

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO DE PROPULSORES ELETROME CÂNICOS<sup>1</sup>**  
**DEVELOPMENT AND DESCRIPTION OF AN ELECTROMECHANICAL PROPELLANT MEASURING INSTRUMENT**

**Graciela Elizabeth Bonmann Bertoldo<sup>2</sup>, Elisiane Pelke Paixão<sup>3</sup>, Luís Fernando Sauthier<sup>4</sup>, Alcedir Luis Finkler<sup>5</sup>, Manuel Martín Pérez Reibold<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Projeto de Dissertação do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Unijuí.

<sup>2</sup> Bolsista CAPES, aluna do curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Unijuí.

<sup>3</sup> Bolsista de Iniciação à Pesquisa, aluna do curso de Engenharia Elétrica da Unijuí.

<sup>4</sup> Bolsista Capes, aluno do curso de Modelagem Matemática da Unijuí.

<sup>5</sup> Aluno do curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Professor EBTT no IFFar.

<sup>6</sup> Professor Orientador do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Unijuí.

**Resumo:** Os UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) são veículos aéreos caracterizados pela ausência física de um piloto. Em português ganham o nome de VANTs (Veículo aéreo não tripulado). São utilizados em diversas missões militares e, também, para fins meteorológicos, de segurança, entretenimento, entre outros. Essas aeronaves podem possuir asas fixas ou serem do tipo multirrotores. Entre os multirrotores, o quadricoptero, ou quadrirrotor, vem se destacando no mercado pelo seu custo baixo de construção e manutenção. Estes são arranjos de quatro propulsores eletromecânicos, cada qual constituído por hélice, motor brushless, e ESC (Electronic Speed Control). Os propulsores são responsáveis pela sustentação e movimentação dos quadrirrotores e, por isso, é de fundamental importância a sua modelagem matemática. Porém, para se modelar matematicamente um sistema dinâmico, é necessário obter dados precisos do sistema. Na literatura técnica não se encontra uma plataforma padrão para a aquisição desses dados. Sendo assim, pretende-se desenvolver um instrumento de medição eficaz e capaz de mensurar as variáveis envolvidas no sistema. Para isso, aprimorar-se-á os métodos de aquisição de dados das plataformas desenvolvidas pelo grupo de pesquisa, a partir de informações retiradas da literatura técnica. A plataforma desenvolvida passará por testes de calibração a fim de caracterizá-la como instrumento de medição. Pretende-se com este trabalho auxiliar a comunidade científica que projeta e desenvolve aeronaves do tipo multirrotores, uma vez que caracterizar-se-á um instrumento de medição capaz de fornecer dados precisos para a modelagem de propulsores eletromecânicos.

**Palavras-chave:** VANT. Multirrotores. Quadrirrotores. Plataformas de testes. Modelagem Matemática.

**Abstract:** Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are aerial vehicles characterized by the physical absence of a pilot. In Portuguese they gain the name of VANTs (Veículo aéreo não tripulado). They are used in several military missions and also for meteorological purposes, security,

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

entertainment, among others. Such aircraft may have fixed-wings or be multirotor type. Among the multirotors, the quadricopter, or quadrotor, has been standing out in the market for its low cost of construction and maintenance. These are arrangements of four electromechanical propellants, each consisting of propeller, brushless motor, and ESC (Electronic Speed Control). The electromechanical propellants are responsible for the support and movement of the quadrotors and, therefore, their mathematical modeling is of fundamental importance. However, in order to mathematically model a dynamic system, it is necessary to obtain accurate system data. In the technical literature there is no standard platform for the acquisition of this data. Thus, it is intended to develop an effective measuring instrument and capable of measuring the variables involved in the system. For this, the data acquisition methods of the platforms developed by the research group, will be improved, based on information in the technical literature. The developed platform will undergo calibration tests to characterize it as a measuring instrument. This work is intended to help the scientific community that designs and develops multirotor aircraft, since it will be characterized a measuring instrument capable of providing accurate data for the modeling of electromechanical propellants.

**Keywords:** UAV. Multirotor Aircraft. Quadrotor Aircraft. Testbed. Mathematical modeling.

## 1. Introdução

Os UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*) são aeronaves que não necessitam de um piloto a bordo. São utilizadas para fins militares, meteorológicos, de segurança, entretenimento, entre outros. Esses veículos aéreos podem ser de asa fixa ou, do tipo multirrotores. Dentre os multirrotores os quadrirrotores destacam-se por possuírem peso reduzido e capacidade de realizar manobras em espaços pequenos, inacessíveis para aeronaves convencionais e/ou de alta periculosidade para o ser humano (UYAR et al., 2012), combinado com um baixo custo de produção e manutenção.

