



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO
CAMPUS RECIFE
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SISTEMA, PROCESSOS E CONTROLES
ELETRO-ELETRÔNICO
ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

LEANDRO HENRIQUE CAVALCANTI BERNARDES

**DESENVOLVIMENTO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO
COM ARDUINO**

RECIFE

2019

LEANDRO HENRIQUE CAVALCANTI BERNARDES

**DESENVOLVIMENTO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO
COM ARDUINO**

Este trabalho foi apresentado ao Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas.

Orientador: Anderson L. S. Moreira, Ms.C.

RECIFE

2019

Ficha elaborada pela bibliotecária Emmely Cristiny Lopes Silva CRB4/1876

B519d
2019

Bernardes, Leandro Henrique Cavalcanti.

Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado com arduino / Leandro Henrique Cavalcanti Bernardes. --- Recife: O autor, 2019.
52f. il. Color.

TCC (Curso Superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) – Instituto Federal de Pernambuco, Departamento Acadêmico de Controle de Sistemas Eletrônicos - DASE, 2019.

Inclui Referências.

Orientador: Professor M.e. Anderson Luiz Souza Moreira.

1. Veículo não tripulado. 2. Hardware aberto. 3. Sensores de monitoramento. 4. Sistemas embarcados. I. Moreira, Anderson Luiz Souza (orientador). II. Instituto Federal de Pernambuco. III. Título.

CDD 005 (21ed.)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado pelo aluno Leandro Henrique Cavalcanti Bernardes à coordenação de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, do Instituto Federal de Pernambuco, sob o título de "DESENVOLVIMENTO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO COM ARDUINO" orientado pelo Prof(a). Ms. Anderson Luiz Souza Moreira e aprovado pela banca examinadora formada pelos professores:

Recife, 11 de Março de 2019:

Anderson L. S. Moreira, Ms.C
Orientador

Prof. Ms. Paulo Abadie Guedes
CTADS/DASE/IFPE

Prof. Ms. Lizandro Nunes Silva
CTADS/DASE/IFPE

**Leandro Henrique Cavalcanti
Bernardes**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por sempre acreditarem em mim e por todo investimento, carinho e suporte ao longo de todas as etapas da minha vida.

Agradeço aos meus amigos de curso juntamente com os professores pela amizade e companheirismo durante a minha jornada universitária, período de grande aprendizado.

"A grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-las"
Aristóteles

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver tanto o *hardware* como o *software* para um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) utilizando materiais acessíveis. Mostrando a forma de desenvolvimento direta de construção e o modelo utilizado. Também fundamentado a seleção conveniente dos sensores embarcados e os outros componentes. Possuindo como configuração do *hardware* final fazendo composição do drone, integrado por uma placa de controle aberta, sem utilização de componentes pre-configurados e fácil obtenção. Sendo desenvolvido também um controle baseado em Arduino para o controle em terra. Terá como conclusão a sincronia adequada entre o sistema do VANT e o controle de monitoramento, no qual resultará em diversas pesquisas na área em desenvolvimento, tais quais monitoramento ambiental, verificação de linhas de transmissão de alta tensão e pesquisa de componentes que irão compor o sistema mais leves. O sistema final é composto por duas placa de prototipação de baixo custo no controle do VANT e outra placa semelhante para o controle em terra, tendo como algoritmo base o MultiWii com modificações no levantamento do voo e no seu pouso tornando-os automatizados.

Palavras-chaves: Veículo não tripulado. *Hardware* aberto. Sensores de monitoramento. Sistemas embarcados.

ABSTRACT

This work aims to develop both hardware and software for an unmanned aerial vehicle (UAV) using accessible materials. Showing the form of direct development of construction and the model used. Also founded the convenient selection of embedded sensors and other components. Possessed as configuration of the final hardware making composition of the drone, integrated by an open control board, without using preconfigured components and easy obtaining. Arduino-based control is also developed for ground control. It will conclude the appropriate synchronization between the VANT system and the monitoring control, which will result in several researches in the area under development, such as environmental monitoring, verification of high voltage transmission lines and research of components that will compose the system lighter. The final system consists of two low-cost prototyping boards in the control of the UAV and another similar board for ground control, based on the MultiWii algorithm with changes to the flight survey and its landing making them automated.

Key-words: Unmanned vehicle. Open hardware. Monitoring sensors. Embedded systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – MQ-1 Predator | 15 |
| Figura 2 – Gyroplane No. 1 | 16 |
| Figura 3 – Diagrama de tipos de aeronaves | 17 |
| Figura 4 – Protótipo do esquema do drone | 19 |
| Figura 5 – Protótipo do drone | 20 |
| Figura 6 – Protótipo do drone | 21 |
| Figura 7 – Arquitetura do sistema do VANT | 22 |
| Figura 8 – (a)Protótipo do VANT (b) CR200 Datalogger (c) Sensores de baixo custo DHT11, DHT21, DHT22, SHT10 e SHT11 | 23 |
| Figura 9 – Drone Marmita | 24 |
| Figura 10 – Drone pulverizando uma plantação | 24 |
| Figura 11 – IDE Arduino | 27 |
| Figura 12 – Interface de configuração do MultiWii | 28 |
| Figura 13 – Dimensões da Arduino Mega 2560 | 29 |
| Figura 14 – Diagrama de circuito do Arduino Nano V3 | 30 |
| Figura 15 – Frame utilizado no projeto | 31 |
| Figura 16 – Motor utilizado no projeto | 33 |
| Figura 17 – Módulo de rede sem fio NRF24L01+ | 34 |
| Figura 18 – Módulo de ultrassom | 35 |
| Figura 19 – Módulo acelerômetro e giroscópio | 36 |
| Figura 20 – Controlador e sensores do VANT | 40 |
| Figura 21 – Controlador em terra | 40 |
| Figura 22 – Modelo simplificado dos movimentos de um quadrimotor | 41 |
| Figura 23 – Movimentos do VANT em relação aos eixos | 42 |
| Figura 24 – Algoritmo para levantamento de voo e liberação para controle | 44 |
| Figura 25 – Protótipo VANT produzido | 44 |
| Figura 26 – Algoritmo de pouso automático | 45 |
| Figura 27 – Protótipo Controle produzido | 46 |
| Figura 28 – VANT em teste | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Configuração do motor RS2205-2300KV CCW | 32 |
| Tabela 2 – Tipos de VANT's | 41 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|------------------------------------|
| VANT | Veículo Aéreo não Tripulado |
| ESC | Electronic Speed Controllers |
| IDE | Integrated Development Environment |
| ABS | Anti-lock Braking System |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| DMP | Digital Motion Processor |
| ARM | Advanced RISC Machine |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|--------------------|
| Ω | Sentido da rotação |
| ϕ | Arfagem |
| θ | Guinada |
| ψ | Altitude |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Surgimento dos VANT | 14 |
| 1.2 | Delimitação do tema | 17 |
| 2 | ESTADO DA ARTE | 18 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 26 |
| 3.1 | Sistemas embarcados | 26 |
| 3.2 | Sobre a plataforma de prototipação | 27 |
| 3.3 | Sobre a plataforma MultiWii | 28 |
| 3.4 | Controlador de voo | 28 |
| 3.5 | Controladora em terra | 29 |
| 3.5.1 | Frame | 30 |
| 3.5.2 | Motores | 32 |
| 3.5.3 | Bateria | 33 |
| 3.5.4 | ESC | 34 |
| 3.5.5 | Comunicação | 34 |
| 3.5.6 | Sensores | 35 |
| 3.5.6.1 | <i>Ultrassom</i> | 35 |
| 3.5.6.2 | <i>Girosópio Acelerômetro</i> | 36 |
| 4 | METODOLOGIA | 38 |
| 4.1 | Prototipação | 39 |
| 4.1.1 | Arquitetura | 39 |
| 4.2 | Aerodinâmica | 41 |
| 4.3 | Movimentos | 41 |
| 4.4 | Configuração do controle em terra | 43 |
| 4.5 | Funcionalidades | 43 |
| 4.6 | Protótipo e testes | 43 |
| 4.6.1 | Teste 01 | 46 |
| 4.6.2 | Teste 02 | 46 |
| 4.6.3 | Teste 03 | 47 |
| 4.6.4 | Teste Final | 47 |
| 5 | RESULTADOS | 48 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 50 |

| | |
|--------------------|-----------|
| REFERÊNCIAS | 51 |
|--------------------|-----------|

1 INTRODUÇÃO

Os veículos aéreos não tripulados, (VANT) mais conhecidos como drones, cuja tradução do inglês significa “zangão”, tiveram como início de sua história em campanhas militares com maior uso de reconhecimento de terrenos hostis, contudo, atualmente são também usados para fins recreativos e de pesquisas científicas. Não necessitando de pilotos a bordo do veículo mostra sua principal característica, podendo também ser autônoma ou a combinação de remota com autônoma. Podendo ter curso e rotas pré-programadas ou definidas em tempo real, determinadas por um computador a bordo por exemplo. Sua complexidade varia de acordo com o objetivo que pretende ser empregado como apenas execução de manobras recreativas ou como demarcação de um terreno de agricultura, determinando qual tipo de agrotóxico deve ser utilizado e quais pontos do terreno deve ser aplicado.

Os drones são capazes de entrar em lugares de alto risco onde o acesso ao local é difícil ou impossível para qualquer pessoa, por exemplo, dentro de áreas de alta criminalidade, lugares com ambiente não salutar, entre outros. Estes não exigem pilotos a bordo, porque podem ser programados para fazer seus voos de reconhecimento de forma autônoma, resultando na economia de combustível no transporte devido ao peso ou tamanho reduzido, que pode ser aplicado no caso de entrega de produtos que já vem sendo utilizado em diversas partes do mundo (MEJÍA, 2017).

1.1 Surgimento dos VANT

Os primeiros veículos foram criados para ser utilizado em operações militares, do qual, os primeiros usos do conceito de VANT datam épocas da guerra civil americana onde lançavam balões contra os inimigos contendo explosivos para cair em depósitos de mantimentos.

Contudo, foi por volta de década de 30 e 40 durante a segunda guerra mundial que começaram a ser desenvolvidos os primeiros protótipos de VANT com mais robustez, possuindo maior controle e precisão dos seus alvos, sendo um deles o protótipo americano chamado de *Operation Aphrodite*, no qual, consistia de um avião bombardeiro B-17G adaptado para ser controlado remotamente, servindo como bomba rádio controlada, mas devido os impedimentos tecnológicos da época não foi possível concluir o projeto (GONZALEZ, 2012).

Apesar de alguns dos exemplares da época ser operacionais, eles não eram tão eficientes, difíceis de controlar e com alcance limitado. Porém, devido aos avanços tecnológicos trazendo dispositivos eletrônicos como processadores e sensores cada vez mais

eficientes e compactos, os veículos não tripulados evoluíram. Em meados de 1995 entrou em operação um dos modelos militares mais avançados, o MQ-1 Predator (Figura 1), fabricado pela *General Atomics* e fornecido a força aérea americana (USAF), este exemplar contém dois modos de operação, controle autônomo ou remoto e pode realizar missões de reconhecimento e ataque ar-terra (GERTLER, 2012). Em 2002 esse modelo foi o primeiro VANT a realizar uma missão de ataque terrestre na guerra do Afeganistão.

Figura 1 – MQ-1 Predator



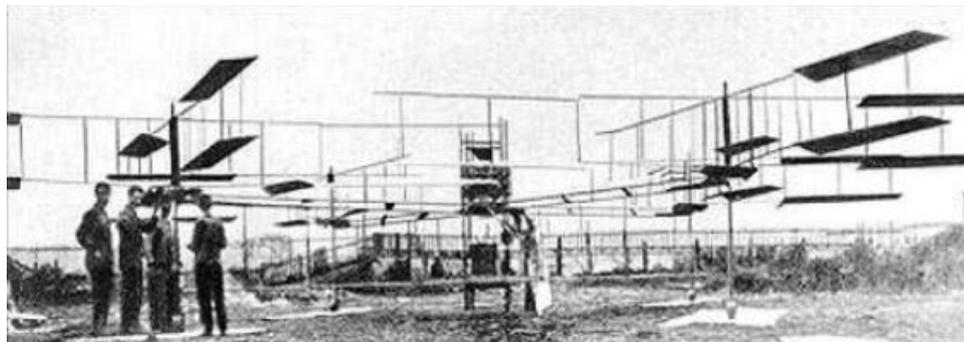
Fonte: Figura extraída de AirforceTechnology (2015)

Devido à complexidade e altos custos envolvidos essa foi uma tecnologia que se manteve restrita para usos militares por várias décadas. Os VANT comerciais só começaram a surgir na década de 1980 e atualmente com a tecnologia cada vez mais acessível eles estão sendo utilizadas largamente nas mais diversas aplicações civis.(LEISHMAN, 2002).

