRN. Natal, 2008.

ARDUPILOT. **Choosing a Ground Station**, 2016. Disponível em: <<http://ardupilot.org/copter/docs/common-choosing-a-ground-station.html>>. Acesso em: 19 maio 2017.

ARMADA. The Growing World of Unmanned Airbone Spies. IN: **Armada International**, vol. 28, nº 3, 2004.

ABNT. **NBR 5462**: Confiabilidade e Manutenibilidade. 37 p. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT. **NBR IEC 60079-17**: Equipamentos elétricos para atmosferas explosivas Parte 17: Inspeção e manutenção de instalações elétricas em áreas classificadas (exceto minas). 27 p. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

AUSTIN, R., **Unmanned Aircraft**. 1. ed. A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, v. 1. p. 3 -145, 2010.

AVIASTAR. **Convertawings Model A**. Disponível em: <http://www.aviastar.org/helicopters_eng/convertawings.php>. Acesso em: 3 out. 2017.

BAHL, I. J., BHARTIA, P. **Microstrip antennas**. Inc, second printing ed., Artech House, 355 p, 1982.

BAHL, I. J.; BHARTIA, P. **Microstrip antenna technology**. IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. ap-29, nº 1, p. 2-24, 1981.

BALANIS, C. A. **Modern antenna handbook**. United States of America: John Wiley & Sons. p. 1701. 2008

BALANIS, C. A. **Teoria das antenas: análise e síntese**. vol. 1 e 2. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BALBO, A. R. de S.; SANTOS, E. D. dos; SILVA, L. M. da, LOPES, M. T.. **Quadróptero Investigador – QI**. 2014. 104 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2014.

BLUME, S. W.. **Electric power system basics: For the nonelectrical professional**. New Jersey: IEEE Press, 258 p, 2007.

BRINHOLE, E. R. **Determinação da frequência de ressonância de antenas tipo microfita triangular e retangular utilizando redes neurais artificiais**. 2005. 87 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2005.

BOUABDALLAH, S.; MURRIERI, P.; SIEGWART, R.. **Design and control of an indoor micro quadrotor**. In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, 2004.

BULLA, G. **Otimização da largura de banda de antena de microfita**. 167 f. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRS. Porto Alegre, 2011.

CAPOVILLA, C. E.. **Antenas planares aplicadas a comunicação móveis de última geração utilizando elementos quase-yagi**, Campinas, São Paulo, 2004

CERBARO, V. A.. **Crop drone: uma solução para coleta, armazenamento e disponibilização dos dados agrícolas**. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Curso Computação Aplicada, UPF, Passo Fundo, 2016.

CHAN, K-C., HARTER, A.. **Impedance matching and the smith chart – the fundamentals**. RF antennas tx/rx. p. 52-66. jul. 2000.

CHAVEZ, M.. **Amazonia y energias renovables: Línea de transmisión moyobamba-iquitos: loreto sale del aislamiento energético**. 2014. Disponível em: <https://maxchavez.files.wordpress.com/2014/08/torres_alta_tension.jpg>. Acesso em: 23 out. 2017.

COELCE, **Padrão de estrutura de linhas aéreas de alta tensão PE-044 a PE-048/2005 classe de tensão 72,5 kV, novembro de 2005**. Disponível em: <http://www.eneldistribuicao.com.br/ce/documentos/PE-LDAT_2015%20R-02.pdf>. Acesso em 19 out 2017.

COMITTI, A.. **Engenharia de manutenção técnica da inspeção visual**. 2012. Disponível em: <<http://eletricidade-eletronica-telecom.blogspot.com.br/2012/08/engenharia-de-manutencao-tecnica-da.html>>. Acesso em: 14 set. 2017.

COSTA, A. G. de. **Sistema de rádio comunicações para UAV**. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2015.

COSTA, S. E. A. P. de. **Controle e simulação de um quadrotor convencional**. Lisboa, 2008.

CUCCO, J.. **Gestão territorial em faixas de servidão de linhas de transmissão propensas à invasão utilizando lógica difusa**. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2011.

