

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

**VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS) DO TIPO MULTIRROTOR:
ABORDAGEM TEÓRICA E ÊNFASE NO ESTUDO DO QUADRIRROTOR.¹
MULTI-ROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS): THEORETICAL
APPROACH AND EMPHASIS ON THE STUDY OF QUADRIROTOR.**

**Nelize Fracaro², Dionatan Breskovit De Matos³, Eduardo Post⁴, Manuel
Martín Pérez Reimbold⁵, Caroline Luft⁶**

¹ Pesquisa realizada durante o Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUI.

² Mestranda do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática da UNIJUI, bolsista UNIJUI, nelize_fracaro@hotmail.com.

³ Mestrando do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática da UNIJUI, bolsista UNIJUI, breskovit.mat@gmail.com

⁴ Mestrando do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática da UNIJUI, bolsista CAPES, edupostmat@gmail.com

⁵ Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática, manolo@unijui.edu.br

⁶ Professora no Instituto Federal Catarinense, carol_luft@hotmail.com

Resumo — O presente artigo expõe uma revisão bibliográfica sobre os veículos aéreos não tripulados (VANTS), os quais vêm sendo cada vez mais utilizados em diversas áreas, como a agricultura e segurança. Dentre eles dar-se-á ênfase aos veículos do tipo multirrotor, mais especificamente os quadrirrotores. Estes possuem algumas vantagens que justificam sua escolha para estudo. Além disso, investiga a história dos quadrirrotores e as principais vantagens e desvantagens dos mesmos, bem como suas características mais importantes. Também procura expor algumas pesquisas que foram realizadas no estudo da estrutura e funcionamento do quadrirrotor para posteriormente contribuir na resolução de alguns problemas que são expostos pela literatura.

Abstract — This article presents a literature review on Unmanned aerial vehicles (UAVs), which have been increasingly used in several areas, such as agriculture and security. Among them, emphasis will be placed on multi-rotor vehicles, more specifically four-wheelers. These have some advantages that justify their choice for study. In addition, it investigates the history of the four-wheelers and the main advantages and disadvantages of them, as well as their most important characteristics. It also seeks to present some research that was carried out in the study of the structure and operation of the quadrirrotor to later contribute in solving some problems that are exposed in the literature.

Palavras-chave: Veículos Aéreos não Tripulados; multirrotor; quadrirrotor.

Keywords: Unmanned aerial vehicles; Multi-rotor; Quadriprotor

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

1 INTRODUÇÃO

Um veículo aéreo não tripulado (VANT) se caracteriza pelo seu funcionamento independente da presença humana em seu interior, ou seja, não há a necessidade de um piloto embarcado para pilotá-lo. A crescente evolução dessa categoria de veículos aéreos é justificada pelo fato de possuírem diversas aplicações, bem como, diferentes configurações. Estas possibilitam o seu uso em situações que limitam a presença física de humanos.

Os veículos aéreos não tripulados estão sendo alvos de estudos recentes, pois esse tipo de veículo está em plena evolução. Soma-se a isso, a exigência de grande esforço por parte de seus pesquisadores para adequar e implementar teorias de controle, perpassando muitas vezes, por questões bastante complexas.

Neste artigo, são apresentados os veículos aéreos não tripulados, enfatizando os do tipo multirrotor e mostrando suas aplicações em diversas áreas. Eles destacam-se pelo seu baixo custo e facilidade para sua construção. São utilizados no setor agrícola, em pesquisas climáticas, exploração de minérios, guarda costeira e policiamento urbano, telecomunicações, energia, televisão e cinema.

Dentre os tipos de multirrotores destaca-se o VANT com quatro rotores (quadrirrotor), haja vista que sua estrutura possui algumas vantagens se comparada à de outros. Além disso, o mesmo vem sendo usado como plataforma padrão para a pesquisa de mobilidade e percepção tridimensional. Pretende-se também explanar a história dos quadrirrotores e expor as principais características, vantagens e desvantagens dos mesmos, bem como mostrar algumas pesquisas que já foram desenvolvidas nesta área.

