



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ADRIEL DE OLIVEIRA FREITAS**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA CURVA DE DESCARGA DA BATERIA DE UM  
QUADRIROTOR ROLLING SPIDER UTILIZANDO A TEORIA DE  
IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

**SOBRAL**

**2019**

ADRIEL DE OLIVEIRA FREITAS

MODELAGEM MATEMÁTICA DA CURVA DE DESCARGA DA BATERIA DE UM  
QUADRIROTOR ROLLING SPIDER UTILIZANDO A TEORIA DE IDENTIFICAÇÃO DE  
SISTEMAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Vandilberto Pe-  
reira Pinto

SOBRAL

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

F936m Freitas, Adriel de Oliveira.

Modelagem matemática da curva de descarga da bateria de um quadrirotor Rolling Spider utilizando a teoria de identificação de sistemas / Adriel de Oliveira Freitas. – 2019.  
84 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto.

1. Baterias. 2. Quadrirotor. 3. Curva de Descarga. 4. Identificação de Sistemas. 5. Modelagem Matemática. I. Título.

CDD 621.3

---

ADRIEL DE OLIVEIRA FREITAS

MODELAGEM MATEMÁTICA DA CURVA DE DESCARGA DA BATERIA DE UM  
QUADRIROTOR ROLLING SPIDER UTILIZANDO A TEORIA DE IDENTIFICAÇÃO DE  
SISTEMAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Éber de Castro Diniz  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Lucivando Ribeiro de Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, ser Supremo, ao qual devo a vida.

A minha mãe, pela compreensão nos momentos de anseio e ausência, e pelas palavras de incentivo.

Ao Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto por me orientar em meu trabalho de conclusão de curso, e em projetos de pesquisa e extensão.

Aos demais familiares, pelo incentivo e carinho.

Aos amigos, que de alguma maneira me ajudaram a passar pelos momentos difíceis, com conversas e descontração

À Universidade Federal do Ceará- Campus Sobral, pela estrutura física oferecida.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

E à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento (Funcap), pelo financiamento do projeto de pesquisa que originou este trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original”

(Albert Einstein)

## RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação de técnicas de identificação de sistemas na modelagem matemática da curva de descarga da bateria de um quadricóptero *Rolling Spider*, com o objetivo de identificar o modelo que representa maior acurácia. Na modelagem matemática foram utilizadas as estruturas de modelos paramétricos lineares ARX, ARMAX, e Box-Jenkins. Também foi aplicado o método dos Mínimos Quadrados não Recursivos (MQNR) para estimar uma função de transferência que represente a curva de descarga da bateria do quadricóptero. Os parâmetros e validação das estruturas de modelos ARX, ARMAX, e Box-Jenkins foram obtidos com o auxílio da ferramenta *toolbox systemIdentification* presente no software *Matlab/Simulink*. Já os parâmetros e validação dos Mínimos Quadrados não Recursivos foram obtidos a partir de um algoritmo implementado no software *Matlab*. O banco de dados utilizado na estimação e validação dos modelos matemáticos foi obtido experimentalmente a partir de uma plataforma de testes e aquisição de dados. A partir dos resultados da validação dos modelos matemáticos estimados, foi selecionado o modelo discreto MQNR para representar a curva de descarga da bateria do quadricóptero *Rolling Spider*, pois apresentou melhor resultado quando comparado aos demais modelos. O modelo discreto MQNR apresentou uma acurácia de 97,5914%, enquanto os modelos discretos ARMAX e Box-Jenkins apresentaram uma acurácia de 65,55% e 66,95% respectivamente. Já o modelo discreto ARX apresentou o pior resultado, com uma acurácia de 56,86%.

**Palavras-chave:** Baterias. Quadricóptero. Modelagem Matemática. Identificação de Sistemas.

## ABSTRACT

This work presents the application of systems identification techniques in the mathematical modeling of the battery discharge curve of a Rolling Spider quadrotor, in order to identify the model that represents the highest accuracy. In the mathematical modeling, the structures of linear parametric models ARX, ARMAX, and Box-Jenkins were used. The non-recursive least squares(MQNR) method was also used to estimate a transfer function that represents the quadrotor battery discharge curve. The parameters and validation of the ARX, ARMAX, and Box-Jenkins frameworks were obtained with the aid of the systemIdentification toolbox present in Matlab / Simulink software. The parameters and validation of non-recursive least squares were obtained from an algorithm implemented in Matlab software. The database used in the estimation and validation of the mathematical models was obtained experimentally from a platform of tests and acquisition of data. From the results of the validation of the estimated mathematical models, the discrete model MQNR was selected to represent the discharge curve of the Rolling Spider quadrotor, because it presented better result when compared to the other models. The discrete model MQNR presented an accuracy of 97.5914%, while the discrete models ARMAX and Box-Jenkins presented an accuracy of 65.55% and 66.95% respectively. The ARX discrete model presented the worst result, with an accuracy of 56.86%.

**Keywords:** Batteries. Quadrotor. Mathematical Modeling. System Identification.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aeronave do Tipo Asa Fixa (Drone Maptor) . . . . .	14
Figura 2 – Quadrirotor Parrot AR Drone 2.0 . . . . .	15
Figura 3 – Plataforma experimental utilizada na aquisição de dados. . . . .	19
Figura 4 – Plataforma experimental utilizada na aquisição de dados. . . . .	20
Figura 5 – Modelo final do protótipo STARMAC II . . . . .	21
Figura 6 – Primeiro Quadrirotor, 1907. . . . .	23
Figura 7 – Octopus Voador, 1922. . . . .	24
Figura 8 – Parrot AR.Drone 2.0 Elite Edition . . . . .	25
Figura 9 – Parrot Rolling Spider . . . . .	25
Figura 10 – Draganflyer X4-P . . . . .	26
Figura 11 – Modelo de quadrirotor utilizado . . . . .	27
Figura 12 – Descrição da variação da velocidade angular dos propulsores (setas em preto) e movimento executado pela aeronave (setas em vermelho) . . . . .	28
Figura 13 – Esquema de composição de uma célula eletroquímica. . . . .	29
Figura 14 – Estágios de operação da bateria. . . . .	30
Figura 15 – Modelo baseado em Thevenin. . . . .	32
Figura 16 – Modelo baseado em Impedância. . . . .	33
Figura 17 – Representação de um sistema. . . . .	35
Figura 18 – Representação esquemática do modelo ARX. . . . .	37
Figura 19 – Representação esquemática do modelo ARMAX. . . . .	37
Figura 20 – Representação esquemática do modelo BJ. . . . .	38
Figura 21 – Comando para abrir a Simulação AsbQuadcopter . . . . .	42
Figura 22 – Ambiente de Visualização 3D . . . . .	43
Figura 23 – Modelo de Simulação AsbQuadcopter . . . . .	44
Figura 24 – Modelo Linear e Não-Linear do quadrirotor . . . . .	44
Figura 25 – Subsistema <i>FlightControlSystem</i> . . . . .	45
Figura 26 – Subsistemas do bloco <i>Command</i> . . . . .	46
Figura 27 – Plataforma de Testes. . . . .	47
Figura 28 – Sinais de referência modificados. . . . .	48
Figura 29 – Quadrirotor executando o algoritmo de voo em um dos ensaios experimentais realizados. . . . .	50

Figura 30 – Banco de dados com informações da bateria do quadricóptero obtidas nos 10 ensaios realizados. . . . .	50
Figura 31 – Curva de descarga da bateria obtida experimentalmente. . . . .	52
Figura 32 – Curva de descarga da bateria antes do filtro média móvel(Curva em azul), e a curva de descarga da bateria após a aplicação do filtro média móvel(Curva em vermelho). . . . .	53
Figura 33 – Interface do <i>Toolbox system Identification</i> . . . . .	55
Figura 34 – Abrindo a janela de importação de dados. . . . .	55
Figura 35 – Importando os dados experimentais. . . . .	56
Figura 36 – Abrindo a janela <i>polynomial Models</i> . . . . .	57
Figura 37 – Janela <i>polynomial Models</i> . . . . .	57
Figura 38 – Comparação entre modelo real(em azul) e o modelo estimado(em vermelho) para os Mínimos Quadrados não Recursivos considerando o erro(em verde) como a diferença entre o valor real e estimado . . . . .	61
Figura 39 – Ambiente de validação. . . . .	62
Figura 40 – Resultados da validação dos modelos ARX, ARMAX e BJ.. . . .	63
Figura 41 – Etapa 1 da instalação do <i>toolbox</i> : Abrindo a janela principal do software <i>Matlab</i> . . . . .	70
Figura 42 – Etapa 2 da instalação do <i>toolbox</i> : Abrindo a janela do <i>Add-Ons Explorer</i> . . .	71
Figura 43 – Etapa 3 da instalação do <i>toolbox</i> : Localizando o <i>Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones</i> . . . . .	71
Figura 44 – Etapa 4 da instalação do <i>toolbox</i> : Selecionando o <i>toolbox</i> desejado . . . . .	72
Figura 45 – Etapa 5 da instalação do <i>toolbox</i> : Iniciando a instalação. . . . .	72
Figura 46 – Etapa 6 da instalação do <i>toolbox</i> : Finalizando a instalação . . . . .	73
Figura 47 – Abrindo a janela de busca de dispositivos bluetooth. . . . .	74
Figura 48 – Iniciando a busca por dispositivos bluetooth próximos . . . . .	75
Figura 49 – Selecionando o quadricóptero <i>Rolling Spider</i> e adicionando-o à lista de dispositivos	75
Figura 50 – Abrindo a janela de serviços Bluetooth . . . . .	76
Figura 51 – Conectando ao quadricóptero utilizando uma rede ad-hoc de grupo(GN) . . . .	76
Figura 52 – Etapa 1 (Comunicação): Abrindo a janela de configuração de Parâmetros da planta e sensores. . . . .	77
Figura 53 – Etapa 2 (Comunicação): Abrindo a aba de configuração do Hardware . . . .	78

Figura 54 – Etapa 3 (Comunicação): Setando o Modelo do hardware como <i>Rolling Spider</i> .	78
Figura 55 – Etapa 4 (Comunicação): Finalizando a configuração de Parâmetros da planta e sensores . . . . .	79
Figura 56 – Etapa 5 (Comunicação): Abrindo o bloco de Controle do Sistema . . . . .	79
Figura 57 – Etapa 6 (Comunicação): Abrindo a configuração de parâmetros do bloco de controle do sistema. . . . .	80
Figura 58 – Etapa 8 (Comunicação): Abrindo o subsistema do bloco de controle. . . . .	80
Figura 59 – Etapa 9 (Comunicação): Abrindo o bloco de estimação de estados . . . . .	81
Figura 60 – Etapa 10 (Comunicação): Abrindo a configuração de parâmetros do estimador de estados. . . . .	81
Figura 61 – Etapa 12 (Comunicação): Abrindo o bloco de controle de estabilidade . . . . .	82
Figura 62 – Etapa 13 (Comunicação): Abrindo a configuração de Parâmetros do bloco de controle de estabilidade . . . . .	82
Figura 63 – Etapa 15 (Comunicação): Ativando a aquisição de dados de voo. . . . .	83
Figura 64 – Etapa 16 (Comunicação): Enviando a simulação para o quadricóptero . . . . .	83

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ARMAX	Auto regressivo com média móvel e entradas exógenas
ARX	Auto regressivo com entradas exógenas
BJ	Box-Jekins
GAIC	Grupo de Automação Industrial e Controle
Li-Po	Lithium-Ion Polímero
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MQNR	Mínimos Quadrados não Recursivos
SOC	Estado de carga
VANTs	veículos aéreos não tripulados

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivações e Justificativa</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<b>1.2.1</b>	<i>Objetivo Geral</i>	<b>17</b>
<b>1.2.2</b>	<i>Objetivos Específicos</i>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>QUADRIROTORES</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Um Breve Histórico</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Topologias de Quadrirotos Existentes</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1</b>	<i>AR.Drone</i>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Parrot Rolling Spider</i>	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<i>Draganflyer</i>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Dinâmica do Sistema</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>BATERIAS</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Efeito de Recuperação</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Nível Cutoff</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Efeito de Taxa de Capacidade</b>	<b>31</b>
<b>3.4</b>	<b>Modelos de Baterias</b>	<b>31</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Modelos Eletroquímicos</i>	<b>32</b>
<b>3.4.2</b>	<i>Modelos Elétricos</i>	<b>32</b>
<b>3.4.3</b>	<i>Modelos Analíticos</i>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Conceitos Gerais</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelos Paramétricos Lineares</b>	<b>35</b>
<b>4.2.1</b>	<i>Modelo ARX</i>	<b>36</b>
<b>4.2.2</b>	<i>Modelo ARMAX</i>	<b>37</b>
<b>4.2.3</b>	<i>Modelo BJ</i>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Estimador dos Mínimos Quadrados não Recursivos</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>

5.1	<i>Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones</i> . . . . .	41
5.2	<b>Simulação AsbQuadcopter</b> . . . . .	42
5.2.1	<i>Bloco Airfame</i> . . . . .	44
5.2.2	<i>Bloco FCS</i> . . . . .	45
5.2.3	<i>Bloco Command</i> . . . . .	45
5.2.4	<i>Bloco Sensors</i> . . . . .	46
5.2.4.1	<i>Bloco Environment</i> . . . . .	46
5.2.5	<i>Bloco Visualization</i> . . . . .	47
5.3	<b>Plataforma de teste</b> . . . . .	47
5.4	<b>Aquisição de dados</b> . . . . .	48
5.5	<b>Condicionamento dos dados experimentais</b> . . . . .	51
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	54
6.1	<b>Modelagem Matemática</b> . . . . .	54
6.1.1	<i>Estimação dos parâmetros</i> . . . . .	54
6.1.2	<i>Modelo ARX</i> . . . . .	58
6.1.3	<i>Modelo ARMAX</i> . . . . .	59
6.1.4	<i>Modelo Box-Jenkins</i> . . . . .	59
6.1.5	<i>Modelo MQNR</i> . . . . .	61
6.2	<b>Validação dos modelos</b> . . . . .	62
6.3	<b>Identificação da melhor estrutura</b> . . . . .	63
7	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	65
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	67
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	70
	<b>APÊNDICE A</b> – Instalação do <i>Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones</i> . . . . .	70
	<b>APÊNDICE B</b> – Conexão Bluetooth entre o computador e o quadricóptero utilizando um Dongle Low Energy Bluetooth USB 4.0 . . . . .	74
	<b>APÊNDICE C</b> – Envio da simulação e obtenção dos registros de voo via bluetooth . . . . .	77
	<b>APÊNDICE D</b> – <i>Implementação em Matlab- Condicionamento dos dados experimentais e implementação do método MQNR</i> . . . . .	84

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário da aviação, diversos veículos aéreos têm sido desenvolvidos para uso civil e militar, contudo, a presença de um piloto em tais veículos sempre era obrigatória. Com o avanço tecnológico, sistemas de alta complexidade foram desenvolvidos, possibilitando o controle das aeronaves de forma remota ou autônoma. Neste contexto surge, então, os veículos aéreos não tripulados (VANTs), uma aeronave munida de um sistema embarcado inteligente ligado a diversos sensores e atuadores, tornando esse veículo capaz de realizar diversas atividades com objetivo pessoal ou profissional(SILVA; CORDEIRO, 2011).

Atualmente há diversos modelos e tamanhos de VANTs presentes no mercado, porém estes são divididos em dois grupos: asa fixa e asa rotativa. As aeronaves do tipo asa fixa dependem de pistas para pouso e decolagem, apresentam altas rotações em seus propulsores, executam voos de longa duração, e possuem elevada capacidade de carga. Porém uma desvantagem deste tipo de aeronave é caracterizada pela dependência de um movimento frontal constante para se manter planando, reduzindo assim os raios de manobrabilidade e curvas(CÂNDIDO, 2015; SANTANA, 2016). A Figura 1 a seguir ilustra um VANT do tipo asa fixa existente no mercado:

Figura 1 – Aeronave do Tipo Asa Fixa (Drone Maptor)



Fonte: (HORUS, 2019).

Já os veículos aéreos não tripulados do tipo asa rotativa são caracterizados como aeronaves do tipo VTOL(do inglês: *Vertical Takeoff and Landing*), o termo VTOL refere-se

a capacidade da aeronave pousar e decolar verticalmente. Segundo SANTANA (2016), os veículos do tipo asa rotativa são os mais utilizados em aplicações civis por apresentar uma alta manobrabilidade, e principalmente pela capacidade de pairar sobre um determinado alvo.

Dentre os diversos modelos de aeronaves do tipo asa rotativa se destacam os quadricópteros, veículo bastante utilizado em monitoramento ambiental, manutenção de linhas de transmissão elétrica, mapeamento geográfico, resgate, vigilância, dentre outras aplicações (CÂNDIDO, 2015). Conforme COSTA (2008), um quadricóptero é composto por quatro propulsores distribuídos em cada extremidade de um corpo em formato de uma cruz. Cada propulsor contém uma hélice acoplada em seu eixo. No entanto este tipo de veículo é considerado como sendo uma aeronave de fácil construção e baixo custo, porém apresenta uma dinâmica de voo difícil de estabilizar. A Figura 2 ilustra um VANT do tipo quadricóptero:

Figura 2 – Quadricóptero Parrot AR Drone 2.0



Fonte: (PARROT, 2019).

Além do desenvolvimento de protótipos de baixo custo, outros dois fatores contribuíram de forma significativa para o aumento da utilização de quadricópteros em diversas áreas. O primeiro fator consiste no aumento da contribuição de pesquisadores para o controle de trajetória e estabilidade deste tipo de aeronave (SILVA, 2015). Já o segundo fator consiste na versatilidade obtida a partir do auxílio de uma fonte de energia denominada bateria (ROMIO *et al.*, 2012). No projeto de quadricópteros o tempo de vida da bateria é considerado uma das características mais importantes, pois indica o tempo que a aeronave irá operar sem a necessidade de conectar a uma fonte externa.

A autonomia de voo deste tipo de aeronave está intrinsecamente ligado às limitações



de tamanho, peso e capacidade de armazenamento da bateria acoplada em sua fuselagem. Assim é notório a necessidade, por parte dos fabricantes de baterias desenvolverem produtos que atendam a essas limitações e proporcionem uma maior capacidade de armazenamento (ROMIO, 2013), conseqüentemente uma maior segurança e autonomia de voo.

Outra necessidade importante é a utilização de métodos capazes de realizar o prognóstico do tempo de vida de baterias, para a referida predição utilizam-se diversas técnicas para modelar as características de descarga de uma bateria, os modelos matemáticos com amplo destaque na literatura são os de enfoque analítico, elétrico, estocástico, híbrido e experimental (DOUGLAS *et al.*, 2018). O método experimental não tem sido utilizado no contexto de VANTs, por ser inviável do ponto de vista econômico, e pelo motivo apresentar dificuldades na implementação (ROMIO, 2013), pois o tempo de vida da bateria dos quadricópteros dependem também de fatores externos que atuam no sistema dinâmico da aeronave através de distúrbios. Uma das formas de se obter o tempo de vida de uma bateria consiste na análise de sua curva de descarga.

O presente trabalho aborda conceitos gerais a respeito dos principais modelos utilizados para descrever matematicamente o perfil de descarga de uma bateria, porém, nele são aplicadas técnicas de identificação de sistemas para obter um modelo acurado que caracterize a curva de descarga da bateria de um VANT do tipo quadricóptero *Rolling Spider*. Vale ressaltar que os modelos matemáticos provenientes da teoria de identificação de sistemas são obtidos a partir de dados do sistema dinâmico real (DOUGLAS *et al.*, 2018).

Observações adicionais acerca de quadricópteros, baterias, estruturas de modelos da teoria de identificação de sistemas utilizados para modelar o perfil de descarga de baterias são apresentados durante os capítulos e seções seguintes.

## **1.1 Motivações e Justificativa**

Ao longo dos anos, os veículos aéreos não tripulados do tipo quadricóptero tem sido utilizados em diversos tipos de atividade, tais como: Segurança, monitoramento ambiental, mapeamento geográfico, aerofotografias, manutenção de linhas de transmissão, resgate, vigilância, além de aplicações industriais (CÂNDIDO, 2015).

A utilização e mobilidade deste tipo de VANT está condicionada ao uso de uma fonte de alimentação móvel, denominada bateria, que fornece energia ao sistema do veículo, possibilitando sua utilização de forma remota ou autônoma por um determinado tempo sem ser

conectado à uma fonte de alimentação externa (ROMIO, 2013). Os VANTs do tipo quadrirotor utilizados em aplicações de uso civil e militar operam de forma remota, ou seja, controlados sem a necessidade de pilotos dentro do veículo. A ocorrência de falha na bateria, ocasiona falta de energia para alimentar o sistema da aeronave, proporcionando assim perdas econômicas por comprometimento da atividade desempenhada pelo veículo, e por extravio ou dano provenientes de tombos da aeronave. Sendo assim, para uma maior confiabilidade e segurança no decorrer do voo, torna-se necessário a utilização de métodos capazes de realizar a predição do tempo de vida de baterias para este tipo de veículo. Diversos modelos matemáticos são utilizados para realizar prognósticos de falhas em baterias no quesito de tempo de vida, porém, poucos consideram fatores externos que atuam no sistema em forma de distúrbios.

Com base nessas premissas, diante de pesquisas, este trabalho tem por motivação obter a modelagem matemática do perfil de descarga da bateria de um quadrirotor *Rolling Spider*, utilizando as estruturas modelos ARX, ARMAX, BJ, e MQNR da teoria de identificação de sistemas. Para a referida modelagem matemática será considerado a variação no consumo da bateria da aeronave durante o voo e os efeitos das perturbações provenientes do ambiente de voo. Posteriormente os modelos matemáticos obtidos serão comparados, de modo a identificar o modelo que apresenta uma maior acurácia.

## 1.2 Objetivos

Nesta Seção serão apresentados os objetivos do presente trabalho de conclusão de curso. Para uma melhor concepção os objetivos foram organizados em duas Subseções: objetivo geral e objetivos específicos, conforme apresentado a seguir.

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

Realizar a modelagem matemática da curva de descarga da bateria de um quadrirotor *Rolling Spider* utilizando estruturas de modelos da teoria de identificação de sistemas, com o objetivo de identificar qual modelo matemático apresenta maior acurácia. A estimação e validação dos parâmetros de cada modelo é realizada a partir de ensaios experimentais utilizando o VANT quadrirotor *Parrot Rolling Spider* em conjunto com o Software *Matlab/Simulink*. Nos ensaios foram considerados as variações no consumo da bateria durante o voo, manobras de decolagem e pouso, além do consumo em meio a perturbações provenientes do ambiente de voo.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Comunicar via Bluetooth um quadricóptero *Rolling Spider* com o software *Matlab/Simulink*.
- Enviar algoritmos de controle de voo, controle de trajetória, e aquisição dos dados de monitoramento energético da bateria do quadricóptero *Rolling Spider*, levando em consideração manobras de decolagem, pouso, e perturbações externas.
- A partir dos dados obtidos em ensaios reais, com o quadricóptero pairando, realizar a modelagem matemática da curva de descarga da bateria utilizando as estruturas de modelos paramétricos lineares ARX, ARMAX, e BJ, além do estimador dos Mínimos Quadrados não Recursivos (MQNR).
- Utilizar a ferramenta computacional *systemIdentification* do software *Matlab/Simulink*, para estimar e validar os parâmetros dos modelos matemáticos ARX, ARMAX, e Box-Jenkins.
- Identificar o modelo matemático que melhor representa a curva de descarga da bateria utilizada em quadricópteros *Rolling Spider*, ou seja, identificar o modelo que apresenta uma maior acurácia.

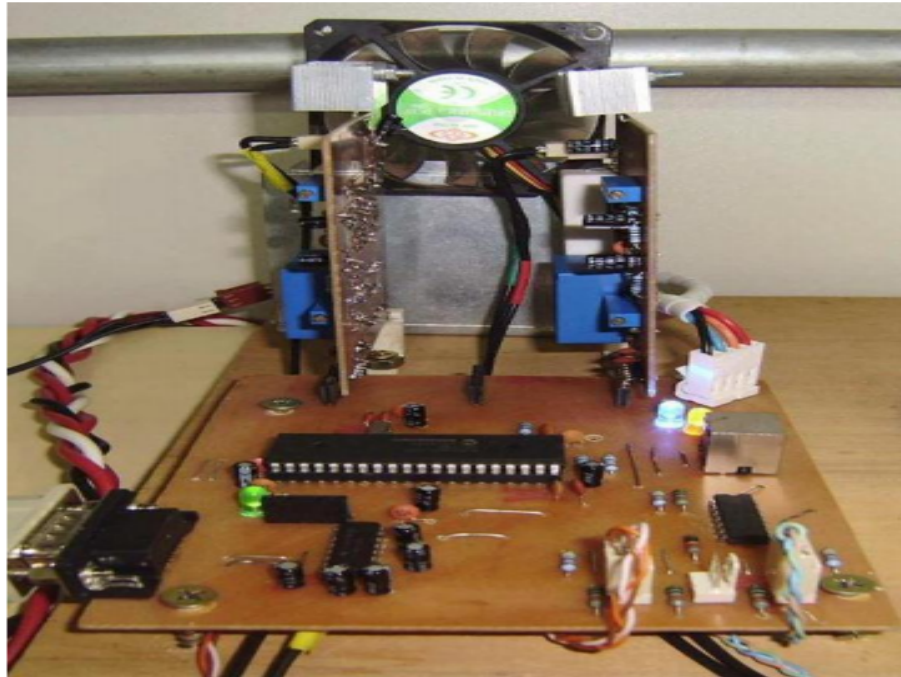
### 1.3 Estado da Arte

Atualmente, os veículos aéreos não tripulados do tipo asa rotativa vem sendo utilizados em diversas áreas, realizando atividades importantes no setor agrícola, de segurança, monitoramento, mapeamento geográfico, dentre outros. O aumento na utilização deste tipo de veículo deve-se ao empenho de diversos pesquisadores, e profissionais da área de tecnologia que tem contribuído através de estudos e trabalhos com o objetivo de obter maior confiabilidade e autonomia de voo. A predição do tempo de vida de baterias utilizadas em quadricópteros é crucial, pois as baterias são componentes críticos cuja falha pode impactar no funcionamento do sistema do quadricóptero. Uma forma de se obter o tempo de vida de baterias consiste na utilização de modelos matemáticos que simulam a curva de descarga deste dispositivo armazenador de energia.

O trabalho proposto por Romio *et al.* (2012) dedica-se à modelagem matemática do tempo de vida de baterias de dispositivos móveis utilizando estruturas de modelos paramétricos lineares da teoria de identificação de sistemas. Os modelos matemáticos são estimados e validados com o auxílio da ferramenta *ident* do software *Matlab*. As estruturas de modelos

utilizadas foram ARX, ARMAX e BJ. Os parâmetros de cada modelo foram estimados a partir de dados do sistema real obtidos por uma plataforma experimental(Figura 3), nos ensaios experimentais foi utilizada uma bateria Modelo Nokia BL-5L(presente em celulares Nokia N95). Romio *et al.* (2012) finaliza seu trabalho comparando os modelos estimados com o modelo real(experimental) e identificando qual modelo estimado apresentou melhor resultado.

