

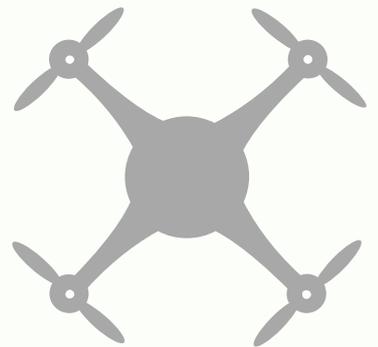
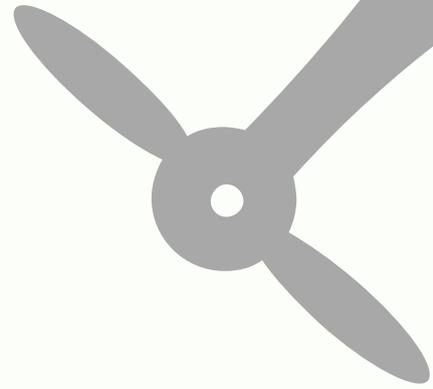
Universidade Federal do Espírito Santo  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Programa de Educação Tutorial - PET

# Jornal PET

## Ensaio de estabilização: estudos preliminares do desenvolvimento de um VANT

Este artigo apresenta as experiências adquiridas em pesquisa teórica sobre veículos aéreos não tripulados - VANTs. Isso inclui análises sobre seus elementos, tais como motores e baterias, e também estudos sobre técnicas de estabilização e controle dessas aeronaves. Ainda, apresenta resultados obtidos em experimentos de estabilização de uma barra na horizontal pela atuação de motores elétricos. Esses experimentos tinham por objetivo analisar a implementação de um algoritmo de controle PID por meio de uma placa de Arduino, sendo a angulação da barra a variável controlada e a potência do motor a variável manipulada, e avaliar a possibilidade de prosseguir com o projeto de construção de um protótipo de drone.

Preparado por: Luiz Fernando Vieira Corrêa  
Vitória, 2021



# I. O projeto

VANT é a sigla para Veículo Aéreo Não Tripulado. Em síntese, esses dispositivos têm por objetivo se movimentar no ar em seus seis graus de liberdade com estabilidade. Além disso, pretende-se que sejam comandados remotamente ou naveguem autonomamente, dispensando a necessidade de um piloto embarcado. O termo drone, importado do inglês e traduzido como "zangão", é como popularmente esses objetos são conhecidos.

Aos VANT'S podem ser adicionados equipamentos que realizam tarefas específicas, como câmeras para filmagens aéreas. Por conta disso, suas finalidades são muito variadas, como o uso recreativo, acadêmico ou em missões militares. Buffon et al (2017) utilizou-se de VANT's para analisar a problemática socioambiental em áreas com risco de inundação, conseguindo, com isso, uma base de dados mais realista em sua pesquisa. Viana et al (2018) estudou a utilização de VANT's com câmeras termográficas acopladas a eles no monitoramento de áreas agrícolas. Em seu trabalho, demonstrou o potencial dessa aplicação pouco explorada. Na área de construção civil, Álvares et al (2019) estudou a aplicabilidade de VANT's no monitoramento sistemático do progresso de obras.

Baseado no seu mecanismo de sustentação, os VANT's podem ser classificados em veículos de asa fixa ou veículos de asa rotativa. Enquanto os primeiros utilizam do empuxo gerado por um diferencial de pressão nas asas, os segundos são sustentados pelo empuxo gerado por hélices acopladas aos seus motores. Helicópteros são bons exemplos de veículos de asa rotativa, tendo a hélice horizontal como responsável pela sustentação e a hélice vertical responsável por anular o momento reativo proveniente da hélice principal. O modelo de VANT que inspirou esse trabalho é o quadricóptero e um maior detalhamento sobre a sua mecânica de voo está disponível no item II.

Para compreender seu funcionamento, abordaremos as partes básicas e suas devidas funções. Primeiramente, analisamos o sistema responsável por gerar a força que o mantém no ar: o conjunto motopropulsor. Ele é constituído pelos motores, controladores eletrônicos de velocidade, hélices e bateria. Dada sua importância, procurou-se explorar o processo de escolha desses componentes em contexto de fabricação de protótipos para estudo. Os detalhes estão apresentados no item III.