Neste sentido, o objetivo do artigo é levantar informações teóricas que visam a compreensão de tópicos referentes a estes tipos de veículos aéreos, com a finalidade de possuir condições de, posteriormente, propor soluções de problemas destacados na literatura técnica. Além disso, servir de base para futuras investigações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) são veículos de pequeno porte caracterizados pela ausência física de um controlador. Em aeronaves não tripuladas, a ausência do piloto a bordo possibilita a redução do tamanho, do custo de fabricação e manutenção e maior flexibilidade nas manobras. Além disso, são utilizados em situações que possam acarretar perigo à vida humana.

Em relação ao deslocamento da aeronave, ele pode ser realizado de forma independente através de uma rota pré programada, por controle remoto ou por uma combinação de ambos os sistemas. A combinação dos dois sistemas é utilizada quando se quer um meio termo entre complexidade e custo.

As primeiras aeronaves foram desenvolvidas para uso militar com a finalidade de espionar o inimigo nas guerras, sem causar risco humano. Ultimamente, estas naves vêm sendo utilizadas também no meio civil, em diversas áreas, para fiscalizar, inspecionar e/ou monitorar através de imagens aéreas e filmagens. A figura a seguir mostra algumas das atuais aplicações.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Figura 1: Áreas de aplicações de aeronaves não tripuladas

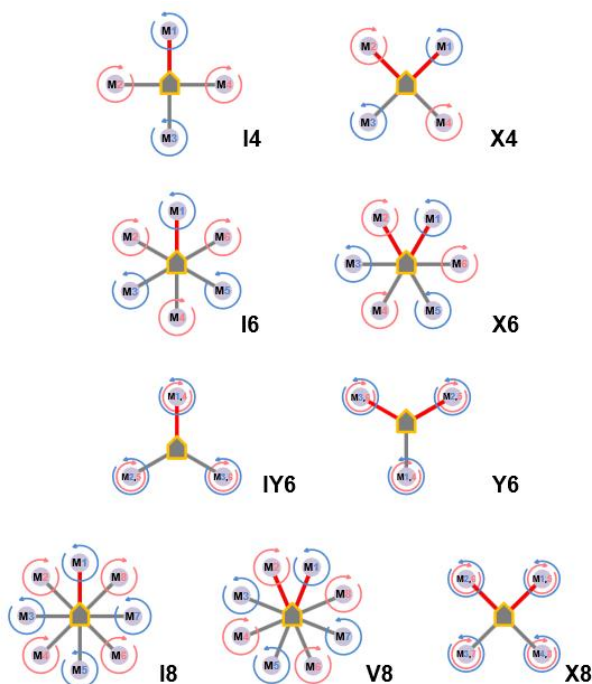


Fonte: Próprios autores

As naves são concebidas de acordo com sua função, podendo ser propulsionadas por motores de combustão, motores a jato ou elétricos. Posteriormente, serão abordadas, de forma exclusiva, naves com motores elétricos, mais especificamente, os multirrotores. Estes caracterizam-se por possuírem em sua estrutura múltiplos rotores ou múltiplos motores. Diferentes modelos são projetados de acordo com a quantidade e o posicionamento de seus rotores. O funcionamento da aeronave depende desta distribuição. Os motores podem ser posicionados na estrutura em forma de "I", "X", "IY", "Y" e "V", como apresentado na figura 2.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Figura 2: Diferentes configurações de multirrotores



Fonte: (COPTERCRAFT, 2016)

Geralmente, as configurações possibilitam que as aeronaves decolem e aterrissem de modo vertical. Esta característica, juntamente com capacidade de navegação na horizontal, são desafios de investigação na área de controle de navegabilidade. Este fato justifica o seu uso como plataforma padrão de estudo nesta área.