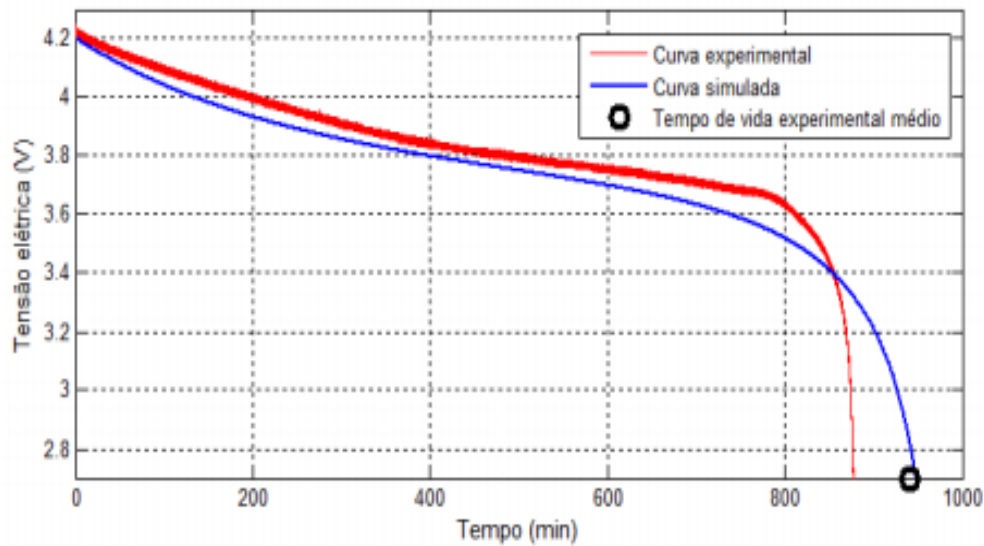
Figura 3 – Plataforma experimental utilizada na aquisição de dados.



Fonte: (ROMIO *et al.*, 2012)

Outras abordagens matemáticas são aplicadas para modelar a curva de descarga de baterias, Brondani *et al.* (2016) em seu trabalho apresenta a modelagem matemática da curva de descarga de baterias de Lítio Íon Polímero a partir do modelo elétrico *Battery*. Parte dos parâmetros estimados para este modelo são obtidos a partir da análise de curvas de descarga reais, enquanto os demais parâmetros são obtidos com o auxílio do datasheet da bateria. As curvas reais de descarga utilizadas foram geradas com base em dados fornecidos a partir de uma plataforma de testes, desenvolvida pelo Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC) da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí). Após a estimação do modelo *Battery* é realizada a validação a partir da comparação entre o tempo de vida apresentados nas curvas dos modelos estimados e o tempo de vida apresentado nas curvas reais de descargas(obtidas com o auxílio da plataforma de testes). A Figura 1.4 a seguir mostra a comparação entre a curva de descarga de um modelo *Battery* estimado(curva em azul) e a curva de descarga real obtida experimentalmente(curva em vermelho):

Figura 4 – Plataforma experimental utilizada na aquisição de dados.

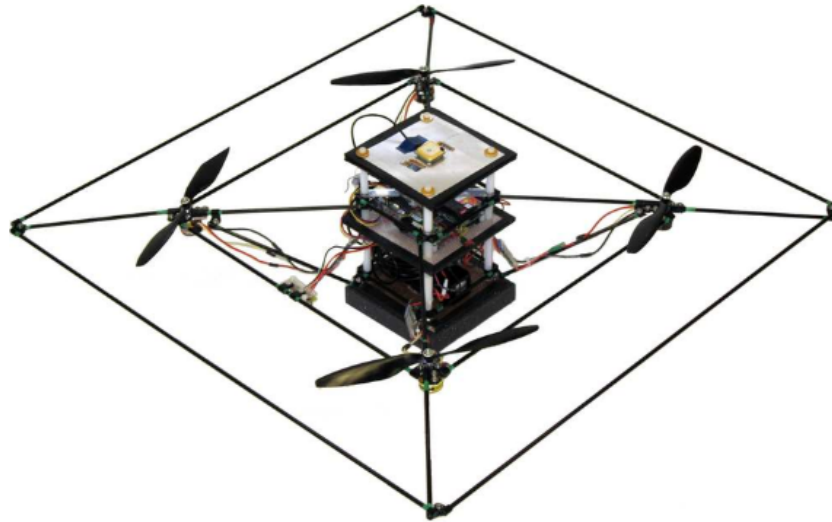


Fonte: (ROMIO *et al.*, 2012)

Garantir a confiabilidade e autonomia de voo através do monitoramento da bateria de VANTs tem se tornado um quesito de grande importância em atividades de precisão e missões militares que utilizam este tipo de veículo. CÂNDIDO 2015, em seu trabalho propõe um sistema de gerenciamento de voo de quadrirotos tolerante a falhas considerando as restrições energéticas deste tipo de veículo. Nesse trabalho é implementado um controlador preditivo em conjunto com um filtro híbrido estocástico a um algoritmo de monitoramento e prognóstico de falhas.

Além do controle de estabilidade, monitoramento e prognósticos de falhas de baterias, outra importante problemática a ser tratada para utilização de VANTs consiste no desenvolvimento de algoritmos de tomada de decisão voltados a um melhor aproveitamento energético das baterias, execução de voos autônomos com percursos predefinidos, e que evitem danos inerentes a colisões. Um grupo de pesquisadores da Universidade de Stanford desenvolveram um protótipo de quadrirotor com o intuito de validar diversos algoritmos de voos autônomos, alguns deles consistem em : realizar manobras agressivas; evitar colisões em voos colaborativos; e executar percursos definidos(HOFFMANN *et al.*, 2009). O protótipo desenvolvido encontra-se em sua segunda versão denominada: *Stanford Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi-Agent* (STARMAC II), Figura 5.

Figura 5 – Modelo final do protótipo STARMAC II



Fonte: (HOFFMANN *et al.*, 2007).

#### 1.4 Organização do Trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em 07 capítulos, que serão brevemente descritos a seguir:

- Capítulo 1: Este capítulo introduz o tópico deste trabalho de conclusão de curso, além dos principais objetivos, motivação, e estado da Arte.
- Capítulo 2: Apresenta uma breve histórico sobre quadrirotores, além de expor as principais topologias utilizadas na área de pesquisa. Por fim, neste capítulo é apresentado como ocorre a dinâmica de voo dos quadrirotores.
- Capítulo 3: Este capítulo introduz conceitos específicos sobre as principais características e propriedades de baterias, além de apresentar os principais modelos de bateria tratados na literatura.
- Capítulo 4: Este capítulo introduz conceitos gerais relacionados a teoria de identificação de sistemas, bem como os as estruturas de modelos ARX, ARMAX, Box-Jenkins e Mínimos Quadrados não Recursivos (MQNR).
- Capítulo 5: Este capítulo introduz conceitos gerais sobre a simulação e o *toolbox* utilizados neste projeto para criar, editar e enviar algoritmos de voo através da comunicação bluetooth estabelecida entre o computador e o hardware do quadrirotor *Rolling Spider*. Neste capítulo também é apresentado o passo a passo para aquisição em tempo real e condicionamento dos dados de descarga da bateria do quadrirotor.
- Capítulo 6: Apresenta a modelagem matemática da curva de descarga da bateria do

quadrirotor *Rolling Spider*, utilizando a teoria de identificação de sistemas. Neste capítulo também é realizada a validação dos modelos matemáticos obtidos, além da identificação do modelo que melhor representa a curva de descarga da bateria.

- Capítulo 7: Apresenta a conclusão deste trabalho e expõe perspectivas para trabalhos futuros.

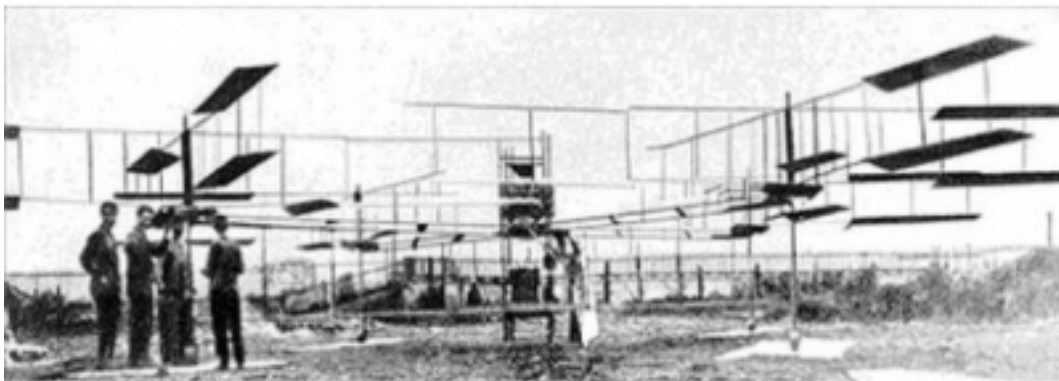
## 2 QUADRIROTORES

Neste capítulo são apresentados os primeiros quadrirotos que obtiveram sucesso em seus voos (Seção 2.1), descreve algumas topologias de quadrirotos utilizadas na área de pesquisa (Seção 2.2). Neste capítulo também é apresentado o princípio da dinâmica de voo de um VANT do tipo quadrirotor (Seção 2.3).

### 2.1 Um Breve Histórico

A topologia de quadrirotos surgiu no início do século XX trazendo a ideia de veículos que possuíssem quatro rotores orientados em direção vertical. Diante desse tema, faz consigo um breve fato histórico e alguns quadrirotos produzidos. Em 1907, Charles Richet e os irmãos Breguet criaram o primeiro quadrirotor (*Bréguet-Richet Quad-Rotor Helicopter*), onde a ideia inicial era ser conduzido por um piloto controlando quatro rotores, como pode ser observado na Figura 6. Este pesava 578 quilogramas e continha um mecanismo simplificado ligando os controles do piloto aos rotores. Devido sua massa elevada e sua larga extensão, o quadrirotor não conseguiu estabilidade suficiente para ser pilotado, vindo a levantar apenas 1,5 metros. Mesmo não obtendo êxito completo, foi idealizada a teoria dos pares de rotores girarem em sentidos, sendo utilizada até nos dias atuais. (COSTA, 2008).

Figura 6 – Primeiro Quadrirotor, 1907.



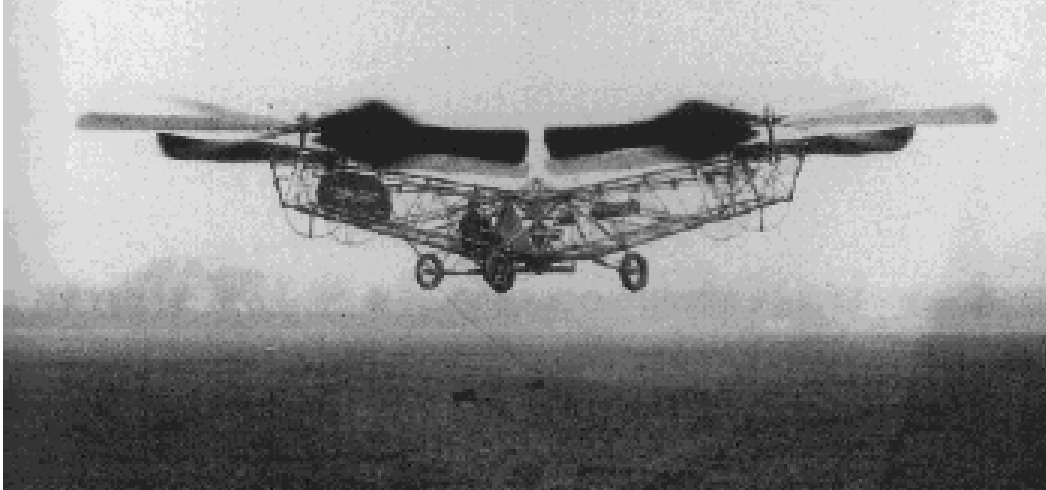
Fonte: (LEISHMAN, 2000).

No ano de 1920, Etienne Oemiche, criou uma aeronave que continha quatro motores e oito hélices. Devido a estabilidade e controlabilidade da aeronave, a mesma conseguia voar por exatamente 1000 metros. Dois anos após a criação da aeronave de Etienne Oemiche, Bothezat, com ajuda do exército americano, desenvolveu o primeiro quadrirotor (*Octopus Voador*), que tinha capacidade para transportar um passageiro e fazer voos aéreos rasos com baixa velocidade



(Figura 7). Por motivos de desempenho insatisfatório e ter um alto custo financeiro, o projeto de Bothezar foi cancelado (LEISHMAN, 2000).

Figura 7 – Octopus Voador, 1922.



Fonte: (LEISHMAN, 2000).

## 2.2 Topologias de Quadrirotores Existentes

O grande avanço tecnológico e pesquisas com quadrirotores, possibilitaram que vários laboratórios de pesquisa e universidades começassem projetos que ofereceram aos quadrirotores a capacidade de miniaturização e voos autônomos. (MAHONY; ROBERTS, 2002). Em contrapartida o avanço do voo autônomo ainda é um desafio para determinados ambientes.

### 2.2.1 AR.Drone

O AR.Drone, a princípio foi produzido para diversão tendo como controle um celular ligado a uma rede Wi-Fi que disponibiliza ao usuário, em forma de realidade aumentada, vídeos e fotos em tempo real. O drone já se encontra na sua segunda versão (Parrot AR.Drone 2.0), Figura 8, entre suas especificações encontramos um processador ARM Cortex A8 1 GHz 32-bit, sistema operacional Linux 2.6.32, memória RAM DDR2 de 1GB, acelerômetro, giroscópio, sensor de pressão e câmera vertical QVGA 60FPS (PARROT, 2019).

O modelo Parrot AR.Drone 2.0 ainda contém 4 motores "inrunner" tipo brush-free de 14,5 watts e 28,500 revolução / minuto, micro rolamento de esferas, nylatron gears, rolamentos auto compensadores de bronze, peso com moldura interna 380 gramas e com moldura externa 420 gramas.

Figura 8 – Parrot AR.Drone 2.0 Elite Edition



Fonte: (PARROT, 2019).

### 2.2.2 Parrot Rolling Spider

O mini VANT Aranha Rolante (do Inglês: *Rolling Spider*), como o nome já sugere, tem o formato semelhante ao de uma aranha com rodas, este veículo consiste em um quadricóptero de baixo custo, munido da capacidade de capturar imagens durante o voo (HYPE, 2017). A Figura 9 a seguir ilustra um VANT do tipo quadricóptero Rolling Spider.

Figura 9 – Parrot Rolling Spider



Fonte: (MODELSPEED, 2019).

O VANT Aranha Rolante é controlado por conexão via Bluetooth, a partir de um smartphone ou tablet utilizando o aplicativo *FreeFlight*. Este veículo aéreo pode realizar diversos tipos movimentos mantendo uma boa estabilidade por contar com três eixos de giroscópio e três

de acelerômetro, além de possuir uma memória de 1 Gibabyte para armazenamento interno. Já autonomia da bateria do Aranha Rolante é de até 8 minutos no ar(HYPE, 2017).

No ambiente de pesquisas podemos, a partir do software MATLAB, criar algoritmos que se conectem via Bluetooth com o drone para obter informações de sensores como acelerômetro, giroscópio, ultrassom e de pressão atmosférica.

### 2.2.3 *Draganflyer*

O Dranganflyer é um quadricóptero que permite ao usuário controlá-lo através de um transmissor de rádio (R/C) e tem uma estrutura que é constituída com tubos de fibra de carbono que permitem possuir um peso menor comparado aos quadricópteros do mesmo porte(POUNDS *et al.*, 2006). A Figura 10 a seguir ilustra um modelo de quadricóptero Draganflyer existente no mercado:

Figura 10 – Draganflyer X4-P



Fonte: (DRAGANFLYER, 2019).

Dentre os principais modelos fabricados se destacam o Draganfly M600 Pro Ag e o Draganflyer X4-P. No presente momento o Draganflyer é muito estudado nas universidades e laboratórios de pesquisa, por apresentar uma estrutura bastante flexível, eles o utilizam como base de suas investigações.

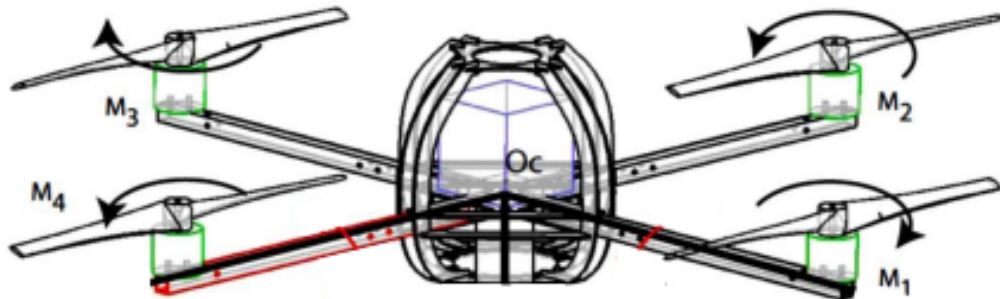
## 2.3 Dinâmica do Sistema

Os VANTs do tipo quadricóptero são formados por quatro propulsores dispostos simetricamente em um corpo rígido no formato de cruz. Cada propulsor possui uma hélice acoplada

em seu eixo. Conforme DUARTE (2015), cada conjunto: propulsor-hélice é responsável por uma parcela da força de sustentação da aeronave. Esta parcela gera uma certa quantidade de torque sobre o centro de rotação com sentido oposto ao sentido de giro da hélice, e uma força de arrasto oposto ao sentido de voo. A Figura 11 a seguir ilustra o modelo convencional de um quadricóptero:

Para que o momento angular total proveniente dos propulsores seja nulo, um par de propulsores (M1 e M3) deve girar em um sentido, enquanto o outro (M2 e M4) deve girar no sentido reverso conforme a Figura 11 a seguir:

Figura 11 – Modelo de quadricóptero utilizado

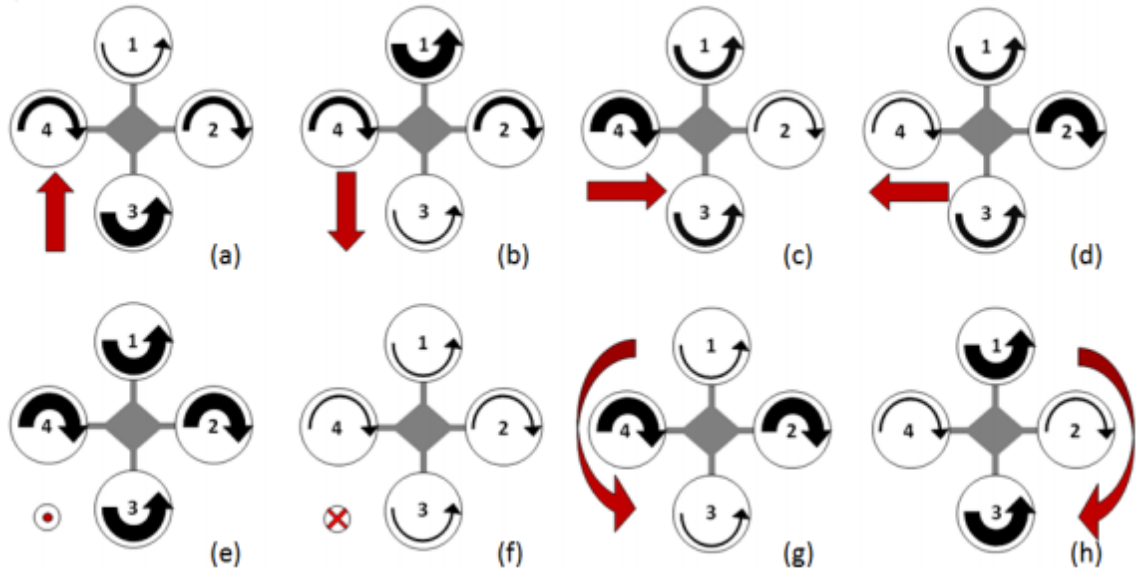


Fonte: (DUARTE, 2015).

Para a configuração ilustrada na figura 11: o torque proveniente de M1 anula o torque gerado por M4, de modo análogo o torque proveniente de M2 anula o torque gerado por M3, mantendo assim o corpo rígido da aeronave em equilíbrio quando os propulsores possuírem a mesma velocidade de rotação (SÁ, 2012).

A Figura 12 a seguir ilustra os possíveis movimentos realizados pelo quadricóptero a partir da variação da velocidade angular dos propulsores: M1(1), M2(2), M3(3), e M4(4). Nela os propulsores M2(2) e M4(4) giram no sentido horário, enquanto M1(1) e M3(3) giram no sentido anti-horário. A largura da seta é diretamente proporcional a velocidade de giro do propulsor.

Figura 12 – Descrição da variação da velocidade angular dos propulsores (setas em preto) e movimento executado pela aeronave (setas em vermelho)



Fonte: (SÁ, 2012).

Segundo SÁ (2012) ao manter a velocidade de M2(2) e M4(4) inalterada, e aumentando a velocidade de M3(3) em relação a M1(1) a aeronave é deslocada para frente, Figura 12 (a). O deslocamento no sentido oposto ocorre quando a velocidade de M2(2) e M4(4) é mantida inalterada, e a velocidade de M1(1) é maior em relação a de M3(3), Figura 12 (b).

O deslocamento da aeronave para direita é obtido mantendo a velocidade de M1(1) e M3(3) inalterada, e aumentando a velocidade de M4(4) em relação a M2(2), Figura 12 (c). Já o deslocamento para esquerda é obtido mantendo a velocidade de M1(1) e M3(3) inalterada, e aumentando a velocidade de M2(2) em relação a M4(4), Figura 12 (d).

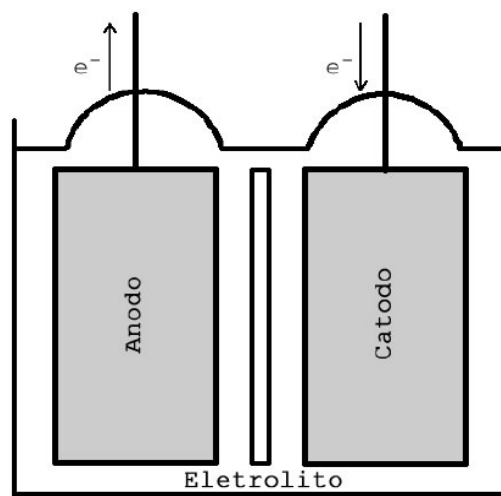
Com o aumento simultâneo da velocidade de rotação de todos os propulsores, a aeronave se desloca para cima, Figura 12 (e). Já com a diminuição simultânea da velocidade de rotação de todos os propulsores a aeronave se desloca para baixo, Figura 12 (f).

Por fim com a variação simultânea da velocidade de dois propulsores situados no mesmo eixo do corpo rígido da aeronave produz um torque em torno do eixo, gerando um movimento acelerado rotacional. Portanto com o aumento simultâneo da velocidade de M2(2) e M4(4), e mantendo a velocidade de M1(1) e M3(3) inalterada, o torque resultante faz com que a aeronave gire no sentido anti-horário, Figura 12 (g). De modo análogo com o aumento simultâneo da velocidade de M1(1) e M3(3), e mantendo a velocidade de M2(2) e M4(4) inalterada, o torque resultante faz com que a aeronave gire no sentido horário, Figura 12 (h).

### 3 BATERIAS

Uma bateria é constituída de células eletroquímicas que podem ser conectadas em série, paralelo, e em ligações mistas. Nessas células ocorre o processo de reação eletroquímica e com isso a energia química armazenada nas células é transformada em energia elétrica. O esquema de composição de uma célula eletroquímica (Figura 13) é formada por dois eletrodos: ânodo e cátodos, e entre esse eletrodos tem um eletrólito que os separa(ROMIO, 2013).

Figura 13 – Esquema de composição de uma célula eletroquímica.



Fonte: (ROMIO, 2013).

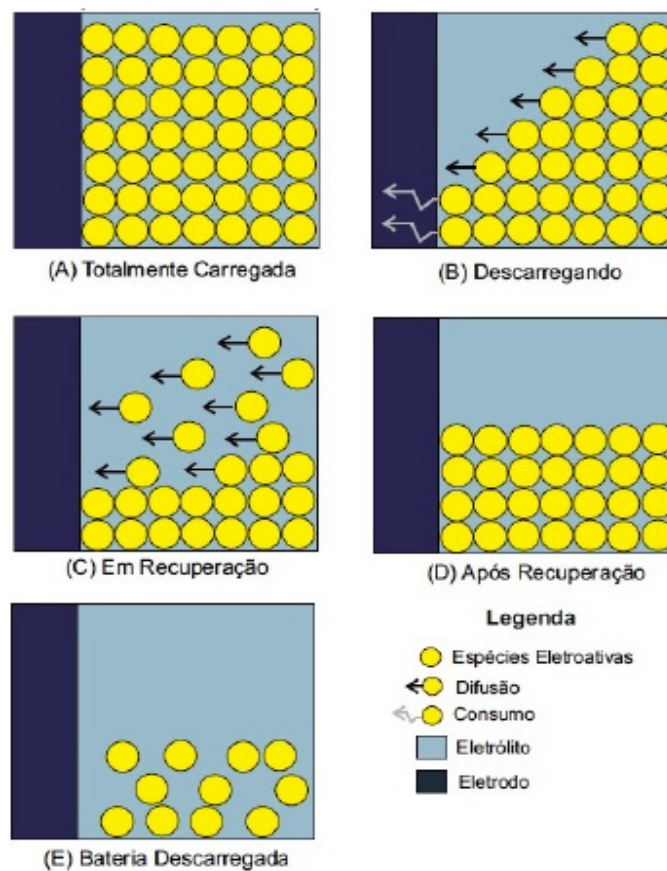
Quando ocorre o processo de descarga da bateria, na parte do ânodo acontece uma reação de oxidação, e na do cátodo o processo é uma reação de redução. Devido esses processos é que ocorre a troca de elétrons na célula eletroquímica. No processo de oxirredução, a Tensão (expressa em volts) e a capacidade (expressa em ampere-hora) são grandezas, que quando estudadas e feito o produto delas é possível mensurar o quanto de energia armazenada tem disponível na bateria. Considerando a grandeza Tensão no caso ótimo de descarga de uma bateria ideal é constante durante o período de descarregamento e tem uma queda instantânea a zero quando a bateria fica descarregada, com isso a capacidade ideal é constante no processo de descarga e toda a energia armazenada é utilizada no processo.

Quando se trata de um caso real, aparecem variáveis não-lineares que devem ser estudadas pois elas influenciam no tempo de vida útil da bateria.

### 3.1 Efeito de Recuperação

Um dos efeitos não-lineares que devem ser estudados é o Efeito de Recuperação, que ocorre em períodos de relaxação da bateria, onde há pouca energia para ser escoada. Nesse período ocorre uma reestruturação dos elétrons nas células e com isso um aumento da capacidade da bateria, isso acontece quando se tem uma quantidade significativa de carga antes do sistema chegar no nível do cutoff. Na Figura 14, pode ser observados os estágios do efeito de recuperação da bateria:

Figura 14 – Estágios de operação da bateria.



Fonte: (ROMIO, 2013).

Em ‘A’ a bateria está na sua totalidade de carga, onde pode ser observado que em todo comprimento do eletrólito se tem um agrupamento de espécies eletroativas. Em ‘B’ acontece um descarregamento, onde é diminuída as especies eletroativas junto ao eletrodo. Depois disso, ocorre o momento de relaxação da bateria, que acontece quando a corrente de descarga se atenua, onde acontece a reestruturação dos elétrons, em ‘C’. Assim, aumenta o numero de especies eletroativas próximas ao eletrodo novamente, até o gradiente de concentração ficar inexistente,

com isso a capacidade efetiva da bateria é ampliada, onde pode ser visto em 'D'. Contudo, a quantidade de espécie eletroativas não consegue ser da mesma quantidade inicial, sendo menor do que tinha no início do processo. Em 'E' quando a bateria atinge um estágio inferior a carga, as reações eletroquímicas se findam e a bateria chega ao estágio de descarga (ROMIO *et al.*, 2012).