O conceito do quadrirrotor não é atual, ele surgiu no começo do século XX onde em 1907 o professor Charles Richet e os irmãos Bréguet criaram o primeiro quadrirrotor que se tem registro (Figura 2), chamado de “Bréguet-Richet Quad-Rotor Helicopter”. Este modelo necessitava de um piloto embarcado e seu sistema de controle era manual através de mecanismos simples, ele pesava cerca de 580 kg. Segundo relatos o protótipo não conseguiu obter a estabilidade necessária para sua pilotagem, não levantando mais que um metro e meio do solo (RASI, 2008). Apesar de seu funcionamento não ter sido satisfatório, Charles Richet e os irmãos Bréguet contribuíram descrevendo a teoria dos pares de hélices girarem em sentidos opostos, conceito ainda hoje utilizado para evitar o torque giroscópico, caso contrario o veiculo iria girar em torno do seu próprio eixo.

O uso desta tecnologia trouxe inúmeros benefícios entre eles mapeamentos territoriais e monitoramento ambiental. Partindo das diversas utilidades também o aprimoramento visando o custo-benefício e funcionalidades personalizadas (MORGADO; SOUSA,

Figura 2 – Gyroplane No. 1



Fonte: (GUIMARÃES, 2012).

2009). Os modelos mais comuns para os VANT são os aeromodelos e quadricópteros. Tendo como diferença entre eles a aplicação, onde a velocidade do aeromodelo na maioria das vezes será superior a do drone, porém na questão de diversidade de movimentos o drone se mantém superior devido à sua gama de possibilidade de movimentos como subir e descer na vertical, ir para trás e ficar estável no ar, são exemplos de possibilidades de movimentos de um drone (SILVA; MORAIS, 2014).

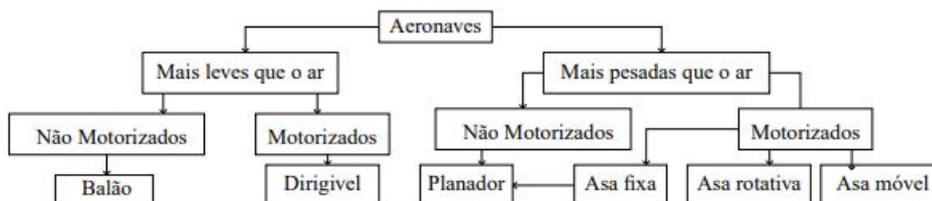
Contudo, em questão de complexidade de software os aeromodelos são mais fáceis, pois seus movimentos enquanto no ar são mais limitados comparados aos drones. Um dos conceitos que foi utilizado para os VANT's são os helicópteros, que possuem vários rotores com asas rotativas. Estes veículos têm motores que operam em sincronia, no qual os pares giram em direções opostas e que possui algumas vantagens comparadas aos helicópteros (SANTANA; BRANDÃO; SARCINELLI-FILHO, 2015).

Os VANT's dispõem de algumas vantagens, dentre elas, as operações de veículos não tripulados são menos custosas comparada as operações realizadas em veículos tripulados e com a possibilidade de realizarem operações de alto riscos pois não possuem tripulação, outra vantagem dos drones é que pode possuir inúmeras utilidades, entre elas filmar pontos estratégicos, reconhecimento do território, recolhimento de dados, além de transmitir ou guardar as informações coletadas e retornar à base podendo utilizar somente o GPS (*Global Position System*). Tornando assim necessário uma unidade de controle em terra responsável pela navegabilidade e estabilidade da aeronave contando com um conjunto de sensores posicionados estrategicamente (PAULA, 2012).

Com o decorrer do tempo, diante das inovações e utilidades atribuídas a esses veículos não tripulados foram criadas configurações padronizando diferentes tamanhos, tempo de voo e capacidades. Sendo eles de asa fixa, nos quais alcancem grandes velocidades e percorrendo grande distancias. Os de asas rotativas, sendo caracterizados pela sua movimentação horizontal e vertical, possuem grande variedades de movimento e possibilidade de pairar em um ponto único. Outro grupo são os de balões e dirigíveis, que

são aeronaves mais leves que o ar, possuem baixa velocidade e podem carregar grandes quantidades de peso dependendo do seu tamanho. E por último os *flappings* que são inspirados em insetos, devido ao seu bater de asas. Todos devidamente representados em suas divisões na figura 3 representando os tipos de aeronaves (GUIMARÃES, 2012).

Figura 3 – Diagrama de tipos de aeronaves



Fonte: Figura extraída de (GUIMARÃES, 2012).

Tendo como unidade de controle o *hardware* aberto que possui uma grande facilidade na sua utilização e programação, permitindo a aplicação de técnicas customizadas para a obtenção e transmissão do controle em tempo real.

1.2 Delimitação do tema

Alguns fatores influenciaram no tipo de VANT que iria ser produzido, levando em consideração o custo e os recursos disponíveis para o desenvolvimento do protótipo, planejou-se desenvolver um VANT de pequenas proporções. Tendo como atrativo a sua fácil maleabilidade, podendo ser facilmente transportado e não necessitando de uma infraestrutura grande para realizar transportes, aterrissagens ou pousos. O sistema de aeronave mais interessante para o projeto foi o de multirotores, mais especificamente o quadricóptero. Esse modelo é uma espécie de helicóptero que possui uma estrutura em forma de cruz ou “H”, com quatro rotores acoplados a hélices dispostos cada um em uma extremidade do corpo. Este modelo apresenta uma baixa complexidade mecânica comparado aos outros modelos citados devido ao seu sistema de navegação que é realizado variando-se a velocidade individual dos rotores.

O VANT produzido neste trabalho tem como contribuição a apresentação do projeto e mostrar o desenvolvimento de um sistema de *hardware* controlado por uma eletrônica embarcada composta por micro controlador, sensores e atuadores. Utilizando como metodologia, uma implementação que envolve o estudo dos princípios de voo de aeronaves e os fundamentos teóricos dos componentes utilizados, no qual o sistema propõe-se a integrar sensores e atuadores necessários ao funcionamento.

2 ESTADO DA ARTE

Nos últimos anos houve um grande avanço no desenvolvimento de drones e dos hardwares dedicados principalmente do sistema de comunicação do mesmo da mesma forma como o desenvolvimento de software que o acompanha devido principalmente a redução dos custos dos componentes eletrônicos (RASI, 2008).

É muito ampla a dimensão de novos artefatos que surgem oriundos de novos sistemas operacionais, microprocessadores, sensores e atuadores torna-se chamativo um projeto de criação de hardware dedicado, onde se criou diversas abordagens em que já foram apresentadas para diversos fins. Destaque aos quadricópteros devido a sua simples construção, tanto agilidade como estabilidade no voo como sua versatilidade. Sendo produto de comércio devido a sua área de utilização bastante vasta, Tecnologia de modo geral entrega versatilidade, mobilidade e facilidade para uma gama de diversos usos, desde campanhas militares, monitoramento ambiental, inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica, verificar plantações, vigilância de limites territoriais, tráfego urbano, medição de terrenos, mapeamento de regiões e entre outras. (SILVA, 2008)

Segundo o Tenente Brigadeiro Juniti Saito na aula inaugural realizada em 2008 aos cadetes da Academia da Força Aérea, afirmou que os veículos aéreos não tripulados têm destino promissor da aviação militar, onde nações mais desenvolvidas tecnologicamente já estão propulsando seus veículos não tripulados a jato, atingindo altitudes de mais de 60.000 pés. Isto para não citarmos os micro-VANT's, que simulando os voos dos insetos, podem adentrar espaços de dimensões mínimas.

Além dos VANT's, tudo indica que não poderemos deixar de investir em desenvolvimento de tecnologias críticas como a dos radares, dos satélites e da propulsão a jato. Esses veículos possuem sistemas de comunicação de transmissão e recepção entre o VANT e o controle em terra combinado a sensores que captam as condições do ambiente e como influenciam o voo dando a resposta em tempo real, assim não necessitando de um piloto experiente para fazê-lo levantar e manter sua estabilização. (SANTOS; SPEROTTO, 2016)

Existem trabalhos que empregam somente o controle em si do veículo, outros a adição de sensores ou até mesmo mais funcionalidades. Variando assim também o custo do equipamento dependendo do que foi implementado e qual o objetivo proposto para a construção do mesmo.

No projeto de (CÂMARA et al., 2016) que cria um VANT com a tecnologia KK Multicopter, Zigbee e Arduino com o objetivo de monitoramento, realizando o envio em tempo real desses dados utilizando um sensor DHT11 coletando temperatura combinado

a umidade, e posteriormente o processamento desses dados para outros fins, como por exemplo na medição da umidade de determinado local. O KK Multicopter é uma placa para controle de voo de aeromodelos com no máximo 6 motores, tendo a finalidade de estabilizar VANT durante o voo. Essas informações serão salvas, posteriormente processa a informação de acordo com o software da KK Multicopter e envia um sinal de controle para os controladores de velocidade (ESC). Os movimentos são realizados por um controle em terra podendo dar maior mobilidade e controle dos movimentos realizados pelo VANT.

O Arduino teve o papel de enviar os dados coletados do sensor DHT11 através do módulo XBee ao receptor que armazena os dados em uma tabela no Excel sendo processados posteriormente por um algoritmo. Durante os testes foi constatado uma certa dificuldade em relação ao objetivo principal do trabalho de (CÂMARA et al., 2016) (figura 4), que seria a varredura de locais com acesso perigoso aos seres humanos e provavelmente com diversos pontos em que o módulo emissor não teria visada para o módulo receptor. Portanto o módulo Xbee PRO S1 não se demonstrou suficiente para o seu papel dando a possibilidade de utilizar tecnologia de transmissores RF (Rádio Frequência) que devido a sua baixa frequência poderá desempenhar a tarefa com êxito.

Figura 4 – Protótipo do esquema do drone



Fonte: Figura extraída de Câmara et al. (2016).

Em grande parte dos veículos produzidos, têm sido concebidos como base para embarcar sensores e atuadores que transmitem dados para a obtenção de imagens e dados do ambiente inserido, assim podendo acionar seus atuadores caso necessário, de tal modo, que as utilidades presentes nesses veículos manifestam proveitos em relação a aeronaves tripuladas e as que não utilizam motores como propulsores, tais como: uma maior autonomia para obtenção de imagens do alto, alternativa na execução de campanhas em circunstâncias adversas sem risco de morte para o piloto, custo reduzido no treinamento de pilotos, maior adaptabilidade e adição de novas funcionalidades. (MESCOLOTI et al., 2018).

No qual, em seu trabalho visando meios menos custoso, foi desenvolvido um sistema de controle para VANTS usando dispositivos de baixo custo com o objetivo do envio de dados do veículo para a estação de controle em terra capturando latitude, altitude, velocidade e orientação do norte magnético da terra com a rota preestabelecida para ser guiada via GPS.

O seguinte trabalho representado na figura 5 apresenta um modelo de construção de VANT, sendo constituído por: Arduino¹, KK Board² composta por giroscópio, acelerômetro controlados por um Atmega324PA, barômetro e magnetômetro, e com o shield XBee³ para a comunicação com o controle. Foi observado um desempenho não muito preciso em relação a trajetos muito longos no qual foi dividido em subtrechos tendo como objetivo a correção da rota a cada fim dos pequenos trechos criados. Outro problema encontrado foi que o micro controlador Atmel que está contido na placa Arduino não foi capaz de gerenciar todos os sensores e a comunicação com a placa KK Board utilizada para a estabilização finalizando no cancelamento dos voos autônomos, tornando uma possível solução à utilização de uma placa com o microprocessador ARM devido à limitação do tamanho da Datapath contida na unidade de microprocessamento do Atmega.

Figura 5 – Protótipo do drone



Fonte: Figura extraída de (MESCOLOTI et al., 2018).