Existem aeronaves com três até oito rotores. O quadrirrotor, por exemplo, deriva do helicóptero e os meios utilizados para a sua propulsão são quatro rotores de empuxo vertical. Os rotores normalmente são colocados na extremidade da estrutura em forma de cruz e no centro são embarcados os dispositivos necessários para realizar o seu controle.

Toda a movimentação realizada depende apenas da variação da velocidade das hélices. Entretanto, não há necessidade de variar o ângulo de ataque das pás, como ocorre no helicóptero. Assim, o quadrirrotor, possui um maior grau de manobrabilidade e por utilizar quatro rotores, o diâmetro das hélices pode ser menor. Dessa forma, diminui a sua energia cinética e possibilita que a aeronave atinja lugares com menos acessibilidade (PAULA, 2012).

As hélices são acopladas diretamente ao rotor no quadrirrotor, resultando em uma maior simplicidade mecânica e na redução de custos. Com aos avanços ocorridos nos equipamentos eletrônicos, motores elétricos e semicondutores, é fácil de ser controlado e estabilizado (FORBES, 2013).

O quadrirrotor possui a capacidade VTOL (vertical take-off and landing), que permite pouso e decolagem de forma vertical, sem a necessidade de uma pista (SOUZA et. al., 2012). Para a realização dos movimentos todos os rotores da aeronave são utilizados. Contudo, devido à

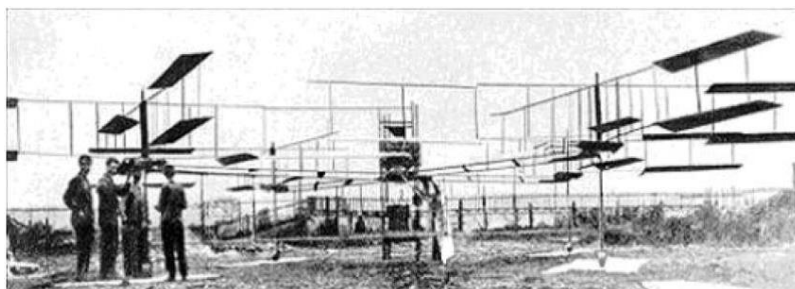
Evento: XXII Jornada de Pesquisa

necessidade de variar as suas velocidades se perde uma considerável quantidade de energia. Para se chegar às características da capacidade VTOL, foi preciso um longo período de estudo. Devido às dificuldades técnicas da época de seu surgimento, o quadrirrotor e os VANTs numa forma geral eram pouco confiáveis e imprecisos. Para compreender a evolução desse tipo de aeronave, uma breve apresentação histórica do desenvolvimento do quadrirrotor é apresentada na seção seguinte.

2.1.1 HISTÓRIA DO QUADRIRROTOR

O quadrirrotor teve sua origem no ano de 1907, com a construção do Bréguet-Richet Gyroplane Nº 1 pelos irmãos Bréguet.

Figura 3: Bréguet-Richet Gyroplane Nº1



Fonte: DE SOUSA, 2011.

Devido ao seu tamanho e a sua grande massa, ele não teve força suficiente para atingir uma elevada altitude, chegando a apenas 1,5 m de altura (LEISHMAN, 2002). Em 1920, Etienne Oemichen, desenvolveu uma aeronave com quatro motores e oito hélices. Oemichen obteve estabilidade e controlabilidade que possibilitaram voar por aproximadamente 1000 metros. Dois anos depois, Bothezat, com o auxílio do exército americano, construiu o primeiro quadrirrotor a transportar um passageiro, realizando voos com baixa altitude e velocidade. O projeto foi cancelado por apresentar um desempenho insatisfatório (LEISHMAN, 2000). De acordo com Wierema (2008) devido às dificuldades de controle apresentadas, os pesquisadores focaram no helicóptero de apenas uma hélice, com a pretensão de obter maiores conhecimentos na área de controle.

