UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VINICIUS PELIZZER CASARA

HELICÓPTERO 2-DOF: DESENVOLVIMENTO E CONTROLE DAS MALHAS DE ARFAGEM E GUINADA POR TÉCNICAS PI E LQR

JOINVILLE, SC
2015

VINICIUS PELIZZER CASARA

HELICÓPTERO 2-DOF: DESENVOLVIMENTO E CONTROLE DAS MALHAS DE ARFAGEM E GUINADA POR TÉCNICAS PI E LQR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica na Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.
Orientadora: Dra. Mariana Santos Matos Cavalca

JOINVILLE, SC

2015

VINICIUS PELIZZER CASARA

HELICÓPTERO 2-DOF: DESENVOLVIMENTO E CONTROLE DAS MALHAS DE ARFAGEM E GUINADA POR TÉCNICAS PI E LQR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Banca Examinadora:

Orientadora: _____

Prof.ª Dra. Mariana Santos Matos Cavalca
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: _____

Prof. Dr. José de Oliveira
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: _____

Prof. Eng. Gabriel Hermann Negri
Universidade do Estado de Santa Catarina

JOINVILLE, 11 DE DEZEMBRO DE 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de uma forma ou de outra em minha graduação nestes quatro anos e meio.

Primeiramente e acima de tudo, agradeço a Deus, por nos conceder a vida, o amor e compaixão.

Agradeço à Prof.ª Dra. Mariana Cavalca, pela orientação e por todos os ensinamentos recebidos.

Ao Prof. Dr. André Leal e a todos os integrantes do grupo PET Engenharia Elétrica pelo apoio, incentivo, disponibilidade de espaço físico e carga horária, além do companheirismo nos últimos dois anos e meio como PETiano.

Aos meus pais, Lodovico e Beatriz, à minha irmã Valéria e demais familiares por todo incentivo, compreensão e amor.

Aos meus tios e padrinhos, Sérgio e Terezinha, e ao meu primo Giancarlos, pelo apoio e incentivo, além da contribuição em uma etapa do trabalho, cedendo a estrutura da empresa RM Máquinas Frigoríficas para elaboração do projeto e da montagem da planta didática.

Aos colegas e amigos: Rodolfo V. Bernardi, por toda a parceria desde o início do curso até os dias atuais, Dhyony Serighelli, Gillian Dal Posso, Vitor Okamoto, Iago Campos, Gian Nunes, Lucas Terres e Jardel Teixeira, que contribuíram em diversos assuntos relacionados ao curso.

Ao colega e amigo Rodolfo Weinert, pelo apoio e contribuição para melhoria do trabalho.

RESUMO

CASARA, Vinicius Pelizzer. **Helicóptero 2-DOF: Desenvolvimento e controle das malhas de arfagem e guinada por técnicas PI e LQR.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2015.

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de uma planta didática intitulada Helicóptero 2-DOF, composta pelas malhas de arfagem e guinada, elaborada com o objetivo de contribuir para o estudo de disciplinas e pesquisas na área de acionamentos e controle do curso de Engenharia Elétrica. Buscou-se criar uma interface de comunicação entre *hardware* e *software* que auxiliasse a implementação das técnicas de controle. É apresentada a modelagem do sistema por meio de aproximação linear e aplicadas técnicas de controle linear, PI e LQR, nas malhas de arfagem e guinada, além de complementar o trabalho com testes de malhas de controle avançadas em parceria com acadêmicos do mestrado. Os resultados são apresentados com intuito de validar a aplicabilidade da utilização da planta às técnicas de controle, desde controle clássico a controle ótimo.

Palavras-chave: Planta didática, helicóptero 2-DOF, malhas de controle e modelagem

ABSTRACT

CASARA, Vinicius Pelizzer. **2-DOF Helicopter: Development and Control of Pitch and Yaw Loop for PI and LQR Techniques.** Course Conclusion Work (Bachelor of Science in Electrical Engineering). Santa Catarina State University. Joinville, 2015.

This work describes the development of a didactic plant entitled 2-DOF Helicopter, composed by pitch and yaw loops, prepared in order to contribute to the study of disciplines and research in the field of drive and control in the course of Electrical Engineering. It sought to create an interface between hardware and software that would help the implementation of control techniques. It's presented the modeling of the system by means of linear approximation and applied linear control techniques, PI and LQR, the pitch and yaw loops, also complement the work with advanced control loop tests in partnership with master's students. The results are presented in order to validate the applicability of using the plant to control techniques, from classical control to optimal control.