De acordo com (PAULA, 2012), ressalta, que os principais ganhos no uso de veícu-

¹ Mais adiante será tratado sobre esta plataforma no presente trabalho.

² O KKmulticontroller é uma placa para o controle de voo para multicopters de controle remoto com 2,3,4 e 6 rotores. Seu objetivo é estabilizar a aeronave durante o vôo levando o sinal dos três giroscópios na placa (roll, pitch e yaw) e alimenta a informação no Circuito Integrado (Atmega IC). Isso então processa as informações de acordo com o software KK e envia um sinal de controle para os Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESCs) que estão conectados à placa e também conectado aos motores.

³ São módulos que utilizam como tecnologia de comunicação a RF (Rádio Frequência) que fazem comunicações no padrão ZigBee IEEE 802.15.4. Oferecendo uma excelente imunidade contra interferências, e a capacidade de hospedar milhares de dispositivos numa mesma rede, com taxas de transferências de dados variando entre 20Kbps a 250Kbps. Tendo como proposito a economia do máximo de energia possível.

los não tripulados frente as aeronaves tripuladas é o custo na sua confecção e assistência no qual são reduzidos, resultando uma maior gama de alternativas de utilização e longas horas de duração de voo.

No seu trabalho representado na figura 6 foi desenvolvido um quadricóptero com sua estrutura sendo composta por tubos de fibra de carbono e utilizando como sensores um acelerômetro, ultrassom, GPS e um giroscópio. Como controle em terra é utilizado um micro controlador NXP LPC1768⁴, construído com o objetivo de capturar imagens e vídeos aéreos com baixo custo, contudo o autor salienta que a estabilização não foi suficiente para realizar voos.

Figura 6 – Protótipo do drone



Fonte: Figura extraída de (PAULA, 2012).

Em outro trabalho que envolve tecnologia semelhante, (CROIZÉ et al., 2015) desenvolveu um sistema que teve como propósito ser construído e enviar um veículo não tripulado para medição da concentração de gás de determinado local definido pelo usuário, no qual o veículo foi capaz de se mover de forma autônoma. Foi utilizado como problema real as algas verdes que são uma verdadeira praga da poluição nas costas francesas e chinesas, se acumulam ao longo das praias e apodrecem lentamente, liberando um gás sulfídrico tóxico e letal de tal forma que essa contaminação causou vítimas e continua a causar danos na costa incluindo a questão dos nitratos. As amostras associadas com as coordenadas GPS podem então ser analisadas para determinar um mapeamento de áreas poluídas e maior localização de fonte concentrada. Arquitetura idealizada do drone na figura 7, onde o VANT contém o Arduíno nano, módulo de comunicação GPS e sensor de gás.

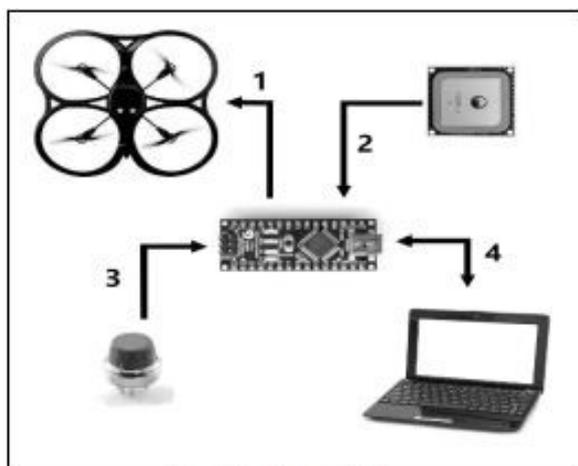
Devido ao problema foi pensado na confecção do *hardware*, o mesmo é composto

⁴ São placas de desenvolvimento com microcontroladores com arquitetura ARM, desenhadas para serem flexível, baixo-custo e rápida prototipagem profissional. A versão citada é a LPC1768 que vem com ARM Cortex-M3. As placas vem com 40 pinos prontas para conectar na protoboard. Inclui uma interface de programação USB, o qual o PC identifica como USB Flash Drive.

por um Arduino Nano como unidade central que irá se relacionar com os outros componentes: computador, sensor de gás, módulo GPS, controlador e conversor de nível. O GPS repassa o posicionamento atual, fazendo o VANT capaz de se mover de forma autônoma até o destino definido, no qual, em todos os pontos salve o nível da atmosfera em que ele está inserido. A interface do usuário foi codificada em C# usando, para bibliotecas ler e escrever através de uma porta serial USB estão disponíveis e integrando HTML e JavaScript para um formulário do Windows. Sendo exibido também o posicionamento do seu GPS as coordenadas definidas com um conjunto de marcadores.

Além disso, se uma sessão foi salva pelo usuário, permitindo que o usuário verifique ou modifique rapidamente a rota drone e visualizar a concentração de gás de cada pontual.

Figura 7 – Arquitetura do sistema do VANT



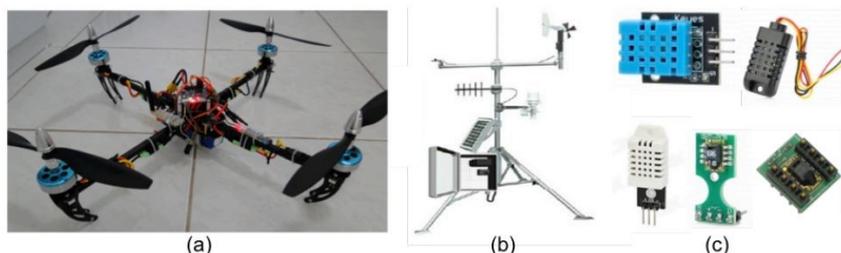
Fonte: Figura extraída de (CROIZÉ et al., 2015).

No trabalho de (TEIXEIRA; SOARES; YEPES, 2014) o veículo produzido por ele tem sido acoplado alguns sensores de temperatura e umidade obtidos diante a sondagem realizada com o intuito de selecionar os equipamentos de grande fidelidade e de baixo custo como os sensores DHT11, DHT21, DHT22, SHT10 e SHT11 que são compatíveis com a placa de prototipação Arduino. Tendo como objetivo atender algumas emergências de difícil acesso ou obtenção de informações como o Corpo de Bombeiros, utilizado para inspeção e monitoramento de áreas de risco em ambientes urbanos e rurais.

Como é uma pesquisa em fase de teste, pretende comparar os resultados com um equipamento de estação meteorológica de precisão, CR200 Datalogger. Caso o resultado seja promissor, terá uma grande gama de utilização, de custo reduzido já que poderá se mover em vários pontos reduzindo o custo de instalação do equipamento meteorológico ali próximo do ambiente e maior precisão. Segue a figura 8 dos sensores utilizados juntamente com o protótipo do drone no projeto de (TEIXEIRA; SOARES; YEPES, 2014).

Não obstante dos diversos projetos que vem sendo produzidos sobre esse tema

Figura 8 – (a) Protótipo do VANT (b) CR200 Datalogger (c) Sensores de baixo custo DHT11, DHT21, DHT22, SHT10 e SHT11



Fonte: Figura extraída de (TEIXEIRA; SOARES; YEPES, 2014).

e das diversificações de utilização no mercado, presumimos que ainda existe bastante espaço para novos trabalhos na área, principalmente esse trabalho que objetiva uma nova forma econômica de produção de um VANT de maneira que atenda a necessidade do indivíduo. Com isso, o projeto proposto – Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado com Arduino – tem como propósito o controle mais fácil e automatizado de um veículo aéreo sendo controlado por um controle portando também a tecnologia da placa de prototipação Arduino via onda de rádio, ambos utilizando tecnologia Arduino, dando um maior horizonte na possibilidade de modificá-lo para qualquer fim.

Contendo o gerenciamento do balanceamento do veículo, assim evitando movimentos que gerem a queda e também estabilização no ar.

O adicional do veículo produzido é que se trata de um sistema configurável, ou seja, o projeto está apto a inclusão de novas funcionalidades de acordo com a opção do usuário e suas necessidades devido à falta de empresas do ramo que não visam suas necessidades específicas. Tendo como diferencial também o seu pouso automático a partir do pressionamento de um botão facilitando seu manuseio e evitando possíveis quedas bruscas que possam danificar o VANT.

No trabalho de (SANTOS; CARDOSO; CARVALHO, 2015) teve como propósito a construção de um VANT quadrimotor de baixo custo utilizando um sistema de código aberto Multiwii, sucata e a criação de um controle sem fio para sua manipulação, propondo também sua manipulação por algoritmos de calibração e estabilização do veículo, na figura 9 é representado o seu drone "Marmita", utilizando peças de baixo custo.

Para a comunicação dos dispositivos foi utilizado módulos de rádio frequência para realizar a comunicação. Sendo módulo para a transmissão TX modelo TXA1-433-F11⁵ que trabalha com uma frequência de 433,92 MHz. A recepção de dados é feita com um módulo Rx modelo RXA27L-433MHz⁶. Para o controle do VANT foi utilizado um joys-

⁵ <http://electronics-diy.com/arduino-rf-link-using-433mhz-transmitter-receiver-modules.php>

⁶ http://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/433Mhz_RF-TX&RX.pdf

Figura 9 – Drone Marmita



Fonte: Figura extraída de (SANTOS; CARDOSO; CARVALHO, 2015).

tick USB conectado ao Arduino Uno juntamente com um transmissor, programados em C++. O receptor é gerenciado por um Arduino Mega ligado ao drone, e capta a informação recebida, passando os dados para o software Multiwii ⁷. Na criação do protocolo, um esquema de codificação e decodificação foi desenvolvido para o envio de todas as informações necessárias, de uma vez só, eliminando possíveis atrasos de comunicação. Teve como resultados alguns contratempos ocorridos pelos testes resultando em hélices quebradas porem melhoramento na criação de uma base de testes mais segura, calibração dos motores e calibração nas respostas. Propondo para trabalhos futuros a calibração aprimorada dos componentes e adição de itens.

No trabalho proposto visa implementar as tecnologias citadas e reproduzi-las tendo como objetivo modifica-las a ponto de tornar o levantamento do voo como o pouso mais automático.

Figura 10 – Drone pulverizando uma plantação



Fonte: Figura extraída de (KALE et al., 2015).

⁷ A ferramenta MultiWii será abordada posteriormente.

No trabalho de (KALE et al., 2015) utiliza também como algoritmo o Multi Wii, sendo uma tecnologia de voo popular, como posição de GPS e retorno para a posição inicial. Tendo como aplicação ser implementado em controle para aplicações agrícolas, onde os VANTs são responsáveis pela pulverização de produtos químicos nas lavouras como representado pela figura 10. O processo de aplicação dos produtos químicos é controlado por meio do retorno da rede de sensores sem fio implantada no campo de colheita. Além disso, foi implementado um algoritmo para ajustar a rota do VANT sob alterações das diversidades do ambiente como o vento e o impacto relacionado ao número de mensagens trocadas entre o VANT e os pontos de comunicação no solo. Tem a expectativa de economia de 20% à 90% em água, tratamentos químicos e mão de obra. Tendo como benefícios o baixo peso e voo em baixas altitudes. A figura 10 mostra o VANT produzido pelo autor pulverizando determinada área de uma plantação com baixa altitude.

O projeto proposto visa seguir a mesma base que alcançado por (KALE et al., 2015), pretende não somente atender o campo da agricultura mas abranger sua utilização devido sua customização de movimentos e sensores.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado um detalhamento do protótipo desenvolvido, descrevendo sua arquitetura, estrutura física, motores, hélices, sensores, unidade de processamento, bateria, etc

3.1 Sistemas embarcados

Sistemas embarcados são aplicações computacionais independentes sendo mais simples que sistemas de propósito gerais, são encarregados de executar apenas uma função determinada na qual executam geralmente repetidas vezes em um *loop*. Também chamado de sistema embutido no qual é dedicado ao dispositivo que controla. Sistemas embarcados são aplicações dedicadas, geralmente responsáveis por realizar uma tarefa específica de maneira contínua e ao custo mínimo. Normalmente, esses dispositivos estão inseridos em máquinas ou em sistemas maiores. Atualmente, os sistemas embarcados estão presentes no nosso cotidiano através de diferentes formas e com diferentes objetivos. Televisão, câmera digital, brinquedos, sistemas ABS (sistemas de antitravamento em freios), controladores de voo, *smartphones*, calculadoras são alguns exemplos de tais dispositivos. (OLIVEIRA; MENEZES, 2017)

Por serem muito simples, muitas vezes esses sistemas não têm flexibilidade "de *software* e de *hardware*" que lhes permita fazer outras tarefas quaisquer que não sejam aquelas para as quais foram desenhados e desenvolvidos. A única flexibilidade permitida e desejada é no caso de uma atualização de novas versões, fazendo com que o sistema possa ser reprogramado, geralmente com correções ou novas funções que o tornem melhor. Mas isto é feito sempre pelos fabricantes e quase nunca pelos usuários finais.