DEAL EXTREME: **Hobbies e brinquedos**. Disponível em: <http://www.dx.com/pt/p/apm2-6-flight-controller-w-neo-6m-gps-module-and-crius-mavlink-osd-v1-0-915mhz-3dr-radio-telemetry-319276#.Wdb5OGhSw_4>. Acesso em: 6 nov. 2017.

DIAS, E. J.. Inspeção filmada em redes de distribuição aéreas de energia elétrica. In: **XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)**, Curitiba, 2004.

DOUVILLE, R. J. P., JAMES, D. S. **Experimental study of symmetric microstrip bends and their compensation**. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 26, No. 3, pp. 175-181, 1978.

EBC, Agência Brasil. **Linhas de transmissão de energia**. 2012. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/sites/_agenciabrasil2013/files/agencia_brasil170912_mca7686.jpg>. Acesso em: 22 out. 2017.

EDWARDS, T.; STEER, M.. **Foundations for Microstrip Circuit Design**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 426 p.

ELETRIC. **Categoria de Produtos: Materiais Elétricos**. Disponível em: <<http://www.eletrics.com.br/produtos/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

ESTAVÃO, A.; FERREIRA JÚNIOR, A. A.. **Projeto e análise de circuitos acopladores e divisores de sinais na faixa de radiofrequência utilizando microlinha de fita**. Revista de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, v. 16, n. 1, p.1-12, set. 2014.

EZQUERRO, V. S.. **Estudo de um arranjo de nanoantenas para comunicação óptica sem fio**. 2015. 94 f. Relatório Técnico - Curso de Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Comunicações, Unicamp, Campinas, 2015.

FAA – Federal Aviation Administration. **Advanced avionics handbook**. 2009. Disponível em: <https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/media/aah_ch04.pdf>. Acesso em: 6 out. 2017.

FEITOZA, G. M. **Análise de antenas de microfita com patches circulares sobre substratos anisotrópicos usando o método dos potenciais de hertz** 98 f. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, 2005.

FIDALGO, J. E. L. R.. Maximização da receita de concessionária de transmissão de energia elétrica através da otimização da manutenção. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, EPUSP, São Paulo, 2007.

FILHO, V. A. A. **Arranjo de log-periódicos compactos em microfita com elementos fractais de koch**. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2010.

FLYING TECH, **2.4GHz Replacement IPEX-13 Rx antenna for futaba, frsky, flysky and other 150mm** Disponível em: <https://www.flyingtech.co.uk/sites/default/files/Product_images/Rx%20Antenna.jpg>. Acesso em: 21 Jan 2017.

FPVHOBBY.COM, **19 dbi 2.4 GHz High gain panel antenna**. Disponível em: <<http://www.fpvhobby.com/antenna/10-19dbi-24ghz-high-gain-panel-antenna.html>>. Acesso em: 21 out 2017.

GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. **Microstrip antenna design handbook**, Boston, Mass, USA: Artech House, 2001.

GHAVAMI, M; MICHAEL, L.; KOHNO, R.. **Ultra wideband: signals and systems in communication engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons. p. 278. 2004.

GLOBE FLIGHT. **DJI flame wheel F450**: Aerial Solutions. Disponível em: <<https://www.globe-flight.de/DJI-NAZA-ARF-Kit-quadrocopter-Hobby-F450-E305>>. Acesso em: 23 out. 2017.

GOSEILFIE. **Inspeções de Obras Industriais com Drones**. 2016. Disponível em: <<http://www.goselfie.com.br/category/inspecoes-gerais/>>. Acesso em: 11 out. 2017.

GUPTA, I. J., KSIENSKI, A. A. **Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 31. p. 785-791. Setembro 1983.

HAMMERSTAD, E. O. Equations for a microstrip circuit design. **Proc. Fifth European Microwave Conf.**, p. 268-272, Setembro 1975.

HOLANDA, S. M.. **Estudo e desenvolvimento de antenas de microfita utilizando tecido de malha a base de fibras têxteis compostas**. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunicação e Automação, UFERSA, Mossoró, 2016.

HUANG, Y., BOYLE, K.. **Antennas: From Theory to Practice**. Singapore: John Wiley & Sons. p 379. 2008.

IEEE, Transactions on Geoscience and Remoting Sensing, vol 47, n. 3, 2009.