Keywords: Didactic plant, 2-DOF helicopter, control loops and modeling

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Pêndulo amortecido 18
Figura 2: Modelo comercial de planta 3-DOF 19
Figura 3: Estrutura experimental com três graus de liberdade 20
Figura 4: Plataforma experimental de um modelo reduzido de helicóptero 22
Figura 5: Diagrama das forças na planta com dois graus de liberdade 24
Figura 6: Exemplo de configurações “*tractor*” e “*pusher*” 25
Figura 7: Estrutura original da planta didática 28
Figura 8: Acoplamento do eixo de arfagem ao eixo do potenciômetro 29
Figura 9: Acoplamento do sensor do ângulo de guinada 29
Figura 10: Estrutura base da planta didática 31
Figura 11: Parte inferior da base de sustentação da planta 32
Figura 12: Peça que liga a haste horizontal e a haste vertical 33
Figura 13: suporte dos motores 34
Figura 14: Suporte do potenciômetro na planta 34
Figura 15: Planta modificada 35
Figura 16: Motor *Brushless* EMAX CF2805 36
Figura 17: Motor EMAX XA2212 38
Figura 18: *Driver* ESC HobbyKing 20 A 39
Figura 19: Potenciômetro Vishay SPECTROL 357 40
Figura 20: Esquema de ligação da estrutura de controle 41
Figura 21: Plataforma Arduino Uno 42
Figura 22: Diagrama de entradas e saídas 44
Figura 23: Medição para a obtenção do modelo do ângulo de arfagem 45
Figura 24: Resposta no ângulo de guinada com degrau no atuador de arfagem e valor constante no atuador da guinada 47
Figura 25: Comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência 48
Figura 26: Resposta no ângulo de arfagem com degrau no atuador de arfagem e valor constante no atuador da guinada 48
Figura 27: Comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência 49
Figura 28: Resposta no ângulo de guinada com degrau no atuador de guinada e valor constante no atuador da arfagem 50
Figura 29: Comparação entre os dados reais da leitura do ângulo de guinada e a resposta obtida da função transferência 51
Figura 30: Resposta no ângulo de arfagem com degrau no atuador de guinada e valor constante no atuador da arfagem 51
Figura 31: Comparação entre os dados reais da leitura do ângulo de arfagem e a resposta obtida da função transferência 52
Figura 32: Diagrama de blocos controlador PI 57
Figura 33: Lugar geométrico das raízes em malha aberta 58
Figura 34: Resposta ao degrau de malha fechada 58
Figura 35: Referência em 21º no movimento de arfagem e resposta do atuador 66
Figura 36: Referência variando de 21º para 53º no movimento de arfagem e a resposta do atuador 67
Figura 37: Resposta do controle PI em ângulos de arfagem próximos a saturação 68
Figura 38: Resultados do LQRI com oscilações no ângulo de arfagem e guinada 70
Figura 39: Resultados do controlador LQR 72

Figura 40: Resultado dos ângulos de arfagem e guinada aplicando um distúrbio em 50 segundos 73
Figura 41: Resultado com a mudança 3 vezes de referência 74
Figura 42: Resultado do controle predito sem restrições no ângulo de arfagem 76
Figura 43: Resultado do controle predito sem restrições no ângulo de guinada 76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
ESC	*Electronic Speed Control*
SISO	*Single Input – Single Output*
MIMO	*Multiple Input – Multiple Output*
DSP	Dispositivo Lógico Programável
N-DOF	*Number - Degrees Of Freedom*
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
LQR	*Linear Quadratic Regulator*
FET	*Fields Effect Transistor*
PPGEEL	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do motor *Brushless* EMAX CF2805 36
Tabela 2: Especificações do *Brushless* EMAX XA2212 37
Tabela 3: Especificações elétricas do potenciômetro 40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 HIPÓTESES 15
1.2 DIVISÃO DO TEXTO 15

2 PLANTAS DIDÁTICAS COM *N-DOF* 17
2.1 PLANTA 1: PÊNDULO AMORTECIDO 17
2.2 PLANTA 2: EXPERIMENTAL COM 3-DOF 19
2.3 PLANTA 3: PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE UM MODELO REDUZIDO DE HELICÓPTERO 21
2.4 CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS 22