Comumente, o usuário final não terá acesso ao *software* do sistema embarcado, mas interage com o mesmo através de alguma interface como tela ou botão, que auxilia de forma mais prática para o controle do mesmo. Geralmente o sistema embarcado é composto pelo conjunto de componentes entre eles uma unidade de processamento, sensores e atuadores.

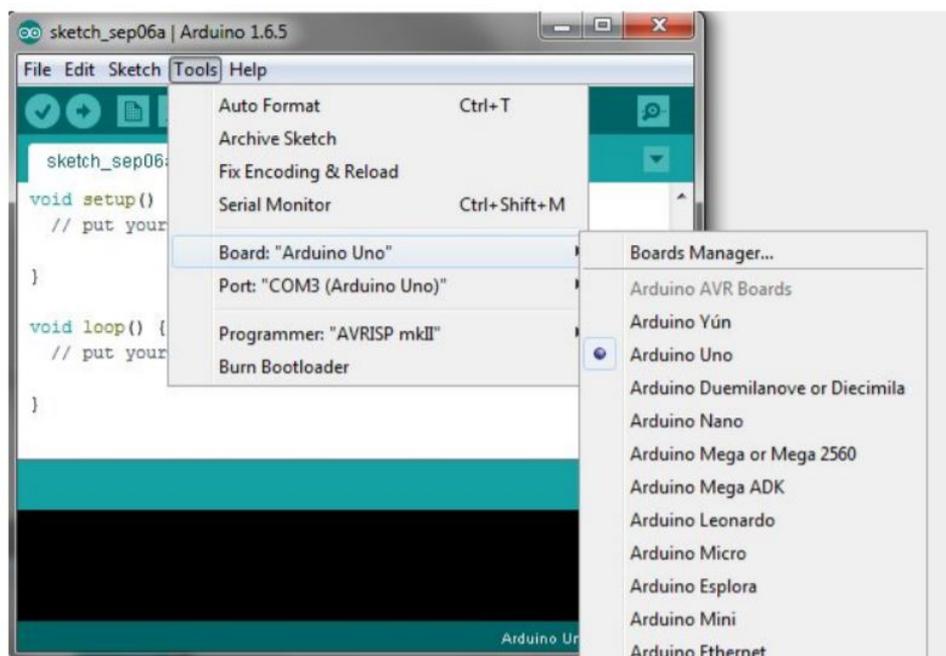
Um grande responsável pela expansão do uso e aplicação dos sistemas embarcados foi a utilização do microcontrolador, pelo seu baixo custo, versatilidade e tamanho reduzido. Muitas vezes é ele que desempenha sozinho todas as funções do aparelho, incluindo controladores para as diversas funções disponíveis e até mesmo uma pequena quantidade de memória RAM, entre outros recursos. (OLIVEIRA; MENEZES, 2017)

3.2 Sobre a plataforma de prototipação

Como plataforma de desenvolvimento foi utilizada a IDE do Arduino, no qual, é uma aplicação de plataforma aberta ao público desenvolvida (para Windows, macOS, Linux) que foi escrita na linguagem Java. Ele é usado para escrever e fazer *upload* de programas para a placa de prototipação Arduino. A plataforma oferece suporte as linguagens C¹ e C++² usando regras especiais de estruturação de código, incluindo uma biblioteca de *software* do projeto Wiring, que fornece versatilidade na configuração de portas de entrada e saída. Oferecendo suporte a diversos tipos de derivações da placa Arduino como Arduino Leonardo, Arduino Uno, Arduino Mega entre outros (ARDUINO, 2015).

Também oferece suporte online, onde poderá criar sketches específicos para cada projeto, mantendo a gama de placas e microcontroladores disponíveis.

Figura 11 – IDE Arduino



Arduino IDE: Board Setup Procedure

Fonte: Figura extraída de (ARDUINO, 2015)

¹ C é uma linguagem de programação criada em 1972, por Dennis Ritchie, no AT&T Bell Labs, para desenvolver o sistema operacional Unix em que o seu código fonte é executado diretamente pelo sistema operacional ou pelo processador, após ser traduzida por meio de um processo chamado compilação, tornando-a código de máquina. Tendo seu propósito como geral e procedural. https://www.livinginternet.com/i/iw_unix_c.htm

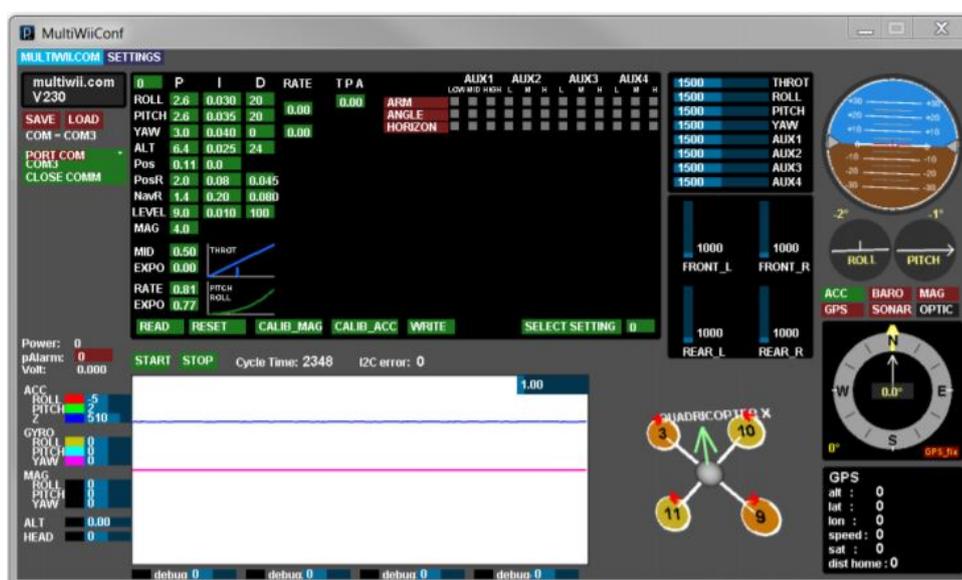
² Linguagem de programação compilada multi-paradigma e de uso geral. Sendo conhecida como C com Classes devido a sua semelhança com a linguagem C com adicional de trabalhar com orientação a objetos.

3.3 Sobre a plataforma MultiWii

O MultiWii é um projeto *open source* de propósito geral para controlar modelos de radio controle voadores. Decorrente vindo de uma extensão Wii Motion Plus (sensor retirado do controle do Nintendo Wii) e uma placa Arduino Pro mini. Sendo um controle de voo muito simples, barato e minimalista, o projeto cresceu e suporta todos os recursos esperados, incluindo a navegação por GPS. Sendo composto por código escrito em C para o dispositivo embarcado, uma placa de controle e por uma aplicação que ajuda na configuração e calibração em tempo real do veículo. A figura 12 representa a configuração da calibragem do dispositivo de forma gráfica, apresentando todas as informações do dispositivo como o PID e recebimento dos sinais.

Podendo ser configurado com diversos tipos de sensores, motores, modelos de VANTs e também outras funcionalidades que podem ser habilitadas.

Figura 12 – Interface de configuração do MultiWii



Fonte: Figura extraída de <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/lynxmotion-multiwii-software-configuration.pdf>

3.4 Controlador de voo

Primeiramente, o papel de controlador de voo e sistema de controle foi atribuído a uma placa Arduino MEGA. Baseada no microcontrolador ATmega2560, possui 54 pinos digitais no qual 15 destes podem ser utilizados como PWM. Possui 16 pinos de entradas analógicas e 4 portas para comunicação serial. Sua vantagem sobre a Arduino UNO é a quantidade de pinos e com maior quantidade de memória, sendo uma ótima opção para projetos que necessitem de muitos pinos de entradas e saídas além de memória de programa com maior capacidade.

Há na placa um microcontrolador ATMEL ATmega2560 que funciona como interface USB para essa comunicação. Este microcontrolador é o responsável pela forma transparente como funciona a placa Arduino, possibilitando o *upload* do código binário gerado após a compilação do programa feito pelo usuário.

A própria IDE realiza o processo de compilação e transferência do código do computador para o microcontrolador Atmega, o que torna o processo de programação e prototipagem muito mais ágil. Entre as muitas vantagens de utilização dessa placa, podemos citar suas pequenas dimensões. A Figura 13 apresenta essas dimensões visualmente:

Figura 13 – Dimensões da Arduino Mega 2560



Fonte: Figura extraída de <http://blog.arduino.cc/2011/01/05/nice-drawings-of-the-arduino-uno-and-mega-2560/>

Outra grande vantagem do Arduino é a existência de bibliotecas para praticamente qualquer componente externo que se deseje anexar (*Shields* e acessórios). Nesse projeto, por exemplo, utilizou-se a biblioteca Wire, esta biblioteca permite o acesso a dispositivos I2C³ com endereçamento de 7 bits. Ela faz parte do núcleo de bibliotecas disponível com o software padrão do Arduino, de modo que não é necessário instalar nada adicional.

Contudo, visando a versatilidade e possibilidade de troca por outro dispositivo de mesma finalidade o controle central do veículo perdeu a funcionalidade de receber e interpretar os dados via radio para outra placa Arduino. A comunicação entre elas é realizada entre fios pelo protocolo I2C.

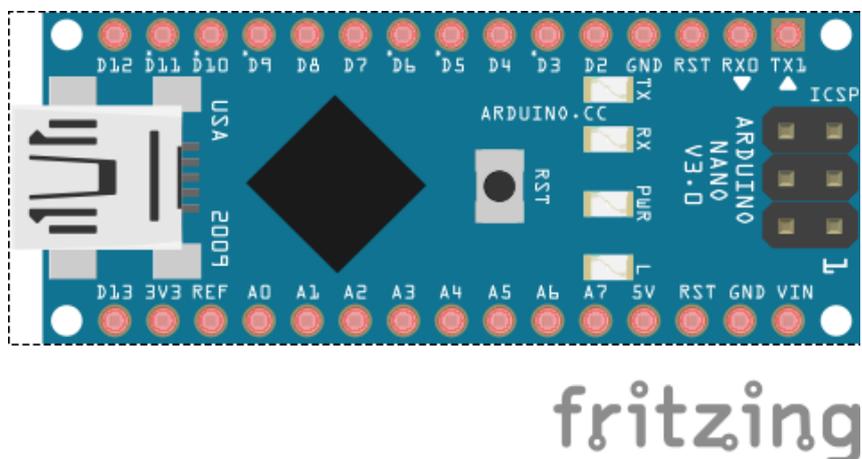
3.5 Controladora em terra

O Arduino Nano representada na figura 13 é uma placa pequena, completa e fácil de usar, baseada no ATmega328P (Arduino Nano 3.x). Tem a mesma funcionalidade do

³ Do inglês *Inter-Integrated Circuit* (Circuito Inter-integrado) é um barramento serial desenvolvido pela Philips que é usado para conectar periféricos de baixa velocidade entre dispositivos, a um sistema embarcado ou a um telefone celular.

UNO, mas em tamanho reduzido. Não possui uma entrada de energia DC e funciona com um cabo USB Mini-B em vez de um cabo padrão.

Figura 14 – Diagrama de circuito do Arduino Nano V3



Fonte: Próprio autor produzido no fritzing.