Os sistemas de navegação de drones geralmente são constituídos de sensores inerciais, como acelerômetros e giroscópios, e dispositivos GPS. Nos testes apresentados neste trabalho, o sensoriamento de posição foi realizado pelo MPU-6050. Esse sensor contém em seu chip um acelerômetro e um giroscópio do tipo MEMS. O uso do GPS foi dispensado, uma vez que a base de testes foi fixada ao solo.

O sistema de navegação fornece ao controlador as informações necessárias para estabilização e correta realização dos comandos. Para tanto, algoritmos de controle são implementados, medindo o erro entre o valor esperado e o valor medido e, com base nisso, ajustando a potência dos motores. Desta forma, compensa-se a ação de forças externas, como o vento, e a diferença comum de eficiência dos motores. Para estudar a possibilidade de implementação de um algoritmo de controle tipo PID na placa de Arduino, foi montada uma base de testes contendo uma barra com movimento restrito a um grau de liberdade. Um motor tipo brushless foi acoplado em sua extremidade e testes foram realizados com o algoritmo variando sua potência para equilibrar a barra na horizontal. Mais detalhes sobre sistemas de controle estão discutidos no item IV, a base de testes está apresentada no item V e os resultados dos testes estão dispostos no item VI.

## II. A mecânica do quadricóptero

Os quadrotores são veículos relativamente simples. Para se movimentar, modificam unicamente a velocidade de rotação dos seus motores, como bem demonstrado por Sá (2012). Não há, então, nenhum elemento seu sistema de voo que se baseie em variação angular, como comumente há nos veículos de asa fixa. Por conta disso, esses dispositivos foram escolhidos como objeto de estudo.

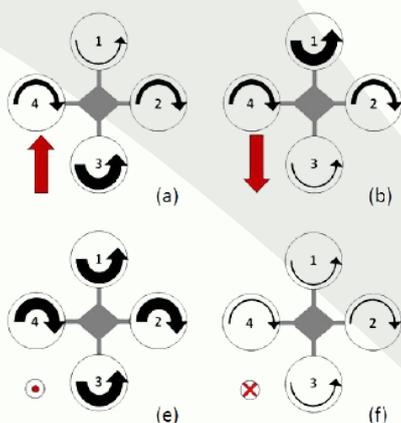
Seus quatro motores se dispõem equidistantes entre si ao longo de linhas perpendiculares, formando um "x". A fim de evitar que o drone perca estabilidade e rotacione em torno do próprio eixo, anula-se o torque produzido em seu funcionamento. Para tanto, dois motores opostos giram em uma direção enquanto os outros dois giram na direção contrária.

Caso contrário, existirá um momento resultante não nulo cujo efeito seria o giro do drone em torno de seu eixo vertical. Porém, esse princípio pode ser usado para rotacionar *intencionalmente* o drone. Para isso, é necessário aumentar a velocidade de motores opostos em relação aos demais, induzindo torque, como é mostrado na figura 1 (g) e (h). Porém, para evitar movimentos colaterais, deve-se

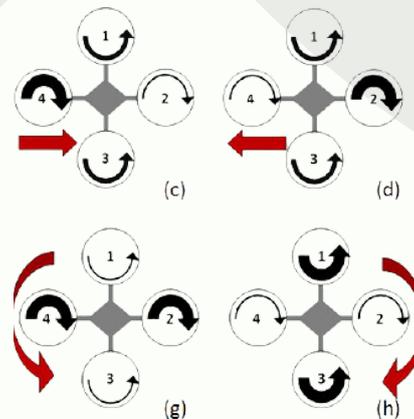
compensar o empuxo resultante diminuindo a velocidade dos motores restantes.

Para ganhar altitude, é necessário que a força de empuxo produzida pelos motores supere a força peso. Consegue-se isso, aumentando a potência dos 4 motores simultaneamente, como esquematizado pela figura 1 (e). Enquanto isso, para que o drone paire no ar, é necessário que a velocidade dos motores seja tal que o empuxo produzido se iguale à força peso. Por fim, para fazê-lo perder altitude, diminui-se a velocidade de seus motores, como mostrado em (f).

Para movimentos horizontais, diminui-se a velocidade de rotação de um motor enquanto aumenta-se a velocidade do motor oposto, como demonstrado em (a), (b), (c) e (d). O resultado é um ganho de velocidade na direção do primeiro motor. Isso pode ser feito em todas as direções e, inclusive, pode-se realizar a combinação de dois movimentos.



