

## INVOLVEMENT OF A CIRCULAR POLARIZATION MICROFINE ANTENNA FOR FPV IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

### Desenvolvimento de uma Antena de Microfita com Polarização Circular para FPV em Veículos Aéreos Não Tripulados

Alexandre Moraes Araujo - UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-árido - alexandrearaujo.gppcom@gmail.com

Gutembergue Soares Silva - UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - guttembbergue@gmail.com

Fred Sizenando Rossiter Pinheiro - UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - fredrossiter@uol.com.br

André Pedro Fernandes Neto - UFERSA - Universidade Federal Rural do Semiárido UERN - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE-andrepedro@ufersa.edu.br

**Abstract:** Demand in certain wireless communication systems for smaller antennas and better adaptability in confined spaces, make microstrip antennas potential substitutes for traditional antennas. This work presents a proposal of microstrip antenna to obtain circularly polarized waves with application in equipment of transmission of Videos of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). The methodology used included studies of circular polarization antennas, design, simulation and antenna construction using different substrates. The results were compared with commercial dipole antennas used in a First Person View (FPV) device and showed that the Triangular Patch Antennas have all desirable features for operation in the FPV system, being possible to board them for the obtaining of images and analysis of the performance of the system with them.

**Keywords:** Microstrip antenna, Circular Polarization, Triangular patch, Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

**Resumo:** A necessidade em determinados sistemas de comunicação sem fio por antenas de menor porte e melhor adaptabilidade em espaços reitados, tornam as antenas de microfita potenciais substitutos das antenas tradicionais. O trabalho apresenta uma proposta de antena de microfita para obtenção de ondas circularmente polarizadas com aplicação em equipamentos de transmissão de vídeos de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). A metodologia utilizada contemplou estudos das antenas de polarização circular, projeto, simulação e construção das antenas utilizando diferentes substratos. Os resultados foram comparados com antenas dipolo comerciais utilizadas em um dispositivo de First Person View (FPV) e mostraram que as Antenas *Patch* Triangular possuem todas as características desejáveis para operação no sistema FPV, sendo possível embarcá-las para a obtenção de imagens e análise de desempenho do sistema com as mesmas.

**Palavras-chave:** Antenas de microfita. Polarização circular, *Patch* triangular, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS).

## 1. INTRODUÇÃO

As pesquisas na área de antenas se intensificaram nos últimos anos devido ao crescimento massivo de dispositivos para comunicações sem fio. A necessidade em determinados sistemas por antenas de menor porte e de melhor adaptabilidade em espaços restritos tornam as antenas de microfita em potenciais substitutos das antenas tradicionais. Esse tipo de antena se destaca na utilização em VANT's graças à possibilidade de miniaturização, e flexibilidade no ajuste de características eletromagnéticas como frequência de ressonância, polarização e largura de banda (BALANIS, 2011).

A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados surgiu como uma alternativa militar para acesso a zonas de risco, em substituição ao envio de tropas ou aeronaves humanamente tripuladas. Em um VANT podem haver vários equipamentos para comunicação com uma estação base, como o próprio rádio controle, o sistema de telemetria e o sistema de captura de vídeo em tempo real (CERBARO, 2016). Os VANT's são conhecidos atualmente pelas suas aplicações, as quais são fundamentadas na necessidade de retirar o homem, no papel do piloto, da presença de ambientes inóspitos. Marshall et al. (2015), definem três principais meios onde um VANT pode ser aplicado sem degradar a saúde humana, contemplando: ambientes perigosos, aqueles onde o risco de pilotar uma aeronave é grande podendo causar queda da mesma, ou que a vida do piloto corra perigo devido a riscos não operacionais; ambientes insalubres, onde o homem pode ser exposto a riscos químicos e/ou biológicos e; ambientes onde a atividade do piloto requer longas horas de voo, tornando-a fadigante.

FPV, sigla para *First Personal View*, é um equipamento bastante utilizado por praticantes de aeromodelismo e profissionais que utilizam *drones* como ferramenta de marketing multimídia. Além disto, a captura de imagens aéreas realizada por VANT's, também é utilizada em áreas agrícolas e de manutenção de equipamentos com acesso limitado, como inspeção de linhas de transmissão.

Normalmente, as antenas que são alocadas em sistemas FPV são omnidirecionais, isto é, irradiam ondas eletromagnéticas em todas as direções ao seu redor, porém, não possuem um bom ganho, o que pode dificultar a comunicação em longas distâncias. Enquanto as antenas de microfita são mais diretivas, porém podem oferecer um ganho superior ao de uma antena comum (HAYAT e BUCK, 2013). Um importante parâmetro que será analisado no desenvolvimento desse trabalho é a polarização das ondas eletromagnéticas. A polarização de uma onda é definida pela trajetória que a extremidade do vetor campo elétrico descreve em um ponto fixo no espaço, além do sentido em que ela é traçada observando-se diante da direção de propagação (HAYAT e BUCK, 2013).

As estruturas planares desenvolvidas nesse trabalho têm como proposta inicial a aplicação no sistema de comunicação de um veículo aéreo não tripulado, no seu subsistema de transmissão de imagens. As etapas de projeto e simulação foram desenvolvidas através dos métodos matemáticos de análise numérica apresentados no referencial teórico e com o auxílio de softwares como Fortran, MATLAB e Ansys HFSS. Através da simulação foi possível averiguar a eficiência do projeto e ter um bom entendimento do funcionamento do dispositivo, já que o Ansys HFSS utiliza o método dos elementos finitos, um método de onda completa, para obtenção dos resultados, enquanto que o projeto foi realizado utilizando o método da cavidade. Por fim, com as etapas de construção e medição foi possível obter uma verificação referencial para o método de projeto utilizado e dessa forma chegar às conclusões sobre as aplicações das antenas desenvolvidas.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O uso de uma estrutura planar como elemento radiador de ondas eletromagnéticas torna-se um atrativo quando o local onde a antena será instalada tem limitação de espaço e de massa embarcada, como é o caso de aplicações em satélite, vant's e dispositivos móveis. Além disso, as antenas do tipo microfita possuem maior flexibilidade para ajustes nos parâmetros eletromagnéticos como frequência de ressonância, polarização, diagrama de radiação, casamento de impedância e largura de banda (BALANIS, 2011).