### **3.2 Nível Cutoff**

Outro efeito não-linear que deve ser estudados é o Nível Cutoff, ele é útil para estimar o tempo de vida da bateria. O nível de cutoff pode ser definido como o nível de capacidade mínima da bateria, pois toda bateria tem um nível de tensão para se manter funcionando e quando esse nível de tensão é atingido a bateria perde a funcionalidade e não consegue mais realizar as reações eletroquímicas nas células. Esse nível de cutoff não leva em consideração a descarga total, mas sim a possibilidade de manter as reações nas células(ROMIO, 2013).

### **3.3 Efeito de Taxa de Capacidade**

O Efeito de Taxa de Capacidade também deve ser analisado, esse efeito leva em consideração a capacidade atual da bateria e a intensidade de corrente de descarregamento. Quando se tem correntes elevadas de descargas a capacidade efetiva é baixa, pois não tem tempo hábil para a reorganização das células, que é o Efeito de Recuperação. Já quando se tem cargas alternadas a capacidade efetiva aumenta, pois quando se tem um período sem fluxo de corrente os elétrons fazem um processo de reorganização aumentando assim a quantidade de carga na superfície do eletrodo. E assim aumentando a capacidade da bateria e por consequência um aumento da quantidade de energia disponível na bateria(FRANSOZI, 2015).

### **3.4 Modelos de Baterias**

Nesta seção serão apresentados os principais modelos de baterias encontrados na literatura, e descritas as suas principais características e propriedades.



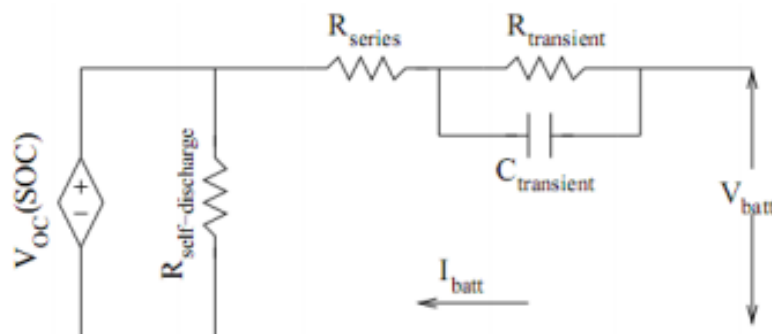
### 3.4.1 Modelos Eletroquímicos

Este modelo baseia-se nos processos químicos ocorrentes na bateria. Por sua acurácia e descrição detalhada, estes processos tornam-se altamente complexos e difíceis de implementar devido a grande quantidade de parâmetros da bateria que devem ser definidos pelo usuário. Doyle, Fuller e Newmann desenvolveram um modelo eletroquímico para células de Li-Íon. Este modelo é composto por um conjunto de seis Equações Diferenciais Parciais (EDPs), acopladas e não lineares (ROMIO, 2013).

### 3.4.2 Modelos Elétricos

Descreve a bateria na forma de circuito, utilizando a combinação de componentes elétricos passivos, tais como: resistores, capacitores e indutores. Estes modelos levam em consideração os efeitos não-lineares descritos nas seções 3.1 e 3.3, sua simulação é de fácil compreensão, realizada em simuladores de circuito elétricos. O modelo Elétrico de Thevenin (Figura 15) utiliza um resistor  $R_{series}$  e uma associação Resistivo-capacitivo em paralelo, formada pelo resistor  $R_{transient}$  e pelo capacitor  $C_{transient}$ , com o objetivo de representar a resposta da bateria para cargas transientes em um estado particular de carga, assumindo constante a tensão de circuito aberto  $V_{OC}(SOC)$ . No entanto, o modelo elétrico de Thevenin não capturam as variações de tensão da bateria em regime permanente, e a informação do tempo de vida (PORCIUNCULA, 2012).

Figura 15 – Modelo baseado em Thevenin.

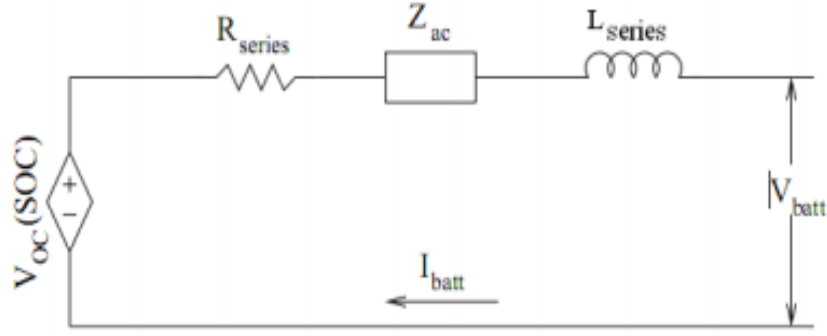


Fonte: (PORCIUNCULA, 2012).

Conforme Porciuncula (2012) os modelos baseados em Impedância (Figura 16) são compostos por uma associação em série de um resistor ( $R_{series}$ ), um indutor ( $L_{series}$ ), e uma impedância ( $Z_{ac}$ ). A impedância formada pela associação série do resistor com o indutor,

representa a resistência interna, e a impedância  $Z_{ac}$  caracteriza o equivalente eletroquímico da bateria. Estes modelos são incapazes de prever a resposta de perfis de descarga em corrente Constante (CC) ou o tempo de vida da bateria, uma vez que funcionam somente para uma temperatura definida, e um Estado de carga (SOC) constante.

Figura 16 – Modelo baseado em Impedância.



Fonte: (PORCIUNCULA, 2012).

### 3.4.3 Modelos Analíticos

São constituídos por um pequeno conjunto de equações que modelam as principais características de uma bateria. Os modelos analíticos descrevem a bateria de uma forma abstrata. Esse modelo é considerado como sendo de fácil implementação computacional. Dentre os principais modelos analíticos destacam-se os seguintes: Modelo linear, Lei de Peukert, e o Modelo de Difusão de Rakhmatov e Vrudhula (PORCIUNCULA, 2012).

## 4 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma rápida introdução à identificação de sistemas dinâmicos, bem como apresentar as principais estrutura de modelos paramétricos lineares utilizadas na literatura. Este capítulo está organizado como segue. Na Seção 4.1 são apresentados conceito gerais relacionados à identificação de sistemas. Na Seção 4.2 são apresentadas as estrutura de modelos paramétricos lineares utilizados no presente trabalho para modelar matematicamente a curva de descarga de um quadrirotor *Rolling Spider*. Por fim, na Seção 4.3 é apresentado o método de estimação dos parâmetros dos Mínimos Quadrados não Recursivos(MQNR)

### 4.1 Conceitos Gerais

Na literatura técnica há dois tipos de abordagem comumente utilizadas para modelar matematicamente a dinâmica de um sistemas, sendo elas: a modelagem conceitual, e por identificação de sistemas(ROMIO *et al.*, 2012).

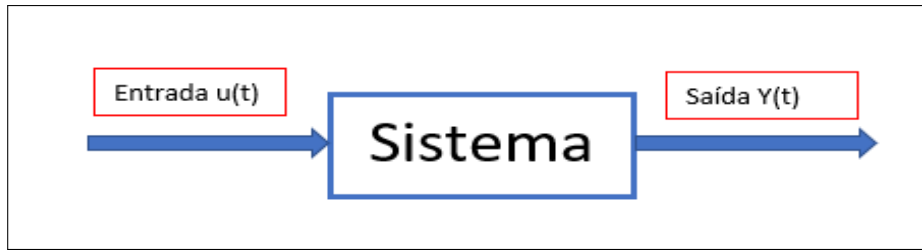
A abordagem conceitual é também conhecida como modelagem pela física ou natureza do processo, nela é necessário conhecer bem o sistema de estudo, bem como as leis da física que regem o sistema a ser modelado(AGUIRRE, 2007). A modelagem conceitual não é utilizada para modelar sistemas que envolve vários processos e nem sistemas complexos, pois as equações envolvidas se tornariam muito complexas ou até mesmo desconhecidas, conseqüentemente ocasionaria um aumento no tempo de análise e dificultaria a implementação computacional do sistema. Para tais sistemas complexos utiliza-se a modelagem por identificação de sistemas.

Conforme (AGUIRRE, 2007), na abordagem por identificação de sistemas é possível realizar a modelagem matemática tendo pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema. Nesta abordagem, quando não há nenhuma informação da física do sistema a identificação é denominada caixa preta. Já quando há alguma informação auxiliar, diferente das disponíveis no banco de dados utilizados, a identificação é denominada caixa cinza. Contudo pode-se analisar um sistema dinâmico no domínio do tempo ou no domínio da frequência, logo a identificação pode derivar modelos (lineares ou não lineares).

Tanto para modelagem caixa preta como para modelagem caixa cinza, os modelos matemáticos são estimados a partir de dados experimentais do sistema real. Basicamente, tais dados são sinais externos que podem ser manipulados por um observador, denominados entradas

$u(t)$ , e saídas  $y(t)$  do sistema, conforme ilustrado na Figura 17 a seguir:

Figura 17 – Representação de um sistema.



Fonte: Próprio Autor.

Para realizar a modelagem basta fazer a aquisição dos dados  $u(t)$  e  $y(t)$ , em seguida utilizá-los para estimar os parâmetros de estruturas de modelos existentes na teoria de identificação de sistemas.

No presente trabalho, para realizar a modelagem da curva de descarga da bateria de um quadricóptero *Rolling Spider*, serão utilizadas as estruturas de modelos: Auto regressivo com entradas exógenas (ARX), Auto regressivo com média móvel e entradas exógenas (ARMAX), Box-Jenkins (BJ), e Mínimos Quadrados não Recursivos (MQNR).

## 4.2 Modelos Paramétricos Lineares

A estrutura geral representada em tempo discreto pode ser representada da seguinte forma (AGUIRRE, 2007, p. 125):

$$A(q)y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)}v(k) \quad (4.1)$$

Onde:  $q^{-1}$  é o operador de atraso, de modo que  $y(k)q^{-1} = y(k-1)$ , e  $v(k)$  é considerado o ruído branco e  $A(q)$ ,  $B(q)$ ,  $C(q)$ ,  $D(q)$  e  $F(q)$  representam os polinômios definidos a seguir:

$$A(q) = 1 - a_1q^{-1} - \dots - a_{n_y}q^{-n_y} \quad (4.2)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + \dots + b_{n_u}q^{-n_u} \quad (4.3)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_v}q^{-n_v} \quad (4.4)$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{n_d}q^{-n_d} \quad (4.5)$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{n_f}q^{-n_f} \quad (4.6)$$

Onde:  $a_1 \dots a_{n_y}$ ,  $b_1 \dots b_{n_u}$ ,  $c_1 \dots c_{n_v}$ ,  $d_1 \dots d_{n_d}$  e  $f_1 \dots f_{n_f}$  são parâmetros que precisam ser estimados, e  $n_y$ ,  $n_u$ ,  $n_d$ ,  $n_e$ ,  $n_f$  são as ordens dos polinômios.

Com base em (4.1), realizando devidas modificações, é possível obter os principais modelos paramétricos lineares, conforme descrito a seguir (ROMIO *et al.*, 2012):

#### 4.2.1 Modelo ARX

O modelo ARX (do inglês: *Autoregressive with exogenous inputs*), pode ser obtido a partir de (4.1), adotando  $C(q) = D(q) = F(q) = 1$  sendo  $A(q)$  e  $B(q)$  polinômios arbitrários, tendo como resultado:

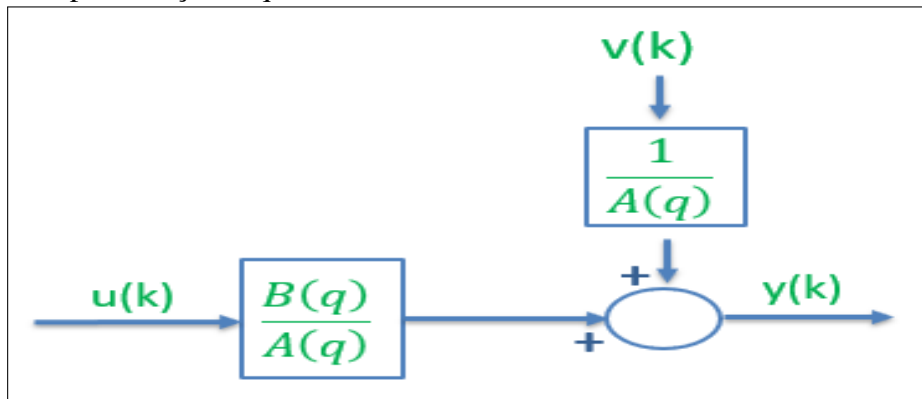
$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + v(k) \quad (4.7)$$

A representação discreta do modelo ARX(4.7) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{1}{A(q)}v(k) \quad (4.8)$$

A Figura 18 mostra a representação esquemática do modelo ARX, utilizando diagrama de blocos.

Figura 18 – Representação esquemática do modelo ARX.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2 Modelo ARMAX

O modelo ARMAX (do inglês *Autoregressive moving verage with exogenous input*), pode ser obtido a partir de (4.1), adotando  $D(q) = F(q) = 1$  e  $A(q)$ ,  $B(q)$  e  $C(q)$  como polinômios arbitrários, tendo como resultado:

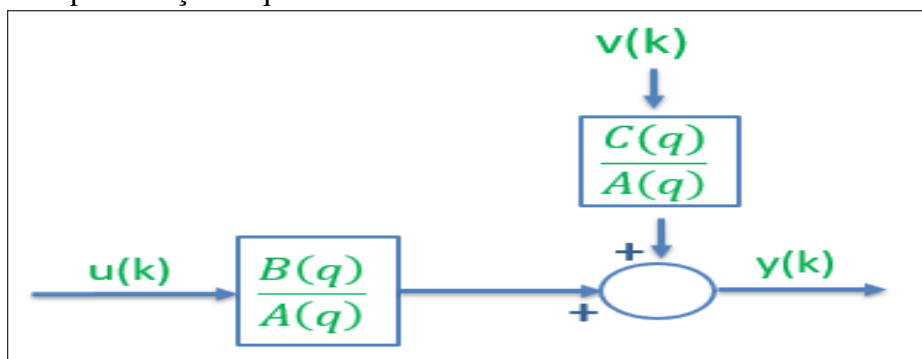
$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)v(k) \quad (4.9)$$

A representação discreta do modelo ARMAX(4.9) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{A(q)}v(k) \quad (4.10)$$

A Figura 19 mostra a representação esquemática do modelo ARMAX, utilizando diagrama de blocos.

Figura 19 – Representação esquemática do modelo ARMAX.



Fonte: Próprio Autor.

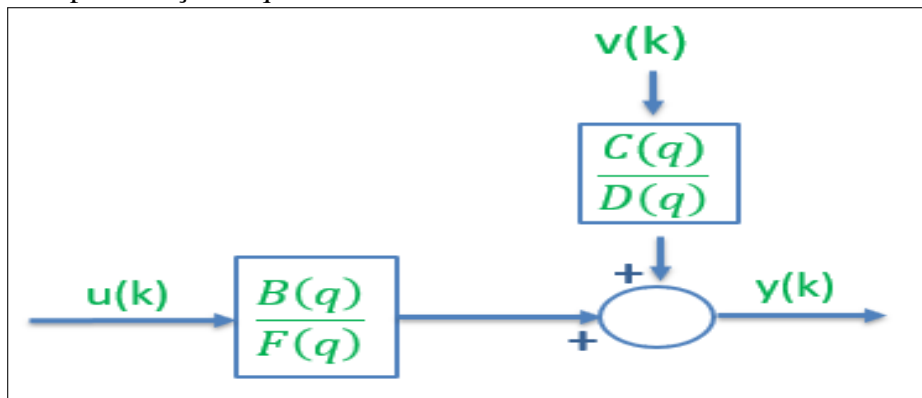
### 4.2.3 Modelo BJ

O modelo BJ (do inglês: Box-Jenkins) é obtido a partir de (4.1), adotando  $A(q) = 1$ . Todos os demais polinômios são arbitrários, obtendo como resultado:

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)}v(k) \quad (4.11)$$

A Figura 20 mostra a representação esquemática do modelo BJ, utilizando diagrama de blocos.

Figura 20 – Representação esquemática do modelo BJ.



Fonte: Próprio Autor.

### 4.3 Estimador dos Mínimos Quadrados não Recursivos

Conforme (CARMO *et al.*, 2010), para representar uma função de transferência discreta e linear de um sistema, deve-se considerar um processo físico obtido por uma entrada  $u(t)$ , uma saída  $y(t)$ , por uma perturbação  $e(t)$ , e com uma função de transferência discreta com a seguinte forma:

$$A(z^{-1})Y(z) = z^{-d}B(z^{-1})U(z) + E(z) \quad (4.12)$$

Onde:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_naz^{-na} \quad (4.13)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \quad (4.14)$$

A função de transferência discreta(4.12) pode ser representada a partir de uma equação de diferenças, tornando possível a simulação computacional:

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - \dots - a_{n_a}y(k-n_a) + \dots \\ \dots b_0u(k-d) + b_1u(k-d-1) + \dots + b_{n_b}u(k-d-n_b) + e(k) \quad (4.15)$$

Onde:  $a_1 \dots a_{n_a}$  e  $b_0 \dots b_{n_b}$  são parâmetros a serem determinados a partir dos dados de entrada  $u(t)$  e saída  $y(t)$  do sistema, e  $n_a$  caracteriza a ordem do modelo matemático estimado. o termo  $e(k)$  representa o erro de modelagem, erro de medição ou ruído na saída do tipo estocástico ou determinístico.

É possível reescrever (4.15) definindo dois vetores: um de medida,  $\varphi(k)$ , e outro de parâmetros,  $\theta(k)$ , logo:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta(k) + e(k) \quad (4.16)$$

Onde:

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1) - y(k-2) \dots - y(n_a)u(k-d) \dots u(k-d-n_b)] \quad (4.17)$$

$$\theta^T(k) = [a_1 a_2 a_3 a_{n_a} b_0 b_1 \dots b_{n_b}] \quad (4.18)$$

São realizadas N medidas, sendo elas utilizadas para se determina  $a_i$  e  $b_j$ , pode-se representar (4.18) na matricial:

$$Y = \phi\theta + E \quad (4.19)$$

O vetor de saída, também denominado e Matriz coluna amostra da resposta do sistema, é obtido experimentalmente. Sua transposta é expressa por:

$$Y^T = [y(0), y(1), y(2), \dots, y(N-1)] \quad (4.20)$$

A estimativa do vetor de parâmetros,  $\theta$ , pode ser obtida pelo procedimento dos mínimos quadrados. A previsão da saída do sistema é dada pelo produto do vetor de parâmetros



pelo vetor de medidas, conforme apresentado a seguir:

$$Y = \phi \theta \quad (4.21)$$

Conforme Aguirre (2007), o estimador de Markov, denominado como estimador dos mínimos quadrados ponderados, é obtido a partir da minimização do seguinte critério:

$$J = \min_{\theta} \left\| Y - \phi \hat{\theta} \right\|_{\omega}^2 \quad (4.22)$$

$$J = \left[ Y - \phi \hat{\theta} \right]^T W \left[ Y - \phi \hat{\theta} \right] \quad (4.23)$$

Os elementos de  $W$ ,  $W(i)$  são a ponderação em cada componente do erro e em função da precisão da medida. A partir de (4.23), igualando-se a zero, tem-se:

$$\frac{\partial J^2}{\partial \hat{\theta}^2} = -2(Y^T W \phi)^T + 2\phi^T W \phi \hat{\theta} = 0 \quad (4.24)$$

Logo realizando as devidas manipulações matemáticas em (4.24), é possível calcular o vetor de parâmetros dos Mínimos Quadrados não Recursivos da seguinte forma:

$$\hat{\theta} = \left[ \phi^T W \phi \right]^{-1} \phi^T W Y \quad (4.25)$$

Onde o estimador dos mínimos quadrados não recursivo (4.25) pode ser reescrito assumindo que  $W = \sigma^2$ , resultando no modelo geral utilizado em implementação computacional:

$$\hat{\theta} = \left[ \frac{1}{\sigma^2} \right] \left[ \phi^T \phi \right]^{-1} \phi^T \left[ \sigma^2 \right] Y$$

$$\hat{\theta} = \left[ \phi^T \phi \right]^{-1} \phi^T Y \quad (4.26)$$

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados conceitos gerais relacionados ao *toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones* utilizado para compilar e enviar algoritmos do software *Matlab/Simulink* para o quadricóptero *Rolling Spider*. Também será apresentada a simulação *AsbQuadcopterStart* utilizada no presente trabalho para acessar, em tempo real, os dados dos sensores e bateria do quadricóptero *PARROT Rolling Spider*. Esta simulação contém implementações de controle clássico que garantem a estabilidade do quadricóptero durante os ensaios realizados. Primeiramente, será apresentada uma breve introdução ao *toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones* (Seção 5.1) e conceitos gerais relacionados ao exemplo *AsbQuadcopterStart*, que consiste em uma simulação criada e disponibilizada por engenheiros da *MathWorks*, essa simulação foi projetada para ser utilizada em quadricópteros da família minidrones *PARROT* (Seção 5.2). Posteriormente, na Seção 5.3 será apresentada a plataforma de testes utilizada para realizar os ensaios experimentais, enquanto na Seção 5.4 será apresentado o passo a passo para realização da aquisição dos dados referentes à disponibilidade energética da bateria do quadricóptero. Por fim, na Seção 5.5 será apresentado o passo a passo para condicionamento dos dados experimentais obtidos nos ensaios.

### 5.1 *Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones*

O *Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones* possibilita aos usuários do software *Matlab/Simulink* a implementação de algoritmos de controle de trajetória e estabilidade, além de algoritmos com fins de aquisição de dados através da comunicação via bluetooth entre o hardware do quadricóptero e um computador. Para a referida comunicação é necessário utilizar um *Dongle Low Energy Bluetooth USB 4.0* (Apêndice B), pois o mesmo dispõe da funcionalidade de conexão em uma rede ad-hoc de grupo (GN). Os algoritmos implementados no quadricóptero por meio da utilização deste *toolbox* podem acessar os dados dos sensores internos do veículo, tais como: sensores ultrassônicos, acelerômetros, giroscópio, pressão de ar e câmera (MATHWORKS, 2019).

Dentre os principais objetivos para o qual o *toolbox* foi desenvolvido destacam-se:

- A implementação de algoritmos de processamento de imagens para orientação, navegação e controle a partir da câmera acoplada ao veículo;
- Implementação da modelagem matemática e simulação do comportamento da aeronave

sob diversas condições de voo;

- Utilização de simulações disponibilizadas para aprimoramento do controle de estabilidade, e desenvolvimento de novas simulações;
- Utilização do teclado do computador para controlar o quadricóptero a partir do bloco de leitura do teclado presente no *Simulink*.

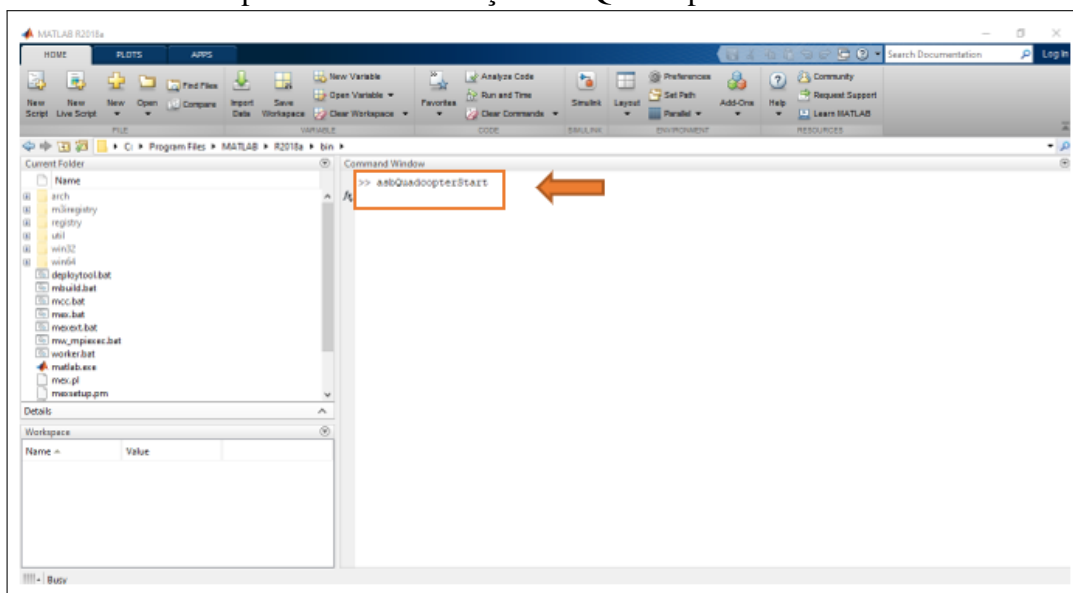
Para utilização do *Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones* é necessário possuir o Software Matlab/Simulink versões 2017a, 2018a, e 2019a. O procedimento para instalação deste *toolbox* encontra-se descrito no Apêndice A.

## 5.2 Simulação AsbQuadcopter

A simulação *AsbQuadcopter* foi desenvolvida por engenheiros da *Mathworks*, com base em trabalhos realizados por professores do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Esta simulação está disponível no *Simulink/Aerospace Blockset* (ANDRADE, 2017), ela será utilizada no presente trabalho para simular o algoritmo de controle de trajetória e estabilidade antes de enviá-lo para o quadricóptero. Esta simulação também será utilizada para acessar em tempo real os dados dos sensores e bateria do veículo aéreo utilizado (*Rolling Spider*).

Para iniciar a Simulação *AsbQuadcopter* basta digitar "*asbQuadcopterStart*" na janela *Command Window* do software *Matlab* (Figura 21), em seguida pressionar a tecla "Enter" no teclado do computador.

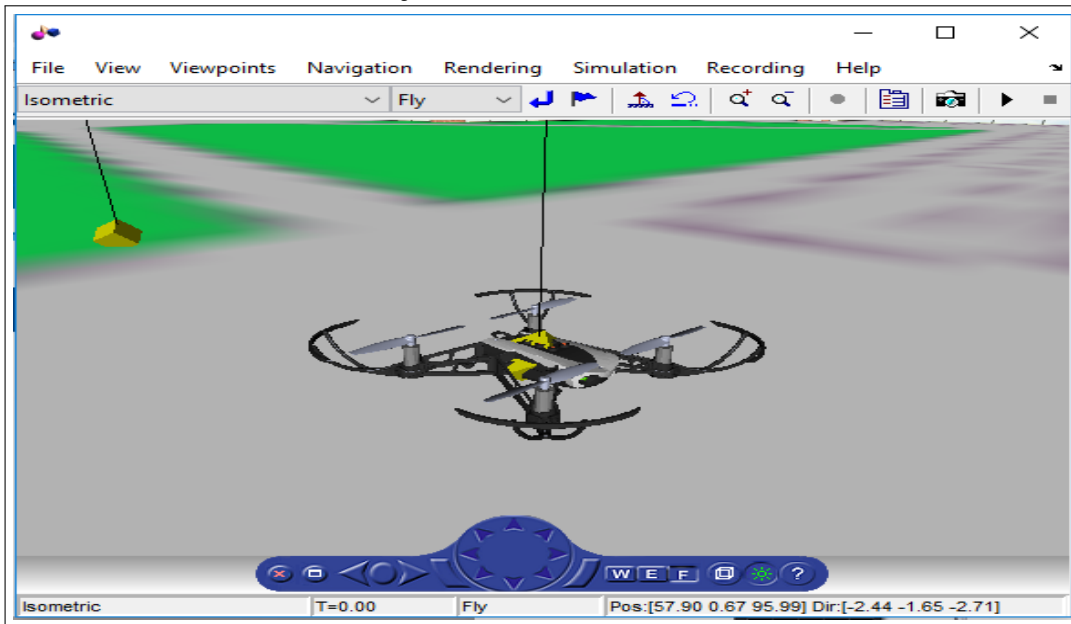
Figura 21 – Comando para abrir a Simulação *AsbQuadcopter*



Fonte: Próprio Autor.