Fonte: Sá (2012)

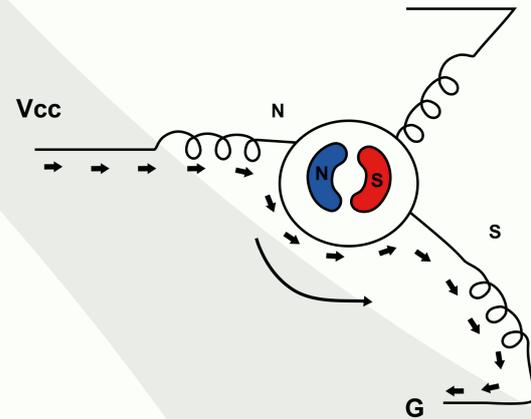


Fonte: Sá (2012)

### III. O conjunto motopropulsor

Sem dúvidas, os motores são um dos principais componentes de um VANT. Esses dispositivos são responsáveis por transformar energia elétrica em mecânica e quando energizados e associados às hélices conferem movimento à estrutura. Por conta de sua alta eficiência e durabilidade, optou-se pelos motores de corrente contínua sem escovas, ou BLDC. O motor é composto por duas partes: rotor e estator. O primeiro é compreendido pelo eixo rotativo ao qual a hélice é acoplada. O segundo é formado pela fração estática do aparato. Quando o rotor se encontra ao centro do motor, diz-se que temos um inrunner. Caso contrário, trata-se de um outrunner. Seu funcionamento se baseia na interação entre o campo magnético induzido

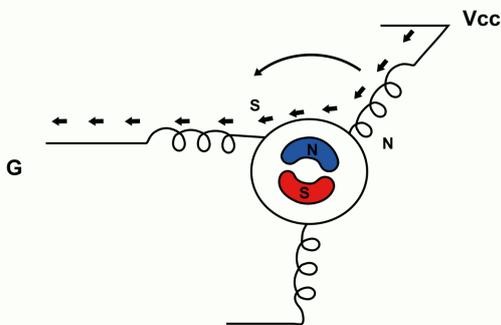
pela passagem de corrente elétrica nas bobinas presentes no estator com o campo magnético dos ímãs permanentes do rotor. Para gerar um movimento contínuo, tensões são fornecidas às bobinas de forma organizada e muito precisa. Simplificadamente, imagine que o motor possua três bobinas dispostas com  $120^\circ$  entre si. Imagine ainda que a corrente passe pela primeira bobina num sentido tal que gere ali um polo positivo, logo depois passando por uma segunda bobina de forma que seja induzido um polo negativo e então atingindo o neutro. O rotor terá, então, ao mesmo tempo seu polo negativo atraído pela primeira bobina e expelido pela segunda.



Fonte: Próprio autor

Essa comutação entre os sentidos das correntes se segue, garantindo uma rotação contínua. É claro, porém, que motores reais possuem uma quantidade maior de bobinas. Inclusive, consegue-se aumentar a eficiência fazendo com que as extremidades do motor tenham o mesmo comportamento. Isto é, ao invés de se induzir apenas um polo positivo, por exemplo, gera-se dois em lados opostos. Isto combinado com um rotor com maior quantidade de pólos, produz maior potência com a mesma passagem de corrente.

O controle de acionamento de cada corrente é realizado pelos controladores eletrônicos de velocidade, ou ESC's. Esses aparelhos possuem MOSFETs em seu interior, que funcionam como interruptores. Assim, eles abrem e fecham conexões em seu circuito interno, determinando o caminho que a corrente deve seguir e, portanto, quais bobinas do motor ela vai energizar.



Fonte: Próprio autor

Em seguida, a corrente passa a seguir o fluxo da segunda para a terceira bobina. Induz-se, assim, um polo positivo nesta e negativo naquela. Com isso, o lado norte do ímã do rotor continua seu movimento.

Esses componentes podem ter ou não integrado em seu circuito um Battery Eliminator Circuit, ou BEC. Sua função é

diminuir a tensão fornecida pela bateria para que seja possível alimentar o Arduino e seus módulos. Dessa forma, torna-se desnecessária a implementação de uma fonte exclusivamente dedicada à eletrônica embarcada, diminuindo, por fim, a massa final do veículo.