JAMES, R. **Handbook of microstrip antennas**. United States of America: IET. 1989.

JYTOP, **Cable & Wire, Bare Conductors**. Disponível em: <<http://pt.jytopcable.com/bare-conductor/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

KUMAR, G.; RAY, K. P. **Broadband microstrip antennas**. Boston: Artech House, 2003.

LEE, K. F., LUCK, K. M., **Microstrip Patches Antennas**, Imperial College Press, USA, 2011.

LEISHMAN, J. G.. The Bréguet-Richet Quad-Rotor Helicopter of 1907, Vertiflite, 2001.

LIMA, A. R.. **Análise e gestão de riscos das ocupações de faixas de linhas de transmissão: estudo de caso da vila alta tensão**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, UFOP, Ouro Preto, 2012.

LIU, Y.; SI, L.; WEI, M.; YAN, P.; YANG, P.; LU, H.; ZHENG, C.; YUAN, Y.; MOU, J.; LV, X.; SUN, H.. Some Recent Developments of Microstrip Antenna. **International Journal of Antennas and Propagation**. DOI: 10.1155/2012/428284. Março, 2012.

LONGHITANO, G. A.. **VANTs para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 163 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo. 2010.

LOPES, R. da F.. **Otimização do processo de manutenção de faixas de serviço de linhas de média e alta tensão**. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica de Computadores, FEUP, Porto, 2013.

LUDAN, W. HONGGUANG, W., LIJIN, F., MINGYANG, Z. **Research on obstacle-navigation control of a mobile robot for inspection of the power transmission lines based on expert system**. In: Tokhi M.O., Virk G.S., Hossain M.A. (eds) Climbing and Walking Robots. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.

MACHADO, B. E. de O.. **Compensação do acoplamento mútuo em conjuntos de antenas para DF através do método da impedância mútua de recepção**. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

MAIA, H. M. C. de A.. **Arranjo de antenas de microfita com substrato anisotrópico com patch supercondutor e aplicações em nanotecnologia**. 75 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Engenharia Elétrica e Computação, UFRN, Natal, 2013.

MARQUES, P. M. M.. **Antenas de comunicações UAV's**. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, IST, Lisboa, 2016

MEDEIROS, F. A.. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não-tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 122 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007.

MEDEIROS, T. E. L. **Antenas de microfita sobre substrato dielétrico organizado de forma quase periódica**. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunicação e Automação. UFERSA. Mossoró, 2013.

MEIER, L. MAVLink. 2009. Disponível em: <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>. Acesso em 28 set 2017.

MENEZES, V. P.. **Linhas de transmissão de energia elétrica aspectos técnicos, orçamentários e construtivos**. 2015. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

MISSION PLANNER. **Mission Planner Home**, 2016. Disponível em: <http://ardupilot.org/planner/>. Acesso em: 9 junho 2017.

MORAIS, J. H. C.. **Estudo de antenas patches de microfita miniaturizadas em banda larga para aplicação em dispositivos móveis e portáteis**. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, UFRN, Natal, 2011.

MOREIRA, P. L. da F.. **Sistema robótico para inspeção de linhas áreas de transmissão de energia elétrica**. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

MUNSON, R. E. **Conformal Microstrip Antena and Micostrip Phased Arrays**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. v. AP-22, n. I, p. 74-78, Jan. 1974.

NANJING ELECTRIC. 2013. Disponível em: <http://www.nanjing-insulators.com/index.html>. Acesso em: 10 out. 2017

ONS, **Procedimentos de redes**, Submódulo 16.2, Acompanhamento de manutenção de equipamentos e linhas de transmissão, 2009.

PADILHA, B. R.; ZAIONS, D. R.; SPULDARO, E.. **Projeto aerodinâmico, estabilidade e controle de um veículo aéreo não tripulado (VANT) de asa fixa**. Joaçaba, 2012.

PASTOR, E.; LOPEZ, J.; ROYO, P.. **UAV Payload and Mission Control Hardware/Software Architecture**. Barcelona, Espanha. 2007.