No ano de 1956, surgiu um novo projeto por meio da construção do Conterawings Model A. A aeronave foi baseada nas ideias de Oemichen e Bothezat, executando vários voos com sucesso. No ano de 1963 foi construído o Curtis X-19 com o objetivo de ser uma aeronave para o transporte de passageiros. Para sua decolagem os motores se encontravam na posição vertical e após decolar deveriam ir para a posição horizontal. Entretanto a sua mecânica não era capaz de transpor com segurança e rapidez os motores da posição de decolagem para a de voo (WIEREMA, 2008).

A marinha americana requisitou da empresa Bell Helicopter, por meio de dois projetos, a construção de aeronaves capazes de decolar verticalmente. Em 1966, o Bell X-22, realizou seu primeiro voo. Diferente do Curtis X-19 a transição entre decolagem e voo foi um sucesso, porém não atingiu a velocidade máxima solicitada de 525 km/h, o que acarretou o cancelamento do

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

projeto.

Figura 4: Bell X-22



Fonte: DE SOUSA, 2011

Posteriormente, outros modelos de quadrirrotor foram desenvolvidos, mas sem novas soluções. O avanço da tecnologia e o consequente desenvolvimento dos componentes microeletrônicos, fabricação de sensores de melhor qualidade e a criação do GPS (Global Positioning System), possibilitaram a criação dos VANTs. Com o crescente uso dos VANTs para a vigilância, principalmente utilizando aeronaves de asa fixa, aviões, de pequeno porte e indetectáveis, surge a necessidade de realizar voos pairados. Dessa forma retorna o quadrirrotor, que a partir de 2004 teve vários modelos criados e apresentados, tanto no meio militar quanto no civil (FERNANDES, 2011).

Em decorrência desse fato, em 2005, a Bell Helicopter, em parceria com a Boeing, assinou um contrato com a marinha americana objetivando a construção do Quad Tilt Rotor, que deveria ter grande capacidade de carga e com elevada velocidade de voo e alcance (SOUSA, 2011). O uso do quadrirrotor pela indústria ainda não ocorreu devido ao fato de grande parte dos objetos transportados poderem ser alçados utilizando aeronaves com um ou dois rotores (MARTÍNEZ, 2007).

As pesquisas com o quadrirrotor vêm crescendo com o avanço da tecnologia e a capacidade de miniaturização dos dispositivos, que geram uma maior mobilidade e uma diminuição nos custos para a sua comercialização (POUNDS, MAHONY e HYNES, 2002), e também por estar se tornando a plataforma padrão para investigação de mobilidade tridimensional. A seguir, é apresentada a dinâmica da atitude do quadrirrotor, ou seja, a forma como são realizados os seus movimentos, em

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

conjunto com suas principais características.

2.1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS DO QUADRIRROTOR

O quadrirrotor, exemplificado na Figura 5, é derivado do helicóptero, pois também utiliza rotores de empuxo vertical como principal meio de propulsão.

Figura 5: Quadrirrotor comercial Phantom



Fonte: PHANTOM BRASIL, 2016

O que o diferencia do helicóptero, é o fato de utilizar quatro rotores ao invés de um ou dois. Estes, são comumente colocados nas extremidades da estrutura em forma de cruz. Já no centro, ficam os equipamentos necessários para a operação e controle.

Ao comparar com os helicópteros, o quadrirrotor tem vantagens significativas como capacidade maior de carga útil (BOUABDALLA et al., 2004), efeitos giroscópicos minimizados (BOUABDALLA et al., 2004), maior simplicidade na mecânica dos rotores por não possuir partes móveis e frágeis (SOUSA, 2011), e propulsores com dimensões menores (SOUSA, 2011). Tais vantagens permitem ao quadrirrotor maior facilidade de voo, inclusive em espaços reduzidos.