Para possibilitar o veículo receber informações e interagir com os sensores que pretende controlar e delas obter informações via rádio, foi criado um sistema que irá obter as informações produzidas pelo controle e captura-las com uma placa microcontroladora Arduino que terá o papel de interpretar e enviar por um módulo de rádio. Para a geração do algoritmo foi necessária a utilização da IDE executado inicialmente em um computador, possibilitando a configuração para escolher o tipo de *hardware* em questão e conseqüentemente a criação de um esboço (*sketch*), cujo *upload* deverá ser feito para a placa Arduino. Uma das vantagens da utilização do Arduino é que sua IDE⁴ – Arduino Software – é multiplataforma, ou seja, pode ser instalada no Windows, Linux e MAC OS X e, por ser uma IDE dedicada ao Arduino, ela possui nativamente diversos exemplos de códigos. Além disso, trata-se de uma IDE gratuita e *open source*⁵, disponibilizada para download no site oficial da plataforma: www.arduino.cc/en/Main/Software. No caso do sistema criado o esboço foi desenvolvido em linguagem de programação baseada em C/C++, que é a linguagem aceita pelo Arduino, o que pode se justificar seu uso.

3.5.1 Frame

Os motores, hélices, bateria e demais sistemas e componentes devem ser fixados numa estrutura física ou numa armação (*frame*). O *frame* é a estrutura que mantém to-

⁴ Do inglês *Integrated Development Environment* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado), consiste em um programa de computador que é utilizado para aumentar a produtividade dos desenvolvedores de software, levando em consideração a qualidade desses produtos, reunindo características e ferramentas aumentando ainda mais a produtividade dos softwares produzidos. <http://www-usr.inf.ufsm.br/~alexks/elc1020/artigo-elc1020-alexks.pdf>

⁵ Open source - termo de origem do inglês que significa código aberto. Isso diz respeito ao código-fonte de um software, que pode ser adaptado para diferentes fins.

dos os componentes juntos, sendo construída em plástico, fibra de vidro, fibra de carbono, alumínio ou madeira. Consiste de duas ou três partes, que não obrigatoriamente têm que ser do mesmo material. Precisa ser projetada para ser resistente e rígido o suficiente, minimizando as vibrações geradas pelos motores evitando a ocorrência de erros nas leituras dos sensores, mas ao mesmo tempo deve ser leve. Caso contrário, terá de utilizar componentes mais caros, como motores mais potentes e baterias com mais capacidade de carga, conseqüentemente mais pesadas.

A diferença dos *frames* pode ser definida pela quantidade e tipo de motores em que cada configuração tem características específicas, singularmente dos VANTS com quatro motores, os *frames* podem ter algumas formas dependendo da sua utilidade, dentre eles em formato H ou X, em que, na parte central ficam a controladora juntamente com os sensores e na maioria das vezes a bateria e presos à parte central ficam quatro “hastes”, em cujas extremidades ficam os suportes para os motores.

Devido ao resultado de alguns trabalhos citados em relação ao *frame* produzido pessoalmente, foi optado pela compra de um modelo comercial onde possui formato X e pode ser utilizado para diversos fins devido a sua estabilidade garantida pelo fabricante e devido ao seu propósito específico. Segue na imagem 15 o *frame* utilizado no projeto.

Figura 15 – Frame utilizado no projeto



Fonte: <https://www.amazon.com/REPTILE-Alien-Multi-copter-500mm-Quadcopter/dp/B0713NYRH3>

O *frame* quadricóptero é um componente crítico pois deve ser forte o suficiente para carregar pequenas cargas e rígido o suficiente para receber a iteração dos motores sem danificar o mesmo.(GULIAEV et al., 2017)

3.5.2 Motores

Grande maioria dos VANT's usa um tipo de motor chamado *Brushless Motor* (motor sem escovas) do inglês. São motores de corrente contínua sem escovas que entregam o impulso necessário para o voo. Como o nome remete os motores *brushless* não têm uma escova no eixo, os motores têm bobinas no centro do motor, as quais são fixadas na estrutura. A parte externa contém certo número de ímãs montados num cilindro, presos ao eixo rotativo. Geralmente, os motores sem escovas giram numa velocidade muito maior e consomem menos energia utilizando a mesma velocidade, comparados aos motores com escova de mesmo porte. Existe uma variedade de motores *brushless*, que se diferem pelo tamanho e pelo consumo de corrente. Ao escolher um motor, devemos nos ater ao seu peso, tamanho, tipo de hélice que estamos usando e como essas características afetam o consumo de energia.

Uma das principais informações que devemos observar ao buscarmos por um motor é seu valor em KV no qual o seu valor indica quantas rotações por minuto (RPM) o motor é capaz de realizar.

O número de RPM pode ser calculado da seguinte fórmula:

$$RPM = [KV] \times [V]$$

Onde o KV (esta na especificação do motor) e V é o valor de tensão fornecida pela bateria. (STÄHELIN et al., 2018)

Os motores *brushless* são mais caros, contudo, possuem vantagens como, maior velocidade comparado aos motores com escova, torque, alta resposta dinâmica, maior eficiência energética, maior durabilidade e ampla gama de possibilidades em tamanhos e configurações de potência e rotação (YEDAMALE, 2003).

Tabela 1 – Configuração do motor
RS2205-2300KV CCW

| | |
|-------------------|---------------|
| Rotação | 2300 RPM/Volt |
| Eficiência Máxima | 80 |
| Corrente Típica | 30A |
| Empuxo Máximo | 1024g(2300kv) |

Fonte: Tabela criada pelo autor retirando informações da embalagem dos motores.

Os motores *brushless* possuem um sistema de controle complexo, por isso eles necessitam de um módulo de controle externo, denominado de controle de velocidade eletrônico (ESC). Este módulo recebe a energia da bateria e a direciona de maneira correta para o motor de acordo com um sinal de controle PWM

Fonte: moura2010uso

Figura 16 – Motor utilizado no projeto



Fonte: Próprio autor.

3.5.3 Bateria

O VANT proposto é um modelo elétrico, ou seja, depende de baterias para sua alimentação, no qual exigem alta corrente e suas baterias devem suprir as condições necessárias. As baterias de polímero de lítio (Li-Po) são ideais para esta aplicação, pois permitem elevadas correntes de descarga e também possui maior capacidade e menor peso comparado com outros tipos de baterias com mesma capacidade. Comumente as células podem ser ligadas em série somando os níveis de tensão ou em paralelo aumentando a capacidade de armazenamento. A carga da bateria é dada normalmente em mAh que é Miliampère hora, significa capacidade de armazenamento que a bateria pode armazenar.

Estas baterias apresentam 3,7V por célula, portanto o número de células define a tensão nominal da bateria. Outro dado importante na escolha de baterias é o quanto de corrente elas podem fornecer, isto é dado então pela sua capacidade de descarga, e é indicada pela letra C. A bateria utilizada possui 2200 mAh, ela possui três células e é capaz de fornecer até 20 vezes sua carga (20 C).

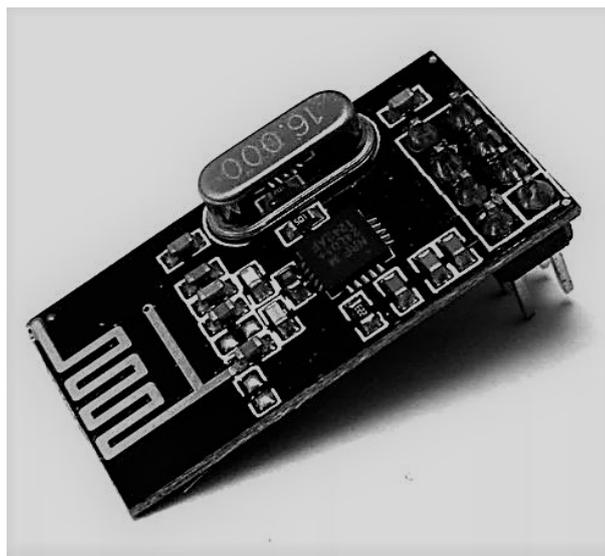
3.5.4 ESC

Como apresentado anteriormente motores sem escova necessitam de um circuito auxiliar para executar o processo de comutação, este é o papel desempenhado pelo ESC (*Electronic System Control*). O ajuste de velocidade é realizado através de uma entrada com protocolo PWM, semelhante ao usado em servo-motores. O ESC usado nos ensaios é do modelo Emax BLHeli 12 A. Esse ESC foi selecionado por atender as demandas de corrente exigidas pelo motor e por sua disponibilidade no mercado. Devido ao motor escolhido irá precisar de um ESC equivalente para o seu controle e alimentação.

3.5.5 Comunicação

Como módulo de comunicação foi usado à plataforma de desenvolvimento aberto o módulo de rede sem fio NRF24L01+ fabricado pela Nordic é uma excelente opção de comunicação entre dispositivos com tecnologia SPI devido ao seu preço comparado a outros módulos de comunicação que utilizam a mesma frequência 2.4 ghz, sendo utilizado o modulo da figura 16. Sendo compacto e muito eficiente perfeito para quem deseja produzir algum sistema embarcado de diversos tamanhos e objetivo que deseja utilizar sistema de rádio de fácil programação. Sua vantagem está no seu baixo consumo de energia e pela velocidade de comunicação, que pode chegar a 2MBPS. Seu alcance pode chegar a 10 metros em ambientes internos e 50 metros em campo aberto. Sua tensão de alimentação vai de 1,9V a 3.6V.

Figura 17 – Módulo de rede sem fio NRF24L01+



Fonte: <http://www.baudaeletronica.com.br/modulo-transceptor-wireless-2-4ghz-nrf24l01.html>

3.5.6 Sensores

Os sensores são transdutores, ou seja, conversores de grandezas físicas em sinais elétricos correspondentes, podendo ter várias funcionalidades como de contato, deslocamento e posição por exemplo. Sendo subdivididos em sensores externos caracterizados pela observação de características do mundo exterior do sistema inserido entre eles os sensores de contato, de proximidade, de força, de química, de distância, de laser, de ultrassom, de infravermelhos e sensores químicos e sensores internos que tem como características fornecer informações sobre os parâmetros internos do sistema inserido, como por exemplo, o ângulo de uma junta, ângulo de um motor de passo, potenciômetros e os sensores inerciais que são incluindo acelerômetros, giroscópios e outros (OLIVEIRA et al., 2017).

3.5.6.1 Ultrassom

Figura 18 – Módulo de ultrassom



Fonte: <https://www.embarcados.com.br/vazao-sensor-ultra-sonico-de-distancia/>

O Sensor de Distância Ultrassônica HC-SR04, é um sensor ultrassônico para medição de distância sem contato de 2 cm à 4 m, com precisão de aproximadamente 3 mm. O módulo é composto por transmissor, receptor e circuito de controle onde é muito utilizado em projetos embarcados devido a sua facilidade de manuseio e preço. Sua tensão de alimentação é de 5 V. Funcionando da seguinte forma, o módulo automaticamente envia oito ciclos de uma frequência de 40 kHz e detecta se há um pulso de retorno. Caso positivo, através de um sinal de nível alto, o tempo de duração deste sinal em nível alto representa a diferença de tempo entre o envio e o retorno.

Composto pelo seguinte cálculo:

$$Distância = \frac{(eco) \times (340m/s)}{2}$$

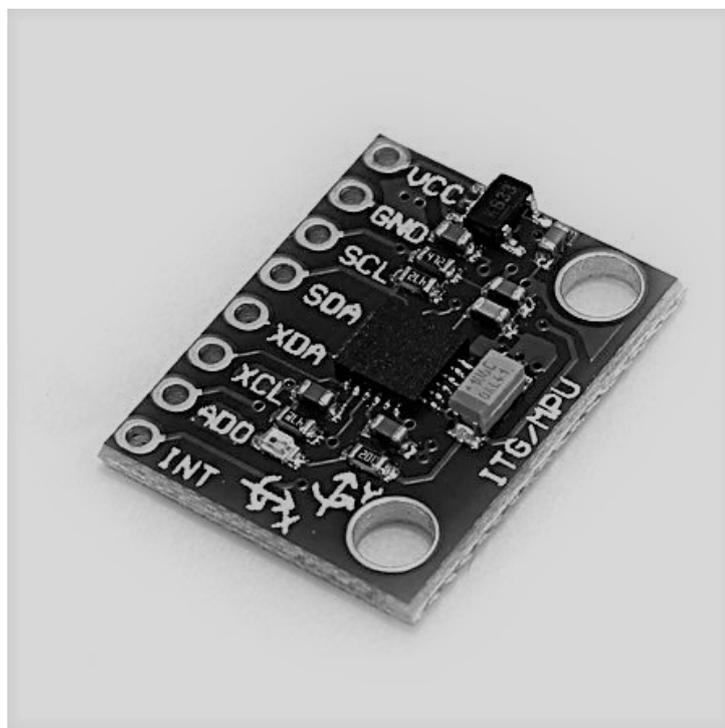
Considerando que a velocidade do som pode ser idealmente igual a 340 m/s, logo o resultado é obtido em metros se considerado o tempo em segundos. Na fórmula, a divisão por 2 é devido a distância de ida e volta do pulso de som. O eco citado na fórmula é a duração do pulso (SILVA, 2018).