Após executar o comando para abrir a simulação AsbQuadcopter conforme descrito acima, serão abertas duas janelas automaticamente. A primeira consiste em uma janela de visualização dos movimentos de atitude do quadricóptero em três dimensões (Figura 22), onde o usuário pode simular o voo do veículo aéreo antes de enviar para o modelo real. O ambiente 3D foi criado apenas para visualização, não podendo ser modificado (ANDRADE, 2017).

Figura 22 – Ambiente de Visualização 3D

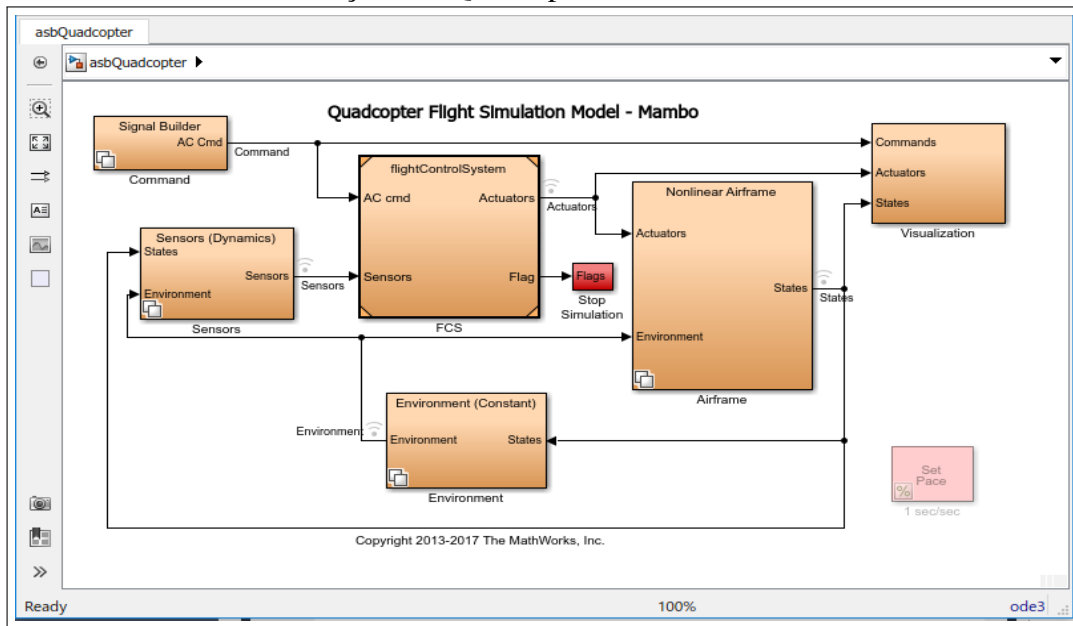


Fonte: Próprio Autor.

A segunda janela apresenta o modelo de simulação em forma de blocos utilizando a ferramenta *Simulink*. Diferentemente do modelo de visualização descrito acima, o modelo de simulação pode ser editado, possibilitando assim aos usuários do software *Matlab/Simulink* a implementação de seus próprios algoritmos de controle de voo, a partir dos modelos matemáticos linear e não-linear que caracterizam a dinâmica de voo dos quadricópteros da família minidrones da empresa PARROT.

Conforme Andrade (2017), uma das principais vantagens da utilização dos quadricópteros minidrone da PARROT consiste na possibilidade de executar testes práticos sem um elevado investimento com equipamentos. O Modelo de Simulação AsbQuadcopter está dividido em seis blocos principais representados na cor laranja, além de dois blocos na cor vermelha utilizados para interromper a simulação (Bloco: "Stop Simulation") e controlar a velocidade de simulação (Bloco: "Set Pace"), conforme mostrado na Figura 23. Cada um dos blocos principais serão brevemente detalhados a seguir:

Figura 23 – Modelo de Simulação AsbQuadcopter

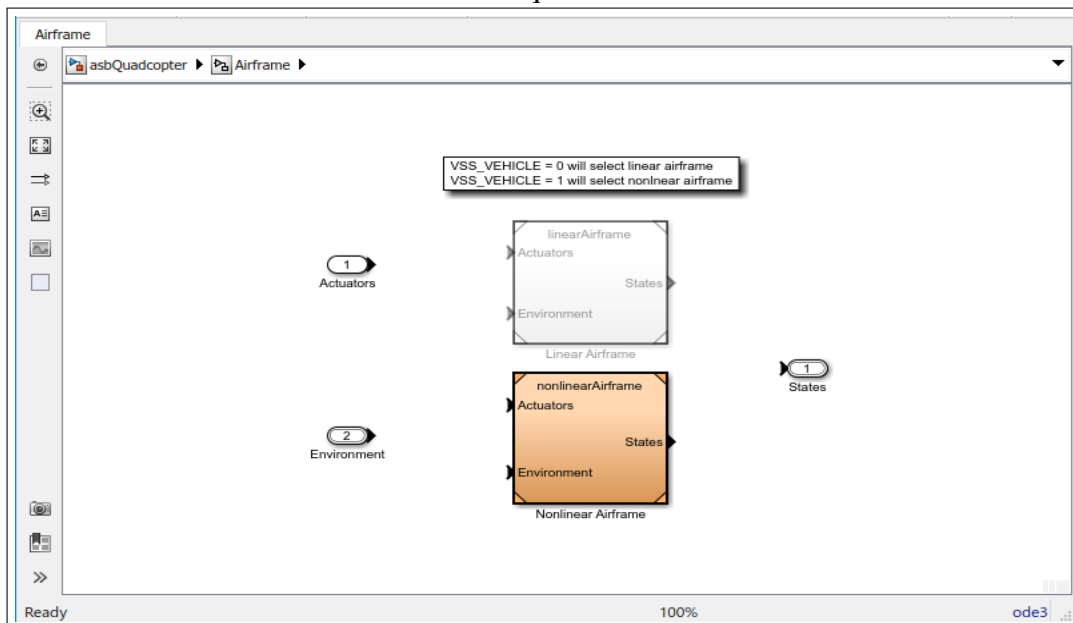


Fonte: Próprio Autor.

### 5.2.1 Bloco Airframe

O bloco "Airframe" contém as representações matemáticas que regem a dinâmica de voo do quadricóptero Rolling Spider. Este bloco está dividido em dois subsistemas referentes à modelagem Linear e Não-Linear respectivamente (ANDRADE, 2017). A Figura 24 a seguir ilustra os dois subsistemas do bloco Airframe:

Figura 24 – Modelo Linear e Não-Linear do quadricóptero



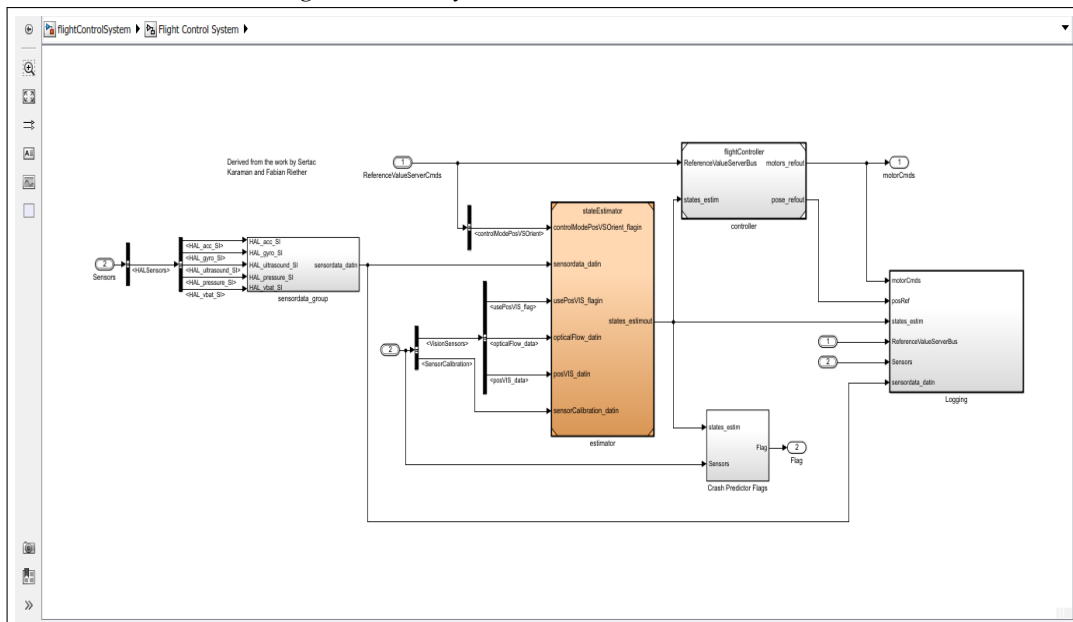
Fonte: Próprio Autor.

### 5.2.2 Bloco FCS

O bloco "FCS" é responsável pelo controle de vôo, nele são gerados os códigos de voo que são enviados para o quadricóptero. Este bloco possui um subsistema de controle denominado *FlightControlSystem*, onde são utilizados 6 controladores que variam entre PD e PID, utilizados em sincronismo para o controle de posição do veículo quadricóptero (DOUGLAS, 2018).

Nesse subsistema são gerados os erros que são enviados para os controladores, erros esses gerados a partir da comparação das variáveis de um estimador de estado formado por um filtro de Kalman, e um sinal de referência proveniente do bloco *Command* descrito na Subseção 5.2.3 (DOUGLAS, 2018). A Figura 25 a seguir ilustra o subsistema *FlightControlSystem*:

Figura 25 – Subsistema *FlightControlSystem*



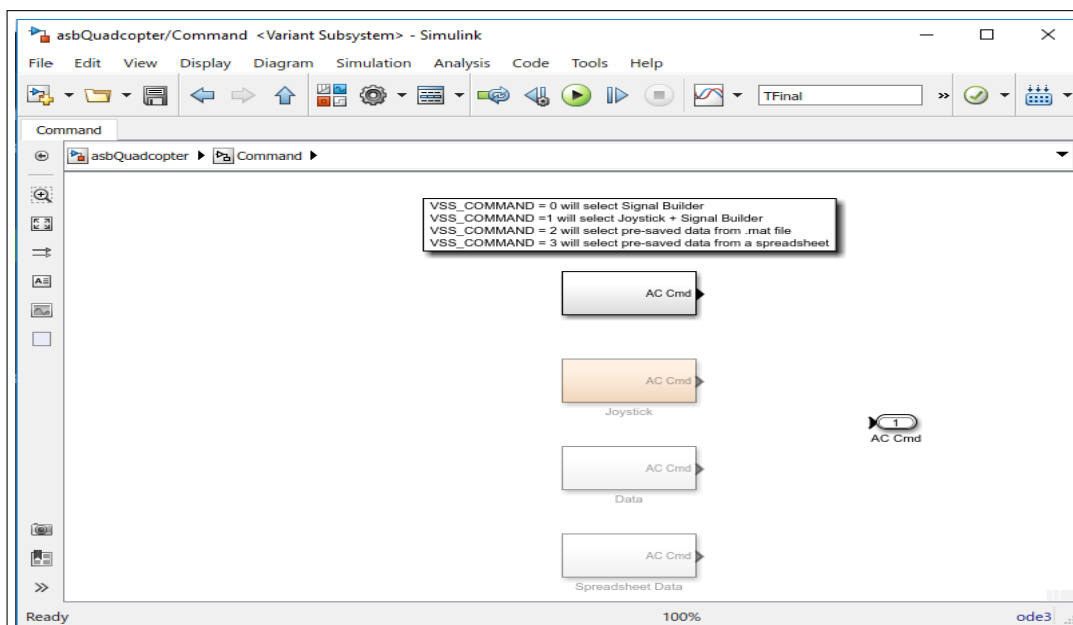
Fonte: Próprio Autor.

### 5.2.3 Bloco Command

O bloco "Command" é utilizado para fornecer uma entrada ao sistema, onde essa entrada refere-se a um sinal de posição em função do tempo, caracterizada como sendo a trajetória a ser percorrida pelo quadricóptero. Esse sinal de trajetória é formado por seis componentes, e é utilizado como referência nos comparadores utilizados nos *loops* de controle de posição. O bloco "Command" está dividido em em quatro subsistemas (Figura 26) conforme especificado a seguir (ANDRADE, 2017):

- Subsistema "Signal Bild": Utilizado quando o usuário quer implementar sinais de entrada(trajetória) em sua forma contínua no domínio do tempo.
- Subsistema "Joystick": Como o nome sugere, esse subsistema é utilizado quando o usuário quer implementar sinais de entrada(trajetória) utilizando um controle Joystick.
- Subsistema "Spread sheet"Data: Utilizado na implementação de sinais de entrada a partir de planilhas utilizando a ferramenta excel.
- Subsistema "Data": Utilizado quando o usuário quer implementar sinais de de entrada(trajetória) em forma de vetores.

Figura 26 – Subsistemas do bloco *Command*



Fonte: Próprio Autor.

## 5.2.4 Bloco Sensors

O bloco "Sensors" é utilizado para simular a dinâmica e ruídos dos sensores utilizados no quadricóptero (DOUGLAS, 2018).

### 5.2.4.1 Bloco Environment

O bloco "Environment" é utilizado para modelar o vetor gravidade e a pressão do ar para a planta e os sensores (DOUGLAS, 2018).

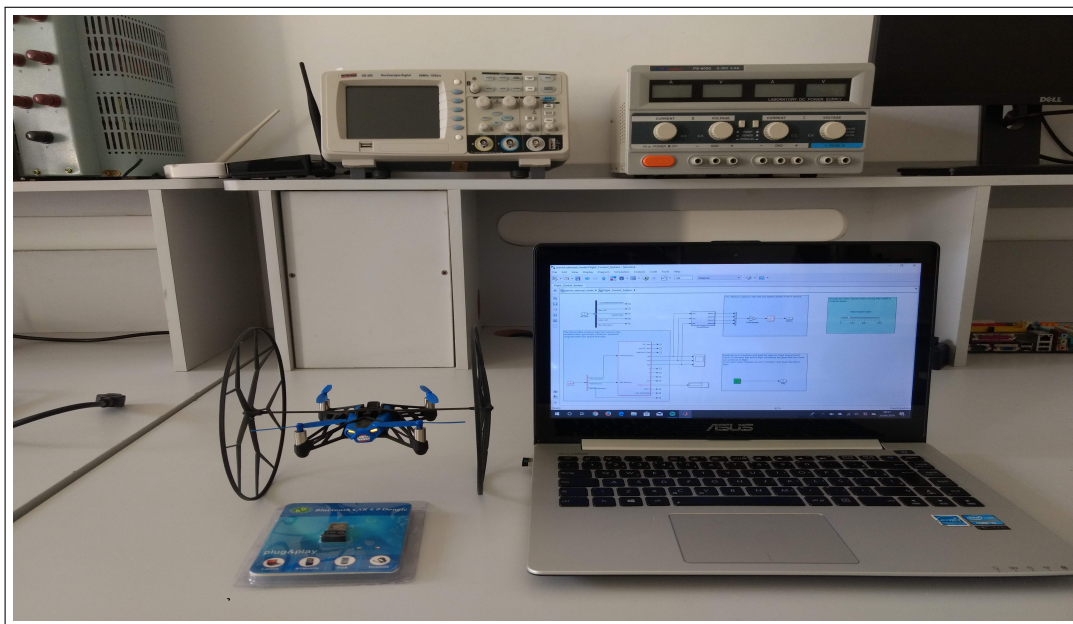
### 5.2.5 Bloco Visualization

O bloco "Visualization" é utilizado para traçar os sinais de saída do sistema, e acionar o visualizador 3D para figurar os movimentos de atitude da aeronave gerados a partir da simulação *Asbquadcopter*. A partir deste bloco, também é possível visualizar em tempo real a velocidade de giro dos eixos dos propulsores do quadricóptero. (DOUGLAS, 2018).

### 5.3 Plataforma de teste

Os dados experimentais apresentados na Seção 5.4 foram obtidos a partir de uma plataforma de testes composta por um drone *Parrot Rolling Spider*, um *Dongle Bluetooth USB 4.0*, e um notebook em conjunto com o software *Matlab/Simulink*. A Figura 27 a seguir apresenta uma foto da plataforma de testes utilizada para realizar os ensaios experimentais:

Figura 27 – Plataforma de Testes.



Fonte: Próprio Autor.

O *Dongle USB* é responsável por estabelecer uma conexão *bluetooth* entre o notebook e o hardware do quadricóptero. O passo a passo para estabelecer a referida comunicação encontra-se descrito no Apêndice B. Já o software *Matlab/Simulink* é utilizado para criar, modificar algoritmos de controle de voo e aquisição de dados do perfil de descarga da bateria a partir da simulação *AsbQuadcopterStart*. Este software é também utilizado para enviar o algoritmo criados a partir da simulação *AsbQuadcopterStart* para o Hardware do quadricóptero utilizando a conexão *bluetooth* estabelecida. O procedimento para envio do algoritmo de controle de estabilidade,



controle de trajetória, e aquisição de dados para o hardware do quadricóptero encontra-se descrito no Apêndice C.

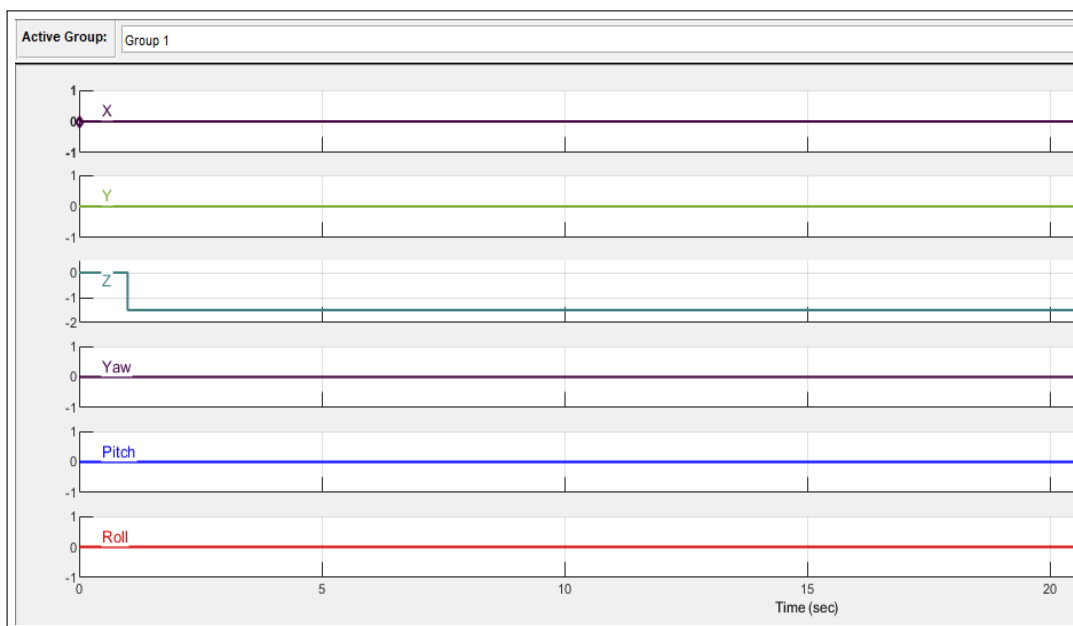
Os ensaios experimentais foram realizados no laboratório de Sistemas de Controle da Universidade Federal do Ceará(UFC)- Campos Sobral. A plataforma de testes utilizada pertence ao projeto de pesquisa: Prognóstico e monitoramento da saúde de bateria para múltiplos veículos aéreos não tripulados(VANTs) em uma missão colaborativa, financiado pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico(FUNCAP).

#### 5.4 Aquisição de dados

Esta seção tem por objetivo apresentar todas as etapas utilizadas para obtenção dos dados do perfil de descarga da bateria do quadricóptero *Rolling Spider*. Para esta aquisição de dados, foram realizadas 4 etapas conforme descrito a seguir:

A primeira etapa consiste na criação do algoritmo de voo e controle de trajetória. Inicialmente foi necessário abrir a simulação *AsbQuadcopterStart* como detalhado na Seção 5.2. Logo após abrir a simulação, foi modificados os sinais de referência do bloco "*Position/Attitude Reference*", este bloco encontra-se localizado no subsistema "*Signal Bild*"(Subseção 5.2.3). A Figura 28 a seguir ilustra os sinais de referência do bloco "*Position/Attitude Reference*" após a referida modificação.

Figura 28 – Sinais de referência modificados.



Fonte: Próprio Autor.

Os sinais apresentados na Figura 28 são responsáveis por determinar a trajetória a ser seguida pelo quadricóptero após o envio do algoritmo, onde os sinais X, Y, e Z representam movimentos lineares nos eixos x, y, z do sistema de coordenadas inercial. Já os sinais *Yaw*, *Pitch*, e *Roll* representam o posicionamento angular do sistema de coordenadas fixo em relação ao sistema de coordenadas inercial em função do tempo.

A partir da Figura 28 é possível observar que a trajetória a ser executada pelo quadricóptero consiste em apenas um movimento no eixo z do sistema de coordenada inercial, ou seja, o veículo irá decolar na vertical e permanecer pairando em 0,7 metros de altura até a bateria descarregar completamente. Em aplicações civis e militares esta posição é utilizada em monitoramentos ou localização de alvo.

A segunda etapa utilizada para aquisição de dados consiste na configuração da simulação *AsbQuadcopterStart* para armazenar, em tempo real, os dados do estado energético da bateria. Após a referida configuração a simulação irá armazenar tanto os valores de tensão (em Volts) nos terminais da bateria do quadricóptero, como a porcentagem de carga da bateria durante todo o período de voo. O procedimento configurar a simulação *AsbQuadcopterStart*, ativando assim, o registro de dados de voo encontra-se descrito no Apêndice C.

Já a terceira etapa consiste em submeter a bateria do quadricóptero a um processo de carga completo, conectando-a em uma fonte de carregamento externa. Após este procedimento, as baterias são desconectadas da fonte de carga externa e conectadas ao quadricóptero. Em seguida é estabelecido uma conexão bluetooth entre o notebook e o quadricóptero (Apêndice B).

Por fim na quarta etapa consiste no envio do algoritmo para o veículo aéreo *Rolling Spider*, em seguida aguardar este veículo executar o algoritmo até a descarga completa da bateria, finalizando o ensaio experimental. O procedimento para envio do algoritmo para o hardware do quadricóptero encontra-se descrito no Apêndice C. Após a realização de cada ensaio experimental é necessário salvar o arquivo "*RSdata.mat*" gerado pela simulação, nele estão contidos todos os registros de voo, tais como: leitura dos sensores e dados do estado energético da bateria durante todo período de voo.

A Figura 29 a seguir mostra uma foto do quadricóptero executando o algoritmo de voo em um dos ensaios realizados:

Figura 29 – Quadrirotor executando o algoritmo de voo em um dos ensaios experimentais realizados.



Fonte: Próprio Autor.

Foram realizados um total de 10 ensaios experimentais, em cada ensaio foram armazenados os valores de tensão nos terminais da bateria e os valores referente a porcentagem de carga da bateria, considerando uma taxa de amostragem de 0,005 segundos. Nos ensaios foram utilizados 1 bateria de Lithium-Ion Polímero (Li-Po) nova da marca Shoot, modelo XT-412. A Figura 30 a seguir demonstra o banco de dados criado a partir dos registros de voo dos 10 ensaios experimentais realizados.

Figura 30 – Banco de dados com informações da bateria do quadrirotor obtidas nos 10 ensaios realizados.

Name	Value
E01P	167363x1 double
E01T	167363x1 double
E01V	167363x1 double
E02P	161157x1 double
E02T	161157x1 double
E02V	161157x1 double
E03P	159618x1 double
E03T	159618x1 double
E03V	159618x1 double
E04P	140930x1 double
E04T	140930x1 double
E04V	140930x1 double
E05P	141987x1 double
E05T	141987x1 double
E05V	141987x1 double
E06P	151628x1 double
E06T	151628x1 double
E06V	151628x1 double
E07P	150537x1 double
E07T	150537x1 double
E07V	150537x1 double
E08P	149867x1 double
E08T	149867x1 double
E08V	149867x1 double
E09P	141511x1 double
E09T	141511x1 double
E09V	141511x1 double

Fonte: Próprio Autor.

No banco de dados apresentado na Figura 30 cada linha contem um vetor. Os dois dígitos mostrados após a letra "E" representam a numeração do ensaio realizado. Logo é possível observar que para cada ensaio foram armazenados 3 vetores, diferenciados entre si por uma letra à direita dos dois dígitos, que por sua vez, caracteriza o tipo de dados do vetor. As letras "P", "T", "V" caracterizam o tipo de dados como sendo: Porcentagem de Carga(em %), Tempo(em segundos), e Tensão nos terminais da bateria(em Volts) respectivamente. Para os vetores apresentados no banco de dados, cada componente do vetor consiste em uma amostra.

## 5.5 Condicionamento dos dados experimentais

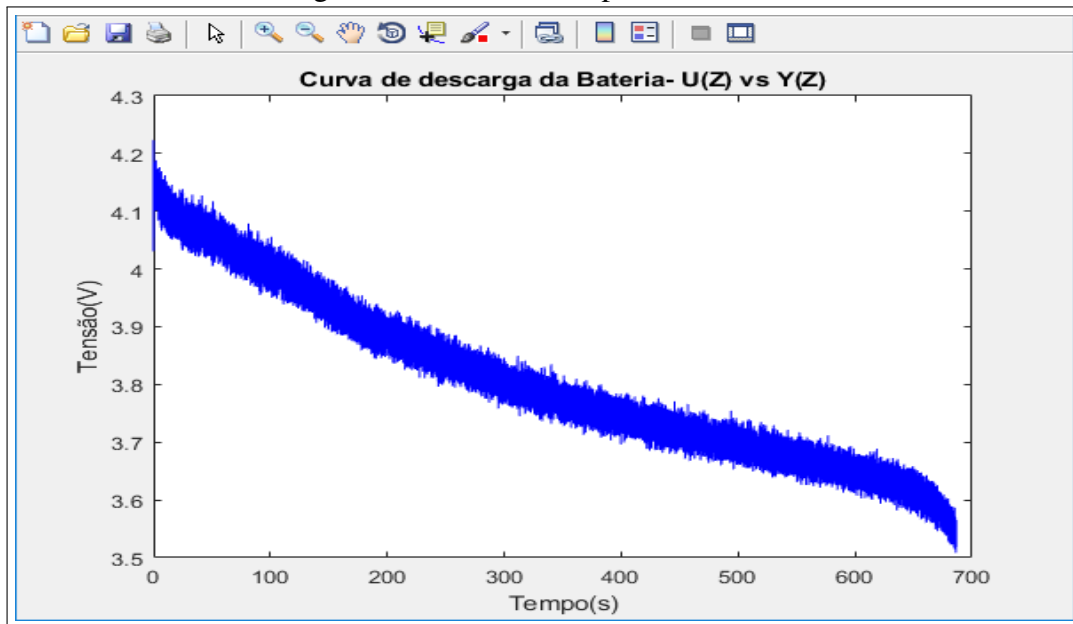
Para realizar a modelagem matemática da curva de descarga da bateria de um quadricóptero, considerando o sistema como caixa cinza, é necessário obter experimentalmente um sinal de entrada  $u(k)$  e um sinal de saída  $y(k)$ , este sinal de saída caracteriza a resposta do sistema quando aplicado a entrada  $u(k)$ . Nesta seção será apresentado o procedimento para obtenção de  $u(k)$  e  $y(k)$  a partir do banco de dados apresentado na seção anterior. Em seguida será aplicado um filtro digital média móvel no sinal de resposta do sistema com o objetivo de eliminar componentes indesejadas, tais como o ruído branco. O sinal de saída após a aplicação do filtro será denominado de  $y'(k)$ .