A simplicidade e os baixos custos envolvidos na construção de um quadrirrotor são fatores importantes e que são levados em conta ao se escolher essa aeronave como plataforma para a realização de um estudo. Mesmo possuindo algumas limitações, apresenta o melhor custo benefício dentre as demais configurações, conforme a Tabela 1.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Tabela 1: Multirrotores

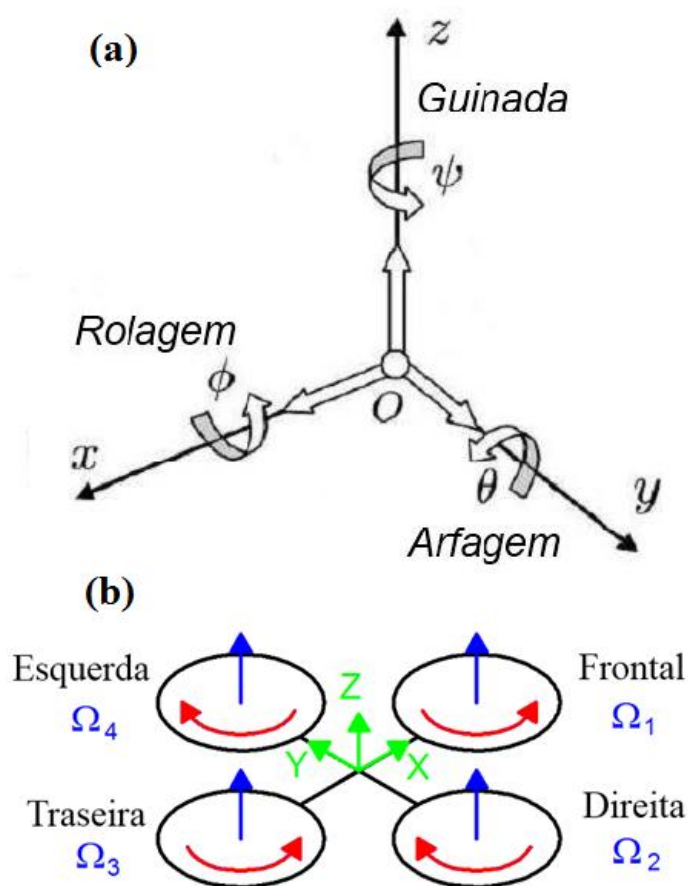
<i>Tipo</i>	<i>Quantidade de rotores</i>	<i>Coaxial</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Y	3	Não	Baixo custo	Sem proteção contra falhas
I4	4	Não	Simplicidade e baixo custo	Sem proteção contra falhas
X4	4	Não	Simplicidade e baixo custo	Sem proteção contra falhas
I6	6	Não	Limitada proteção contra falhas e grande capacidade de carga	Grandes dimensões e preço elevado
X6	6	Não	Limitada proteção contra falhas e grande capacidade de carga	Grandes dimensões e preço elevado
Y6	6	Sim	Pequeno, boa estabilidade e resistência ao vento	Baixa eficiência e mecanismos complexos
IY6	6	Sim	Pequeno, boa estabilidade e resistência ao vento	Baixa eficiência e mecanismos complexos
I8	8	Não	Proteção contra falhas e potente	Grandes e caros
V8	8	Não	Proteção contra falhas e potente	Grandes e caros
X8	8	Sim	Atinge grandes altitudes e resistência ao vento	Ineficiente

Fonte: COPTERCRAFT, 2016

O quadrrorotor tem a habilidade de realizar os seguintes movimentos de atitude: arfagem, guinada, rolagem e altitude. Um movimento de atitude pode ser definido como a orientação da aeronave, determinada pela mudança na inclinação do eixo em relação ao um ponto de referência.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Figura 6: (a) Movimentos de guinada, arfagem e rolagem realizados pelo quadrirrotor e (b) Distribuição dos motores



Fonte: PAULA, 2012.