A figura 17 representa o módulo utilizado no projeto.

3.5.6.2 Giroscópio Acelerômetro

A placa GY-521 é baseada no CI MPU-6050 da InvenSense (representado na figura 18), além dos dois sensores, tem embutido um recurso chamado DMP (Digital Motion Processor), responsável por fazer cálculos complexos com os sensores e cujos dados podem ser usados para sistemas de reconhecimento de gestos, navegação (GPS), jogos e diversas outras aplicações, assim livrando o microprocessador de realizar os cálculos dos sensores embutidos. No total são 6 eixos, sendo três para o acelerômetro e 3 para o giroscópio. Há também a possibilidade da ligação de um magnetômetro externo através de pinos auxiliares. Outro recurso adicional é o sensor de temperatura embutido no CI, que permite medições entre -40 e +85 °C (TRINDADE, 2015).

Figura 19 – Módulo acelerômetro e giroscópio



Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/acelerometro-e-giroscopio-3-eixos-6-dof-mpu-6050/>

Todos esses componentes compõem o nosso projeto, visando o total desempenho do veículo juntamente com o seu diferencial dos demais projetos.

4 METODOLOGIA

Este trabalho está contido no ambiente de projetos de sistemas embarcados no controle de VANT, em específico, os que têm como controlador a placa de prototipação Arduino. É de singular propósito deste trabalho um sistema de comunicação entre o veículo com o controle em terra, tendo como implementação conjunta a estabilidade e movimentos para exemplo de diversas utilidades, principalmente as que exigem a maior estabilização possível que são as de filmagem e fotografia.

Para isto, é proposto um esquema de construção de sistema baseado na fácil obtenção e dos preços dos componentes e seu uso simplificado comparado aos de uso comerciais. Esse modelo é baseado em ambiente multi-uso e de projeto voltado à prototipação, ou seja, configuração direta correspondendo ao objetivo de sua utilização. A criação de um sistema desse porte é uma tarefa multidisciplinar, pois demanda noções e conhecimentos em programação para sistemas embarcados, sistemas distribuídos, eletrônica e comunicação de sistemas.

Primeiramente, com o objetivo de demonstrar a viabilidade de se controlar, remotamente um veículo sem tripulação, realizaram-se os primeiros testes estabelecendo como meta, o levantamento de voo com todos os componentes já instalados, desde o microcontrolador até o Arduino Mega como os acessórios e sensores, usando o meio rádio como comunicação com o controle em terra, contendo uma placa micro controladora Arduino Nano V3 juntamente com módulo de comunicação via rádio e um *Joystick* ou controle remoto semelhante aos encontrados em videogames, constituído por dois módulos *joystick* analógico de 3 eixos composto por 2 potenciômetros e um botão.

Existem muitos controladores de VANTs diferentes que usam software baseado em Arduino como o Ardupilot, MultiWii e etc, mas uma das principais característica desses controladores é que eles são difíceis de modificar e carecem de modularidade. Isso se torna problemático quando programadores desejam usar esses meios de prototipação para a aplicação de metodologias de controle mais sofisticadas, como controle, funcionalidades e outros tipos de sensores devido as suas bibliotecas limitadas (JI; TURKOGLU, 2015). Além disso atualmente, também não há documentação suficiente fornecida explicando cada parte do código. Sendo assim neste trabalho propõem por questões de modularidade e fracionabilidade, o código do Arduino foi escrito pegando como base ideias de sistemas *open source* citados anteriormente para abranger todo os componentes básicos para o controle de um veículo não tripulado tendo como objetivo principal na simplicidade, fornecendo valores importantes como a calibração e ações mais automatizadas que são o levantamento de voo e pouso automático utilizando apenas um botão.

4.1 Prototipação

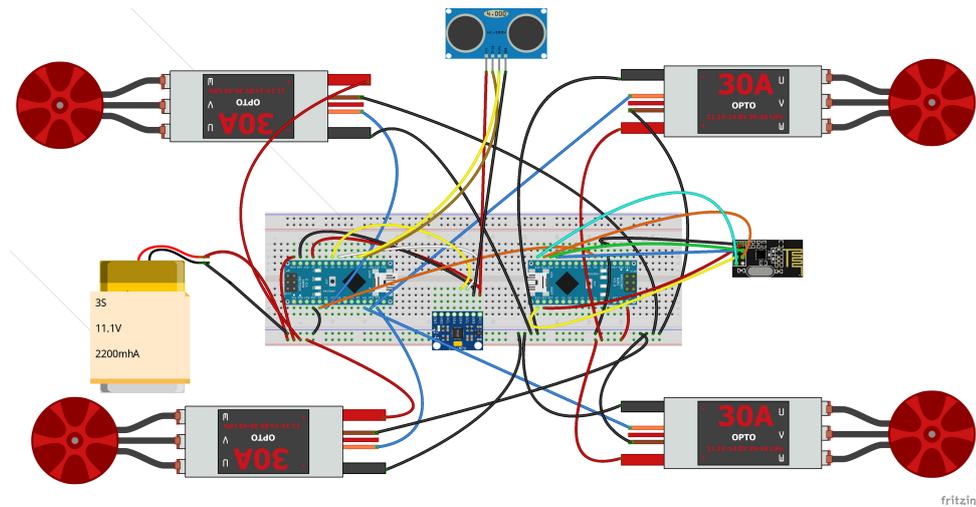
Tendo como base os trabalhos relacionados no capítulo anterior, tomaram-se decisões consideráveis na construção do protótipo desse trabalho. A decisão mais importante refere-se a dos sensores que irão constituir o veículo. Os sensores de bom desempenho devido aos seus algoritmos de filtros já incluídos, e estruturas mecânicas destinadas à redução de ruídos externos, tendo seu padrão de uso resultados extremamente precisos, contudo, esses sensores acabam encarecendo demasiadamente o custo final do protótipo. Como o objetivo desse trabalho foi desenvolver um VANT de custo reduzido optou-se pela utilização de sensores individuais de baixo custo para o desenvolvimento de uma própria IMU. E como solução para melhorias dos dados capturados utilizaram-se outras abordagens para a redução dos ruídos nas medidas, como algoritmos de filtro e balanceamento.

Outro fator importante analisado foi à unidade de controle principal do veículo, em alguns dos trabalhos citados foram utilizadas unidades computacionais de tamanho reduzido para esta tarefa, algo que acaba encarecendo o projeto. E em outros trabalhos utilizaram-se micro controladores de baixo desempenho, reduzindo assim a flexibilidade de utilização de algoritmos de controles mais complexos. Para este trabalho optou-se por utilizar um micro controlador de código aberto Arduino devido ao seu custo, assim possibilitando o uso de técnicas de controle que necessitam de um poder de processamento maior, levando em consideração as funcionalidades principais de um VANT que é o seu voo.

4.1.1 Arquitetura

O VANT proposto será um modelo quadricóptero, ou seja, terá quatro motores inclusos, contando com quatro ESC (*Electronic Speed Controllers*) para o controle em pares dos motores, um *buzzer* para emitir o aviso da leitura de todo o componente. Caso todos estejam em pleno estado, o módulo de giroscópio irá fazer o balanceamento, interpretando o solo como referencia de nivelamento, seguidamente levantar voo, após isso, o sensor ultrassônico realiza a leitura da altura que o drone se encontra para ser liberado para a comunicação do controle e por fim uma bateria responsável por alimentar todo o sistema (Figura 20). Na placa controladora do VANT terá as portas 3, 9, 10 e 11 responsáveis pelo controle dos ESC resultando na velocidade dos motores. A porta D2 receberá os comandos da outra placa responsável pela recepção dos sinais enviados pelo controle em terra. As portas A4 e A5 recebe os dados do acelerômetro, dando informações necessárias para o algoritmo da situação atual do veículo. O ultrassom terá como portas A0 e A1 para comunicação com o Arduino e manter a sincronia de informações da distancia do solo para o VANT. No Arduino receptor, é conectado ao modulo NRF2401 para receber as informações transmitidas pelo controle em terra e passa-las para o controle do VANT utilizando as portas D9, D10, D11, D12, D13.

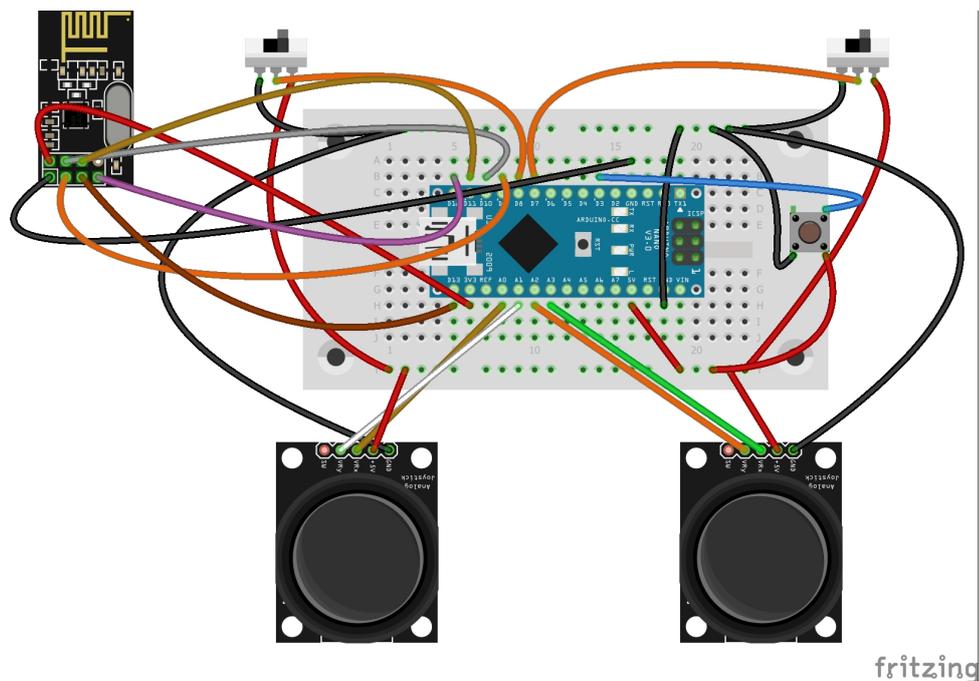
Figura 20 – Controlador e sensores do VANT



Fonte: Próprio autor na ferramenta fritzing.

O modelo do controlador terá como componente integrado um *joystick*, muito semelhante ao que encontramos em videogames, tendo como a placa Arduino e o módulo receptor de rádio, integrantes (Figura 21). Composto por dois *joystick* que utiliza as portas A0 a A3, dois slides utilizando as portas D7 e D8 para ativar os auxiliares e o botão utilizando a porta D3 para efetuar o pouso automático. O módulo NRF2401 utiliza as portas D9, D10, D11, D12, D13 para fazer o envio dos dados.

Figura 21 – Controlador em terra



Fonte: Próprio autor na ferramenta fritzing.

4.2 Aerodinâmica

Os VANT's como quaisquer aeronaves tripuladas convencionais também possuem diversos tipos de características, formatos e tamanhos dependendo da tarefa que se irá desempenhar. Levantando questões de tamanho, peso, alcance, autonomia, etc. Sendo divididos nas categorias da Tabela 2 (PAULA, 2012).