3 ESTRUTURA EXPERIMENTAL: HELICÓPTERO COM 2 - DOF 24
3.1 ANÁLISE DA DINÂMICA DO MOVIMENTO 24
3.2 TRABALHOS ANTERIORES NO DEE 27
3.3 MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS 30
3.4 ELEMENTOS DE SENSORIAMENTO E ATUAÇÃO 35
3.4.1 Motor *Brushless* EMAX CF2805 35
3.4.2 Motor *Brushless* EMAX XA2212 37
3.4.3 Driver de Controle da Velocidade Eletrônico – ESC 38
3.4.4 Potenciômetro Vishay SPECTROL 357 39
3.5 ESTRUTURA EXPERIMENTAL DE CONTROLE 40
3.5.1 Plataforma de desenvolvimento Arduino 41
3.5.2 MicrocontroladorATmega328 42
3.5.3 MATLAB® 43

4 MODELAGEM DO SISTEMA 44
4.1 SISTEMA SISO: ÂNGULO DE ARFAGEM 45
4.2 SISTEMA MIMO: ÂNGULOS DE ARFAGEM E DE GUINADA 46
4.2.1 Representação no espaço de estados 53

5 PROJETO DA MALHA DE CONTROLE 56
5.1 PROPORCIONAL-INTEGRAL 56
5.2 REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO 59

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS 65
6.1 RESULTADOS PI 65
6.2 RESULTADOS LQR 68
6.3 RESULTADOS CONTROLE PREDITIVO 75
6.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MALHAS DE CONTROLE 77

7 CONCLUSÕES 78
7.1 CONTRIBUIÇÕES 79
7.2 TRABALHOS FUTUROS 79

BIBLIOGRAFIA 80

1 INTRODUÇÃO

Uma das primeiras aplicações envolvendo conceitos de objetos aéreos não tripulados foram mísseis nas épocas das guerras, onde estes eram programados para seguir um alvo determinado por uma imagem térmica. Com o passar do tempo e com o estudo de técnicas mais avançadas de controle, surgiram, na década de 60, as primeiras aeronaves não tripuladas ou *UAVs* (*Unmanded Aeriel Vehicle*, em inglês) [1]. A vantagem do estudo destas aeronaves, em relação a mísseis, é que podem ser guiados sem a necessidade de ter uma tripulação embarcada. Assim, permitia o uso dos VANTs em missões de reconhecimento em áreas inimigas.

De uma forma geral, o uso de VANTs em operações militares pode ser analisado por dois pontos de vista. Os argumentos a favor apontam os ganhos de eficiência e efetividade na realização de atividades, ganhos de discriminação e proporcionalidade, bem como a diminuição de perdas. Já os argumentos contrários ao emprego de VANTs apontam para a banalização da guerra, para a proliferação descontrolada, e para o roubo e emprego da tecnologia por inimigos do Estado, em especial organizações criminosas e terroristas. Tal assunto foi abordado em [2].

Além da utilização de aeronaves para serviço militar, um campo que vem usufruindo desta tecnologia é o uso médico. Hoje em dia, helicópteros e aviões de assistência médica são muito bem equipados; possuem a bordo equipamentos como ventiladores, eletrocardiograma, monitores, desfibriladores, etc. Isto permite o tratamento imediato dos casos críticos, principalmente em locais de difícil acesso, evitando em muitos casos a morte da vítima antes da chegada ao hospital [3]. Em grandes cidades, onde há uma concentração considerável de carros, o rápido transporte de equipamentos até o local do acidente diminuiria o número de casos fatais.

Atualmente, o uso de drones vem crescendo em áreas bem distintas da qual foram criados, no caso, militar. Por exemplo, segundo a Revista Globo Rural, os drones têm ganhado espaço na agricultura e na pecuária, desenvolvendo funções na fazenda que reduzem a mão-de-obra de muito agricultores [4]. Com a capacitação de imagens do plantio, juntamente a um *software* de análise gráfica, é possível analisar a plantação e detectar pragas e doenças, excesso de irrigação, entre outros. Até mesmo pela coloração da planta é possível verificar a presença de fungos. No ramo da pecuária, pode-se citar o uso de drones para acompanhamento de pastagem. Por

meio de imagens do alto, é possível analisar quais pastagens devem ser reformadas e quais estão boas para o consumo da boiada, tornando mais prático tal acompanhamento. Além disso, outra aplicação possível na área da pecuária é o controle boiada; por exemplo, com o uso de imagens para contar o rebanho, buscar animais perdidos e até tocar a boiada. Nota-se, entretanto, que alguns especialistas em bem-estar animal dizem que tal utilização pode causar prejuízo aos animais. Para mais aplicações, ver [4].