Os componentes desse conjunto precisam dialogar entre si. Isto é, quando se escolhe um, é necessário que se atente às especificações dos demais e verifique se são compatíveis. Dessa forma, evita-se que os componentes sejam danificados. Os fabricantes dos motores geralmente disponibilizam tabelas com resultados obtidos a partir de combinações do modelo em questão com hélices e baterias específicas. Temos a voltagem da bateria e a numeração das hélices como valores de entrada. Além disso, o kv do motor, que exprime a quantidade de rotações desenvolvidas por unidade de tensão, é levado em consideração.

Dentre os valores fornecidos pela tabela, um dos mais importantes é a sua capacidade de levantamento de carga, ou *pull*, em inglês. É medido em unidades de massa e nos diz o quanto aquele motor, com a hélice e fornecimento de tensão especificados, pode levantar. É aconselhável que a soma dos motores gere um *pull* duas vezes maior do que a massa total do drone, dando margem para manobras e eventuais perdas de eficiência dos

motores. Também é fundamental que se dê atenção ao valor de corrente consumida por cada motor. A partir dela, verifica-se se existe o risco de danificar o ESC, sendo necessário garantir que o valor de corrente suportada por ele seja maior do que a corrente consumida pelo motor. Por fim, toma-se o cuidado de garantir que o consumo de corrente total dos quatro motores seja menor que o produto da taxa de descarga pela capacidade nominal da bateria, de forma que a bateria consiga suprir a demanda do veículo.

O modelo escolhido para o projeto foi o Racerstar BR2212 1000KV 2-4S Brushless Motor. As informações de performance oferecidas pelo fabricante estão apresentadas a seguir.

Voltagem (V)	Hélice	Corrente de Carga (A)	Pull (g)
11,1	1047	15,6	885

Fonte das informações:

[https://www.banggood.com/Racerstar-BR2212-1000KV-2-4S-Brushless-Motor-For-RC-Models-p-1083190.html?cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/Racerstar-BR2212-1000KV-2-4S-Brushless-Motor-For-RC-Models-p-1083190.html?cur_warehouse=CN). Acesso em 28/11/1998

Os dados fornecidos para o modelo escolhido são referentes a testes com ele alimentado por baterias de 11.1V e acoplados à hélices de passo 47 com 10 polegadas de diâmetro. Esses motores foram escolhidos porque sua capacidade de levantamento de carga mais do que supera o dobro do peso

previsto para o drone, que era de 800 gramas. Para acompanhá-lo, realizou-se a compra de ESC's com capacidade para 30 Amperes e uma bateria com taxa de descarga de 30 C e capacidade nominal de 2700 mAh. Além, é claro, de hélices com especificações idênticas às utilizadas nos testes do fabricante do motor.

## IV. Sistema de Controle

Um drone é um veículo naturalmente instável por diversos fatores. Por exemplo, sabe-se que dois motores de um mesmo modelo não possuem a mesma eficiência. Assim, mesmo que seja fornecida a mesma energia para ambos, as potências desenvolvidas serão diferentes, causando, portanto, disfunção no voo. Com isso, torna-se necessária a implementação de um algoritmo capaz de corrigir esses detalhes.

O tipo de controlador escolhido para o projeto foi o controlador PID. Ele integra três técnicas de controle: proporcional, integral e derivativo. A cada um deles é associado uma constante, definida pelo programador do controle, que servirá como peso para sua ação. Elas são comumente denominadas  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$ . Os valores ideais para essas constantes podem ser obtidos empiricamente ou a partir de simulações. Com a implementação desse

algoritmo, melhora-se substancialmente a eficiência do voo, contornando tanto adversidades externas, como a força do vento, quanto internas.

Basicamente, esses algoritmos operam administrando a potência de atuadores com base no cálculo de erro entre um valor-alvo, ou *setpoint*, e o valor medido pelos sensores. No caso de drones, os motores têm seu funcionamento regulado pelo controlador, que visa estabilizar o veículo em uma dada altura ou inclinação. O programa vai garantir que os motores desenvolvam potência suficiente, não mais nem menos, para aquele objetivo.