Tabela 2 – Tipos de VANT's

| Categorias | Alcance (Km) | Altitude (m) | Autonomia (h) | Peso (Kg) |
|----------------------------------|--------------|--------------|---------------|-----------|
| Micro | <10 | 250 | 1 | >5 |
| Alcance Médio | 70 a 200 | 5000 | 6 a 10 | ~1250 |
| Alta Altitude Longa Autonomia | >2000 | 20000 | 24 a 48 | <30 |

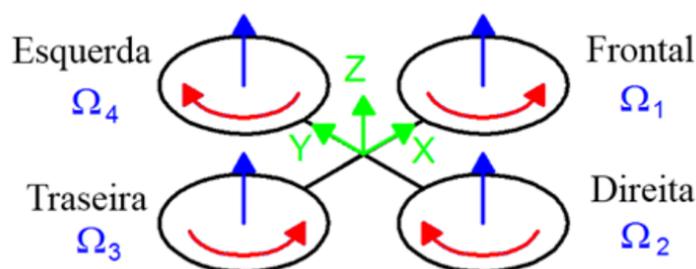
Fonte: Tabela modificada de (PAULA, 2012).

Apesar das categorias apresentadas os VANT's também são diferenciados dos tipos de voo e modo de propulsão. Sendo caracterizados por mais leves ou pesados que o ar podendo ser motorizados ou não. Sendo assim, tendo objetivo a construção do drone para a obtenção das informações de possíveis sensores que poderiam ser inclusos no seu sistema. O tipo micro será empregado no trabalho devido a sua usabilidade, fácil transporte e custo reduzido.

4.3 Movimentos

Para o fácil entendimento será utilizado um modelo simplificado, representando o funcionamento dos motores diante de diversos movimentos, levando em consideração que a estrutura proposta seja perfeitamente simétrica e que para os movimentos realizados seja dependente das velocidades da rotação das hélices dos motores.

Figura 22 – Modelo simplificado dos movimentos de um quadrimotor



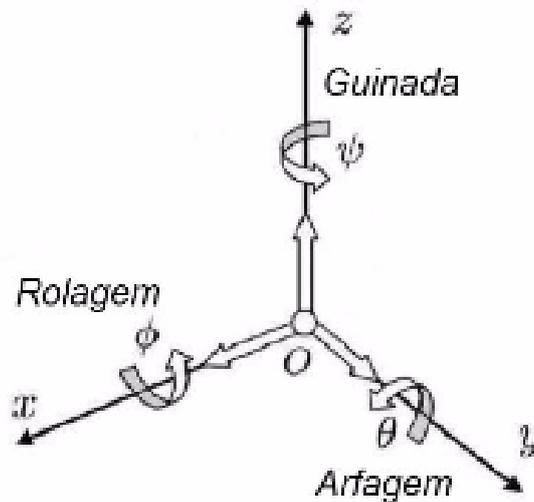
Fonte: Figura extraída de Paula (2012, p. 10).

Sendo observada na Figura 22 a estrutura do quadrimotor, este representado pelas linhas pretas, as linhas vermelhas representam o sentido de cada rotor (horário ou anti-horário), as setas verdes representam as coordenadas que será representada no corpo a

partir do seu eixo e a seta azul representa a velocidade vetorial das hélices (Ωn). Em que os pares têm sentidos contrários um do outro, tendo como objetivo eliminar os efeitos giroscópios ocasionados pelos torques dos rotores. Assumindo que o centro da massa e as hastes são idênticas ligadas ao corpo rígido (SILVA; MORAIS, 2014).

Apesar de o quadricóptero possuir seis graus de movimento tem sua limitação pois possui apenas quatro motores, assim dando somente a possibilidade de quatro movimentos básicos, sendo eles (rolagem $[\phi]$, arfagem $[\theta]$, guinada $[\psi]$) e altitude representados na figura 22 (COSTA, 2008).

Figura 23 – Movimentos do VANT em relação aos eixos



Fonte: PAULA, 2012, p. 10

Assim, para a realização do movimento longitudinal faz-se necessário variar a velocidade dos rotores em pares, no qual os pares que tiverem a maior rotação comparada aos demais irá determinar o sentido contrário, ou seja, para ir para frente os motores traseiros terão de aumentar a rotação. O movimento de rolagem tem a mesma proposta do movimento longitudinal, contudo, os pares que irão ter a maior velocidade serão os laterais.

Para o movimento de guinada será proporcionada pela diferença no contra torque entre cada par de rotores, sendo respectivamente um dos motores dos pares dianteiros e traseiros terá que ter a rotação maior que os demais. Finalizando, para ter o movimento de subida ou descida será pelo aumento ou diminuição simultânea da velocidade assumindo que todos estão com a mesma rotação, sendo observado no resultado do projeto do autor.

4.4 Configuração do controle em terra

Para a comunicação com o VANT será confeccionado um controle em terra utilizando um controle similar ao de vídeo game com uma unidade de hardware aberta juntamente com um módulo emissor de sinal rádio frequência.

Tendo como funcionamento baseado dos controles convencionais utilizados no mesmo ramo dos drones, utilizando os movimentos de Throttle representando elevação do veículo, onde os quatro motores funcionam em sincronia. O movimento de Yaw representa a virada do VANT em torno do seu eixo Z, movimento de Roll que configura a movimentação de direita e esquerda no eixo X e por ultimo o Pitch que é a movimentação de ir pra frente ou para trás , movimentos representados pelo eixo Y.

4.5 Funcionalidades

Serão desempenhados algoritmos pré-configurados para o levantamento e pouso do VANT, sendo eles procedimento automático de voo para liberar a comunicação do controle e para o procedimento de pouso automático respectivamente, sendo representados na figura 23.

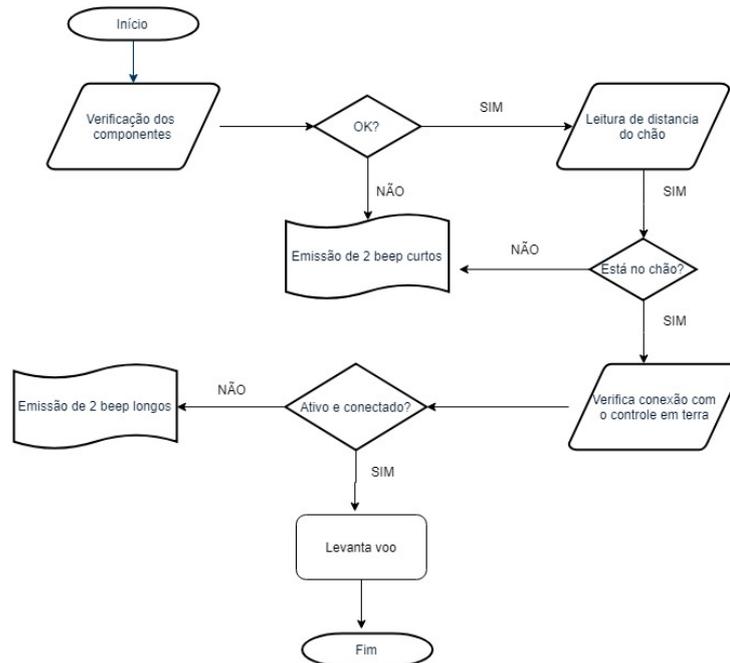
O algoritmo funciona de forma sistemática, onde o primeiro passo é a verificação dos componentes, caracterizado na busca dos componentes básicos para o controle e funcionamento do veículo como os motores, acelerômetro e conexão com o controle em terra. Caso negativo ira a emissão de 2 *beep* curtos, caso positivo, irá fazer a leitura do chão através do ultrassônico. Se o componente estiver presente o algoritmo ira proceder e verificar se o VANT se encontra no chão, caso negativo ira emitir os mesmo dois *beep* curtos caso positivo verifica a conexão com o controle em terra. Sendo negativo emitirá dois *beep* longos e caso positivo procedera com o levantamento de voo.

4.6 Protótipo e testes

O VANT usado nos testes, algumas diferenças em relação as estimativas iniciais precisam ser consideradas. Diante dos problemas encontrados em trabalhos do mesmo ramo foi optado por utilizar um *frame* comprado para o quadricóptero tendo em vista a simetria da aerodinâmica e na distribuição de peso, evitando problemas futuros. Tornando o peso concentrado ao centro, onde a maior parte da eletrônica do veículo se encontra juntamente com a sua bateria.

Outro problema detectado durante os testes foram as condições de voo durante a decolagem. Nas simulações o sistema foi considerado sempre em voo estático, sem interferência de terceiros como vento ou ambiente inserido, tendo como solução a criação de outro algoritmo de estabilização utilizando a técnica de *watch dog* que é a interrupção de

Figura 24 – Algoritmo para levantamento de voo e liberação para controle



Fonte: Próprio autor.

Figura 25 – Protótipo VANT produzido



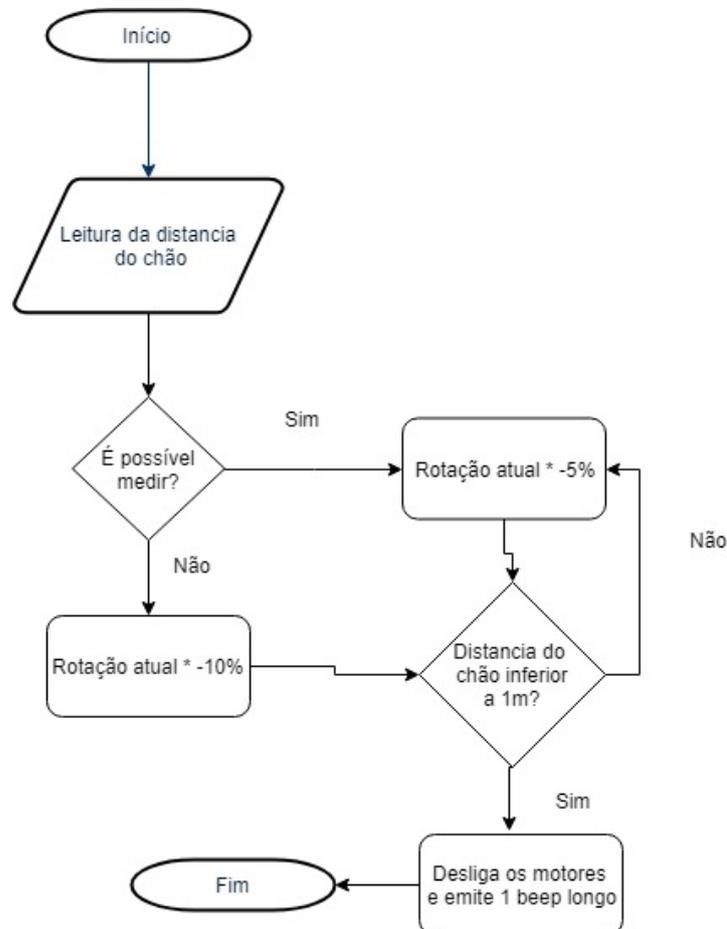
Fonte: Próprio autor.

uma tarefa em andamento no sistema por outro por um determinado período de tempo, no caso inserido seria do algoritmo de estabilização sendo interrompido pela requisição de movimento do usuário pelo controle em terra.

Como contemplado na figura 24 o protótipo do drone possuía somente uma placa servindo como controladora e como receptora de sinais, foi optado por uma controladora

responsável exclusivamente pelo recebimento dos comandos do controle devido a sua substituição em caso de danos ou pela substituição por outro dispositivo de recebimento de dados equivalente.

Figura 26 – Algoritmo de pouso automático

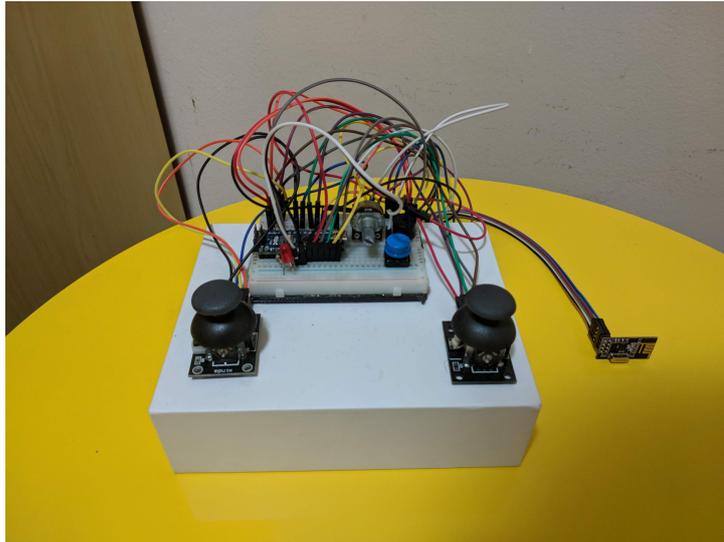


Fonte: Próprio autor.