A curva de descarga de uma bateria é caracterizada por uma variação temporal da tensão nos terminais da bateria durante um processo completo de descarga. Logo o tipo de dados apresentados pelo sinal de entrada possui unidade de tempo(segundos), já o sinal de saída é formado pelos valores de tensão nos terminais da bateria em cada período de amostra.

O sinal de entrada  $u(k)$  em sua forma discreta consiste em um vetor linha que caracteriza o tempo de descarga da bateria, esse vetor é formado pela média aritmética de todos os vetores de tempo presente no banco de dados experimentais, a unidade de medida de suas instâncias discreta é o segundo. Já o sinal  $y(k)$  em sua forma discreta, consiste em um vetor linha formado pela média aritmética de todos os vetores de tensão presentes no banco de dados experimentais, a unidade de medida de suas instâncias discreta é o Volt. O algoritmo feito no *Matlab* utilizado para obter  $u(k)$  e  $y(k)$  a partir do banco de dados experimentais encontra-se no Apêndice D.

A Figura 31 a seguir ilustra a curva de descarga da bateria obtida experimentalmente(Curva  $u(k)$  vs  $y(k)$ ).

Figura 31 – Curva de descarga da bateria obtida experimentalmente.

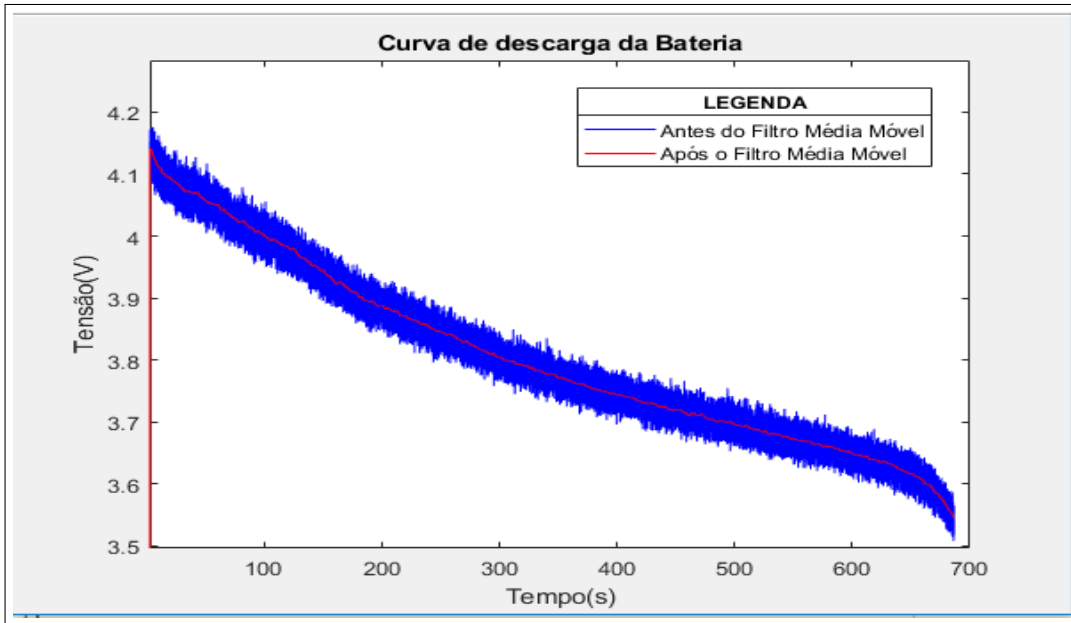


Fonte: Próprio Autor.

Para a redução do ruído branco foi aplicado um Filtro digital: Média móvel, pois este filtro apresenta bom desempenho em muitas aplicações e ótimo desempenho na redução de ruído branco, ao mesmo tempo que preserva a resposta ao degrau (SCANDELARI, 2019). Após a aplicação de um filtro digital média móvel no sinal  $y(k)$ , o sinal resultante consiste em:  $y'(k)$ . O algoritmo feito no *Matlab* utilizado para aplicação do filtro média móvel no sinal de resposta do sistema  $y(k)$ , obtendo assim  $y'(k)$  encontra-se no Apêndice D.

A Figura 32 a seguir ilustra a curva de descarga da bateria do quadricóptero obtida experimentalmente antes da aplicação do filtro (Curva em azul) e a curva de descarga da bateria após a aplicação do filtro (Curva em vermelho):

Figura 32 – Curva de descarga da bateria antes do filtro média móvel(Curva em azul), e a curva de descarga da bateria após a aplicação do filtro média móvel(Curva em vermelho).



Fonte: Próprio Autor.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

É possível descrever a dinâmica interna de um sistema através de um modelo matemático. Esse modelo matemático não necessita ser uma verdade absoluta do sistema ao qual está representando, mas torna-se necessário que seja acurado o bastante após a modelagem (ROMIO, 2013).

Neste capítulo é apresentados os procedimentos e os resultados da modelagem matemática da curva de descarga de um quadricóptero *Rolling Spider* utilizando a teoria de identificação de sistemas (Seção 6.1). O restante deste capítulo está organizado como segue. Na Seção 6.2 é realizado a validação de cada modelo matemático obtido, bem como a obtenção da acurácia de cada modelo estimado. Na Seção 6.3 é realizado a identificação do modelo que melhor representa a curva de descarga da bateria do quadricóptero

### 6.1 Modelagem Matemática

Os Sinais  $u(k)$  e  $y'(k)$  apresentados na seção 5.5 serão utilizados para estimar tanto os parâmetros das estruturas de modelos paramétricos lineares ARX, ARMAX e BJ, como para estimar os parâmetros dos Mínimos Quadrados não Recursivos (MQNR).

Para estimar os parâmetros das estruturas ARX, ARMAX, e BJ serão utilizadas metade das amostras (denominadas amostras de modelagem) de  $u(k)$  e  $y'(k)$ . A outra metade das amostras (denominadas amostras de validação) serão utilizadas na validação de cada modelo. O algoritmo utilizado para extrair as amostras de modelagem e as amostras de validação a partir de  $u(k)$  e  $y'(k)$  encontra-se no Anexo D.

As mesmas amostras utilizadas para estimar os parâmetros das estruturas paramétricas ARX, ARMAX, e BJ serão utilizadas para obter os parâmetros dos Mínimos Quadrados não Recursivos (MQNR), já a validação do modelo MQNR é realizada com base no erro médio quadrático.

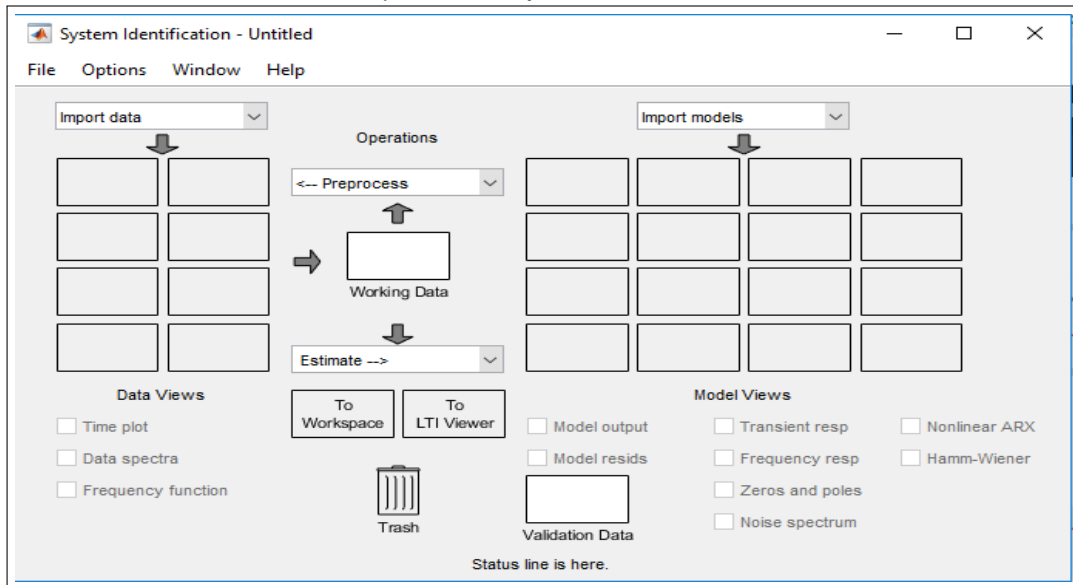
#### 6.1.1 Estimação dos parâmetros

Para estimar os parâmetros das estruturas ARX, ARMAX e BJ foi utilizado o *Toolbox systemIdentification* presente no software *Matlab/Simulink*. Este *toolbox* permite o estudo e aplicação das diferentes estruturas de modelos presentes na teoria de Identificação de Sistemas. A utilização do *toolbox systemIdentification* para estimar os parâmetros de uma estrutura de

modelo linear consiste em 5 passos, conforme descrito a seguir:

O primeiro passo consiste em abrir o *toolbox*, para isto basta digitar "*systemIdentification*" no "*Comand Window*" do software Matlab e em seguida clicar em "Enter" no teclado do computador. A Figura 33 a seguir ilustra a interface do *toolbox systemIdentification*:

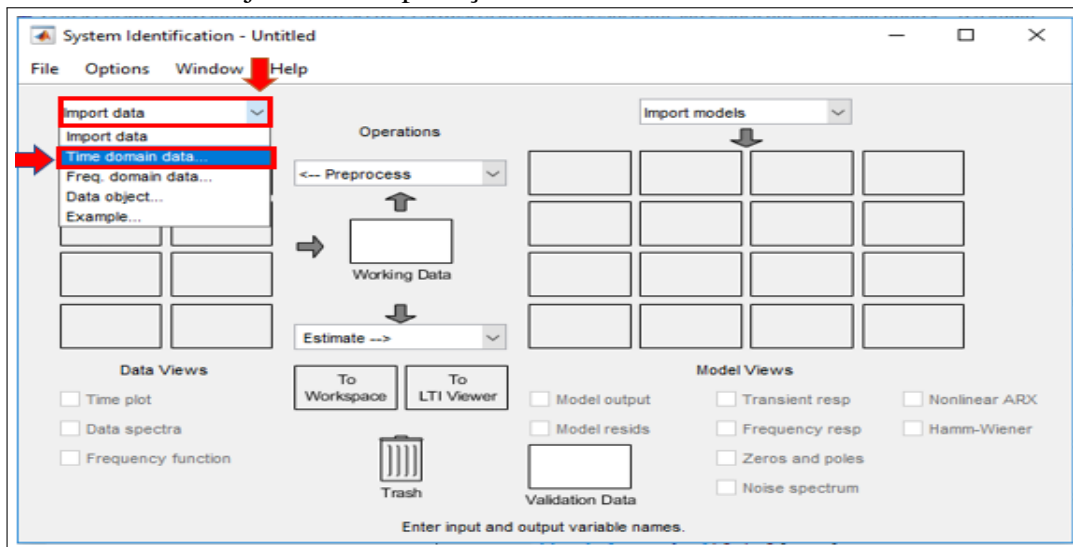
Figura 33 – Interface do *Toolbox systemIdentification*.



Fonte: Próprio Autor.

O segundo passo consiste em abrir a janela de importação de dados clicando em "*import data*" em seguida clicando em "*Time domain data...*" conforme apresentado na Figura 34 a seguir:

Figura 34 – Abrindo a janela de importação de dados.

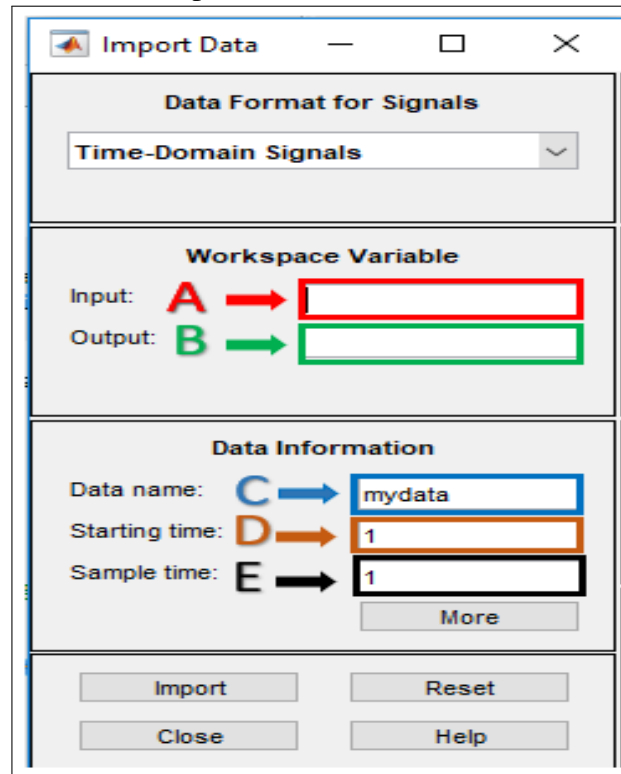


Fonte: Próprio Autor.



O terceiro passo consiste na importação do vetor que contém as amostras de estimação dos parâmetros, para isto basta preencher os campos A,B,C,D e E indicados na Figura 35 a seguir:

Figura 35 – Importando os dados experimentais.



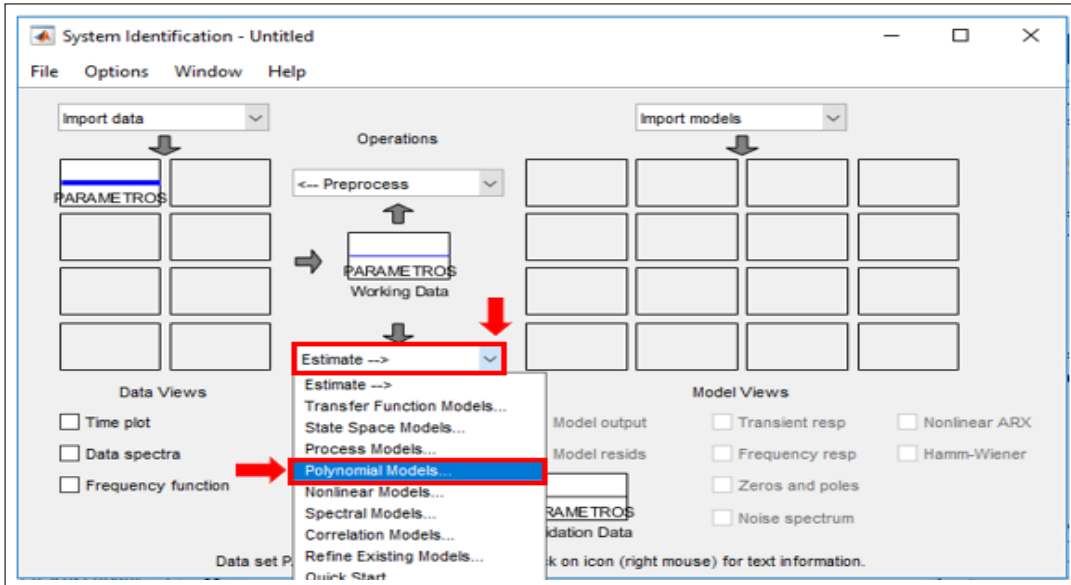
Fonte: Próprio Autor.

- A- Campo destinado a inserção do vetor que contém os dados de entrada do sistema(Input);
- B- Campo destinado a inserção do vetor que contém os dados de saída do sistema(Output);
- C- Campo destinado a nomeação do conjunto de dados importado (Data Name);
- D- Campo destinado a inserção do valor de partida do sistema (Starting Time);
- E- Campo destinado a inserção do valor do intervalo de amostragem (Sample Time);

Após o preenchimento das informações acima basta clicar em "Import" que os dados experimentais serão importados para o *toolbox*.

O quarto passo consiste em abrir a janela *polynomial Models*. para isto, basta clicar em "Estimate", logo em seguida clicar em "*polynomial Models...*" conforme a Figura 36 a seguir:

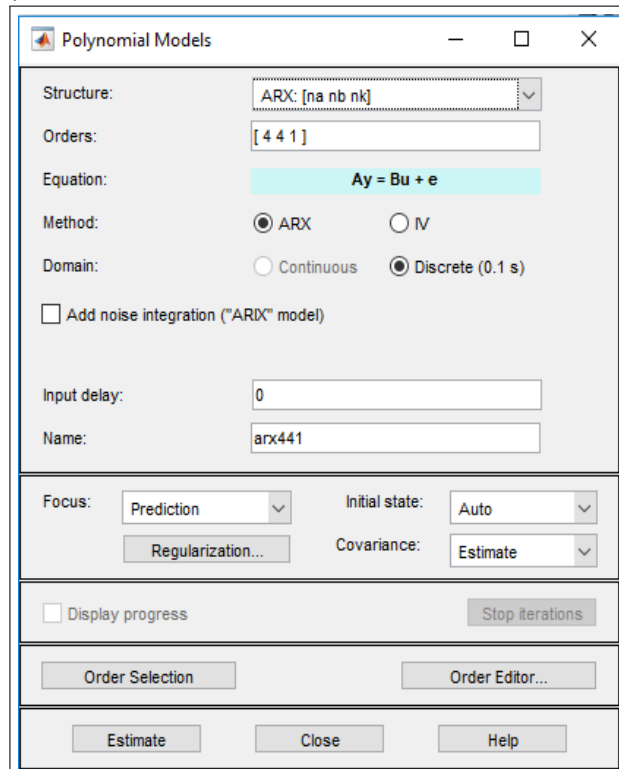
Figura 36 – Abrindo a janela *polynomial Models*.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 37 a seguir mostra a janela *polynomial Models*.

Figura 37 – Janela *polynomial Models*.



Fonte: Próprio Autor.

O quinto passo consiste na escolha da estrutura de modelo paramétrico linear e da ordem dos polinômios a serem estimados. Para isto, basta executar as seguintes etapas: com a janela *polynomial Models* aberta, clique em "Structure" para selecionar a estrutura de

modelo paramétrico, e em seguida digite o valor da ordem dos parâmetros a serem estimados preenchendo o campo "Orders". Vale ressaltar que a partir da janela *polynomial Models* é possível estimar os parâmetros das estruturas ARX, ARMAX, e BJ sem precisar repetir as etapas anteriores.

Para Estimar a função de transferência da curva de de descarga da bateria de um quadrirotor utilizando o método dos Mínimos Quadrados não Recursivos será utilizado o algoritmo disponibilizado no Apêndice D.

### 6.1.2 Modelo ARX

Conforme apresentado na Seção 4.2 o modelo ARX discreto é representado por dois polinômios:  $A(q)$  e  $B(q)$ , onde o polinômio  $A(q)$  é responsável por determinar a ordem do modelo matemático. No presente trabalho são considerados modelos de segunda ordem. Os polinômios gerais para um modelo ARX de segunda ordem são dados por:

$$A(q) = 1 - a_1q^{-1} - a_2q^{-2} \quad (6.1)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} \quad (6.2)$$

Aplicando as amostras de modelagem no *Toolbox systemIdentification*, conforme apresentado na seção anterior, foram obtidos os valores dos parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ , e  $b_2$ . Substituindo esses parâmetros em (6.1) e (6.2) são obtidos os seguintes polinômios:

$$A(q) = 1 - 0.9961q^{-1} + 0.0001623q^{-2} \quad (6.3)$$

$$B(q) = 1.643q^{-1} - 1.643q^{-2} \quad (6.4)$$

onde  $q^{-n}$  é o operador de atraso, conforme (AGUIRRE, 2007). Utilizando (4.8), pode-se escrever a equação do modelo ARX da seguinte forma:

$$y(k) = \frac{1.643q^{-1} - 1.643q^{-2}}{1 - 0.9961q^{-1} + 0.0001623q^{-2}}u(k) + \frac{1}{1 - 0.9961q^{-1} + 0.0001623q^{-2}}v(k) \quad (6.5)$$

### 6.1.3 Modelo ARMAX

O procedimento para determinação dos parâmetros do modelo ARMAX é semelhante ao do ARX. Para este modelo também foi considerado o sistema modelado como sendo de segunda ordem. O modelo ARMAX é representado por três polinômios conforme apresentado a seguir:

$$A(q) = 1 - a_1q^{-1} - a_2q^{-2} \quad (6.6)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} \quad (6.7)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} \quad (6.8)$$

Logo utilizando a ferramenta *Toolbox systemIdentification*, foram obtidos os seguintes parâmetros para este modelo:

$$A(q) = 1 - 1.988q^{-1} + 0.9882q^{-2} \quad (6.9)$$

$$B(q) = 0.02139q^{-1} - 0.02139q^{-2} \quad (6.10)$$

$$C(q) = 1 - 0.9974q^{-1} + 0.0002626q^{-2} \quad (6.11)$$

onde  $q^{-n}$  é o operador de atraso, conforme (AGUIRRE, 2007). Utilizando (4.10), pode-se escrever a equação do modelo ARMAX da seguinte forma:

$$y(k) = \frac{0.02139q^{-1} - 0.02139q^{-2}}{1 - 1.988q^{-1} + 0.9882q^{-2}}u(k) + \frac{1 - 0.9974q^{-1} + 0.0002626q^{-2}}{1 - 1.988q^{-1} + 0.9882q^{-2}}v(k) \quad (6.12)$$

### 6.1.4 Modelo Box-Jenkins

Para a obtenção do modelo BJ é considerado o mesmo procedimento realizado para a obtenção dos modelos ARX e ARMAX. Logo para este modelo também será considerado

o sistema como sendo de segunda ordem, onde este modelo é representado pelos seguintes polinômios:

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} \quad (6.13)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} \quad (6.14)$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} \quad (6.15)$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} \quad (6.16)$$

Utilizando a ferramenta *Toolbox systemIdentification*, foram obtidos os seguintes parâmetros para este modelo:

$$B(q) = 0.01525q^{-1} - 0.01525q^{-2} \quad (6.17)$$

$$C(q) = 1 - 0.9955q^{-1} - 0.004279q^{-2} \quad (6.18)$$

$$D(q) = 1 - 1.985q^{-1} + 0.9852q^{-2} \quad (6.19)$$

$$F(q) = 1 - 1.993q^{-1} + 0.9928q^{-2} \quad (6.20)$$

onde  $q^{-n}$  é o operador de atraso, conforme (AGUIRRE, 2007). Utilizando (4.11) pode-se escrever a equação do modelo BJ da seguinte forma:

$$y[n] = \frac{0.01525q^{-1} - 0.01525q^{-2}}{1 - 1.993q^{-1} + 0.9928q^{-2}}u(k) + \frac{1 - 0.9955q^{-1} - 0.004279q^{-2}}{1 - 1.985q^{-1} + 0.9852q^{-2}}v(k) \quad (6.21)$$

### 6.1.5 Modelo MQNR

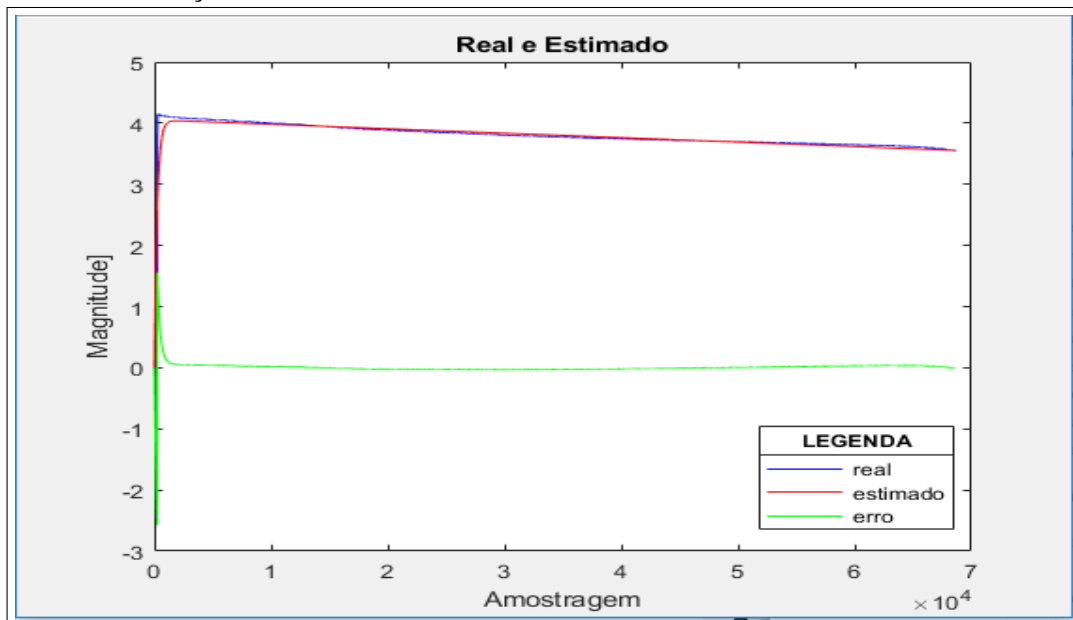
Os conceitos apresentados na Seção 4.3 foram implementados em um algoritmo utilizando o software *Matlab*, com o intuito de estimar a função de transferência da curva de descarga da bateria de um quadricóptero *Rolling Spider* utilizando o método dos Mínimos Quadrados não Recursivos. Para este modelo, também foi estimado os parâmetros considerando o sistema como sendo de segunda ordem.

Ao importar as amostras de modelagem para o algoritmo disponibilizado no Apêndice D, foi obtido como resultado a seguinte função de transferência:

$$y(s) = \frac{14.41s - 2.585 \cdot 10^{-05}}{s^2 + 8.725s + 0.03549} \quad (6.22)$$

A Figura 38 a seguir mostra a curva de descarga da bateria formada pelas amostras de modelagem(curva em azul), a curva do modelo matemático estimado pelos Mínimos Quadrados não Recursivos(curva em vermelho), e a curva do erro apresentada por este modelo(curva na cor verde).