Todos os movimentos de atitude, mostrados na Figura 3 (a), do quadrirrotor derivam da variação da velocidade dos motores. Um exemplo disso, ao realizar um voo pairado a velocidade em todos os motores é a mesma e caso o operador queira que a aeronave ganhe altitude, ele deve aumentar a velocidade em todos os motores. Conforme OST, (2015) para caracterizá-los, será considerada a Figura 6 (b), a fim de especificar a localização dos pontos frontal, traseira, esquerda e direita.

- Arfagem: Se caracteriza por ser realizado em torno do eixo y, ou seja, é a movimentação que faz o quadrirrotor mover-se para frente ou para trás.
- Rolagem: Ocorre em torno do eixo x, fazendo com que a aeronave se desloque para a esquerda ou direita.
- Guinada: Incide em torno do eixo z, dessa forma o quadrirrotor irá se encontrar com uma

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

inclinação de zero grau em relação ao plano xy, realizando um movimento de rotação em torno do seu eixo.

- **Altitude:** Movimento em que a aeronave ganha altura. Para realizar este movimento é necessário aumentar a velocidade de rotação em todos os motores.
- **Voo Pairado:** Se caracteriza pela aeronave se encontrar “parada” no ar, isto é, não realiza nenhum movimento. Esse fato ocorre quando a velocidade de rotação é igual em todos os motores, de forma que o empuxo gerado seja o suficiente para manter a aeronave voando.

Os movimentos do quadricóptero são dependentes da variação na velocidade de rotação dos rotores. Assim, é possível perceber que o funcionamento adequado do quadricóptero está diretamente ligado ao conjunto que está sendo estudado neste trabalho (ESC-Motor-Hélice). Portanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado de cada componente, a fim de entender o seu funcionamento individual e construir uma plataforma de testes. A seguir destacam-se algumas pesquisas que já foram realizadas nesta área e alguns problemas enfrentados.

2.2 PESQUISAS REALIZADAS E PROBLEMAS ENFRENTADOS

Na investigação da mobilidade e percepção tridimensional, o quadricóptero vem sendo utilizado como a plataforma padrão. Então, se faz necessário uma revisão de literatura a fim de ressaltar os estudos realizados e problemas que ainda se encontram em aberto.

A seguir, apresenta-se os objetivos principais de alguns trabalhos que foram encontrados na literatura técnica.

- Visar o voo de várias aeronaves em mesmo espaço. Foram construídas duas aeronaves neste trabalho, o STARMAC I (HOFFMANN, RAJNARAYAN, et al., 2004) e o STARMAC II (HOFFMANN, HUANG, et al., 2007);
- Desenvolver softwares para definir os componentes a serem usados na construção da aeronave (BOUABDALLAH, 2007);
- Construir aeronaves para uso comercial (POUNDS, 2007);
- Construir uma aeronave para ser usada em missões de busca e salvamento (NAIDOO, RIANN e BRIGHT, 2011);

A grande maioria desses trabalhos já encontrados são voltados para o sistema de controle da aeronave, não dando tanto destaque para o projeto de sua estrutura. Porém, alguns trabalhos consideram a modelagem matemática da estrutura ou de parte dela. Entre eles pode-se destacar:

- Proposta de um modelo físico para o motor e a hélice (MARTÍNEZ, 2007);
- Modelagem matemática do conjunto motor-caixa de marcha-hélice (BRESCIANI, 2008);
- A modelagem do conjunto ESC-motor-hélice utilizando a ferramenta polyfit do software MatLab (PAULA, 2012).

Também há trabalhos que abordam o sistema de controle da aeronave. Alguns problemas destacados são:

- Complexidade no projeto de controle de atitude (Hoffmann et al, 2004); (BOUABDALLAH, 2007); (POUNDS, 2007);

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

- Dificuldade na obtenção de dados precisos dos sensores, tais como altitude, posição e velocidade, devido ao ruído causado pelos motores (HOFFMANN, RAJNARAYAN, et al., 2004), (POUNDS, 2007);
- Miniaturização de toda a estrutura, ocasionando a diminuição da carga útil e a aplicação de leis físicas de forma diferente das aplicadas em aeronaves de grande porte (BOUABDALLAH, 2007); (POUNDS, 2007); (GUIMARÃES, 2012);
- Elevado consumo de energia (BOUABDALLAH, 2007); (POUNDS, 2007); (BRESCIANI, 2008); (GUIMARÃES, 2012).