Uma antena de microfita consiste em uma estrutura planar composta por duas camadas metálicas minimamente espessas separadas por uma camada dielétrica, chamada de substrato. A fita metálica acima do substrato é chamada de Patch, é através desta que as ondas se desprendem da antena e irradiam no espaço livre. O Patch também possui relação direta com a distribuição de corrente e dos campos eletromagnéticos no substrato. Já o metal posto abaixo do substrato é denominado plano de terra e funciona como um aterramento para a antena, além de funcionar como um refletor, suprimindo, assim, a criação de lóbulos laterais e secundários (BALANIS, 2011).

### 2.1 Parâmetros das antenas de microfita

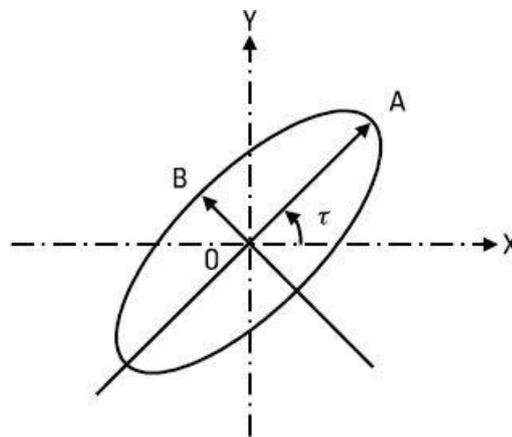
Entre os principais parâmetros que determinam o comportamento eletromagnético de uma antena destacam-se o diagrama de radiação, ganho, perda de retorno, largura de banda, Carta de Smith e polarização. O diagrama de radiação de uma antena é definido por Balanis (2011) como uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação de uma antena em função de coordenadas espaciais  $\phi$  (ângulo de elevação) e  $\theta$  (ângulo de azimute). A determinação do padrão de radiação de uma antena é feita a partir da força medida em campos distantes em relação à antena (POZAR, 2009).

A leitura do diagrama de radiação permite a obtenção de parâmetros importantes para caracterizar a aplicabilidade de uma antena. Por meio dele é possível conhecer a diretividade, analisando o lóbulo principal e a formação de lóbulos laterais e traseiros. A diretividade é uma medida da concentração da energia radiada pela antena numa determinada direção, sendo por definição, dada pela relação entre a intensidade de radiação numa determinada direção e a intensidade de radiação média, representando a habilidade de uma antena em concentrar a potência radiada em uma direção. A associação da diretividade com a eficiência de uma antena fornece um terceiro parâmetro de fundamental importância para aplicação em enlaces de comunicação sem fio que é o ganho. Balanis (2011) afirma que o ganho de uma antena é a relação entre a intensidade irradiada em uma direção e a intensidade obtida se toda a potência de entrada ( $P_{in}$ ) fosse irradiada por uma fonte isotrópica.

A carta de Smith é uma ferramenta gráfica de auxílio à resolução de problemas em linhas de transmissão desenvolvida por P. Smith nos laboratórios da Bell Telephone. Entre outros métodos de análise de impedância e coeficientes de reflexão, ela é a mais conhecida e utilizada. O uso da carta de Smith é de suma importância para o projeto de antenas de microfita, pois com a análise dos parâmetros fornecidos por ela, torna-se possível a otimização do casamento de impedância entre a carga e a linha de transmissão (POZAR, 2009). De acordo com Bird (2009), a perda de retorno é uma medida da eficiência na entrega de potência de uma linha de transmissão a uma carga, como uma antena. Se uma potência ( $P_{in}$ ) é entregue pela linha, e parte dessa potência é refletida ( $P_{ref}$ ), então o grau de descasamento de impedância entre a linha e a carga é dado pela relação de potências.

A polarização de uma antena é definida pela polarização das ondas radiadas por ela, sendo usualmente considerada na direção de máximo ganho quando nenhuma direção é especificada. sendo definida para uma onda, pela trajetória que a extremidade do vetor campo elétrico descreve em um ponto fixo no espaço, além do sentido em que ela é traçada observando-se diante da direção de propagação (HAYT e BUCK, 2013). Ondas eletromagnéticas podem ter polarização linear, circular ou elíptica, sendo as duas primeiras, casos particulares da polarização elíptica (SHAKEEB, 2011). A medição de desempenho de uma antena quanto à sua polarização se dá em termos da sua razão axial, que é definida pela razão entre o maior e o menor eixo da elipse ilustrada na Figura 1. Portanto, para ocorrer a polarização circular ótima é necessário que  $OA = OB$ , o que resulta em uma razão axial igual a um. Enquanto que para a polarização linear  $OA \gg OB$ , e a razão axial tende ao infinito (KUMAR e RAY, 2003).

Figura 1 – Razão axial da antena



Fonte: Adaptado de Kumar e Ray (2003)

## 2.1 Métodos de Alimentação e Análise Numérica

Os métodos mais populares para excitação eletromagnética de antenas de microfita são por linha de microfita, sonda coaxial e acoplamento eletromagnético, sendo este último classificado em acoplamento por abertura ou por proximidade (BALANIS, 2005). O tipo de alimentação que a antena receberá depende do projeto da antena, pois, cada um dos métodos citados anteriormente apresentam características diferentes, logo a aplicabilidade de cada um deles também varia. A linha de microfita é o método mais simples de alimentação do ponto de vista construtivo da antena. A mesma é posicionada no mesmo plano do *patch*, logo acima do substrato, o que facilita a fabricação da antena. Na alimentação via sonda coaxial todas as camadas da antena são perfuradas pelo elemento ativo do conector, que chega à camada superior fazendo contato elétrico com o *patch*. Enquanto o plano de terra da antena funciona como aterramento para a parte externa do conector coaxial (BALANIS, 2005).

Assim como as técnicas de alimentação por meios de linhas de transmissão, seja ela microfita ou coaxial, que apresentam pequena largura de banda, o acoplamento eletromagnético por meio de abertura não resolve este problema. Contudo, diminui a propagação de ondas de superfície e radiação espúria (OLIVEIRA, 2017). Esta técnica consiste na sobreposição de diferentes substratos com uma

camada de plano de terra entre eles. Essa composição faz dessa alimentação a mais difícil de construir. O acoplamento eletromagnético entre a linha de alimentação no substrato inferior e o patch no substrato superior é feito através de uma abertura existente no plano de terra intermediário. O método de acoplamento por proximidade difere do anterior pela inexistência do plano de terra intermediário. Neste, uma linha de microfita sobreposta ao substrato inferior emite ondas eletromagnéticas para todo o substrato que está acima até ocorrer o acoplamento com o patch.