Os quadrirrotores são arranjos de quatro propulsores eletromecânicos, cada qual constituído por hélice, motor *brushless* e ESC (*Electronic Speed Control*). Esses, por sua vez, são responsáveis pelos movimentos e estabilidade dos quadrirrotores. Por essa razão é necessário controlá-los adequadamente para um bom funcionamento da aeronave e, para isso necessita-se obter seu modelo matemático.

O modelo matemático do propulsor eletromecânico do quadrirrotor depende de vários parâmetros. Alguns desses parâmetros são: velocidade rotacional, densidade do ar, torque e empuxo. As variáveis torque e empuxo podem ser calculadas analiticamente, porém os valores obtidos nem sempre condizem com a realidade (PAIXÃO et al., 2017). Por esse motivo, é vantagem obtê-los por meio de testes experimentais, uma vez que os mesmos abrangem todas as características do conjunto motor-hélice-ESC. Sabendo da necessidade de se obter parâmetros precisos para a modelagem matemática e conseqüentemente controle de um UAV e, analisando os métodos utilizados para a obtenção de dados das plataformas experimentais, chegou-se a um questionamento sobre a confiabilidade dos dados obtidos pelas mesmas. Por esse motivo, decidiu-se avaliar o equipamento de testes, tendo como referência as características de um instrumento de medição.

Por tanto, o objetivo deste trabalho consiste em constatar, na literatura técnica, as características dos instrumentos utilizados para obter tais variáveis e com essas informações, aprimorar as

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

plataformas de testes existentes, desenvolvendo um instrumento que forneça dados confiáveis. A partir disso, buscar-se-á obter um modelo matemático dos propulsores utilizando-se das etapas da metodologia de identificação de sistemas.

Este trabalho visa contribuir com as pesquisas desenvolvidas por Chéron (2010), Uyar (2012), Brandt e Selig (2011), Ost (2015), Valer (2017) e demais pesquisas a respeito da modelagem e controle de UAVs, uma vez que se pretende validar um instrumento de medição para obter dados significativos de propulsores eletromecânicos.

Para melhor compreensão do trabalho desenvolvido, o mesmo foi organizado em 5 seções: Na seção 2 expõe-se uma breve revisão bibliográfica sobre os VANTS, dando ênfase aos quadricópteros e seu sistema de Propulsão Eletromecânico. Na seção 3, por sua vez, abrange as características que serão verificadas no instrumento de medição proposto. Apresenta-se, na seção 4, o estado da arte das plataformas UAVs e na seção 5, traz-se os resultados obtidos com a pesquisa.

## **2. UAVs e seu Sistema de Propulsão Eletromecânico**

Os UAVs surgiram durante a Primeira Guerra Mundial (1917), porém seu valor no campo de batalha só fora reconhecido durante a Operação *Desert Storm*, na Península Balcânica em 1991 (VALAVANIS, 2007). Atualmente os veículos aéreos não tripulados podem ser subdivididos em dois grandes grupos: os modelos asa fixa e os modelos multirrotóres.

Os multirrotóres, diferentemente dos modelos de asa fixa, possuem capacidade VTOL (*Vertical Take-off and landing*) e de *hover* (voo pairado). Além disso, sua estrutura (*frame*) pode ser consideravelmente pequena, esses fatores facilitam seu uso em locais pequenos e de difícil acesso para aeronaves convencionais (PHANG et al., 2012).

Existem diferentes modelos de UAVs e, de acordo com a quantidade e o posicionamento de seus rotores é que seus nomes são definidos. Os motores podem ser posicionados na estrutura em diferentes configurações, tomando como base a parte frontal da aeronave, como configuração em "I", "X". Cabe salientar que o funcionamento da aeronave depende desta distribuição.

As configurações em I, definem um único rotor da aeronave para a parte frontal da mesma. Dessa forma os eixos de giro, do quadricóptero configurado em I (I4), são analisados alinhados aos eixos físicos do equipamento (PRABHA; THOTTUNGAL, 2016). As configurações em X, têm essa nomenclatura pois a parte frontal é definida por dois rotores. Nos quadricópteros configurados dessa forma, X4, os eixos de giro são deslocados 45 graus em relação aos eixos físicos do equipamento.