Figura 38 – Comparação entre modelo real(em azul) e o modelo estimado(em vermelho) para os Mínimos Quadrados não Recursivos considerando o erro(em verde) como a diferença entre o valor real e estimado



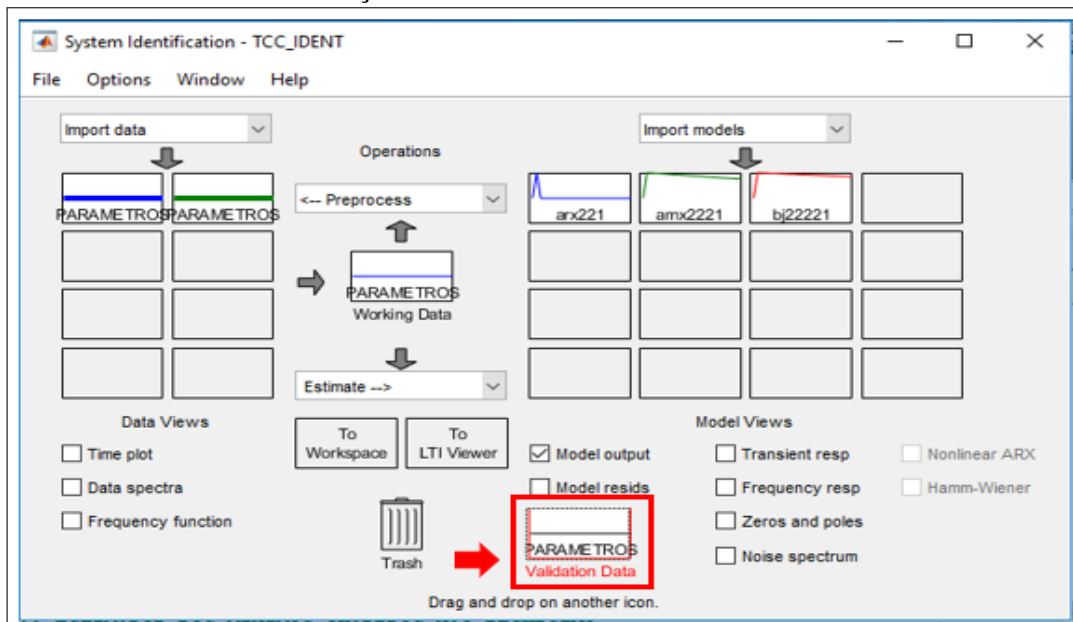
Fonte: Próprio Autor.

## 6.2 Validação dos modelos

Após a estimação dos quatro modelos matemáticos: ARX, ARMAX, BJ e MQNR, cujos, representados por (6.5), (6.12), (6.21), e (6.22) é necessário validar cada modelo. Para isto, serão utilizadas as amostras de validação.

O *Toolbox systemIdentification* dispõe de um ambiente para realizar a validação dos modelos paramétricos. Para validar um modelo matemático estimado, basta importar as amostras de validação para a área "validation data" da janela principal do *Toolbox systemIdentification*. A Figura 39 a seguir apresenta o ambiente de validação (área em vermelho):

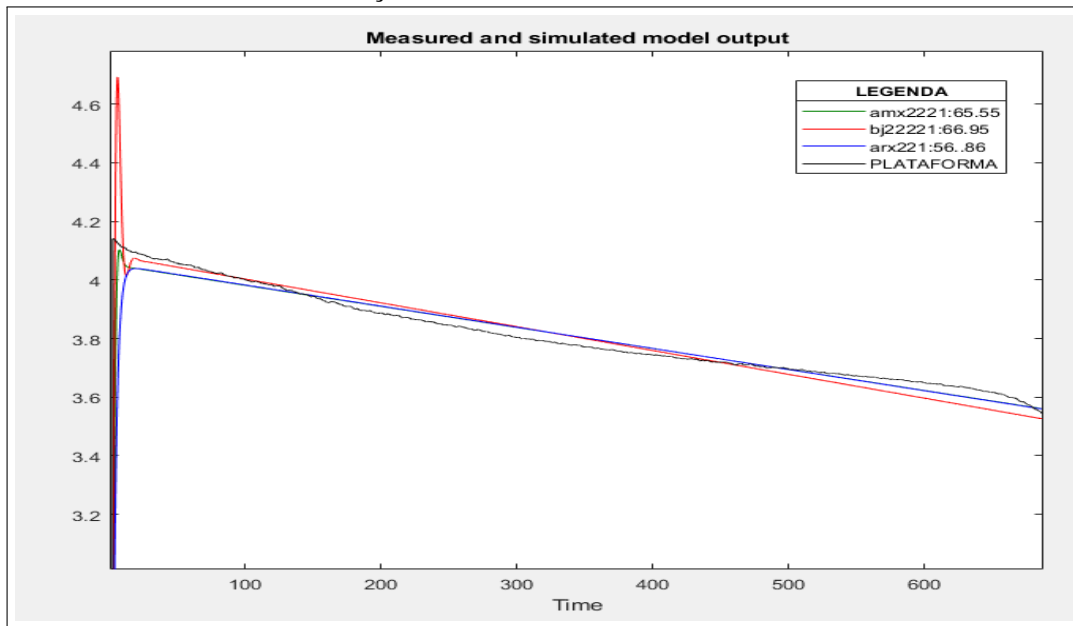
Figura 39 – Ambiente de validação.



Fonte: Próprio Autor.

Após importar as amostras de validação para o ambiente de validação, o *Toolbox systemIdentification* retornará a comparação entre a curva real de descarga da bateria e a curva dos modelos matemáticos estimados ARX, ARMAX, e BJ. O *toolbox* também retornará para o usuário a acurácia de cada modelo. A Figura 40 a seguir apresenta aos resultados obtidos a partir da validação dos modelos: ARX, ARMAX e BJ.

Figura 40 – Resultados da validação dos modelos ARX, ARMAX e BJ..



Fonte: Próprio Autor.

Para que o modelo MQNR fosse avaliado de uma forma não subjetiva, foi utilizado o índice de avaliação para a quantificação do erro entre a saída adquirida e a saída estimada pelo modelo matemático. Dentre diversos itens que podem ser utilizados, o erro quadrático médio (RMSE - *Room Mean Square Error*) foi escolhido, dado por Aguirre (2007):

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y(k) - \bar{y}(k))^2}} \quad (6.23)$$

$$Acuracia = (1 - RMSE) \cdot 100\% \quad (6.24)$$

Utilizando as equações 6.23 e 6.24, foi calculado a acurácia do modelo MQNR, onde foi obtido um valor de 97,5914% (entre 0% e 100%). Indicando que o modelo matemático estimado ajusta-se aos dados adquiridos da saída. O algoritmo utilizado para calcular a acurácia de método MQNR está disponível no Apêndice D.

### 6.3 Identificação da melhor estrutura

Após a estimação e validação dos modelos matemáticos ARX, ARMAX, BJ e MQNR, torna-se necessário a escolha do modelo que representa a curva de descarga do quadrirotor com maior acurácia. Analisando os resultados da validação dos modelos (Seção 6.2), observa-se que



o modelo MQRN apresentou um melhor resultado quando comparado aos demais, com uma acurácia de 97,5914%.

A partir da Figura 40 é possível observa que o modelo ARX apresentou o pior resultado, com uma acurácia de 56,86%. Já os modelos ARMAX e BJ apresentaram acurácia de 65.55% e 66.95% respectivamente. Neste contexto, o modelo MQNR foi identificado para representar a curva de descarga da bateria utilizada em quadrirotores *Rolling Spider*.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Ao longo dos anos, os veículos aéreos não tripulados do tipo quadrirotor tem sido utilizados em diversos tipos de atividade, tais como: Segurança, monitoramento ambiental, mapeamento geográfico, aerofotografias, manutenção de linhas de transmissão, resgate, vigilância, além de aplicações industriais. No entanto para o uso deste tipo de aeronave em atividades de precisão, ou em locais de difícil acesso humano é necessário um aumento na confiabilidade e autonomia de voo, levando em consideração a diminuição dos custos e risco à vida humana. Um fator que contribuiu bastante para o aumento da utilização dos quadrirotores consiste na versatilidade de operar sem está conectado a uma fonte de alimentação externa, obtida a partir do auxílio de uma fonte de energia denominada bateria.

A predição do tempo de vida de baterias utilizadas em quadrirotores é crucial, pois as baterias são componentes críticos cuja falha pode impactar o sucesso da atividade a ser executada. Uma das formas de calcular o tempo de vida de baterias é por meio de experimentação física. No entanto, dependendo do tipo de sistema a ser modelado este processo torna-se inviável tanto no ponto de vista econômico, bem como do ponto de vista computacional, exigindo um elevado conhecimento da dinâmica interna do sistema, além demandar mais tempo para a solução computacional devido ao número e complexidade das equação que caracteriza a dinâmica do sistema. Outra maneira é utilizando modelos matemáticos que simulam a curva de descarga da bateria. No decorrer dos anos diferentes modelos foram desenvolvidos, cada um com suas características e níveis de complexidade.

Neste trabalho é realizado a modelagem matemática da curva de descarga da bateria de um quadrirotor *Rolling Spider* considerando estruturas de modelos presentes na teoria de identificação de sistemas. Para a referida modelagem foi considerado o sistema de descarga da bateria como caixa cinza, ou seja, foram consideradas algumas informações relacionadas aos modelos existentes na literatura, uma delas consiste na ordem do sistema. Foram utilizadas 3 estruturas de modelos paramétricos lineares, sendo elas: ARX, ARMAX, e BJ. Também foi utilizado o método dos Mínimos Quadrados não Recursivos para estimar um modelo matemático que caracterize o perfil de descarga da bateria.

Os modelos ARX, ARMAX, e BJ foram implementados e validados a partir da ferramenta *Toolbox sistemIdentification* presente no software *Matlab/Simulink*. Já o estimador dos Mínimos Quadrados não Recursivos foi implementado e validado a partir de um algoritmo utilizando o software *Matlab*, este algoritmo encontra-se disponibilizado no Apêndice D do

presente trabalho. Para estimar os parâmetros de cada modelo matemático foi utilizado um banco de dados experimentais obtidos a partir de uma plataforma de testes e aquisição de dados composta por um drone *Rolling Spider*, um adaptador bluetooth 4.0, e um laptop em conjunto com o software *Matlab/Simulink*. As baterias utilizadas no processo de descarga, na plataforma de testes, são de Li-Po, da marca Shoot, modelo XT-412.

Uma das principais características deste trabalho é que o banco de dados foi obtido experimentalmente a partir de uma plataforma de testes. O que é considerado um diferencial no trabalho, pois, os modelos podem ser validados a partir de dados reais. A partir dos resultados da validação dos modelos estimados ARX, ARMAX, BJ, e MQNR foi selecionado o modelo discreto MQNR para representar o perfil de descarga do quadrirotor, pelo fato de apresentar uma maior acurácia, quando comparado aos demais modelos. O modelo discreto MQNR apresentou uma acurácia de 97,5914%, enquanto os modelos discretos ARMAX e BJ apresentaram uma acurácia de 65,55% e 66,95% respectivamente. Já o moodemo discreto ARX apresentou o pior resultado, com uma acurácia de 56,86%

Conclui-se que o modelo MQNR em tempo discreto possui os melhores resultados, quando utilizado para modelar matematicamente a curva de descarga de baterias utilizadas em quadrirotores *Rolling Spider*, pois apresenta acurácia considerável.

Como trabalhos futuros pretende-se utilizar estruturas de modelos paramétricos lineares e outros métodos de identificação para realizar a modelagem matemática do tempo de vida de baterias utilizadas em quadrirotores *Rolling Spider*. Para realizar a modelagem matemática do tempo vida da bateria de um quadrirotor, é necessário obter experimentalmente a curva de descarga para diferentes tipos de trajetória. Cada trajetória caracterizará um perfil de descarga específico, pois com a variação da velocidade dos propulsores é variado também o consumo da bateria. A partir dos valores do tempo de vida apresentado em cada curva de descarga é possível obter o modelo matemático do tempo de vida da bateria via identificação de sistemas.

## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. **Introdução à identificação de sistemas**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- ANDRADE, G. D. **Programming Drones with Simulink**. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/videos/programming-drones-with-simulink-1513024653640.html>>. Acesso em: 13 Abril 2019.
- BRONDANI, M. d. F.; SAUSEN, A.; SAUSEN, P. S.; BINELO, M. O. Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio Íon polímero. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES. Natal, 2016.
- CARMO, M. J. d.; TEIXEIRA, P.; COSTA, J. E. R.; PINTO, J. A. Identificação de sistemas: um caso prático em laboratório de controle aplicado na identificação de um sistema mecânico frágil. In: XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. Fortaleza, 2010.
- COSTA, S. E. A. P. **Controlo e Simulação de um Quadrirotor convencional**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeroespacial) — Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- CÂNDIDO, A. S. **Sistema de gerenciamento do voo de quadrirotores tolerante a falhas**. 2015. 209 f. Tese (Doutorado em Sistemas e Controle) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e de Computação: Sistemas e Controle, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.
- DOUGLAS, B. **Drone Simulation and Control**. 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/videos/series/drone-simulation-and-control.html>>. Acesso em: 13 Abril 2019.
- DOUGLAS, J. B. F.; JULIA, G. Z.; AIRAM, T. Z. R. S.; PAULO, S. S. Identificação de sistemas aplicada à predição do tempo de vida de baterias de li-po utilizadas em dispositivos móveis. In: PROCEEDING SERIES OF THE BRAZILIAN SOCIETY OF COMPUTATIONAL AND APPLIED MATHEMATICS. São José dos Campos, 2018.
- DRAGANFLYER. **Technical Specifications Draganflyer X4-P**. 2019. Disponível em: <<http://www.draganfly.com/pdf/x4p-fullset-vs8.pdf>>. Acesso em: 25 Fevereiro 2019.
- DUARTE, M. K. S. **Controle de trajetória de um quadricóptero aplicando técnicas de controle ótimo**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica: Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.
- DUARTE, O. C. M. B. **Serviços Bluetooth**. 2019. Disponível em: <[https://www.gta.ufrj.br/grad/09\\_1/versao-final/bluetooth/Page918.htm](https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/bluetooth/Page918.htm)>. Acesso em: 13 Abril 2019.
- FRANSOZI, L. **Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de Lítio Íon Polímero através de modelos híbridos**. 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul Unijuí, Ijuí, 2015.
- HOFFMANN, G.; HUANG, H.; WASLANDER, S.; TOMLIN, C. J. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. 08 2007.

HOFFMANN, G.; WASLANDER, S.; VITUS, M. P.; HUANG, H.; GILLULA, J.; PRADEEP, V.; TOMLIN, C. J. Stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi-agent control. In: **International Conference on Intelligent Robots and Systems**. St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009. p. 404–405.

HORUS. **Technical Specifications Drone-Maptor**. 2019. Disponível em: <<https://horusaeronaves.com/quanto-custa-um-drone/drone-maptor-4/>>. Acesso em: 26 Março 2019.

HYPE, P. **Dica do dia – Mini Drone Rolling Spider na Imaginarium**. 2017. Disponível em: <<http://patiohype.com.br/dica-dia-mini-drone-rolling-spider-na-imaginarium/>>. Acesso em: 22 Fevereiro 2019.

LEISHMAN, J. G. **Principles of Helicopter Aerodynamics**. New York: Cambridge University Press, 2000.

MAHONY, R.; ROBERTS, J. Design of a four-rotor aerial robot. In: AUSTRALASIAN CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. Auckland, 2002. p. 145–150.

MATHWORKS. **Connect a Parrot Rolling Spider Minidrone to a Windows System Using Bluetooth**. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/supportpkg/parrot/ug/connect-parrot-rs-minidrone-to-computer-using-bluetooth.html>>. Acesso em: 13 Abril 2019.

MATHWORKS. **Hardware Support**. 2019. Disponível em: <[https://www.mathworks.com/hardware-support/parrot-minidrones.html?s\\_eid=PSM\\_sim&hootPostID=c188ea012509afb4971d32e4a75e9dad](https://www.mathworks.com/hardware-support/parrot-minidrones.html?s_eid=PSM_sim&hootPostID=c188ea012509afb4971d32e4a75e9dad)>. Acesso em: 11 Abril 2019.

MODELSPEED. **Parrot MiniDrone Rolling Spider**. 2019. Disponível em: <<https://www.modelspeed.net/parrot-minidrone-rolling-spider-3429-p.asp>>. Acesso em: 22 Fevereiro 2019.

PARROT. **Technical Specifications Ar.Drone 2.0 Elite Edition**. 2019. Disponível em: <<https://www.parrot.com/global/drones/parrot-ardrone-20-elite-edition#parrot-ardrone-20-elite-edition>>. Acesso em: 28 Fevereiro 2019.

PORCIUNCULA, C. M. D. **Aplicação de modelos elétricos de bateria na predição do tempo de vida de dispositivos móveis**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul- Unijuí, Ijuí, 2012.

POUNDS, P.; MAHONY, R.; CORKE, P. Modelling and control of a quad-rotor robot. 12 2006.

ROMIO, L. C. **Modelagem matemática do tempo de vida de baterias Utilizando a teoria de identificação de sistemas** 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

ROMIO, L. C.; SAUSEN, A. T. Z. R.; SAUSEN, P. S.; REIMBOLD, M. M. P. Aplicação de identificação de sistemas no tempo de vida de baterias de dispositivos móveis. In: REVISTA DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS. Rio Grande do Sul, 2012. p. 18–33.

SANTANA, L. V. **Sistema de navegação e controle para veículos aéreos não tripulados e suas aplicações**. 2016. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

- SCANDELARI, L. **Introdução à filtros digitais**. 2019. Disponível em: <[https://www.gta.ufrj.br/grad/09\\_1/versao-final/bluetooth/Page918.htm](https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/bluetooth/Page918.htm)>. Acesso em: 17 Julho 2019.
- SILVA, L. P.; CORDEIRO, C. S. Quadricóptero, aspectos gerais e análises da propulsão elétrica. In: **VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**. Espírito Santo: Instituto Federal Fluminense, 2011. p. 14.
- SILVA, L. T. G. **Modelagem, simulação e controle de um VANT quadrirrotor**. 47 f. Monografia (Graduação) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.
- SÁ, R. C. **Construção, modelagem dinâmica e controle PID para estabilidade de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadrirrotor**. 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Teleinformática) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

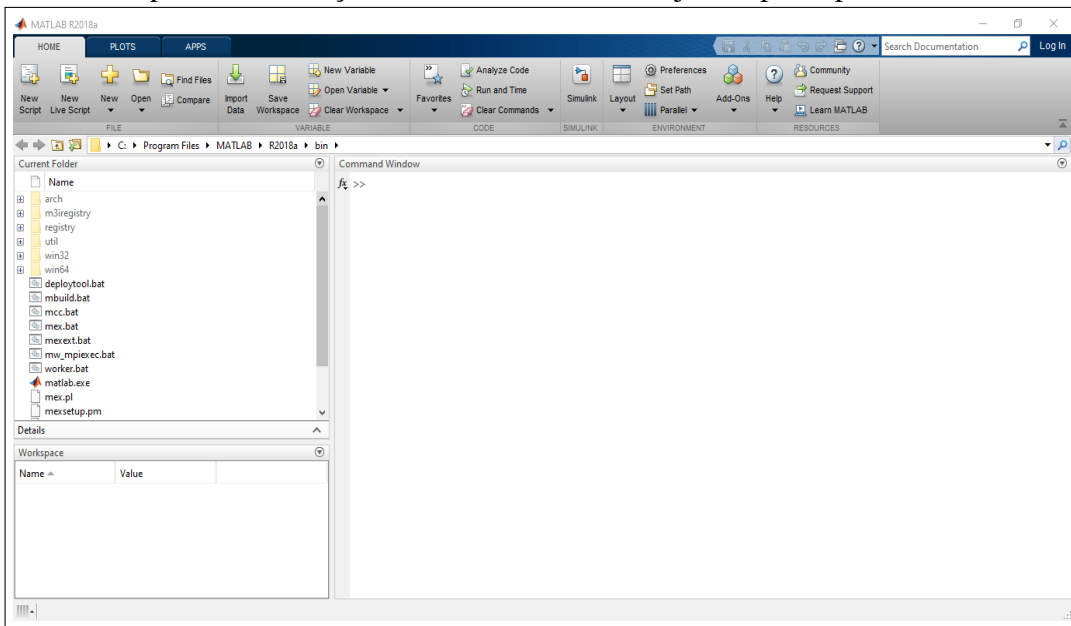
## APÊNDICE A – INSTALAÇÃO DO *TOOLBOX SIMULINK SUPPORT PACKAGE FOR PARROT MINIDRONES*

Para comunicar o quadrirotor *Rolling Spider* com o software *Matlab/Simulink* torna-se necessária a instalação do pacote de suporte para minidrones, disponível no software *Matlab/Add-Ons Explorer* a partir da versão 2017b.

Esta seção tem por objetivo apresentar os procedimentos para Instalação do *toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones*. Estes procedimentos estão divididos em 6 etapas, todas elas encontram-se enumeradas e detalhadas logo a seguir:

1. Abra o Software *Matlab* versão 2017b ou posterior.

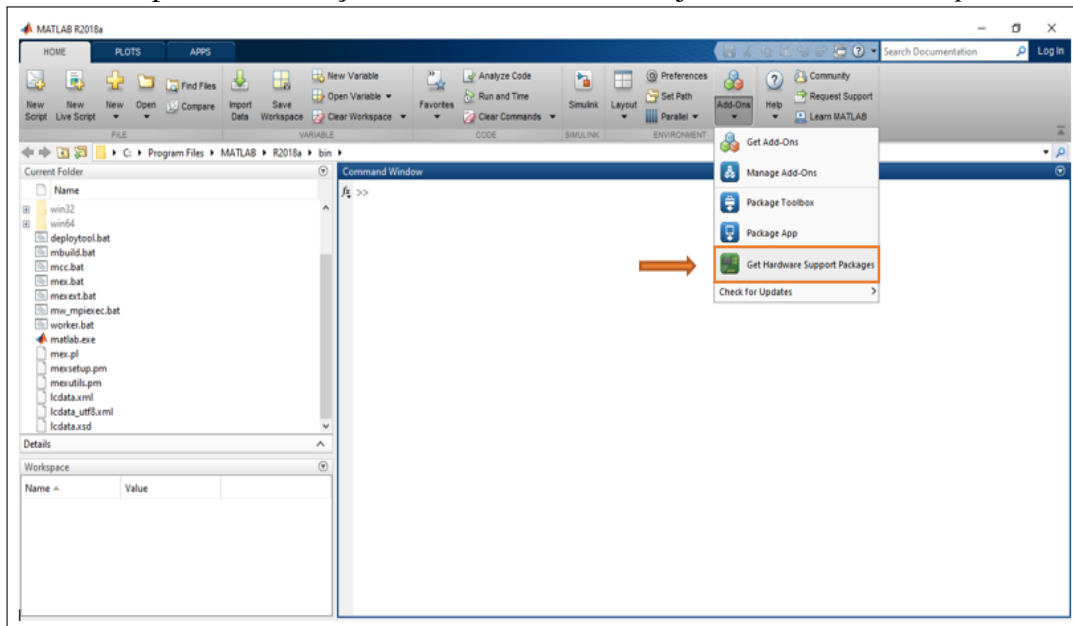
Figura 41 – Etapa 1 da instalação do *toolbox*: Abrindo a janela principal do software *Matlab*.



Fonte: Próprio Autor.

2. Com o cursor sobre "*Add-Ons*" (opção localizada no canto superior direito), pressione o botão esquerdo do mouse, e selecione a opção "*Get Hardware Support Packages*".

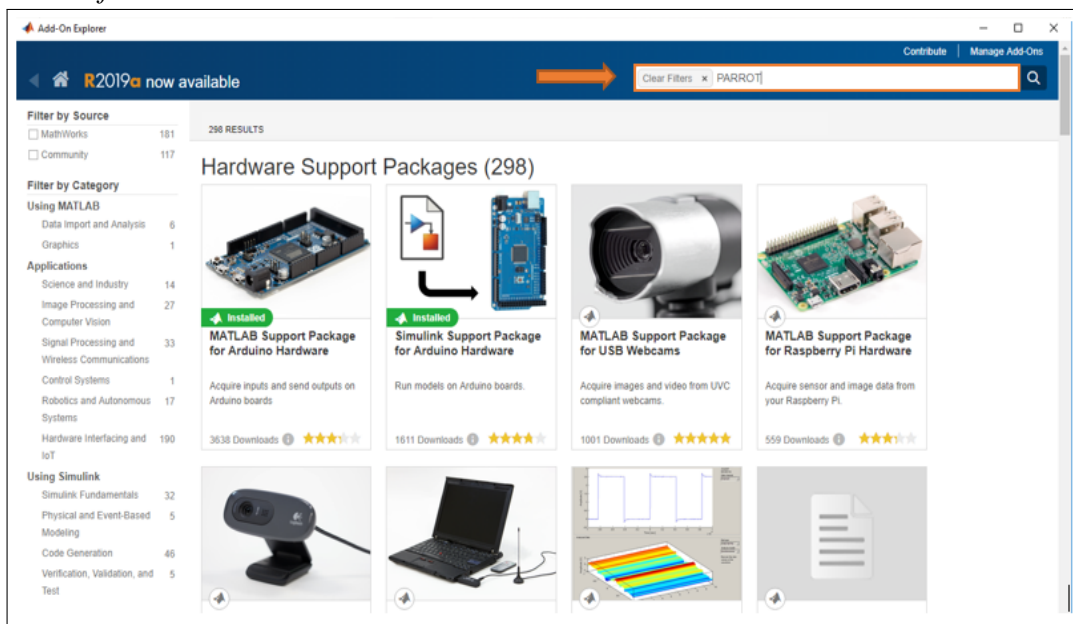
Figura 42 – Etapa 2 da instalação do *toolbox*: Abrindo a janela do *Add-Ons Explorer*.



Fonte: Próprio Autor.

3. Digite "*PARROT*" na caixa de pesquisa localizada no canto superior direito.

Figura 43 – Etapa 3 da instalação do *toolbox*: Localizando o *Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones*.

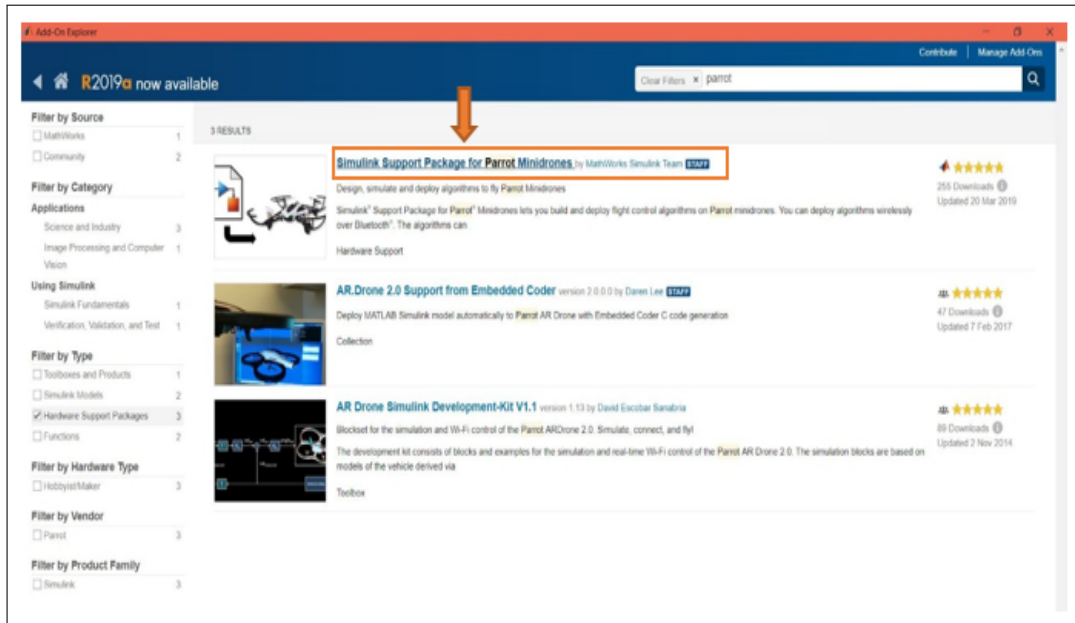


Fonte: Próprio Autor.