O responsável por executar esse algoritmo e controlar os motores é o Arduino. O Arduino é uma ferramenta de prototipagem eletrônica com infinitas possibilidades de aplicação em projetos das mais diferentes áreas. Seu funcionamento se baseia na conexão de dispositivos periféricos, ou módulos, à uma placa central com capacidade de processamento de dados. À ela é carregado um programa, chamado de sketch, que define o que será realizado pelo Arduino. A partir disso, a placa interage com os dispositivos periféricos responsáveis por realizar atividades específicas, como motores elétricos, sensores e LED's.

Utilizamos o MPU 6050 para coletar as informações de posição. Este módulo possui um acelerômetro, que é um

dispositivo capaz de medir a aceleração própria de um objeto. Assim, quando o corpo está sob ação somente da força gravitacional, consegue-se medir as suas componentes e, com isso, inferir informações sobre a sua inclinação. É ele o dispositivo responsável, por exemplo, por girar a tela automaticamente quando a orientação do telefone muda. Além do acelerômetro, o MPU-6050 possui integrado em seu sistema um giroscópio. Este dispositivo mede a velocidade angular do objeto e, dessa forma, traz mais informações de posição. No contexto deste projeto, a função desse dispositivo é constantemente verificar se, durante o voo, o drone está devidamente posicionado e estável. Caso contrário, o controle é acionado e automaticamente corrige-se o erro. Isso é importante porque uma variação na inclinação do drone significa compor um movimento horizontal indesejado. Ainda, com o drone rotacionando sem controle, perde-se a capacidade de conduzi-lo.

## IV. Sistema de Controle

Para estudar a possibilidade de estabilização utilizando-se um controlador PID executado por uma placa de Arduino, uma estrutura foi montada. Trata-se, basicamente, de uma barra atravessada por um eixo. Este, por sua vez, é sustentado por uma base de plástico fixada ao solo. Com

isso, a barra fica limitada a um grau de liberdade, podendo apenas rotacionar.



Fonte: Próprio autor

Um motor foi fixado em uma das extremidades da barra. Na outra, foram firmados os seguintes componentes eletrônicos: uma placa Arduino Uno, um MPU6050 e um NRF24L01 para comunicação sem fio. Os dados eram recebidos por um outro NRF24L01 que estava conectado a uma outra placa Arduino.

## V. Resultados

Após múltiplos testes, alcançou-se valores para as constantes que estabilizaram satisfatoriamente a estrutura. Eles estão apresentados em anexo. Um vídeo demonstrativo está disponível no link: [youtu.be/1zA08-Eou6Y](https://youtu.be/1zA08-Eou6Y)

Com isso, conclui-se que o projeto está apto a adquirir maior complexidade. Sugere-se um aumento no número de graus de liberdade da estrutura utilizada para testes, a fim de aprimorar o controlador.

## VI. Referências

ÁLVARES, J.; COSTA, D.; BARBOSA, A.. **Proposta de método para monitoramento visual sistemático do progresso de obras baseado em mapeamentos 3D por Vant e BIM 4D**. Revista Técnico-científica do CREA-PR, [s. l.], ed. Ed. Especial XVII, p. 312-325, 12 nov. 2018. Disponível em: <http://creaprw16.creapr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/issue/view/17/showToc>. Acesso em: 11 nov. 2019.

Barbosa, F. D. S.. **4DOF quadcopter: development, modeling and control**. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo – SP, 2017.

BUFFON, E. A. M.; PAZ, O. L. S.; SAMPAIO, T. V. M.. **Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para mapeamento das vulnerabilidades à inundação urbana: referenciais e bases de aplicação**. Revista do Departamento de Geografia, Volume Especial – Eixo 9, 2017, p. 180-189, DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.132547.

HERNÁNDEZ, G. A.. **Análise do conjunto motopropulsor elétrico e sua influência no desempenho de VANT's**. Uberlândia, Minas Gerais, 2018.

MELO, A. S. D.. **Implementação de um Quadrotor como Plataforma de Desenvolvimento para Algoritmos de Controle**. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, ES, 2010.

SÁ, R. C.. **Construção, Modelagem Dinâmica e Controle PID para Estabilidade de um Veículo Aéreo não Tripulado do tipo Quadrirotor**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Fortaleza – CE, 2012.

STÄHELIN, S. A.. **Desenvolvimento e modelagem de quadrirotor: um estudo de caso**. Florianópolis, SC, 2018

VIANA, L. A. et al. **Potencial uso de câmera termal acoplada a vant para monitoramento de culturas**. Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, v. 12, n. 3, p. 286- 298, 2018.