Essas orientações, da parte frontal dos UAVs, determinam em quais dos pares de rotores que o sistema de controle deve atuar para a realização dos movimentos de atitude da aeronave. Um movimento de atitude pode ser definido como a orientação da aeronave, determinada pela mudança na inclinação do eixo em relação a um ponto de referência. Os quadricópteros possuem a habilidade de realizar os seguintes movimentos de atitude: arfagem, rolagem, guinada e altitude.

Todos os movimentos do quadricóptero são dependentes da variação da velocidade de rotação dos rotores. Assim, é possível perceber que o funcionamento adequado do quadricóptero está diretamente ligado ao sistema de propulsão eletromecânico e seu controle. Portanto, é de suma importância obter um instrumento de medição capaz de obter dados precisos do sistema de

01 a 04 de outubro de 2018

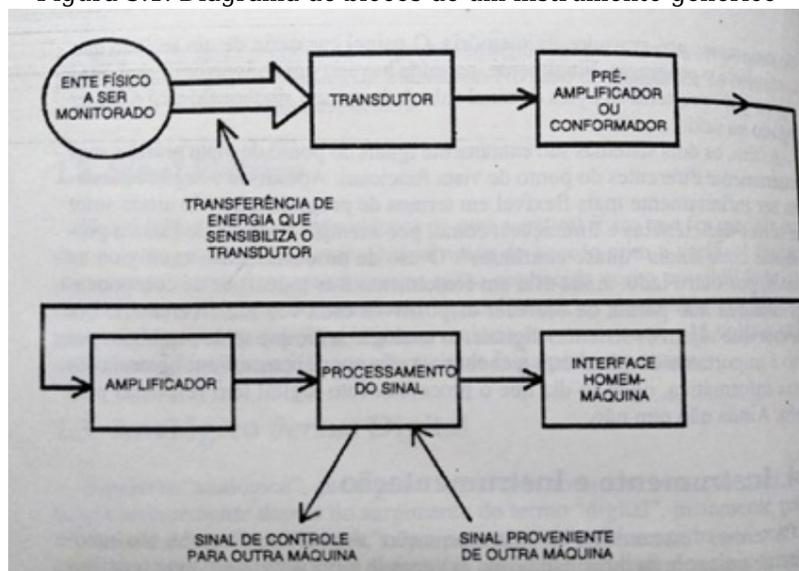
Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

propulsão eletromecânica como um todo, evitando assim, erros de arredondamento em cálculos.

### 3. O instrumento de medição

Segundo o Vocabulário Internacional Metrologia (VIM), instrumento de medição consiste em um “dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou em conjunto com dispositivos complementares” (VIM, 2012). Esse dispositivo, em geral, possui uma entrada de leitura de dados, uma parte de processamento do sinal e, uma saída de dados. Na Figura 3.1 é apresentado o diagrama de um instrumento genérico.

Figura 3.1. Diagrama de blocos de um instrumento genérico



Fonte: (WERNECK, 1996)

O ente físico a ser monitorado pode ser uma pressão, por exemplo, que o instrumento irá medir. Quando essa medição é feita, diz que há uma transferência de energia entre o ambiente e o instrumento que vai sensibilizar o transdutor. O sinal proveniente do transdutor é convertido adequadamente para finalmente ser amplificado pelo amplificador. No bloco de processamento de sinal, o sinal pode ser modificado de acordo com a necessidade do instrumento. Esse bloco também pode receber um sinal, proveniente de outra máquina ou transdutor, que igualmente será utilizado no instrumento, ou enviar um sinal de controle para outra máquina. O sinal processado é enviado para um terminal de vídeo, impressora, um *display* de LEDs, ou outra interface que possibilite a interpretação do mesmo pelo homem.