Algumas dissertações foram desenvolvidas na área da modelagem matemática dos quadrrrotores, as quais cabe destacar:

Paula, (2012), em sua dissertação de mestrado, construiu um quadrrrotor, com o objetivo de obter imagens em alta definição. Além disso, foi realizada a modelagem matemática dos motores por meio da ferramenta polyfit do MatLab, sendo que foi utilizado a modelagem caixa preta e encapsulados o sistema Esc-Motor-Hélice. O autor propôs alguns métodos que permitem a diminuição dos ruídos mecânicos nos sensores que são causados principalmente pela vibração dos motores.

A pesquisa de Ost (2015) faz o estudo dos veículos aéreo não tripulados e realiza a modelagem do conjunto ESC (Eletronic Speed Controler) - Motor - Hélice de um multirrotor. A técnica utilizada é a identificação de sistemas. A contribuição deste estudo foi a identificação dos testes de estacionariedade aplicados aos dados de entrada e saída do sistema.

Na pesquisa de Leila (2016) é obtido o modelo matemático do sistema de propulsão eletromecânico, através da teoria de identificação de sistemas. A metodologia utilizada neste trabalho consiste na compreensão do sistema de propulsão e construção da plataforma de testes para a coleta de dados, para posteriormente realizar a aplicação de testes de estacionariedade para a análise dos dados, e cálculo das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial para determinação da estrutura e ordem do modelo.

3 METODOLOGIA

Nesta revisão de literatura deu-se preferência para artigos publicados em periódicos internacionais, teses e dissertações. Também foram pesquisados projetos que utilizavam o quadrrrotor como base para os seus estudos e com data mais recente, pois assim contribui com a identificação dos problemas que ainda são enfrentados em sua construção e controle.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os multirrotores são aeronaves que possuem duas características importantes, a capacidade de voar horizontalmente e de aterrissar e decolar de modo vertical. É possível observar um vasto campo de aplicação dos mesmos e a crescente utilização dos VANTs.

Por este fato diversos estudos vêm sendo desenvolvidos. Estes objetivam, por exemplo, a busca pela automatização e maior segurança. Assim, denota-se a importância de um melhor conhecimento sobre a estrutura da aeronave. Dessa forma destaca-se a indispensabilidade de

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

compreender as características dos VANTs, suas diferentes configurações e especificamente todo o funcionamento do quadricóptero.

Percebe-se também a necessidade da realização de um estudo a respeito do braço do quadricóptero, o qual é constituído por um ESC (Eletronic Speed Control), um motor e uma hélice. Um melhor conhecimento de cada um desses componentes se faz necessário, com a finalidade de entender seu funcionamento no conjunto.

A utilização de uma plataforma experimental também é fundamental para a obtenção de dados que possuam uma representatividade do processo real. Isso se faz necessário para a posterior realização da modelagem matemática via Identificação de Sistemas. Consequentemente, é preciso estudar a referida técnica, compreender todas as suas etapas, bem como, outros conceitos como as séries temporais e suas características.

Apesar das vantagens que foram apresentadas, ainda existem algumas limitações que geram problemas, tanto estruturais como para o seu controle. Na pesquisa realizada, poucos trabalhos abordavam a modelagem matemática da estrutura da aeronave. O estudo da estrutura do quadricóptero possibilita gerar modelos matemáticos que sejam capazes de descrever e fornecer dados mais precisos a respeito da sua dinâmica de voo.