O desenvolvimento de novas tecnologias no campo do controle automático tem possibilitado a criação de veículos aéreos cada vez mais autônomos, com diferentes níveis de controle implementados. A montagem de plantas didáticas que simulem os movimentos semelhantes de veículos aéreos não tripulados tornou-se importante para se testar, além de técnicas de controle, diferentes métodos de modelagem matemática do sistema [5]. Visto que estes veículos aéreos apresentam, na maioria dos casos, dinâmicas complexas, não lineares, inerentemente instáveis e com modos fortemente acoplados, acredita-se que o desenvolvimento de sistemas autônomos de navegação e controle torna-se um procedimento difícil e perigoso. Isto se dá uma vez que a realização de experimentos em veículos reais oferece frequentemente riscos de acidentes [6].

Comprova-se que a alternativa para testar novas tecnologias da área e também para minimizar os acidentes em período de testes é o desenvolvimento de plataformas onde os veículos ficam presos a pontos de teste, limitando seus movimentos a um determinado espaço e configuração de trabalho. Essas plataformas geralmente são utilizadas como um método inicial para analisar o comportamento dinâmico desses veículos, ou de algum movimento em específico (arfagem, guinada, etc.) [6].

Notados os usos e as aplicações que foram citadas no decorrer deste capítulo, vale citar que o desafio de auxiliar nos estudos de dispositivos que vem a contribuir para o bem-estar da sociedade motiva o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, acredita-se que os estudos nesta área continuarão sendo difundidos na universidade, pelo fato de existir um meio de fazer testes e colocar em prática técnicas de controle até mesmo para outras aplicações, não apenas em helicópteros ou drones.

Por fim, conclui-se que o presente trabalho deu continuidade a uma planta elaborada em trabalhos de iniciação científica anteriormente realizados no Departamento de Engenharia Elétrica da UDESC, citados [7]. Foram feitos outros trabalhos após a construção da planta no Departamento, porém com o intuito de

modelar matematicamente a estrutura e estudar possíveis técnicas de controle. Portanto, este trabalho refez parcialmente algumas etapas dos trabalhos anteriores, buscando aprimorar fisicamente a planta didática e projetando outras malhas de controle, a fim de concretizar o objetivo de disponibilizar uma planta didática para mais estudos na aérea.

1.1 HIPÓTESES

A montagem de plantas didáticas requer uma atenção cuidadosa no momento de projetar peças que irão realizar os movimentos, de maneira a evitar folgas, atritos excessivos, desequilíbrios mecânicos, dentre outros. Neste trabalho, buscou-se minimizar ao máximo as não linearidades, por meio de modificações mecânicas na planta original. Com os primeiros testes em malha aberta, previa-se que poderiam surgir alguns problemas estruturais; logo, uma boa carga de trabalho foi destinada a isso. A tentativa de minimização dos problemas se deve ao fato de que tal planta deverá futuramente servir de base para experimentos de controle linear.

Pretendeu-se buscar o modelo mais adequado e simplificado da planta, com limitantes especificados, ou seja, encontrar a faixa ideal para aplicar tais técnicas de controle linear. Por meio de processadores digitais de sinais (DSP), pretendeu-se implementar malhas de controle digital, podendo assim colocar em prática conceitos aprendidos na disciplina dos cursos de graduação. A partir de tais implementações, buscou-se ajustar os parâmetros dos controladores afim de conseguir uma resposta adequada para validar todo o processo de construção e modelagem da planta.

1.2 DIVISÃO DO TEXTO

O presente trabalho está dividido em sete capítulos, sendo que no primeiro buscou-se introduzir qual a motivação e no que o trabalho poderá contribuir tanto para a sociedade, em uma visão geral, quanto mais especificamente ao curso de Engenharia Elétrica.