A modelagem eletromagnética realizada no projeto de antenas de microfita busca entender e solucionar problemas da interação entre os campos eletromagnéticos entre objetos e o meio no qual o mesmo está inserido, com a determinação de parâmetros estruturais, como o tipo de substrato, geometria do patch e dimensões da antena. Existem diversos métodos para se alcançar tais resultados. Os mesmos são divididos em duas grandes categorias, as quais levam em consideração o comportamento dos campos eletromagnéticos na antena e suas interações com o meio (BALANIS, 2005).

A primeira categoria é a dos métodos aproximados. Seu equacionamento é baseado nos efeitos da distribuição de corrente magnética ao redor do elemento radiador da antena. A acurácia desses métodos decai em virtude do aumento da frequência em análise, principalmente a partir da faixa de ondas milimétricas (mmW, correspondente a frequências entre 30 e 300 GHz). Por se tratar de um modelo aproximado algumas simplificações são realizadas como desconsiderar da existência das ondas de superfície, que tornam-se relevantes em frequências altas (FILHO, 2010).

No entanto, usar estes modelos fornece ao projetista uma visão inicial do comportamento da antena projetada. Dentre esses métodos, dois serão destacados no decorrer dessa seção. O método da linha de transmissão, um dos mais simples, tem seu funcionamento otimizado para antenas patch retangular, não sendo indicado para as demais geometrias. O mesmo permite a determinação de vários parâmetros da antena, como frequência de ressonância, diagrama de radiação e impedância de entrada. Há, ainda, o método da cavidade, que funciona para qualquer geometria de antena, porém otimiza o projeto para patches retangulares (FILHO, 2010).

A segunda categoria é a dos métodos de onda completa. Os mesmos fazem uso de cálculos mais complexos, buscando melhorar a precisão do projeto, especialmente em altas frequências. A contrapartida vem na demanda pelo desempenho computacional para realização desses cálculos. Dentro dessa categoria destacam-se o método dos momentos, o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) (OLIVEIRA, 2017). Dentre estes, destaca-se o uso do método dos elementos finitos pelo software de simulação utilizado no desenvolvimento dessa dissertação, o Ansys HFSS.

### 2.3 VANTs e o enlace de comunicação

A Agência Nacional de Aviação Civil classifica os VANT's em três categorias de acordo com sua massa no instante da decolagem. Classe 1 caracteriza aeronaves acima de 150 Kg de carga útil. Para serem operadas, as aeronaves dessa classe devem ser registradas junto à ANAC e os pilotos devem possuir licença e habilitação, além de um certificado médico. A classe 2 enquadra aeronaves entre 25 Kg e 150 Kg. Esse tipo de aeronave não precisa de licenciamento, porém os fabricantes devem produzir de acordo com os requisitos exigidos. A classe 3

pertencem os demais veículos que não se enquadram nas categorias anteriores (ANAC, 2017). O quadrotor ilustrado na Figura 2 integra a Classe 3, sendo o mesmo é utilizado para fins de pesquisa e desenvolvimento de aplicações em telecomunicações.

Figura 2 – Quadrotor DJI F450



Fonte: Autoria Própria

O quadrotor enquadra-se na categoria de aeronaves mais pesadas que o ar movida a hélices com sustentação por meio de empuxo vertical. Os mesmos são estruturados em forma de X onde em cada ponta há um motor e uma hélice e no centro localiza-se a controladora de voo, sensores, baterias e os rádios para comunicação com a estação de controle (MELO, 2010).

A maioria dos sistemas não tripulados para fins civis são compostos por alguns elementos básicos. Estes elementos são um controlador de voo, uma estação de controle ou GCS (Ground Control Station), o enlace de comunicação e o veículo aéreo não tripulado e sua carga útil. Hoje, o principal sistema de comunicação em operação entre os VANT's e suas respectivas estações base é via radio. No geral, a transmissão de dados tem o intuito de levar a informação desejada de uma fonte de informação até um destinatário. Para que isso ocorra a fonte deve ser conectada a um transmissor que terá como principal função adequar o sinal para ser transmitido no meio de comunicação. Quando a mensagem chega ao destinatário ela passa inicialmente por um receptor que irá tratá-la para o correto recebimento. A cada equipamento, transmissor e receptor, é acoplado uma antena que irá realizar o envio e a detecção do sinal de radiofrequência (COSTA, 2015).

Quando uma informação é enviada do VANT para a estação esta usa um downlink, que pode conter informações de telemetria, ou imagens capturadas em tempo real, por exemplo. Quando um piloto envia um comando de voo ou solicita a captura de determinada imagem, essa é enviada em uplink (MARSHALL *et al.*, 2015). A operação remota do drone por parte da estação base pode ocorrer de duas formas. Existe a comunicação além da linha de visada (BLOS, Beyond Line-of-Sight). Nesse tipo de comunicação, a distância entre o VANT e sua base ultrapassa o alcance máximo suportado pelo sistema. Para não perder o controle do equipamento, embora pouco utilizado no meio civil, pode ser utilizada a comunicação via satélites ou

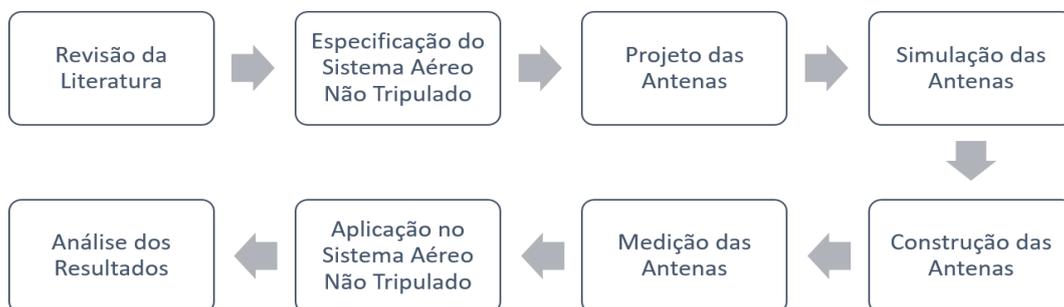
através de um VANT auxiliar que interligaria a base ao VANT principal.