Dessa forma, todos estes estudos visam o acultramento na área de estudo para poder possuir condições de responder os problemas de pesquisa propostos. Com isso existe a necessidade de empregar novas ferramentas que possibilitem a modelagem matemática desses dispositivos, e uma delas é a Identificação de Sistemas. Utilizando essa ferramenta é possível obter modelos trabalhando apenas com os dados. Para isso, pretende-se realizar a investigação de critérios para a determinação da amostragem de dados, do tempo de amostragem e dos sinais de entrada do sistema; dominar a característica estacionariedade da série temporal e, a investigação das propriedades dos estimadores, a fim de obter critérios para a escolha do algoritmo de estimação e obter modelos matemáticos não espúrios.

REFERÊNCIAS

BOUABDALLAH, S.; MURRIERI, P.; SIEGWART, R. **Design and Control of an Indoor Quadrotor. Robotics and Automation**, 2004

BOUABDALLAH, S. **Design and Control of Quadrotors with Application to Autonomous Flying. Tese** Doutorado em Ciências - EPFL, Lausanne, 2007.

BRESCIANI, T. **Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter**. 2008. 180 p. Dissertação (Mestrado em Automação de controle) - Lund University. Lund, Suécia.

COPTERCRAFT. **Multirotor frame configurations**. Disponível em: . Acesso em: 11 abr. 2017.

DE SOUSA, J. D. A. **Development of unmanned aerial four-rotor vehicle**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2011.

FERNANDES, N. D. S. **Design and construction of a multi-rotor with various degrees of freedom**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 2011.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

FORBES. **What Makes The Quadcopter Design So Great For Small Drones?** Disponível em: .
Acesso em: 23 maio 2017.

GUIMARÃES, J. P. F. **Controle de atitude e altitude para um veículo aéreo não tripulado do tipo quadrrorotor.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Brasil: 2012.

HOFFMANN, G., et al. **The Stanford Testbed of Autonomous Rotorcraft for multi-agent control (STARMAC).** Proceedings of the 23rd Digital Avionics System Conference, Salt Lake City. October 2004

HOFFMANN, G. M., et al. **Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment.** Citeseer, 2007.

LEISHMAN, J. G. **Principles of helicopter aerodynamics.** Cambridge: University Press, 2000.

LEISHMAN, J. G. (2002). **The bréget-richet quad-rotor helicopter of 1907.** Disponível em: .
Acesso em: 27 mar. 2017.

MARTÍNEZ, V. M. **Modelling of the flight dynamics of a quadrotor helicopter.** Dissertação Mestrado em Engenharia. CRANFIELD UNIVERSITY. Cranfield, Reino Unido. 2007.

NAIDOO, Y. ; RIANN, S. ; BRIGHT, G. **Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicle Helicopter Modelling & Control.** Int. J. Adv Robotic Sy. Vol. 8, Nº 4, pag 139-149. 2011.

OST, A. **Modelagem matemática do conjunto esc-motor-hélice de um vant utilizando identificação de sistemas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2015.

PAULA, J. C. **Desenvolvimento de um VANT do tipo Quadrrorotor para obtenção de imagens aéreas em alta definição.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2012

PHANTOM BRASIL. Disponível em: . Acesso em: 14 abr. 2017.

POUNDS, P.; MAHONY, R.; HYNES, P. A. R. J. **Design of a four rotor aerial robot. Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation.** Auckland, Australia: [s.n.]. 2002.

POUNDS, P. E. I. **Design, construction and control of a large quadrotor micro air vehicle.** Dissertação de Doutorado - Australian National University. Canberra, Austrália, 2007.

SOUSA, J. D. A. **Simulação e desenvolvimento de um veículo aéreo autónomo de quatro rotores.** Dissertação de Mestrado em Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Automação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

SOUZA, C. et al. **Controle Baseado em Passividade de uma Aeronave VTOL**. XIX Congresso Brasileiro de Automática”, CBA 2012.

WIEREMA, M. **Design, implementation and flight test of indoor navigation and control system for a quadroter uav**. Monografia de Mestrado em Aerospace Engineering. Delft University of Technology. Delft, Holanda. 2008.