Logo na sequência, no Capítulo 2, é apresentada uma breve exposição de diferentes plantas didáticas com N-DOF que tenham semelhança com o presente trabalho. O objetivo principal é buscar aspectos construtivos de cada projeto e extrair tudo o que pode servir para o desenvolvimento do restante do trabalho.

O Capítulo 3 visa detalhar os passos construtivos da estrutura de controle, abordando desde a dinâmica de movimentação até aspectos mecânicos de construção.

Já o Capítulo 4 descreve os passos para a aquisição do modelo da planta, contendo dados coletados experimentalmente e aplicados no *software* MATLAB®.

No Capítulo 5, descreve-se como foram desenvolvidas as técnicas de controle, tanto a técnica proporcional-integral na malha de arfagem SISO, do inglês *Single-Input and Single-Output*, quanto o regulador linear quadrático em ambas as malhas (arfagem e guinada) no sistema MIMO, do inglês *Multiple-Input and Multiple-Output*.

O Capítulo 6 tem como foco a exposição dos resultados experimentais, utilizando-se de gráficos e comentários.

Por fim, o Capítulo 7 explana as considerações finais do trabalho, buscando destacar todos os pontos positivos e os problemas encontrados no decorrer de sua realização, e também propondo sugestões para trabalhos futuros.

2 PLANTAS DIDÁTICAS COM *N-DOF*

O desenvolvimento de sistemas didáticos que possibilitem o estudo de técnicas de controle pode resultar em benefícios para a apresentação de temas presentes num curso introdutório de controle [8].

Atualmente, existem alguns parâmetros que fazem com que as plantas didáticas sejam cada vez mais difundidas e empregadas em universidades. Pode-se citar parâmetros como a viabilidade de possuir um sistema de medição e atuação por meio de uma interface eletrônica baseada em plataformas com microcontroladores [8]. Além disso, o baixo custo de plataformas de prototipagem contribui para o desenvolvimento de tais plantas, mas mesmo assim fornecem um poder de processamento bom. Outro ponto importante é a possibilidade que existe de se fazer a comunicação entre microcontrolador e *softwares* de cálculo matemático, os quais tornam mais simples a implementação de técnicas de controle mais sofisticadas. Tais *softwares* podem permitir a criação de interfaces acessíveis aos usuários que não tenham domínio da ferramenta de cálculo.

Outro aspecto importante de se construir plantas didáticas com N-DOF (N *Degrees of Freedom*, ou, em português, N graus de liberdade) é o fato de possuir um sistema que possibilite escolher entre sistema SISO ou MIMO, visando o estudo de técnicas específicas para cada abordagem. Além disso, em sistemas deste gênero, pode-se utilizar tanto técnicas de controle digital, como controle analógico. Entretanto, o controle digital é mais utilizado por possibilitar a criação de interfaces, sendo que no controle analógico esta abordagem é menos acessível.

A seguir, depois de citadas algumas vantagens do desenvolvimento de plantas didáticas com N-DOF, serão apresentadas três plantas didáticas com diferentes projetos construtivos, técnicas de modelagem e desenvolvimentos de controladores, com intuito de possuir trabalhos para comparação, e de entender as dificuldades que normalmente são enfrentadas.

2.1 PLANTA 1: PÊNDULO AMORTECIDO

O trabalho elaborado por Paulo C. R. Marciano foi um daqueles que inspirou a execução da proposta do presente trabalho, referenciado em [9]. Este trabalho relata o desenvolvimento e a construção do módulo didático, aplicável à área de controle e

automação de processos: o pêndulo amortecido, largamente utilizado como *benchmark* na educação em controle. Um dos objetivos deste era possibilitar a utilização de práticas clássicas e avançadas de modelagem, a identificação de sistemas, processos e equipamentos industriais [9]. A Figura 1 ilustra a planta didática construída com um grau de liberdade.

Figura 1: Pêndulo amortecido

Fonte: [9]

Basicamente, o pêndulo consiste de uma barra de alumínio, posicionada na vertical, engastada em sua extremidade superior, onde instalou-se um potenciômetro de precisão, que fornece informações de sua posição angular. O atuador é um motor *Brushless* DC, modelo CF2822 da EMAX® que, com um ESC *Mystery* e uma hélice, funciona como sistema propulsor, localizado na extremidade inferior do pêndulo [9].