A outra forma é por linha de visada (LOS, Line-of-Sight). Nesse tipo de comunicação, o transmissor e o receptor tem contato direto via rádio sem sofrer diretamente de fenômenos como reflexão ou refração (RAPPAPORT, 2009). Para operação em linha de visada algumas faixas de frequência estão disponíveis para uso sem necessidade de licenciamento junto a ANATEL. Essas faixas são reconhecidas internacionalmente como de uso específico pela indústria, ciência e medicina (ANATEL, 2017). Dessa forma, os drones de aplicação civil são disponibilizados utilizando rádio na faixa de frequência ISM que vai de 2400 MHz a 2483,5 MHz para o controle da aeronave. Na comunicação em linha de visada pode-se prever o alcance do VANT em relação a sua base utilizando o modelo de propagação no espaço livre. Assim como outros modelos de propagação, esse modelo prevê que a potência recebida diminui em função da separação entre os dois rádios elevada (RAPPAPORT, 2009).

### 3. MÉTODO, MODELAMENTO e MEDIÇÕES

Este trabalho contemplou uma ampla revisão da literatura acerca de antenas de microfita, com foco nas antenas de polarização circular. Com o conhecimento consolidado a respeito do tema, foi realizada uma pesquisa sobre os tipos de VANT's e seus sistemas de comunicação, dessa forma pode-se especificar o sistema no qual as antenas desenvolvidas serão instaladas, bem como suas características eletromagnéticas. As etapas de projeto e simulação foram desenvolvidas através dos métodos matemáticos acima explicitados no item 2.1, com o auxílio de *softwares* como *Fortran*, *MATLAB* e *Ansys HFSS*, seguindo os procedimentos apresentados no fluxograma da Figura 3.

Figura 3– Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autoria Própria

Através da simulação é possível averiguar a eficiência do projeto e ter um bom entendimento do funcionamento do dispositivo, já que o *Ansys HFSS* utiliza o método dos elementos finitos, um método de onda completa, para obtenção dos resultados, enquanto que o projeto foi realizado utilizando o método da cavidade. Por fim, com as etapas de construção e medição é possível averiguar o método de projeto utilizado e dessa forma chegar às conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

### 3.1 Especificações do Sistema Aéreo Não Tripulado

As antenas propostas nesse trabalho foram projetadas para funcionar na faixa de frequência do sistema de transmissão de imagem de um VANT. Para tanto, o trabalho teve início com a escolha do aeromodelo no qual a antena seria aplicada. O modelo utilizado é um DJI Flame Wheel F450. Trata-se de um chassi para quadróptero montado com uma placa microcontroladora APM 2.6 (ArduPilot Mega), Figura 30a, utilizando um rádio Fly-Sky iA6 de 6 canais para controle de vôo, Figura 30b e um kit de captura de imagens FPV (First Person View) BOSCAM que opera na faixa ISM de 5.8 GHz. Esse sistema é alimentado por uma bateria Li-Po Zippy 5000 mAh, e durante os testes realizados a autonomia de vôo era em torno de 10 minutos.

O sistema de propulsão do VANT é composto por 4 motores brushless de 1000 kv, onde cada um deles é controlado por um ESC (controladores eletrônicos de velocidade), que recebe os comandos da APM para alterar as rotações de cada motor a fim de executar os movimentos na aeronave. O sistema de transmissão de vídeo é composto por um transmissor TS832 e um receptor RC832 com portadoras na faixa ISM de 5.8 GHz. Na estação de controle um monitor TFT LCD foi instalado para acompanhamento das imagens capturadas em tempo real. O transmissor e a câmera acoplados ao VANT são energizados através da bateria embarcada e para a estação de controle foi adaptada uma bateria Li-Po de 2350 mAh. O sistema utilizado não tem a função de armazenamento das imagens transmitidas, por isso é utilizado um gravador de vídeo digital (DVR) para realizar essa função.

Os equipamentos de transmissão são acompanhados de dois modelos diferentes de antena. A primeira e mais simples é um dipolo hertziano para frequência de 5.8 GHz com polarização linear, Figura 4a. O outro modelo é uma antena helicoidal de polarização circular, Figura 4b. Esses dois modelos foram medidos e tomados como referência para o resultado das antenas desenvolvidas nesse projeto.

Figura 4 – Antenas do sistema de transmissão de vídeo

(a) Antena Dipolo



(b) Antena Helicoidal



Fonte: Autoria Própria

Para a transmissão, o FPV utiliza um transmissor de 600 mW que aloca canais na faixa UWB correspondente as frequências de 5645 MHz a 5945 MHz tendo cada canal uma largura de banda de 20 MHz, resultando em um total de 48 canais disponíveis para a transmissão, e um receptor com sensibilidade de -90 dBm.

O transmissor utiliza uma portadora modulada em frequência (FM) e dentro dos canais de 20 MHz aloca 8 MHz para a transmissão de vídeo e 6 MHz para transmitir

áudio, quando houver microfone acoplado ao sistema. O restante da banda é reservado para separar os canais diminuindo a interferência entre as portadoras de canais adjacentes.

### 3.2 Projeto das Antenas

A antena de microfita foi projetada com de polarização, tendo uma frequência central de 5.8 GHz e a utilização do substrato FR4-Epóxi RT/Duroid 5870. As características do material utilizado estão descritas na Tabela 1.