Posteriormente foi observado que a manipulação do controle estava complexa comparado aos controles convencionais da área de controle de drones e aeromodelismo, devido ao potenciômetro que regulava a velocidade "base" do dispositivo. A disposição dos botões de manipulação estavam posicionados de forma confusa, sofrendo modificação na próxima versão do protótipo, sendo representado na figura 26.

No momento de realização do pouso foi criado um botão que realiza o pouso automático, assim facilitando o manuseio e evitando possíveis acidentes com o VANT, dando início pela leitura da distancia do solo utilizando o sensor ultrassônico para a leitura da distancia do solo, caso a leitura não seja possível ser feita o veiculo ira diminuir sua rotação atual em 10% caso contrario ira reduzir sua rotação em 5%, quando a leitura da distancia do solo for menor que 1m o veiculo ira fazer o desligamento dos motores emitindo 1 beep longo, seguindo o diagrama da Figura 27.

Figura 27 – Protótipo Controle produzido



Fonte: Próprio autor.

4.6.1 Teste 01

O primeiro teste ficou caracterizado pela verificação dos componentes elétricos que irão compor o veículo, começando pelo teste dos motores juntamente com os ESCs. Sendo criado um *sketch* implementado na placa de prototipação Arduino, incluindo a bateria e um potenciômetro. Posteriormente foi testado os sensores ultrassônico e o acelerômetro sendo criado *sketchs* de testes específicos para ambos. Depois foi testado os dois módulos NRF24L01+ enviando e recebendo dados entre eles.

Os testes realizados tiveram êxito, tanto no funcionamento dos dispositivos como sensores e motores juntos com os ESC.

4.6.2 Teste 02

O próximo teste realizado foi da integração de todos os componentes fixando-os no *frame* e criado um *sketch* de teste básico onde os comandos são enviados e recebidos, sem estabilização nem os meios de interrupção de sinais implementados.

Para o teste foi utilizado um barbante para limitar o movimento do veículo, visando os possíveis danos causados pela falta de controle do mesmo. Teve como resultado o recebimento dos dados enviados pelo controle e recebimento do dispositivo com êxito.

4.6.3 Teste 03

Já com todos os componentes em funcionamento, foi incluído o código do MultiWii¹ para observar o funcionamento do sistema com todos os componentes. Logo após seu funcionamento foi incluído no código funcionalidades que são propostas no trabalho.

No teste o VANT foi amarrado com barbante para ter sua movimentação limitada evitando danos e possíveis perda do equipamento.

Figura 28 – VANT em teste



Fonte: Próprio autor.

Com o retorno dos movimentos sendo efetuados pelo veículo, o equipamento foi posto dentro de ambiente controlado, sem interferência de vento, chuva e humana. Tendo como resultado final seu desempenho observado por sua movimentação sendo respondida em tempo real, teste representado na figura 27 do protótipo do veículo produzido.

4.6.4 Teste Final

Como ultimo teste o dispositivo foi posto em ambiente aberto, com interferência de vento assim testando a capacidade do veículo em manter-se estável em um único ponto. Tendo seu desempenho e funcionalidades propostas de se manter estável, controlável e manipulável em sincronia atendidas.

¹ Foi utilizada a versão MultiWii 2.4 nesse projeto tendo o seu código fonte disponível no endereço <https://code.google.com/archive/p/multiwii/>

5 RESULTADOS

No objetivo do trabalho que foi proposto, teve sua desenvoltura de forma satisfatória e alcançou o seus objetivos principais de detalhar um projeto de um VANT desde sua construção como sua configuração (abrangendo a arquitetura de hardware e software), métodos de estudo, seleção de seus componentes e fornecer referências. O veículo contém um sistema de propulsão composto por quatro motores do tipo brushless acoplados a hélices e controlados por ESC, tendo sua alimentação composta por bateria de Li-Po. Como unidade de processamento e controle foi utilizado um microcontrolador da placa Arduino servindo como base de prototipação, tanto para o VANT, como para o receptor de sinais como para o controle em terra, o veículo funciona em conjunto com os sensores acelerômetro/girolômetro para medidas inerciais, ultrassom para aferição da altitude.

Uma plataforma de teste foi produzida para a aferição do funcionamento dos motores juntamente com os ESC, sendo composta também por Arduino, bateria Li-Po e potenciômetro.

Este trabalho visa, ainda, ser uma referência para a construção de um VANT quadricóptero essencial, desde o conjunto de componentes básicos para o funcionamento fazendo parte do produto final até a montagem dos componentes na estrutura com prototipação e testes.

O modelo produzido tem foco em campanhas que exigem curto tempo de voo, tendo em vista que o espaço necessário para utilização do equipamento é de no mínimo 2m², contudo tornando sua utilização simples e prática.

No decorrer dos testes constatou-se uma estimativa de autonomia de voo da ordem de 15 minutos, considerando a aeronave de forma estática, sem interferências de comando do controle. Em condições de movimentação livre, estima-se uma autonomia de 10 minutos.

Visando melhorias futuras, o dispositivo demonstrou ser capaz de ser manipulado através de uma placa dedicada a receber sinais de dados de um controle em terra, propondo que poderá ser substituído por outro dispositivo de mesmo objetivo ou podendo ser substituído por uma controladora com uma inteligência artificial que envie os dados para a controladora do VANT assim realizando as ações específicas.

É válido ressaltar sobre a importância da calibração das variáveis responsáveis pelo equilíbrio do veículo, principalmente os parâmetros do PID (Proporcional, Integral e Derivativo) tendo seus resultados obtidos por testes ou por resultados de dispositivos semelhantes.

O trabalho proposto possui a base necessária para quem quer montar um VANT do tipo quadrimotor com possibilidade de modificações desde sua utilização de sensores como a adição de movimentos ou funcionalidades como sensores sonar e GPS para o sistema de navegação, além da câmera fotográfica para aquisição das imagens aéreas em alta resolução, variando de acordo com a necessidade de cada usuário.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram estudadas as principais dinâmicas relacionadas ao voo de um quadricóptero, tendo como principal objetivo desenvolver um protótipo de VANT contendo como controladora a placa de prototipação Arduino, podendo ser útil para diversos fins, observado de que o veículo pode receber dados de manipulação por outros meios. Sendo composto por sensores como acelerômetro, e ultrassônicos como atuadores que são os motores dando a propulsão do veículo.

Deste modo, o modelo proposto contém a inclusão de outras dinâmicas de manipulação, como durante pouso e decolagem, tornando mais fácil e evitando danos ao dispositivo levando em consideração a melhor manipulação do usuário com o veículo e também considerando a possibilidade de modificação do projeto ao todo, como seus componentes e funcionalidades. Juntamente foi elaborado o controle em terra para o veículo que contém como controlador uma placa de prototipação Arduino sendo utilizada como controladora, que utiliza o método mais viável para a manipulação do VANT.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO, Store Arduino. **Arduino**. Arduino LLC, 2015. Citado na página 27.
- CÂMARA, Matheus Luiz Negreiros et al. **Monitoramento de temperatura e umidade de um ambiente utilizando o protocolo zigbee**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- COSTA, SEAP. **Controlo e simulação de um quadrirotor convencional**. Tese (Doutorado) — Universidade Técnica de Lisboa, 2008. Citado na página 42.
- CROIZÉ, P et al. **Autonomous measurement drone for remote dangerous source location mapping**. *International Journal of Environmental Science and Development*, IACSIT Press, v. 6, n. 5, p. 391, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- GERTLER, Jeremiah. Us unmanned aerial systems. In: LIBRARY OF CONGRESS WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE. [S.l.], 2012. Citado na página 15.
- GONZALEZ, Daniel. **3g panther drone final report: 100% report**. 2012. Citado na página 14.
- GUIMARÃES, João Paulo Ferreira. **Controle de atitude e altitude para um veículo aéreo não tripulado do tipo quadrirotor**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- GULIAEV, Nikita et al. **The design, construction and implementation of an autonomous outdoor quadcopter using an rpi microcomputer and a multiwii flight controller**. Saimaan ammattikorkeakoulu, 2017. Citado na página 31.
- JI, Ankyd; TURKOGLU, K. **Development of a low-cost experimental quadcopter testbed using an arduino controller for video surveillance**. AIAA Infotech@Aerospace, 2015. Citado na página 38.
- KALE, Swati D et al. **Agriculture drone for spraying fertilizer and pesticides. published in iijarsse**, v. 5, n. 12, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- LEISHMAN, J Gordon. **The breguet-richet quad-rotor helicopter of 1907**. *Vertiflite*, v. 47, n. 3, p. 58–60, 2002. Citado na página 15.
- MEJÍA, Luis Estuardo Sánchez. **Diseño y programación de software para la automatización de drones utilizando la plataforma arduino**. Tese (Doutorado) — Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. Citado na página 14.
- MESCOLOTI, Andre et al. Desenvolvimento de um vant autônomo utilizando hardware e materiais de baixo custo. In: *Colloquium Exactarum*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 10, n. 1. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- MORGADO, José; SOUSA, João. **O programa de investigação e tecnologia em veículos aéreos autónomos não-tripulados da academia da força aérea**. *Cadernos do IDN*, p. 9–24, 2009. Citado na página 16.

OLIVEIRA, Bruno Queres de et al. **Tipos e aplicações de sensores na robótica. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 4, n. 1, p. 223, 2017. Citado na página 35.

OLIVEIRA, Edlas; MENEZES, Edgleyson. **Allcontrol uma solução modular de baixo custo para automação residencial**. 2017. Citado na página 26.

PAULA, Julio Cesar de. **Desenvolvimento de um vant do tipo quadrirrotor para obtenção de imagens aéreas em alta definição**. 2012. Citado 4 vezes nas páginas 16, 20, 21 e 41.

RASI, JOSÉ ROBERTO. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em pulverização agrícola. Pós-graduação em Engenharia Rural da Universidade Federal de Pelotas. Rio Grande do Sul**, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.

SANTANA, Lucas Vago; BRANDÃO, Alexandre Santos; SARCINELLI-FILHO, Mário. **An automatic flight control system for the ar. drone quadrotor in outdoor environments**. In: IEEE. **Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS), 2015 Workshop on**. [S.l.], 2015. p. 401–410. Citado na página 16.

SANTOS, André Almeida; CARDOSO, Vitor Campos; CARVALHO, Luis Paulo da Silva. **Automação de vôo e calibração de sensores e controladores para um drone de baixo custo**. **Mostra Nacional de Robótica**, p. 432 – 436, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

SANTOS, Alexandre dos; SPEROTTO, Lucas Kriesel. **Desenvolvimento de quadricóptero auto estabilizável e autoguiado**. **Anais da Escola Regional de Informática da Sociedade Brasileira de Computação (SBC)–Regional de Mato Grosso**, v. 7, 2016. Citado na página 18.

SILVA, Emanuelli Santos da. **Desenvolvimento de um sistema embarcado com o dispositivo odroid-xu4 para integração sensorial de um veículo terrestre não tripulado**. Universidade Federal de Santa Maria, 2018. Citado na página 36.

SILVA, Kleber Lima da; MORAIS, Aniel Silva de. **Hardware para controle avançado de veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero**. **Horizonte Científico**, v. 8, n. 1, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 42.

SILVA, Luiz Maurício de Andrade da. **Análise da decisão “comprar ou fazer” em tecnologias essenciais para o setor aeroespacial de defesa**. 2008. Citado na página 18.

STÄHELIN, Sérgio Araujo et al. **Desenvolvimento e modelagem de quadrirrotor: um estudo de caso**. Florianópolis, SC, 2018. Citado na página 32.

TEIXEIRA, Weder de Oliveira; SOARES, Mariana Gomes; YEPES, Igor. **Estudo de sensores de temperatura e umidade de baixo custo para aplicação em veículo aéreo não tripulado**. **Anais do Computer on the Beach**, p. 411–412, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

TRINDADE, Derick Horrana de Souza da. **Monitoramento de sistemas de transporte com arduíno e shield-gsm, gps, gprs**. 2015. Citado na página 36.

YEDAMALE, Padmaraja. **Brushless dc (bl dc) motor fundamentals**. **Microchip Technology Inc**, v. 20, p. 3–15, 2003. Citado na página 32.