4. Seleccione o item "Simulink Support Package for Parrot Minidrones".

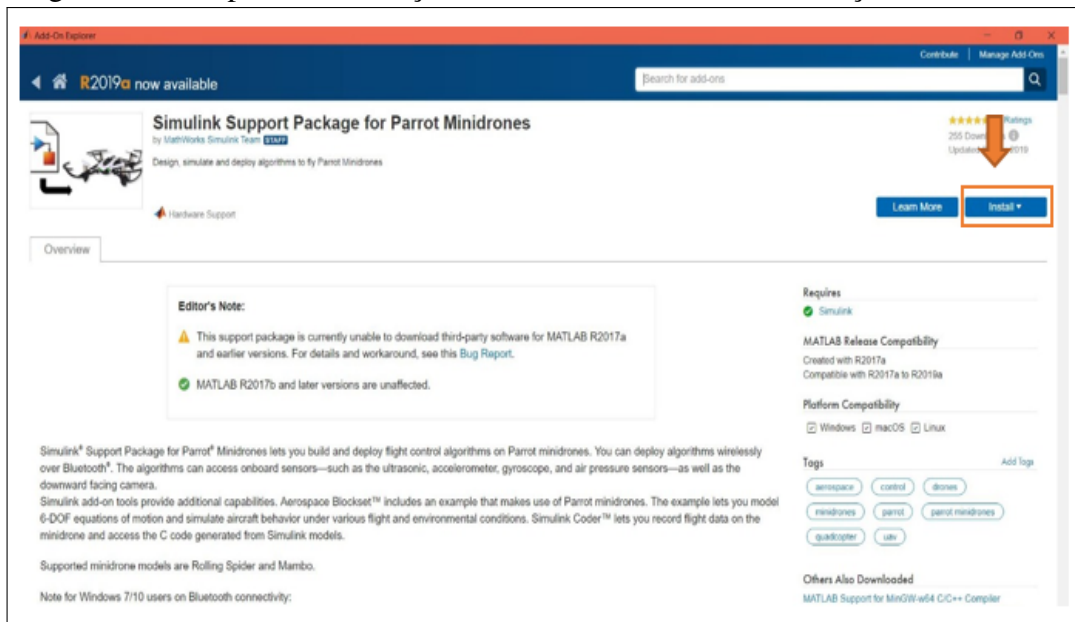
Figura 44 – Etapa 4 da instalação do *toolbox*: Selecionando o *toolbox* desejado .



Fonte: Próprio Autor.

5. Após selecionar o *toolbox* desejado, clique em "Instal" para iniciar a instalação.

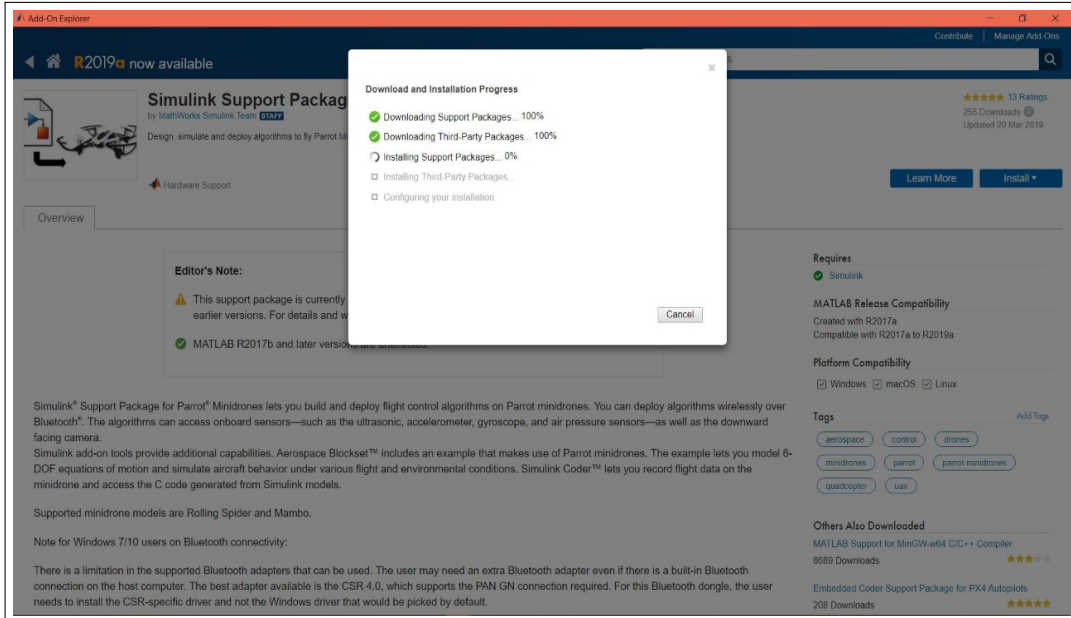
Figura 45 – Etapa 5 da instalação do *toolbox*: Iniciando a instalação.



Fonte: Próprio Autor.

6. Após clicar em "Instal", pressione "Next" e aguarde até que a instalação seja finalizada, depois feche a janela do "Add-On Explorer".

Figura 46 – Etapa 6 da instalação do *toolbox*: Finalizando a instalação .



Fonte: Próprio Autor.

7. Feche a janela do Add-Ons Explorer e execute os procedimentos para conexão bluetooth entre o computador e o quadricóptero descritos no Apêndice B

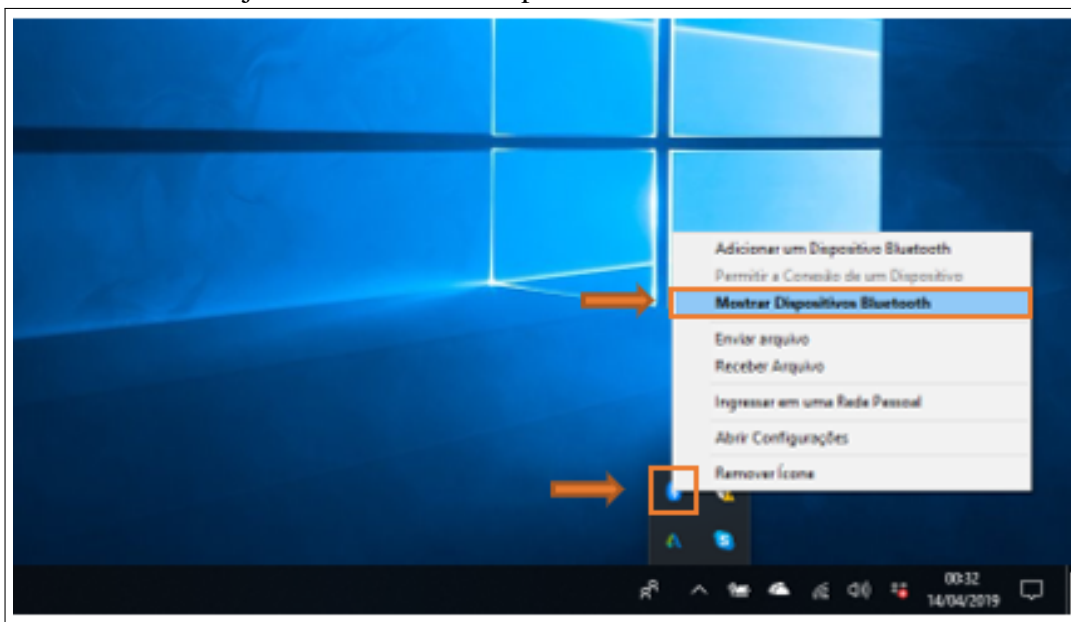
## APÊNDICE B – CONEXÃO BLUETOOTH ENTRE O COMPUTADOR E O QUADRIROTOR UTILIZANDO UM DONGLE LOW ENERGY BLUETOOTH USB 4.0

Esta seção tem por objetivo apresentar os procedimentos necessários para conectar um quadricóptero *Rolling Spider* a um computador utilizando conexão em rede ad-hoc de grupo (GN), que por sua vez consiste em redes que se comunicam de forma direta com um ou mais dispositivos utilizando uma conexão bluetooth (DUARTE, 2019).

O procedimento para comunicar os dois dispositivos está dividido em 8 etapas, cada uma delas encontra-se enumerada e descrita logo a seguir (MATHWORKS, 2017):

1. Ligue o quadricóptero *Rolling Spider* pressionando o botão localizado no corpo do veículo, depois aguarde até que os dois leds se estabilizem na cor verde.
2. Insira o Dongle Bluetooth USB na porta USB do computador, e instale o drive do dispositivo, utilizando o CD que acompanha o adaptador.
3. Na área de notificação da barra de tarefas, clique com o botão direito do mouse no ícone do Bluetooth, e selecione a opção "Mostrar Dispositivos Bluetooth".

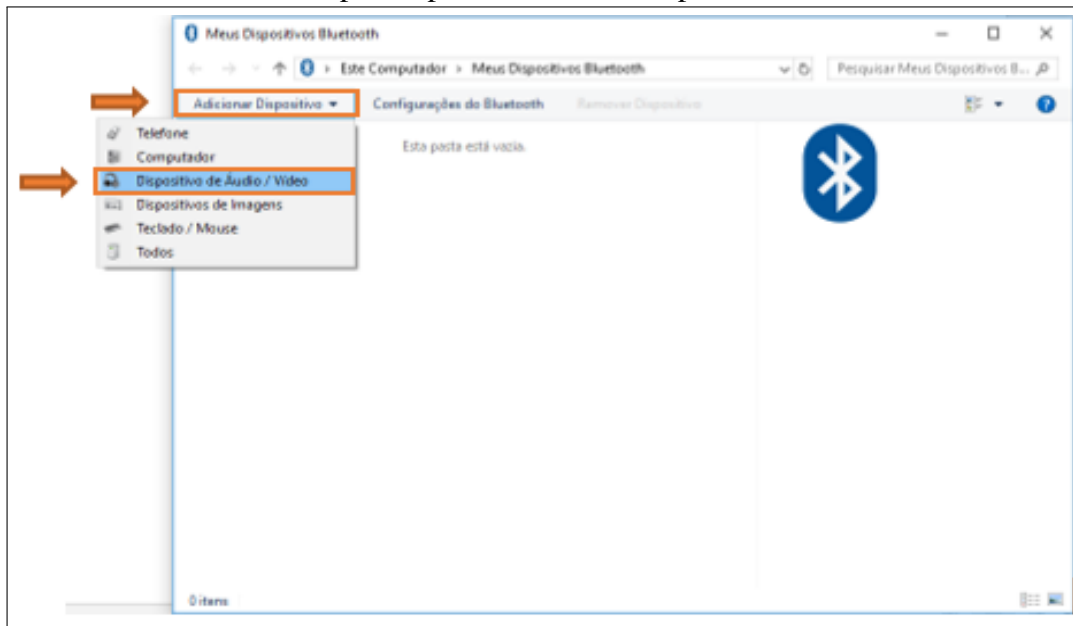
Figura 47 – Abrindo a janela de busca de dispositivos bluetooth.



Fonte: Próprio Autor.

4. Após abrir a janela de busca de dispositivos bluetooth, selecione a opção "Adicionar Dispositivos", em seguida clique em "Dispositivos de Áudio/Video".

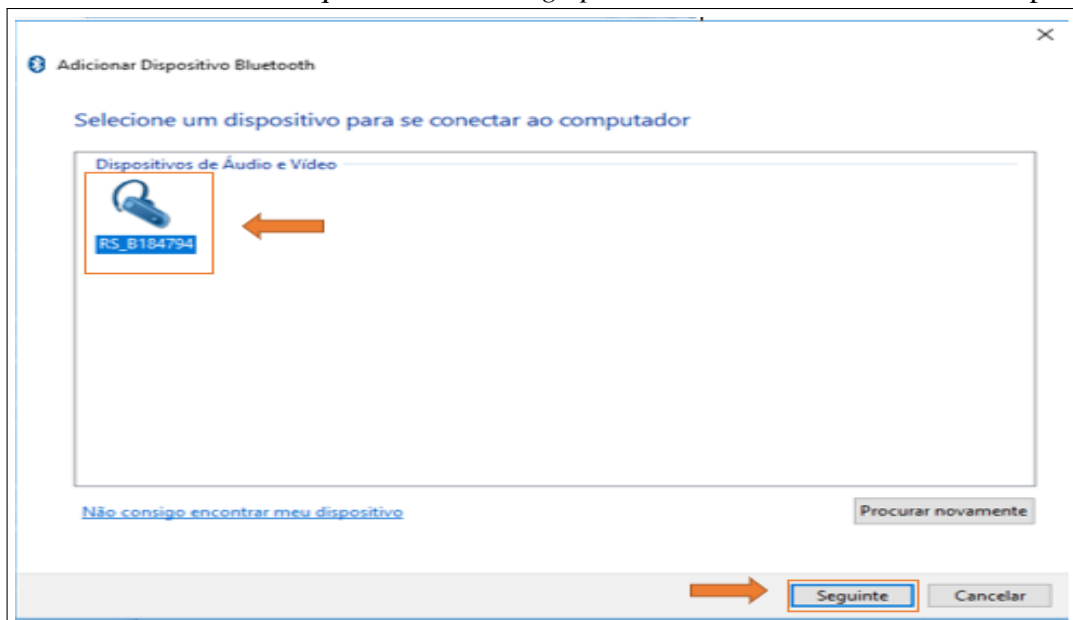
Figura 48 – Iniciando a busca por dispositivos bluetooth próximos



Fonte: Próprio Autor.

5. Selecione o dispositivo *Rolling Spider* e depois clique na opção "seguinte". Vale ressaltar que o nome do dispositivo quadricóptero a ser encontrado sempre será semelhante ao da imagem a seguir:

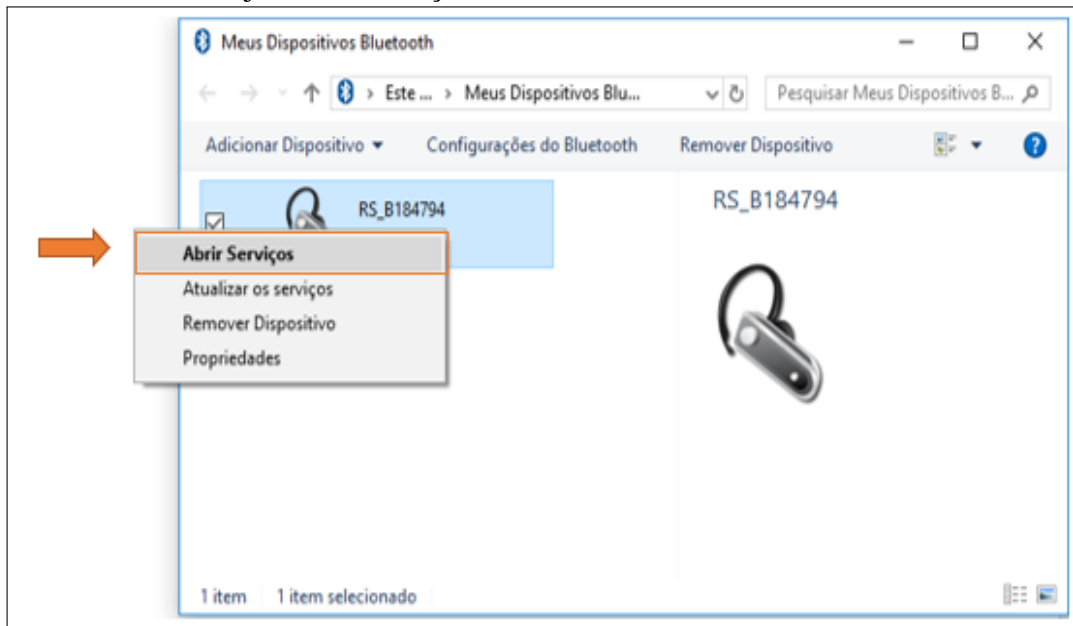
Figura 49 – Selecionando o quadricóptero *Rolling Spider* e adicionando-o à lista de dispositivos



Fonte: Próprio Autor.

6. Após adicionar o dispositivo *Rolling Spider*, clique com o botão direito do mouse em cima do nome do dispositivo adicionado e selecione a opção "Abrir Serviços".

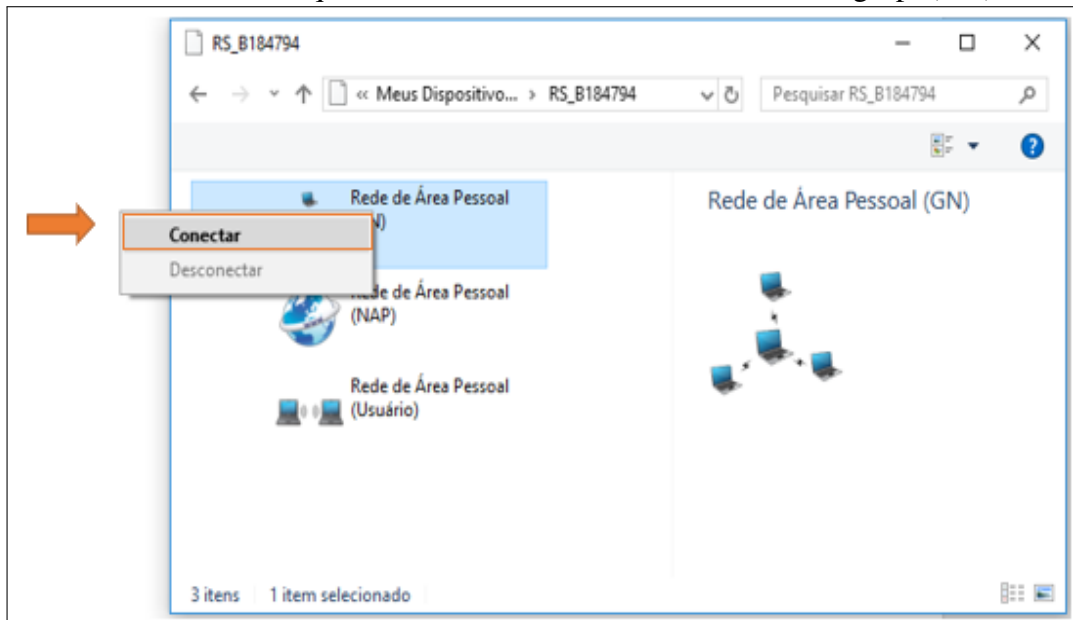
Figura 50 – Abrindo a janela de serviços Bluetooth



Fonte: Próprio Autor.

7. Após abrir a janela de serviços bluetooth, com o cursor do mouse em cima da opção "Rede de Área Pessoal(GN)", clique com o botão direito do mouse e selecione a opção "Conectar".

Figura 51 – Conectando ao quadricóptero utilizando uma rede ad-hoc de grupo(GN)



Fonte: Próprio Autor.

8. Feche a janela de serviços bluetooth e execute os procedimentos para envio da simulação e obtenção dos registros de voo descritos no Apêndice C.

## APÊNDICE C – ENVIO DA SIMULAÇÃO E OBTENÇÃO DOS REGISTROS DE VOO VIA BLUETOOTH

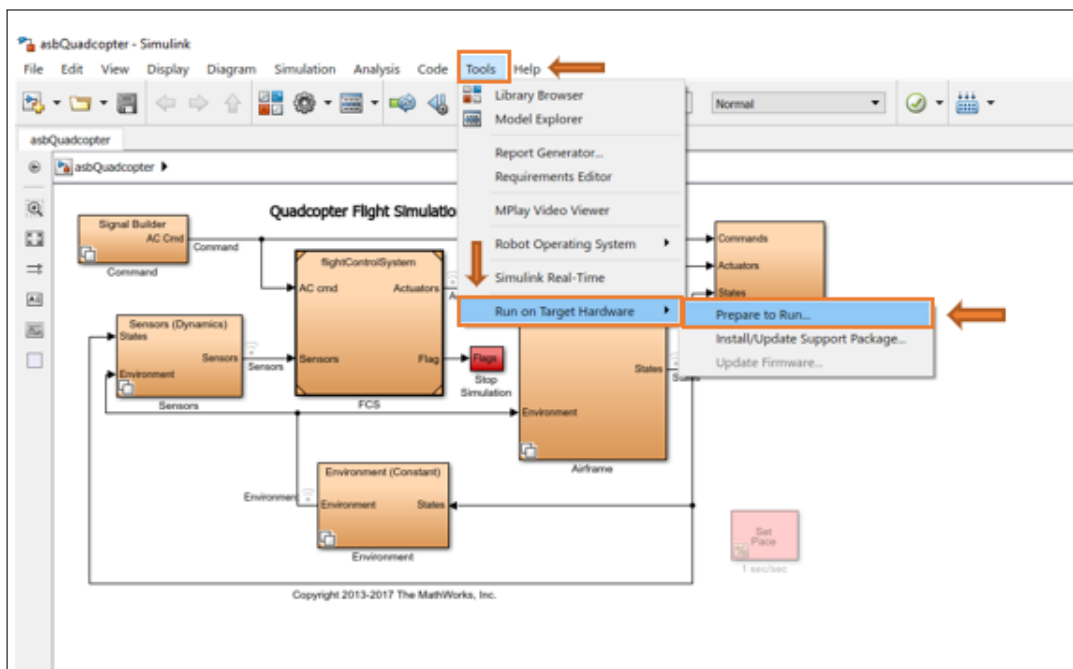
Após baixar o *Toolbox Simulink Support Package for Parrot Minidrones*, conectar o quadricóptero *Rolling Spider* ao Dongle USB via Bluetooth, e abrir o exemplo *AsbQuadcopter*, os próximos passos a serem executados consistem na configuração e envio dos algoritmos de voo, além da aquisição de dados dos sensores e bateria a partir da comunicação via bluetooth entre o software Matlab/Simulink e um quadricóptero de baixo custo.

Esta seção tem por objetivo apresentar todas as etapas necessárias para configurar e enviar a simulação *AsbQuadcopter* para um quadricóptero *Rolling Spider*, e obter o acesso aos dados de registro de voo, descarga da bateria, e leitura dos sensores. Vale ressaltar que os procedimentos para enviar qualquer outro exemplo de simulação relacionado a minidrones quadricóptero ocorre de forma análoga.

A configuração para envio da simulação e aquisição de dados entre o software Matlab/Simulink e Hardware do quadricóptero *Rolling Spider* está dividida em 16 etapas, cujas estão enumeradas e detalhadas logo a seguir:

1. Com a janela principal da simulação aberta, clique em "*Tools*", depois em "*Run on Target Hardware*", por fim selecione a opção "*Prepare to Run...*".

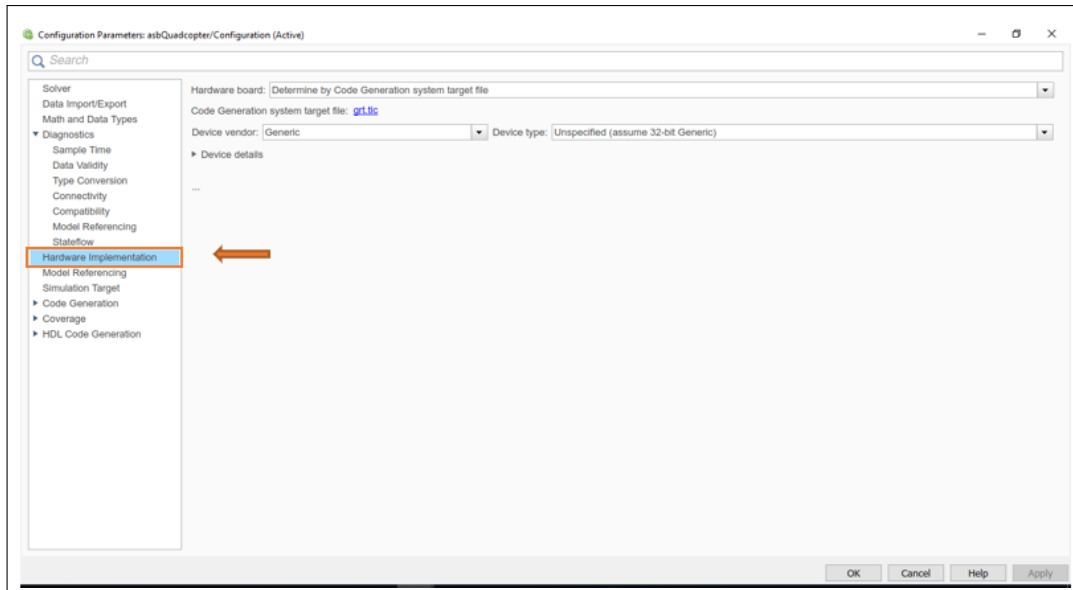
Figura 52 – Etapa 1 (Comunicação): Abrindo a janela de configuração de Parâmetros da planta e sensores.



Fonte: Próprio Autor.

2. Seleccione a opção "*Hardware Implementation*".

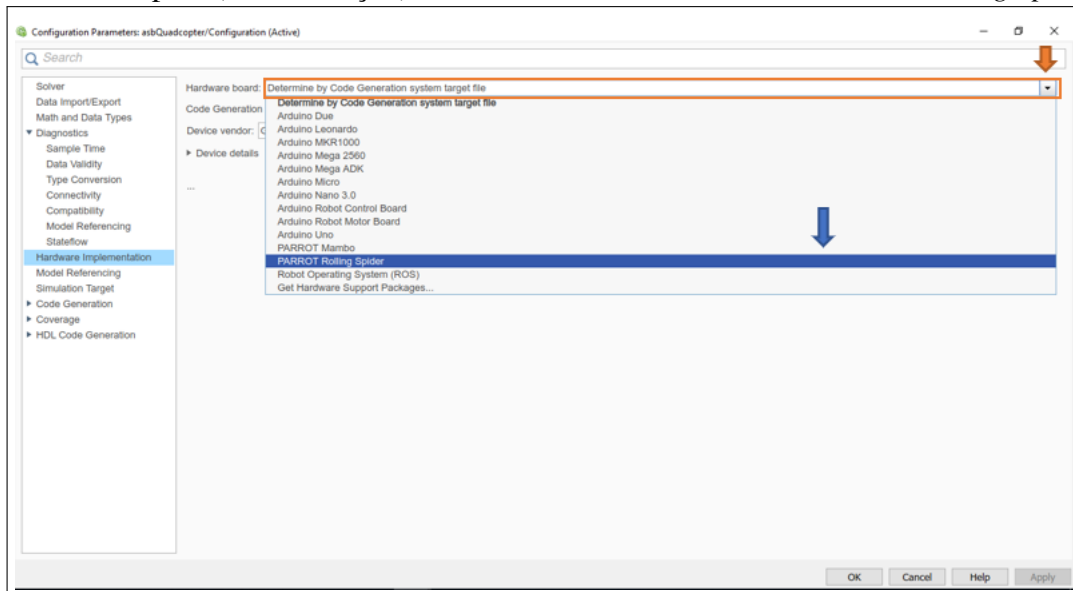
Figura 53 – Etapa 2 (Comunicação): Abrindo a aba de configuração do Hardware .



Fonte: Próprio Autor.