Quando se fala de *performance* ou desempenho de um equipamento eletrônico, refere-se a determinadas medidas características de instrumentos aceitas universalmente. Essas medidas são utilizadas para caracterizar os instrumentos de um modo geral e, podem ser obtidas por meio de testes de calibração. Como, por exemplo (WERNECK, 1996):

- Faixa: representa todos os níveis de amplitude do sinal de entrada nos quais se supõem que o

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

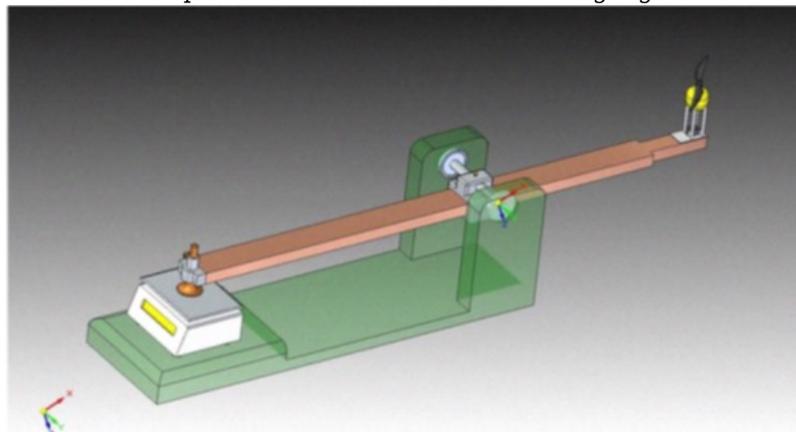
instrumento possa medir, do inglês *range*;

- Resolução: é o menor incremento do sinal de entrada que é sensível ou que pode ser medido pelo instrumento;
- Sensibilidade: é a função de transferência do transdutor, ou seja, a relação entre o estímulo de entrada no transdutor e o sinal de saída por ele produzido;
- Linearidade: é a distância máxima observada entre uma medida feita pelo instrumento e o valor padrão, dividida pelo *range* e multiplicado por 100%;
- Histerese: a histerese quantifica a máxima diferença entre leituras para um mesmo mensurando, objeto de medição, quando este é aplicado a partir de um incremento ou decremento de estímulo;
- Exatidão ou erro: é a diferença absoluta entre o valor real do padrão e o valor medido pelo instrumento. Ao ser especificado deve-se informar em que escala dentro do *range* ela é válida.
- Precisão ou Repetibilidade: é a capacidade de se obter o mesmo valor em diversas medidas. Pode ser dada pelo desvio padrão das medidas efetuadas de um mesmo valor ou pelo maior erro esperado em qualquer medida;
- Largura de faixa: é o *range* de variação da frequência de um determinado sinal.

#### 4. Plataformas de testes desenvolvidas

Tendo em vista que para identificar parâmetros, por meio de experimentos, é necessário utilizar dispositivos de medição precisos, Chéron (CHÉRON et al., 2010) capturou informações como o empuxo, consumo atual e velocidade de rotação fazendo uso de uma balança de precisão, um encoder e um sensor de corrente de entrada em sua plataforma com formato de gangorra, conforme Figura 4.1. Segundo os autores, os sensores, por meio do MATLAB Simulink®, registram os dados através da interface *Quanser* em tempo real, o que reduz a possibilidade de erro na hora de “anotar” os dados.

Figura 4.1. Modelo 3D da plataforma de teste em forma de gangorra e motor na vertical



Fonte: (CHÉRON et al., 2010)

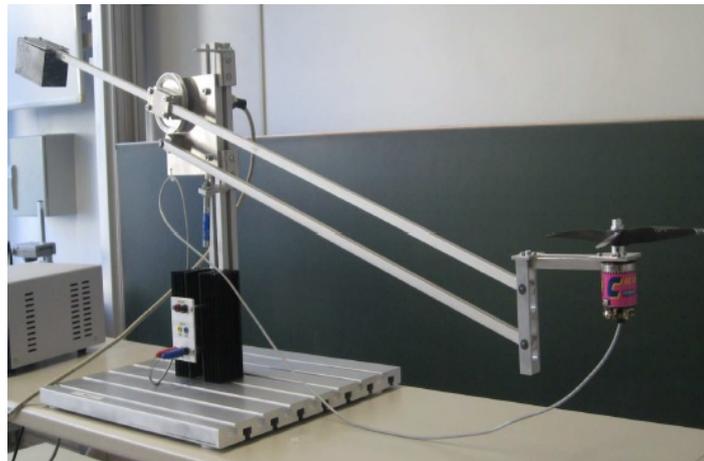
Porém há outras formas de se obter o empuxo do motor, como a utilizada por Uyar (UYAR et al., 2012). Esse, ao invés de uma balança, utilizou um peso, maior do que o empuxo máximo

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

antecipado gerado pelo motor, fixado na extremidade oposta à combinação motor-hélice a ser testada, conforme ilustra a Figura 4.2.