PAULA, J. C.. **Desenvolvimento de um VANT do tipo quadrotor para obtenção de imagens aéreas em alta definição**. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, UFPR, Curitiba, 2012

PEREIRA, J. P. P.. **Estruturas PBG periódicas e quase periódicas em Antenas de Microta com aplicação em veículos aéreos não tripulados**. 91 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e Computação, UFRN, Natal, 2016.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.

RAMESH, M., YIP, K. B. **Design inset-fed microstrip patch antennas**. 2003. Disponível em: <<http://mwrf.com/components/design-inset-fed-microstrip-patch-antennas>>. Acesso em 28 de Jun 2016.

RANGEL, K. R.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P.; Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados. In: **Brazilian Symposium on Aerospace Eng. & Applications**, São José dos Campos, SP, Brasil, 2009.

RC GROUPS. **Flight autonomy**. 2010. Disponível em: <www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1344780&page=3>. Acesso em: 3 out. 2017.

RYAN, H. M.. **High voltage engineering and testing**. Ohio: London United Kingdom: Peregrinus, 447 p. 1994.

SÁ, R. C.. **Construção, modelagem dinâmica e controle PID para estabilidade de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadrotor**. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Teleinformática, UFC, Fortaleza, 2012.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SANTOS, R. C.. **Estudo da interferência de uma metasuperfície no desempenho das antenas de microfita**. 92 f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da UFRN. Natal, 2016.

SILVA, C. R.; CORRÁ JÚNIOR, J. F.. **Montagem e operação de um quadrorotor**. 57 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica, Faculdade de Engenharias Urbanismo e Arquitetura, São José dos Campos, 2014

SILVA, I. B. T. **Projeto e análise de antena de microfita com utilização de metamaterial do tipo CSRR**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Comunicação e Automação, UFERSA, Mossoró, 2014.

SKILLEDFLYER, **Drones Reviews, News & Tutorials**. Disponível em: <<https://skilledflyer.com/>>. Acesso em: 22 out 2017.

SOARES, M. D. **Tutoriais banda larga: WLAN X Sistemas Móveis Celulares**. (2004). Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwlanx/pagina_3.asp>. Acesso em out de 2015.

SWANSON, Daniel Jr. G.; HOEFER, Wolfgang J. R. **Microwave circuit modeling using electromagnetic field simulation**. Boston: Artec House, 2003. 488 p.

TEIXEIRA, P. A.. **Antena gravata borboleta em geometria fractal para múltiplas frequências e grande largura de faixa**. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Telecomunicações, INATEL, Santa Rita do Sapucaí, 2015.

TELECO. **Tutoriais banda larga**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi1/pagina_5.asp>. Acesso em: 20 out. 2017

TUPÃ, Bom Dia. Energisa Sul-Sudeste anuncia nova Linha de Transmissão para Tupã e região. Disponível em: <<http://bomdiatupa.com/wp-content/uploads/2017/06/linha-transmissao-tupa-640x480.jpg>>. Acesso em: 23 out. 2017.

VASCONCELOS, C. F. L. **Antenas de microfita com *patch* em anel e múltiplas camadas dielétricas anisotrópicas uniaxiais**. Dissertação de Mestrado, UFRN, Fevereiro, 2006.

VAZ, J. C.. Gestão da manutenção. In: **Gestão de Operações**. Edgard Blücher, São Paulo, 1998.

VELOZO, L. T.. **Metodização do Estudo das Fundações para Suportes de Linhas de Transmissão**. 2010. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, PUC, Rio de Janeiro, 2010.

VERÍSSIMO, A. H.. A Experiência da COSERN com Inspeções Aéreas em Linhas de Distribuição em 69kV Utilizando Veículos Aéreos não Tripulados. In: **XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)**, Curitiba, 2016.

VISSER, H. J. **Array and phased array antenna basic**: Wiley, 2006.

WENTWORTH, S. M., **Fundamentos de eletromagnetismo com aplicações em engenharia**, LTC, 2006.

WLAN ANTENNA, **High Power Wireless LAN Professional**. Disponível em: <<http://www.wireless-lan-manufacturer.com/rimages/721/wlan-antenna-11.jpg>>. Acesso em: 21 out 2017.

YARMAN, B. S. **Design of ultra wideband antenna matching networks**. Istanbul: Springer. p. 308. 2008.