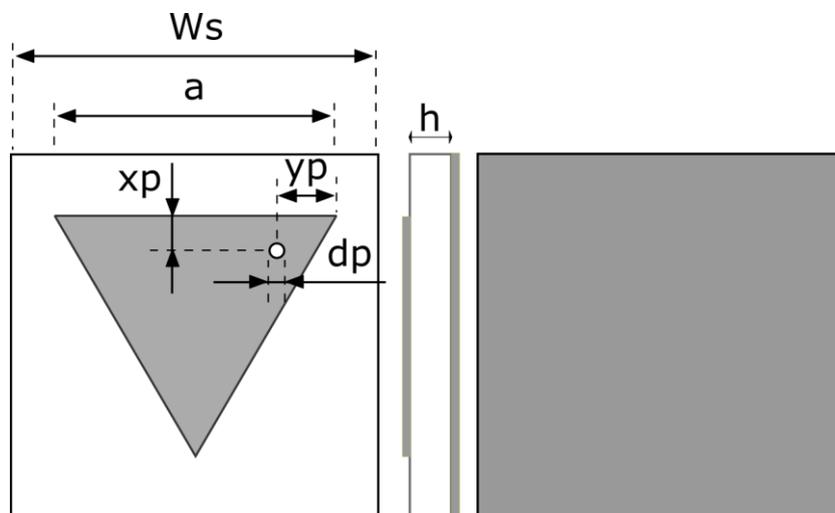
Tabela 1 – Parâmetros para o Projeto das Antenas de Microfita

Material	FR4-Epóxi	RT/Duroid 5870
Permissividade Relativa	4.4	2.3
Altura do Substrato	1.54 mm	1.54 mm
Frequência de Projeto	5.8 Ghz	5.8 Ghz

Fonte: Autoria Própria

O *patch* triangular mostrado na Figura 5, foi projetado de acordo com o método da cavidade aprimorado para geometria triangular por Garg e Long (1988). A alimentação do *patch* é um ponto fundamental para a obtenção de polarização circular. O método desenvolvido por Suzuki, Miyano e Chiba (1987) foi utilizado para definição do local de excitação *patch* e de relativa importância para o entendimento das configurações de polarização circular que a antena pode assumir.

Figura 5 – Antena *patch* triangular projetada



Fonte: Autoria Própria

A construção foi realizada com substrato de fibra de vidro com cobre nas duas faces. O processo de construção das antenas de microfita pode ocorrer por diferentes métodos. Neste trabalho foi utilizada a deposição da tinta sobre o contorno do patch utilizando uma impressora ultravioleta UV Mimaki UJF-3042FX, ilustrada na Figura 6.

Fig. 6 – Impressora Parâmetros para Projeto das Antenas de Microfita



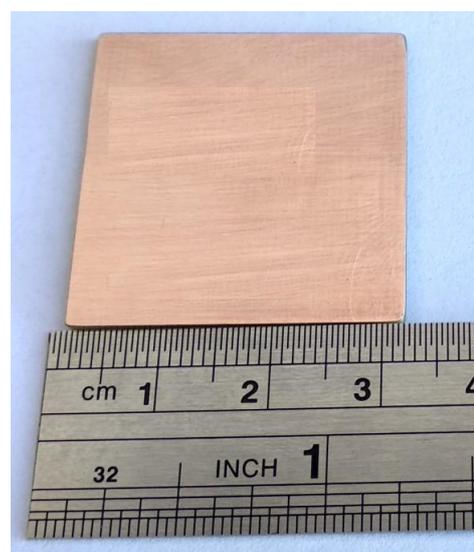
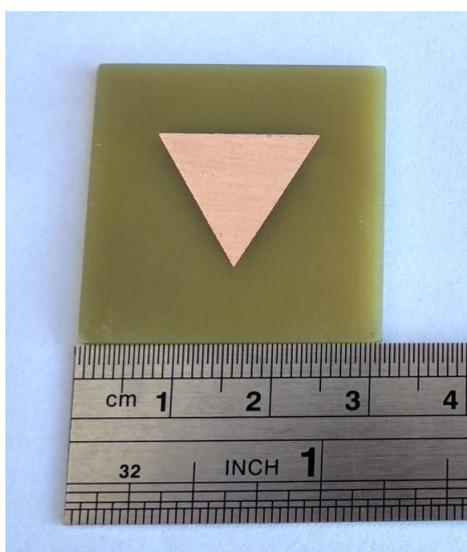
Fonte: Autoria Própria

Após a impressão, as placas de FR4 foram imersas em uma solução de per cloreto de ferro. Essa solução reage com o cobre que não está protegido pela tinta, eliminando-o do substrato. O resultado é um placa contendo apenas o contorno do patch. Após a etapa de corrosão, as antenas passam por um tratamento mecânico para delimitação das suas dimensões. Esse processo foi realizado utilizando lixas de alta rugosidade para desbastar o excesso de placa e uma lima para dar o acabamento. O resultado parcial está apresentado nas Figuras 7a e 7b.

Figura 7 – Antena após corrosão

(a) Vista Frontal

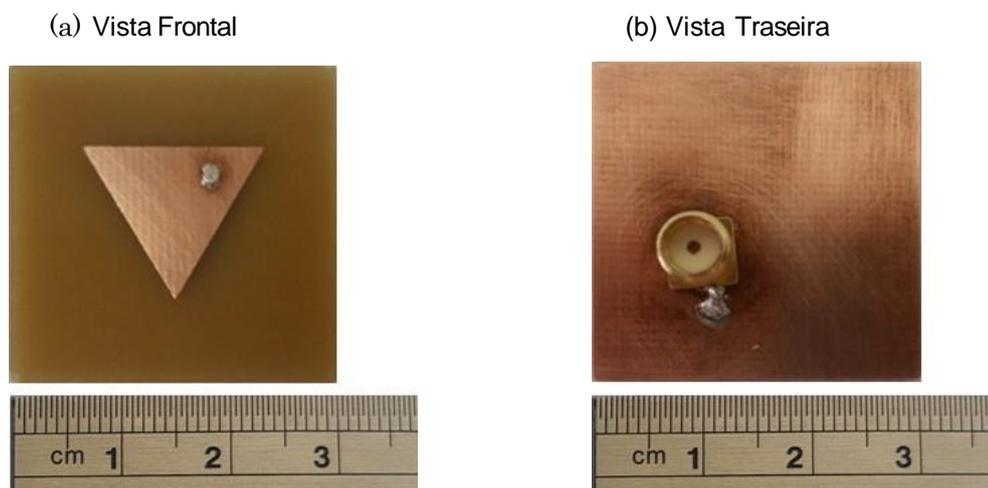
(b) Vista Traseira



Fonte: Autoria Própria

O furo é a etapa da construção da antena que mais requer precisão durante a execução. Pois, caso a posição esteja minimamente errada, já ocorre o descasamento da impedância. Como um dos preceitos da utilização das antenas de microfita é o baixo custo. A construção do protótipo mostrado na Figura 8 foi feita manualmente, foi utilizado para perfuração do substrato de fibra de vidro uma microretífica Dremel.