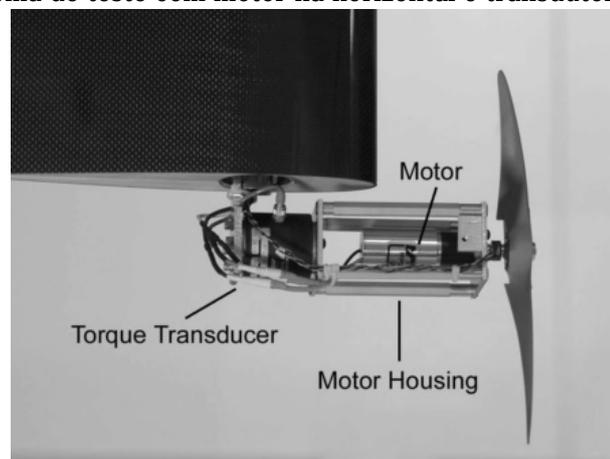
Figura 4.2. Plataforma experimental para captura de empuxo em forma de gangorra com motor na vertical



Fonte: (UYAR et al., 2012)

Em uma terceira plataforma, diferentemente de Chéron e Uyar, é observado o conjunto motor-hélice na horizontal (Figura 4.3). Esse se encontra nessa posição, pois reduz a turbulência das hélices, que tem como causa o retorno do vento que as mesmas empurram para baixo. Turbulência essa que afeta consideravelmente os dados retirados da plataforma e, conseqüentemente, a modelagem e controle do quadricóptero. Nessa plataforma, Brandt e Selig (2011) capturam o torque por meio de um transdutor de torque.

Figura 4.3. Plataforma de teste com motor na horizontal e transdutor de torque instalado



Fonte: (BRANDT; SELIG, 2011)

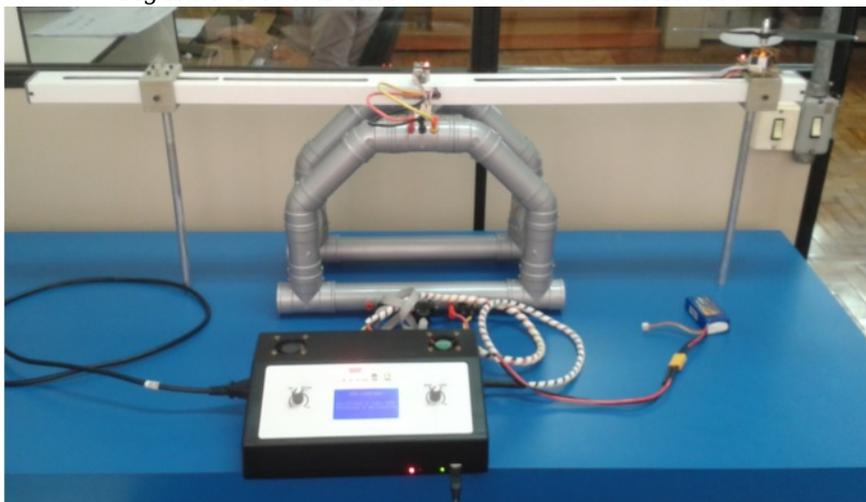
01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

Similar as duas primeiras plataformas experimentais apresentadas nessa seção, Reibold e seus colegas pesquisadores (2017) apresentam uma terceira versão do mesmo modelo de plataforma (Figura 4.4).

Essa plataforma é constituída por uma gangorra, de PVC e alumínio, e um console de controle que visa a obtenção, estritamente, da corrente de entrada e a velocidade de rotação do motor do sistema de propulsão. A gangorra tem o princípio de uma balança, em que os motores são posicionados em suas extremidades. Nela, o suporte do motor pode ser deslocado ao longo do braço da estrutura. Essa dinamicidade, segundo os autores, possibilita a utilização de motores de maior e menor potência elétrica, além de sua utilização para ensaios com diferentes características e finalidades.

Figura 4.4. Plataforma de teste de estacionariedade



Fonte: (REIMBOLD et al., 2017)

Os dados provenientes dessa plataforma serviram como base para diversos trabalhos investigativos. Um deles desenvolvido por Ost (2015), o qual gerou um modelo matemático do propulsor eletromecânico. Outro trabalho, desenvolvido por Valer (REIMBOLD et al., 2017) investigou a possibilidade de se evitar modelos espúrios.