O pêndulo é apenas uma parte do que foi desenvolvido, pois além da estrutura física, foi desenvolvido um supervisório em JAVA que possibilita a configuração e operação do módulo. Este pode realizar a alteração das variáveis de controle, em malha aberta e/ou fechada, para a identificação dos modelos dos processos e sintonia de controladores. A interface criada e mais detalhes podem ser observadas no trabalho que está referenciado em [9].

2.2 PLANTA 2: EXPERIMENTAL COM 3-DOF

A planta didática construída pela Quanser® com três graus de liberdade, ilustrada pela Figura 2, já foi utilizada em diversos trabalhos, em nível desde graduação até doutorado.

O trabalho feito por Ricardo Breganon, referenciado em [10], utilizou como planta experimental um protótipo que se baseia no modelo Quanser®, apresentado na Figura 3. O próprio desenvolveu um controle de arfagem e guinada do sistema.

Figura 2: Modelo comercial de planta 3-DOF

Fonte: [11]

O sistema possui duas hélices paralelas com dois graus de liberdade, os movimentos de arfagem e guinada, e um terceiro grau não controlado em rolagem, responsável em fazer com que o sistema possa guinar, pois o mesmo não possui um rotor de calda [10]. O sistema é composto por duas hastes de tamanhos diferentes, sendo que em umas das extremidades possui dois motores de corrente contínua, os quais juntos às hélices formaram o sistema de propulsão.

O modelo foi construído utilizando o *software* de simulação de sistemas mecânicos ADAMS®, por meio do módulo ADAMS®/*View*, que utiliza as técnicas de modelagem de sistemas multicorpos para a obtenção de equações dinâmicas do movimento. Fato interessante é que o ADAMS® usa o sistema de equações de Euler-Lagrange do movimento, sendo composto de equações algébricas e diferenciais de segunda ordem. O programa calcula tanto os modos e autovalores do modelo, como a representação na forma de espaço de estados.

Figura 3: Estrutura experimental com três graus de liberdade

Fonte: [10]

A técnica de controle utilizada pelos autores é a alocação de polos, com ação integral; utiliza o “controle seguidor com realimentação de estados”. Entretanto, para minimizar a função custo, utiliza o equacionamento do Regulador Linear Quadrático. O método de projeto pode ser melhor visualizado em [12].

O autor obteve bastantes resultados experimentais; porém, fazendo um apanhado geral, a resposta da malha de controle de arfagem não apresenta um erro em regime permanente considerável, mas o sistema possui dinâmica lenta. Já para o ângulo de guinada, notou-se que a resposta apresentou oscilações e a dinâmica também foi bem lenta. Entretanto, analisando a estrutura construída pelo autor, nota-se a existência de diversos parâmetros que afetam as ações de controle, como por exemplo, a distância do contrapeso até o centro da barra e o próprio sistema de propulsão. Como dito no trabalho, simplificações foram feitas em relação ao fluxo gerado pelas hélices, e também na resposta instantânea de força de empuxo a entrada de tensão nos motores.

2.3 PLANTA 3: PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE UM MODELO REDUZIDO DE HELICÓPTERO

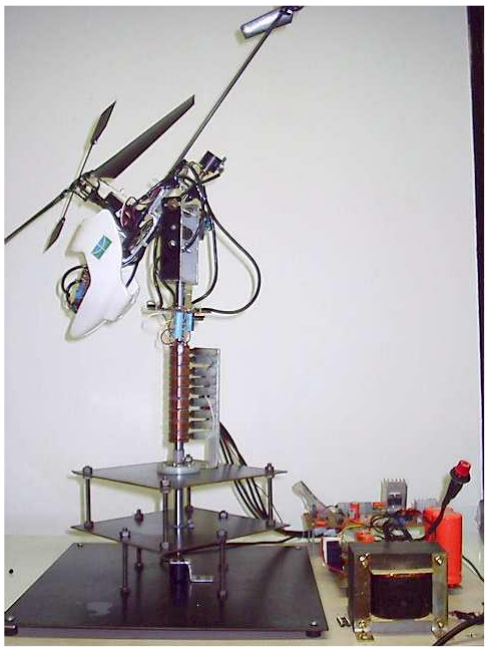
O trabalho que será citado nesta seção foi desenvolvido por Antônio Padilha Lanari Bo e Hélio Henrique Fonseca Miranda, dois acadêmicos do curso de Engenharia Mecatrônica da Universidade de Brasília. A plataforma criada tem como objetivo promover um maior conhecimento sobre a dinâmica de amplitude de um modelo reduzido de helicóptero. Os conhecimentos envolvidos em tal trabalho envolvem desde o primordial, que seria a concepção de um suporte que possibilite o movimento do helicóptero nos três graus de liberdade, até o projeto de instrumentação necessária para a aquisição de dados, acionamento dos atuadores e interface com o computador [1].