3. Clique na aba de opções "*Hardware Board*", em seguida selecione o modelo "*PARROT Rolling Spider*".

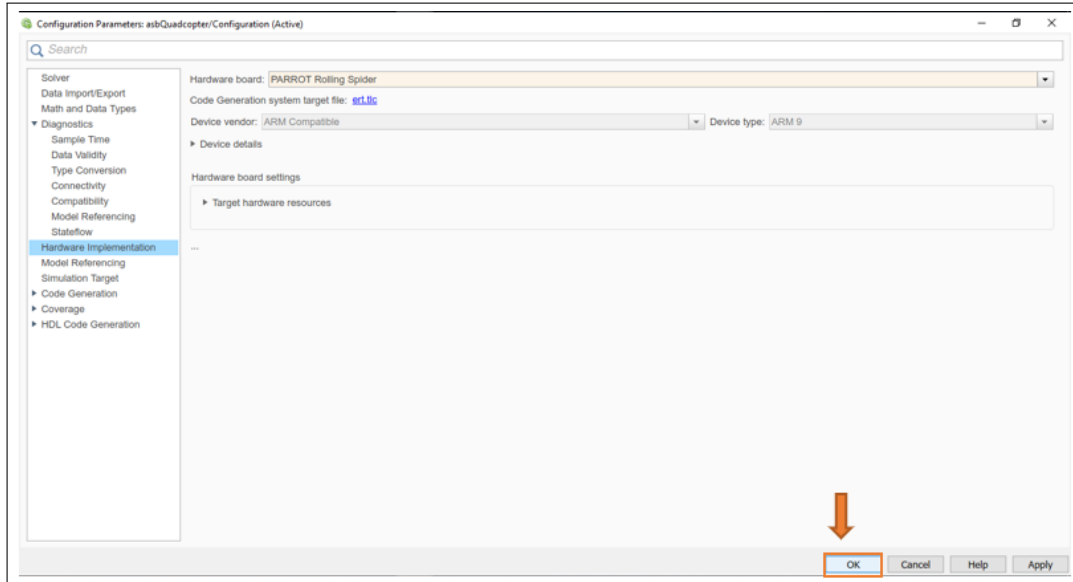
Figura 54 – Etapa 3 (Comunicação): Setando o Modelo do hardware como *Rolling Spider* .



Fonte: Próprio Autor.

4. Com a opção "*PARROT Rolling Spider*" selecionada, clique em "*Ok*".

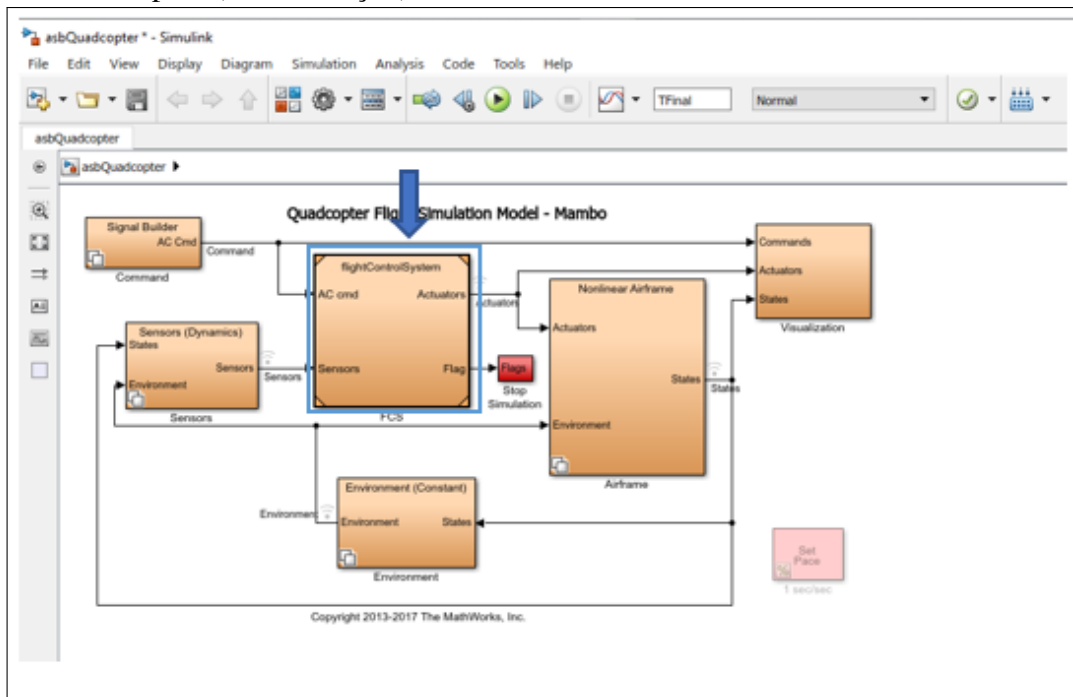
Figura 55 – Etapa 4 (Comunicação): Finalizando a configuração de Parâmetros da planta e sensores .



Fonte: Próprio Autor.

5. Retorne à janela principal da simulação, e abra o bloco: "*FCS*".

Figura 56 – Etapa 5 (Comunicação): Abrindo o bloco de Controle do Sistema .

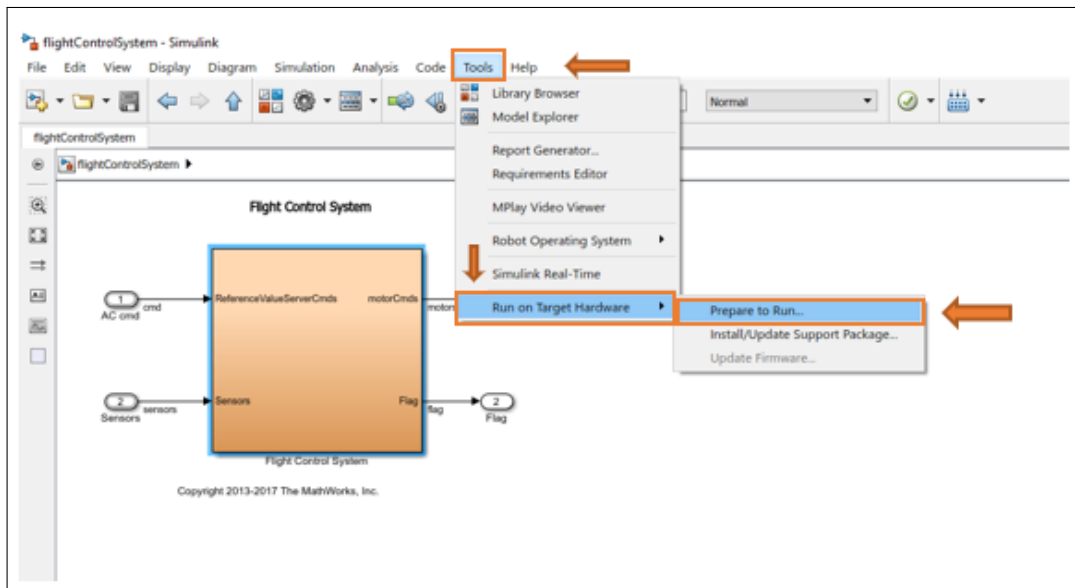


Fonte: Próprio Autor.

6. Após abrir o bloco: "*FCS*", clique em "*Tools*", depois em "*Run on Target Hardware*", e por fim selecione a opção "*Prepare to Run...*".



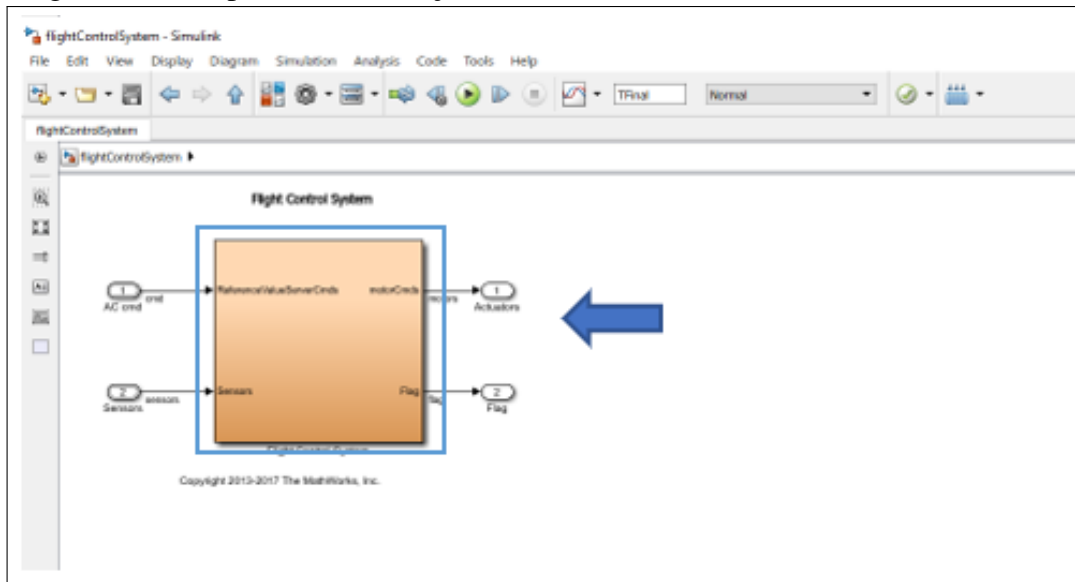
Figura 57 – Etapa 6 (Comunicação): Abrindo a configuração de parâmetros do bloco de controle do sistema. .



Fonte: Próprio Autor.

7. Repita as etapas 2,3 e 4, logo após salve a simulação.
8. Retornando à janela do bloco "FCS", abra o bloco de subsistema: "*FlightControlSystem*".

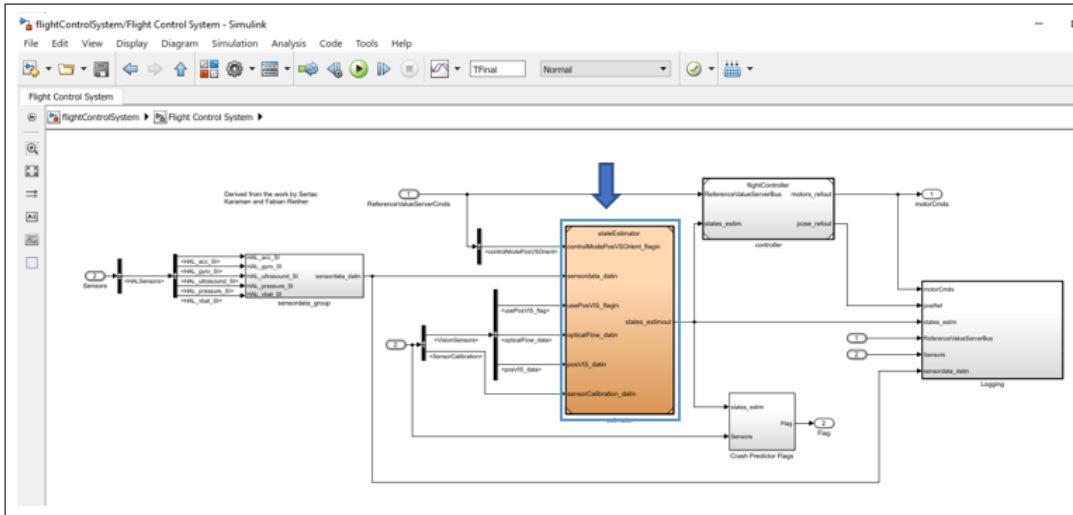
Figura 58 – Etapa 8 (Comunicação): Abrindo o subsistema do bloco de controle.



Fonte: Próprio Autor.

9. Após abrir o bloco de subsistema: "*FlightControlSystem*", abra o bloco de estimação de estados: "*State Estimator*",

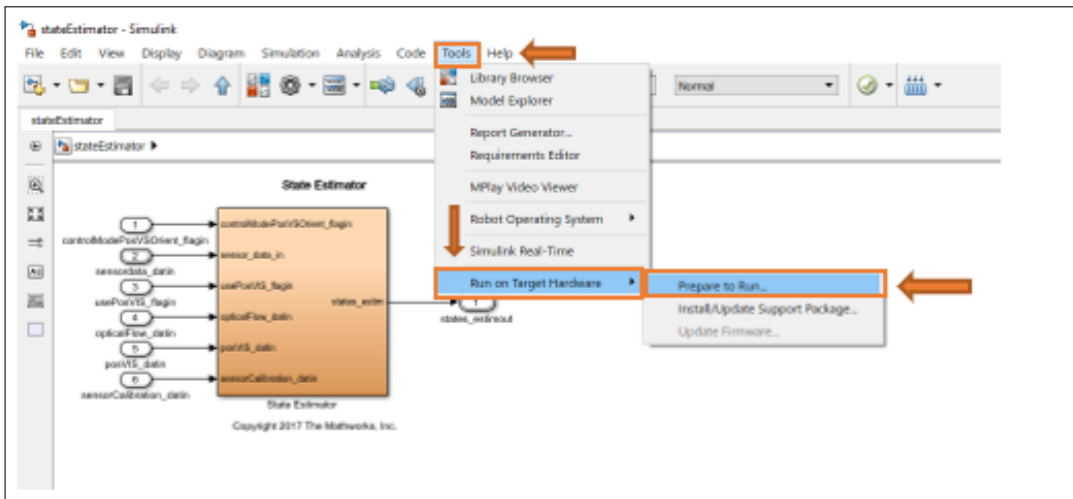
Figura 59 – Etapa 9 (Comunicação): Abrindo o bloco de estimação de estados .



Fonte: Próprio Autor.

10. Na janela "*State Estimator*", clique em "*Tools*", depois em "*Run on Target Hardware*", por fim selecione a opção "*Prepare to Run...*".

Figura 60 – Etapa 10 (Comunicação): Abrindo a configuração de parâmetros do estimador de estados.

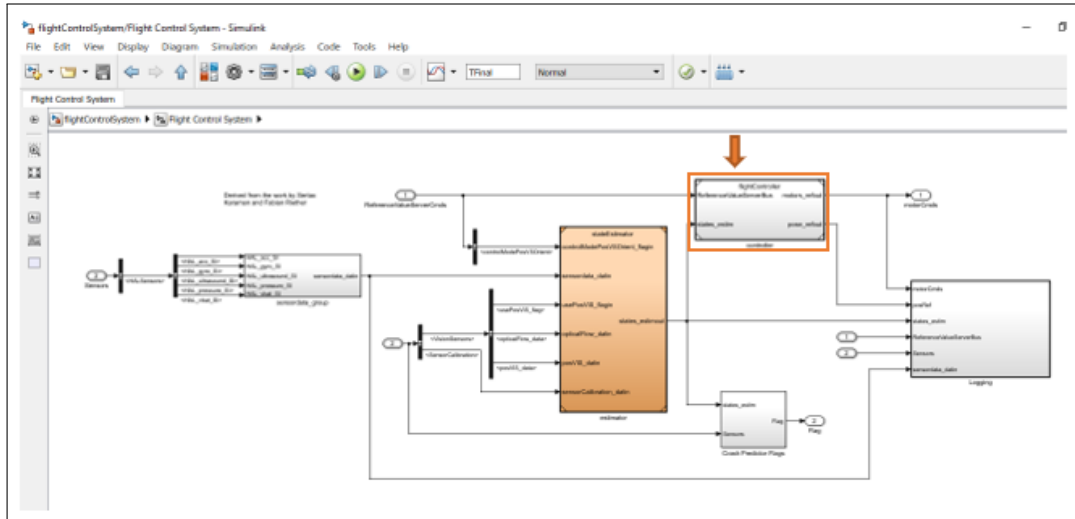


Fonte: Próprio Autor.

11. Repita as etapas 2,3 e 4, logo após salve a simulação e feche a janela "*State Estimator*".

12. Retorne para o bloco de subsistema: "*FlightControlSystem*", abra o bloco de controle: "*Flight Controller*",

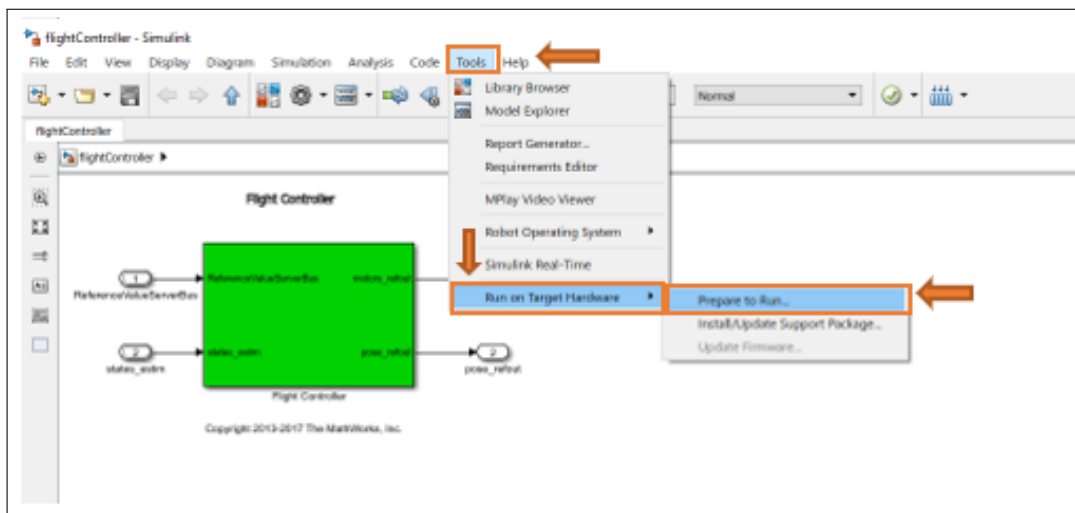
Figura 61 – Etapa 12 (Comunicação): Abrindo o bloco de controle de estabilidade .



Fonte: Próprio Autor.

13. Com a janela "*Flight Controller*" aberta, clique em "*Tools*", depois em "*Run on Target Hardware*", por fim selecione a opção "*Prepare to Run...*".

Figura 62 – Etapa 13 (Comunicação): Abrindo a configuração de Parâmetros do bloco de controle de estabilidade .



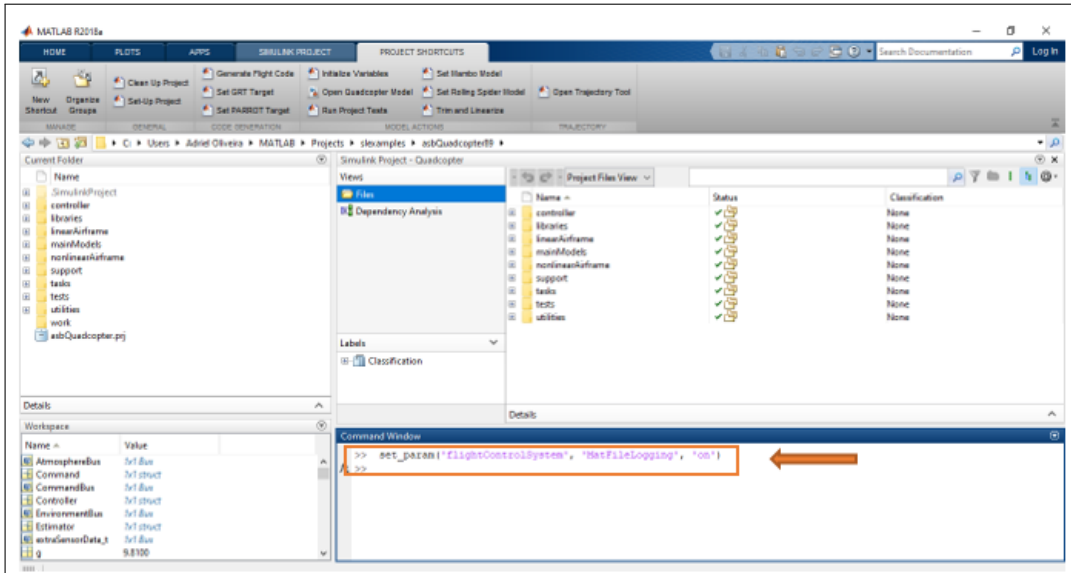
Fonte: Próprio Autor.

14. Repita as etapas 2,3 e 4, logo após salve a simulação e feche a janela "*Flight Controller*".  
15. Ativação da Aquisição de dados

Digite "`set_param('flightControlSystem', 'MatFileLogging', 'on')`" na janela de comando do *Matlab* para ativar a aquisição de dados de voo. Após a execução do comando de

ativação do registro de dados de voo, toda vez que o usuário enviar uma simulação para o quadricóptero, ele armazena em forma de vetores os dados de voo, sensores, e bateria. Os dados registrados ficam armazenados no software *Matlab* para fins de utilização.

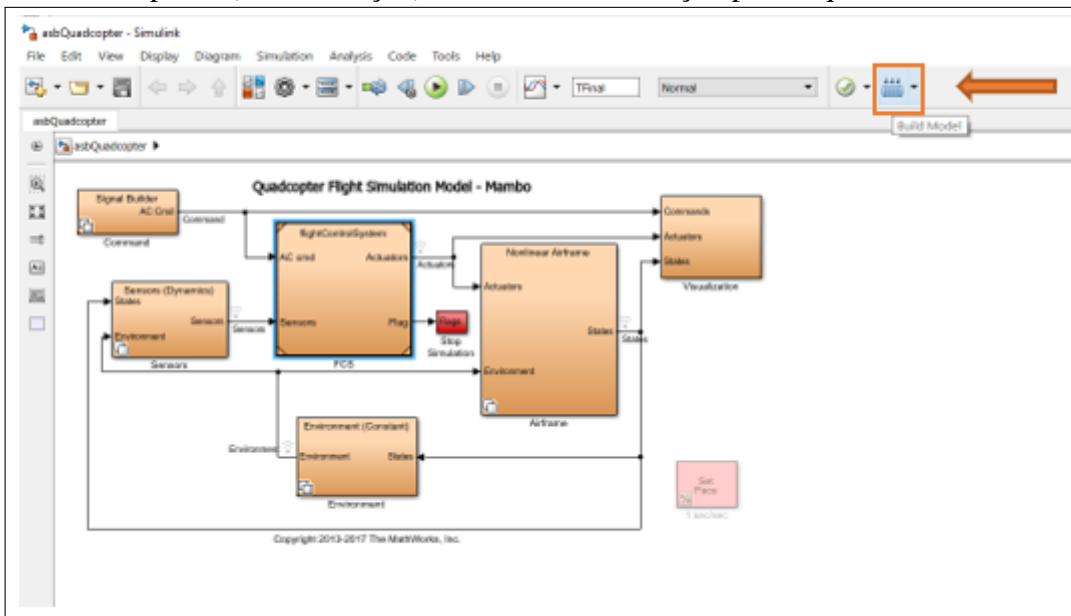
Figura 63 – Etapa 15 (Comunicação): Ativando a aquisição de dados de voo.



Fonte: Próprio Autor.

16. Retorne à janela principal do modelo de simulação, e clique em "*Bild Model*" para enviar a simulação para o quadricóptero.

Figura 64 – Etapa 16 (Comunicação): Enviando a simulação para o quadricóptero .



Fonte: Próprio Autor.

## APÊNDICE D – IMPLEMENTAÇÃO EM MATLAB- CONDICIONAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS E IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO MQNR

Nesta seção será apresentada a Implementação em matlab utilizada no presente trabalho para realizar o condicionamento dos dados experimentais e a aplicação do estimador dos Mínimos Quadrados não Recursivos. Essa implementação consiste em um algoritmo representado em linguagem C, e está dividida em quatro partes conforme descrito a seguir:

Na *parte 1* são realizados os procedimentos lógicos para se obter o sinal de entrada  $u(k)$  e o sinal de saída  $y(k)$  do sistema a partir do banco de dados experimentais. Em seguida são implementados procedimentos lógicos para plotar a curva de descarga real (obtida experimentalmente).

Na *parte 2* é aplicado um filtro digital média móvel no sinal de resposta do sistema  $y(k)$  com o objetivo de reduzir o ruído branco proveniente do processamento digital realizado na aquisição de dados, obtendo assim  $y'(k)$ . Em seguida são implementados procedimentos lógicos para plotar a curva de descarga da bateria após a aplicação do filtro.

Já na *parte 3* do algoritmo é realizado a divisão dos vetores de amostra do sinal de entrada  $u(k)$  e de saída do sistemas  $y'(k)$  em duas parte. A primeira parte (amostras de modelagem) consiste nos dados que serão utilizados para estimação dos parâmetros das estrutura: ARX, ARMAX, BJ, e MQNR. A segunda parte (amostras de validação) da divisão é utilizada para validar os modelos paramétricos lineares.

Por fim, na *parte 4* do algoritmo é realizada a implementação do método dos Mínimos Quadrados não Recursivos. Em seguida são implementados procedimentos lógicos para plotar a curva de descarga real (curva formada pelas amostras de modelagem), curva estimada (curva do modelo estimado), e erro (curva formada pela diferença entre os valores reais e estimados). Outros procedimentos lógicos são implementados com o objetivo de retornar ao usuário usuário a função de transferência e a acurácia do modelo estimado.

```
clear all
close all
clc
load('ENSAIOS_BATERIA')

%% ##### PARTE 1 #####
%% Obtendo os vetores u(k) e y(k) a partir do banco de dados

for Z=1:1:137323
    Y(Z)=(E01V(Z)+E02V(Z)+E03V(Z)+E04V(Z)+E05V(Z)+E06V(Z)+E07V(Z)+E08V(Z)+E09V(Z)+E10V
(Z))/10;
end
U=[0:0.005:686.610];
plot(U,Y,'b')
title('Curva de descarga da Bateria'),xlabel('Tempo(s)'),ylabel('Tensão(V)');

%% ##### PARTE 2 #####
%% Aplicando um filtro média móvel em y(k) e obtendo y'(k)

Z=0;
M = 500;

for Z=M:length(Y)
    Y_SAI(Z)=mean(Y((Z-M+1):Z));
end

hold on, plot(U,Y_SAI,'r');

%% ##### PARTE 3 #####
%% Obtendo as amostras de modelagem(VP e TP) ;
l=1;
m=1;
for j=1:1:137323
if mod(j,2) == 1
VP(l)=Y_SAI(j);
l=l+1;
TP=[0:0.01:686.610];

%%Obtendo as amostras de validação (VV e TV)
else
VV(m)=Y_SAI(j);
m=m+1;
end
end
TV=[0.005:0.01:686.610];

%% ##### PARTE 4 #####
%% Aplicação do método dos mínimos quadrados não recursivos
```

```
y1=VP';
y=y1;
u1=TP';
u=u1;
npts=length(y)

Y=[]; fi=[];
for i=1:npts
    if i<=2
        y1=0; y2=0; u1=0; u2=0;
    else y1=y(i-1); y2=y(i-2); u1=u(i-1); u2=u(i-2);

    end;

    Y=[Y; y(i)];    fi=[fi; -y1 -y2 u1 u2 ];
end
teta=inv(fi'*fi)*fi'*Y;
for t=1:2,
    yest(t)=0;
end
a1=teta(1); a2=teta(2); b1=teta(3); b2=teta(4);
for t=3:npts,

    yest(t)=-a1*yest(t-1)-a2*yest(t-2)+b1*u(t-1)+b2*u(t-2);

end;
figure(1)
plot(y, 'b');
hold on;
plot(yest, 'r'); title('Real e Estimado'), xlabel('Amostragem'), ylabel('Magnitude');

erro=y-yest';
plot(erro, 'g');

legend(' real', ' estimado', ' erro')

nn=2/(npts-1);
tt=0:nn:2
figure(2)
plot(tt, y, tt, yest, tt, erro);

%% FUNÇÃO DE TRANSFERENCIA EM Z e s

Acuracia = ((1-(immse(y,yest')))*100)
Ts=1;
gd=tf([0 b1 b2],[1 a1 a2],Ts)
Gc=d2c(gd, 'zoh')
step(Gc)
```