Figura 8 – Antena conectorizada

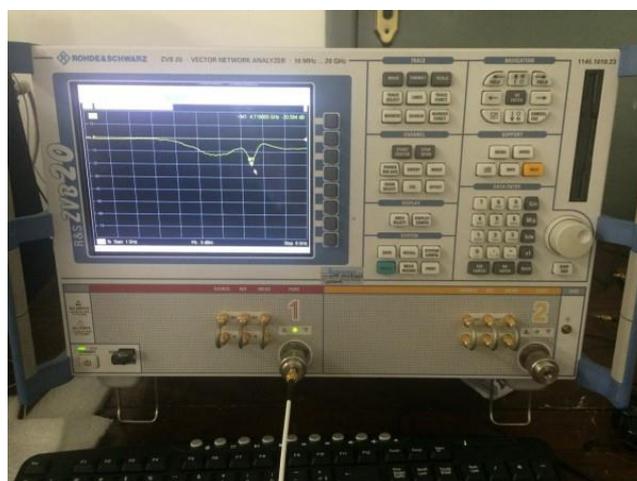


Fonte: Autoria Própria

### 3.3 Medição das Antenas e Procedimento de Aplicação no VANT

Para medições das antenas foram utilizadas as instalações do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado da Universidade Federal de Campina Grande. Foi utilizado para realização das medições um analisador de redes vetoriais (VNA, do inglês vector network analyzer) da Rohde & Schwarz, modelo ZVB20, ilustrado na Figura 9. O mesmo possui um range de 500 MHz a 20 GHz. Nele, foi possível obter parâmetros como coeficientes de reflexão e carta de Smith.

Figura 9 – Analisador de redes *Rohde & Schwarz* ZVB20



Fonte: Autoria Própria

A antena construída foi implementada no sistema de transmissão de vídeo para realização de testes para obtenção de um alcance aproximado de transmissão. A estação de controle em solo do VANT utilizado, ilustrada na Figura 10a, é alimentada por uma bateria de 12 volts de íons de lítio com capacidade de 2350 mAh, que fornece energia para o funcionamento do rádio receptor de imagens, do monitor, onde as imagens capturadas pelo VANT, mostrado na Figura 10b, são transmitidas em tempo real e do DVR, que realiza a gravação das imagens transmitidas.

Figura 10 – Sistema Aéreo Não Tripulado

(a) estação de Controle



(b) Quadrotor DJI F450



Fonte: Autoria Própria

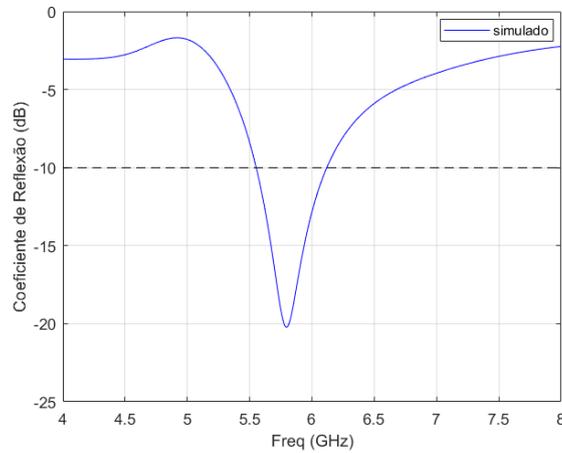
O DVR é um equipamento que funciona com tensão na faixa de cinco a sete volts, por isso foi utilizado um circuito regulador de tensão para realizar a conversão da tensão que sai da bateria de 12 volts para o nível adequado de funcionamento do DVR. Além disso, como a câmera embarcada não possui microfone embutido, as portas do DVR utilizadas para captura de áudio não são utilizadas. Para a aplicação experimental da antena no FPV, foi realizado um teste de alcance no qual o VANT foi fixado em uma posição, enquanto a estação percorreu a distância necessária para a perda de comunicação entre o transmissor e o receptor. Esse processo se repetiu para todas as antenas. É importante apontar que os resultados obtidos no teste experimental sofreram com a influência de ondas eletromagnéticas provenientes de outras fontes que também podem operar na faixa ISM de 5.8 GHz, como os roteadores de redes sem fio dual band.

#### 4.RESULTADO E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados computacionais que deram suporte para a construção e medição da antena proposta e será feita uma comparação com as antenas helicoidais e dipolo que acompanham o kit FPV. Primeiramente, serão apresentadas as simulações feitas no software Ansys HFSS<sup>®</sup> da antena patch triangular. Posteriormente, será feita uma comparação dos gráficos da perda de retorno simulada e medida da antena de microfita, e sua comparação com a antena helicoidal. O gráfico da perda de retorno ilustrado na Figura 11, mostra que a antena de microfita responde na faixa de frequência desejada para operação do FPV. A antena apresenta uma perda de retorno

de -20,22 dB na frequência de 5,8 GHz. E sua largura de banda compreende a faixa de 5,56 GHz a 6,11 GHz, abrangendo, assim, os canais do transceptor FPV.

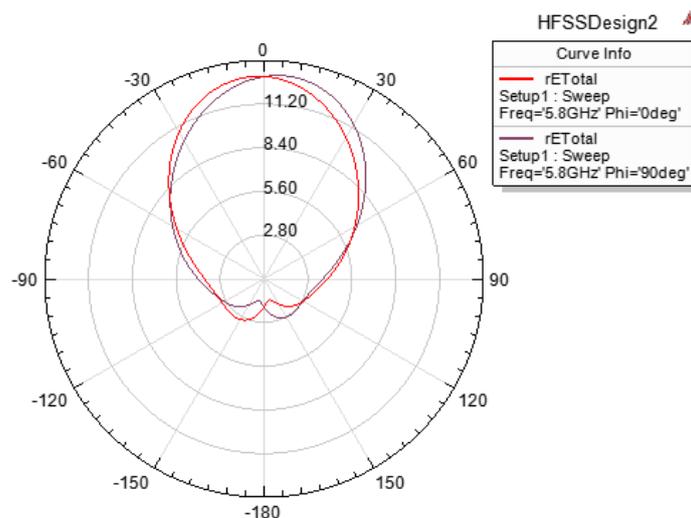
Figura 11- Coeficientes de reflexão simulados da antenna proposta