As pesquisas desenvolvidas nessa plataforma experimental perceberam a necessidade de se obter o coeficiente de empuxo do propulsor para aprimorar os modelos obtidos. Dessa forma, surge uma nova plataforma, num modelo diferenciado, que possibilita a mensuração do empuxo, por meio de uma célula de carga. A estrutura da balança, como pode ser observado na Figura 4.5, é feita de ferro e num dos extremos é alocada uma célula de carga, que por sua vez sustenta o propulsor eletromecânico.

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

Figura 4.5. Balança eletrônica para captura do empuxo



Fonte: Arquivo de imagens GAIC

As células de carga são estruturas eletromecânicas que se deformam dentro do regime elástico ao receberem esforços físicos e, são capazes de converter, por meio de um circuito elétrico, o valor dessa deformação em voltagem. Por esse motivo podem ser consideradas mais eficientes computacionalmente.

## 5. Resultados e discussões

Analisando as plataformas experimentais apresentadas na seção anterior, percebeu-se que uma opção, de baixo custo, para se obter tanto o empuxo como o torque é utilizar células de carga. Outra característica que se mostrou eficiente para reduzir a turbulência das hélices, foi o posicionamento na horizontal do conjunto motor-hélice. A partir disso, adaptar-se-á as plataformas desenvolvidas pelos alunos de Iniciação Científica no GAIC (Grupo de Automação Industrial e Controle), ilustradas no item 4, Figura 4.4 e Figura 4.5, afim de aprimorar a coleta de dados. O instrumento será capaz de capturar, a velocidade rotacional, por meio de um sensor óptico, a potência elétrica de entrada, através de sensor de corrente, o empuxo, por meio de uma célula de carga e, o torque do motor, esse será obtido por meio de duas células de carga instaladas nas laterais do motor, porém fixas na estrutura do modelo.

O instrumento ainda está em fase de desenvolvimento e, posteriormente será realizado testes de calibração para conhecer as características da plataforma desenvolvida. Dentre esses testes, utilizar-se-á de análise estatística, entre outras técnicas, ainda não definidas. Pretende-se com esses testes validar o sistema de medição, obtendo todas as características necessárias para um instrumento de medição ser considerado calibrado, apresentadas na seção 3. Caracterizado o instrumento de medição, partir-se-á para a modelagem matemática do sistema de propulsão

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

eletromecânico.

## 6. Referências Bibliográficas

BRANDT, J. B.; SELIG, M. S. **Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers**. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, [s.l.], no January, p. 1-18, 2011. ISBN: 978-1-60086-950-1, DOI: 10.2514/6.2011-1255.

CHÉRON, C. et al. **A multifunctional HIL testbed for multirotor VTOL UAV actuator**. Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA 2010, [s.l.], no 1, p. 44-48, 2010. ISBN: 9781424471010, ISSN: 1083-4435, DOI: 10.1109/MESA.2010.5552032.

PAIXÃO, E. P. et al. **Sistema de medição de grandezas físicas intrínsecas ao módulo de propulsão de veículos multirrotores**. Revista Interdisciplinar de Ensino Pesquisa e Extensão, [s.l.], v. 5, p. 273-282, 2017.

PHANG, S. K. et al. **Design and mathematical modeling of a 4-standard-propeller (4SP) quadrotor**. Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), [s.l.], p. 3270-3275, 2012. ISBN: 9781467313988, DOI: 10.1109/WCICA.2012.6358437.

PRABHA, M. .; THOTTUNGAL, R. **Modeling and simulation of X-quadcopter control**. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, [s.l.], v. 4, no IV, p. 830-833, 2016.

REIMBOLD, M. M. P. et al. **Aplicação de teste de raiz unitária às variáveis de propulsores eletromecânicos**. Vivências, [s.l.], v. 7, no 13, p. 155-162, 2017. ISSN: 1809-1636.

UYAR, E. et al. **Position control of a seesaw like platform by using a thrust propeller**. The 12th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina: [s.n.], 2012. ISBN: 9781457710711, DOI: 10.1109/AMC.2012.6197019.

VALAVANIS, K. P. **Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy**. Technology. Tampa, Florida: Springer, 2007. v. 33, 473-493-493 p. ISBN: 978-1-4020-6113-4, DOI: 10.1007/978-1-4020-6114-1.

VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 1. ed. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. 94 p.

WERNECK, M. M. **Transdutores e interfaces**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1996. 225 p.