Fonte: Autoria Própria

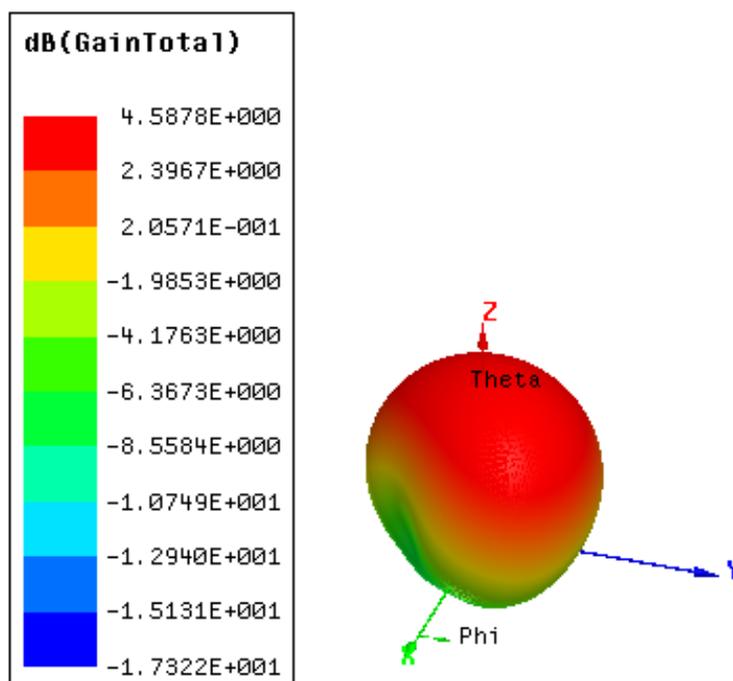
As Figuras 12 e 13, ilustram a simulação dos diagramas de radiação 2D e 3D, respectivamente, da antena de microfita com patch triangular. Nota-se a característica de radiação broadside, típica desse tipo de antena. No diagrama 3D percebe-se ainda que na direção de máxima radiação a antena apresenta o valor de ganho próximo a 4,6 dBi.

Figura 12. Diagrama de Radiação 2D simulado da Antena de Microfita



Fonte: Autoria Própria

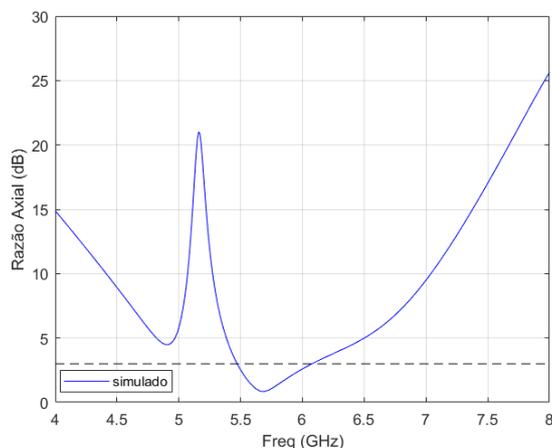
Figura 13-Diagrama de Radiação 3D simulado da Antena de Microfita



Fonte: Autoria Própria

A Figura 14 mostra a razão axial da antena simulada com patch triangular utilizando o substrato FR4. Observa-se que, de acordo com a literatura referenciada, a antena atende às condições de polarização circular na faixa correspondente às frequências de 5,28 GHz a 6,65 GHz, onde os valores desse parâmetro são inferiores à referência de 6 dB, com valor ótimo de 0,84 dB em 5,68 GHz. Os resultados simulados comprovam a eficiência do método utilizado para geração de polarização circular com antenas do tipo microfita com patch triangular. Assim, a antena de FR4 foi construída e medida.

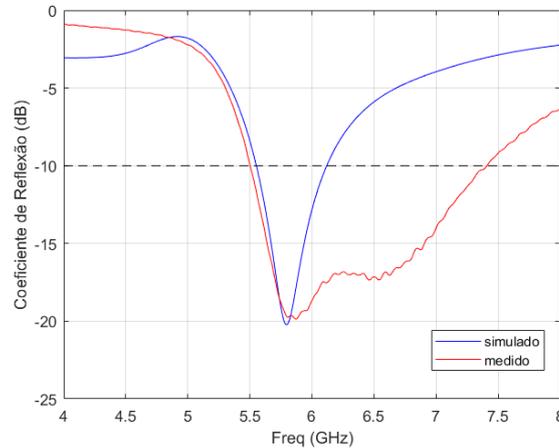
Figura 14- Razão axial da Antena de Microfita



Fonte: Autoria Própria

A Figura 15 apresenta uma comparação das perdas de retorno simulada e medida da antena patch triangular. Percebe-se que a medição a antena apresentou perda de retorno abaixo de -10 dB, na faixa compreendida entre 5,51 GHz e 7,4 GHz.

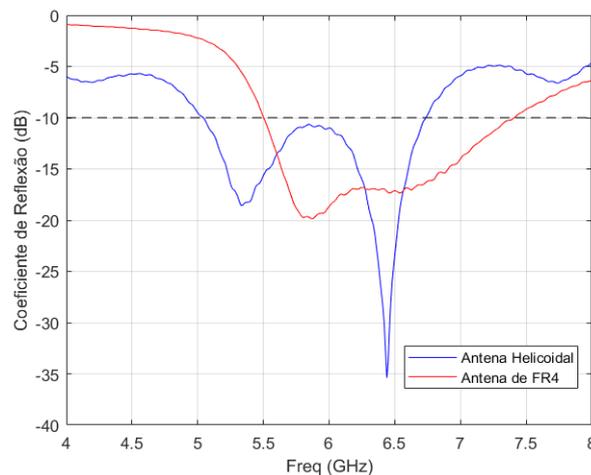
Figura 15- Coeficiente de reflexão medido e simulado da Antena de Microfita



Fonte: Autoria Própria

Estes valores representam uma largura de banda fracionária de 29,28%, o que, de acordo com a literatura, define a antena como sendo de banda ultra larga (UWB) (GHAVAMI, *et al.*, 2014). Por outro lado o resultado simulado apresenta uma faixa de ressonância entre 5,56 GHz e 6,11 GHz, representando 9,43% de largura de banda fracionária. Deve ser observado que o resultado da medição foi mais satisfatório do que o obtido por meio das simulações computacionais. Para a aplicação no FPV essa largura de banda é suficiente, já que atende a todos os canais de comunicação utilizados pelo transmissor. A Figura 16 mostra uma comparação entre a antena de microfita e antena helicoidal. Do gráfico da perda de retorno das antenas pode-se concluir que ambas podem operar na faixa de frequência do FPV, porém a antena helicoidal oferece menor eficiência, visto que apresenta uma alta perda de retorno em 5,8 GHz, tendo seu melhor desempenho em 6,44 GHz.

Figura 16- Coeficientes de reflexão das antenas de microfita e helicoidal



Fonte: Autoria Própria

Enquanto a antena de microfita foi projetada para funcionar na faixa do FPV, e sua largura de banda comporta todos os canais com qualidade. A Tabela 2 resume todas as informações apresentadas nos gráficos, como perdas de retorno, frequência de ressonância e largura de banda medida e simulada das antenas avaliadas no trabalho.

TABELA 2 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Antena	Frequência de Ressonância	Coefficiente de Reflexão (dB)	Fractional Bandwidth (%)
Microfita (Simulado)	5,8	-20,22	9,43
Microfita (Medido)	5,87	19,87	29,28
Antena Helicoidal	6,44	-35,40	28,52

Fonte: Autoria Própria

Após a análise dos resultados, a antena desenvolvida foi instalada no receptor de vídeo da estação de controle do VANT para realização de testes de alcance de transmissão. Para prover a conexão entre a antena e o receptor foi utilizado um cabo *pigtail* SMA macho para RP-SMA macho. Com a antena construída e seus parâmetros medidos, foi possível realizar um teste de transmissão e alcance do FPV. Para realização desse experimento o transmissor de vídeo foi fixado no ponto A, ilustrado na Figura 17, enquanto o receptor se distanciava. Ao rádio transmissor não foi acoplada nenhuma antena, de tal forma que pode-se considerar o ganho no transmissor igual a zero, limitando o alcance do sistema.

Figura 17 – Região de Teste da Antena no Sistema de Transmissão de Vídeo



Fonte: Autoria Própria

Os resultados desse teste apontaram um alcance da antena helicoidal e de microfita de aproximadamente 300 metros, marcado no ponto B da Figura 19. A antena dipolo conseguiu fazer a recepção das imagens com aproximadamente 200 metros de distância do transmissor. A Figura 18 mostra uma imagem capturada pelo

receptor utilizando a antena de microfita com 300 metros de separação entre os rádios.

Figura 18 – Imagem capturada com a antena de microfita a 300 metros de distância do transmissor



Fonte: Aatoria Própria

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposta uma antena de microfita com patch triangular para ser aplicada a FPV embarcado em um VANT. O estudo do referencial de antenas de polarização circular culminou com o projeto e desenvolvimento do protótipo de uma antena *patch* triangular alimentada por sonda coaxial. A aplicação de diferentes materiais para o substrato da antena foi realizada a fim de otimizar a relação entre a carga que seria embarcada no sistema aéreo não Tripulado. Verificou-se através de simulação que esse tipo de antena funciona adequadamente na frequência da aplicação e que ocorre a geração de polarização circular em toda a faixa de operação do equipamento. Por fim, a análise dos resultados obtidos com as medições realizadas em um protótipo da antena proposta, aponta que a antena funciona de acordo com o planejado, e ainda apresenta um desempenho superior a antena helicoidal utilizada como referência. Apesar dos bons resultados computacionais obtidos com o *Ansys HFSS*, os experimentos realizados o protótipo construído em RT/Duroid 5870 não apresentou resultados satisfatórios. Como melhorias em trabalhos futuros ensejamos o desenvolvimento de um método de construção de antenas de microfita com sonda coaxial e máquinas de precisão a fim de minimizar os erros do processo de confecção manual e aplicação de métodos de processamento digital para análise das imagens capturadas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. *RBAC-E 94* : Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. São Paulo, 2017. 6 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. *Resolução 680* : Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. Brasília, 2017.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3 ed. New Jersey (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- BALANIS, C. A. *Modern antenna handbook*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- BIRD, T. S. Definition and misuse of return loss [report of the transactions editor-in-chief]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 51, n. 2, p. 166–167, 2009.
- CERBARO, V.A., *Crop Drone: Uma Solução para Coleta, Armazenamento e Disponibilização de Dados Agrícolas*. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Computação Aplicada, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.
- COSTA, A. G. d. *Sistema de rádio comunicações para UAV*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2015.
- FILHO, R. C. *Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO4 para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- GARG, R.; LONG, S. A. An improved formula for the resonant frequencies of the triangular microstrip patch antenna. *IEEE transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 36, n. 4, p. 570, 1988.
- GHAVAMI M., L. B. MICHAEL, R. KOHNO, *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. John Wiley & Sons, West Sussex: England. 2004.
- HAYAT, W. H.; BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- KUMAR, Girish; RAY, K. P. *Broadband microstrip antennas*. Artech House, 2003.
- MARSHALL, D. M.; BARNHART, R. K.; SHAPPEE, E.; MOST, M. T. *Introduction to unmanned aircraft systems*. [S.l.]: Crc Press, 2015.
- MELO, A. S. d. *Implementação de um Quadrotor como Plataforma de Desenvolvimento para Algoritmos de Controle*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.
- OLIVEIRA, A. H. S. d. *Desenvolvimento de antena CPW em substrato têxtil em estrutura de malha para utilização em sistemas de indentificação por rádio frequência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2017.
- POZAR, D. M. *Microwave engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.
- SHAKEEB, M. *Circularly Polarized Microstrip Antenna*. Tese (Doutorado) — Concordia University, 2011.
- SUZUKI, Y.; MIYANO, N.; CHIBA, T. Circularly polarised radiation from singly fed equilateral-triangular microstrip antenna. In: IET. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*. [S.l.], 1987. v. 134, n. 2, p. 194–198.