Para realizar tais procedimentos citados anteriormente, os autores utilizaram o microcontrolador Atmel AVR ATmega8 como escravo para a atuação das funções, porém quem comanda as ações é o próprio computador.

O projeto mecânico demandou maior concentração de trabalho, principalmente na fabricação do conjunto suporte-junta-escovas. O suporte construído é apresentado na Figura 4, o qual permitia a movimentação do helimodelo em três graus de liberdade.

Uma das principais dificuldades encontradas pelos autores foi a confecção do sistema de escovas para a redução do atrito; porém, tal sistema gera ruídos na medição de sinais de precisão.

Figura 4: Plataforma experimental de um modelo reduzido de helicóptero



Fonte: [1]

A modelagem do sistema foi feita buscando levar em consideração a análise direta das forças que agem sobre a estrutura. Entretanto, no modelo de atitude de helicópteros, foi necessário computar diversas relações de torque e força em cada eixo de rotação: arfagem, rolagem e guinada. Logo, em [1], foi analisado separadamente cada movimento possível da planta fenomenologicamente, e foram feitas algumas considerações que simplificaram a modelagem matemática.

Como o objetivo principal do trabalho era desenvolver a plataforma experimental para estudo de controle, ao final do trabalho, foi testado um controlador PID sintonizado empiricamente para a avaliação do desempenho e comparação com controle manual.

2.4 CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS

As três topologias de plantas com N-DOF foram escolhidas por apresentarem características semelhantes ao presente trabalho. A partir destas, foi possível extrair informações tanto em questões mecânicas, quanto de modelagem e projetos de controladores.

A partir de todas as topologias citadas, destaca-se suas utilidades em processos de aprendizagem na área de controle. Buscam criar interface acessível para que o usuário possa utilizar de forma fácil. Além disso, na maioria deles foram utilizados controladores lineares para validação da planta. Acredita-se que pelo fato de serem os mais utilizados durante a graduação. E também, mesmo sendo controladores lineares, percebe-se que não eram controladores difíceis de serem implementados.

Quanto à modelagem dos sistemas, observou-se, principalmente nas Plantas 2 e 3, que a modelagem fenomenológica é mais utilizada para plantas N-DOF, porém demandam muito mais cálculos e deduções do que utilizar identificações paramétricas. Além disso, tal abordagem pode desconsiderar variáveis que influenciaram na dinâmica da planta.

Outro fato que vale a pena destacar é quanto aos problemas mecânicos elétricos que surgem ao decorrer do projeto. Por exemplo, a utilização de escovas tende a ser algo viável mecanicamente, porém na parte elétrica, apresenta ruídos na leitura do sinal. No caso da Planta 1, onde foram utilizados fios para fazer a ligação dos motores e sensores com o microcontrolador, tais fios regeram atrito no movimento da haste, porém os dados não apresentam ruídos. Este é um detalhe que deve ser muito bem analisado no momento do projeto.

Por fim, conclui-se que tal revisão das plantas didáticas serviu como referência e base de comparação para a planta desenvolvida.

3 ESTRUTURA EXPERIMENTAL: HELICÓPTERO COM 2 - DOF

O projeto que motivou este trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido por acadêmicos da própria UDESC, os quais construíram um protótipo de uma planta didática de baixo custo com dois graus de liberdade, que futuramente servisse como ferramenta de apoio didático para disciplinas de controle [7].

Segundo o artigo referenciado em [7], a ideia inicial da elaboração da planta utilizou como base trabalhos previamente elaborados e publicados envolvendo plataformas semelhantes. Foram feitas buscas nos sites dos fabricantes como Quanser®, Festo® e FeedBack®, onde encontrou-se o manual citado em [13].

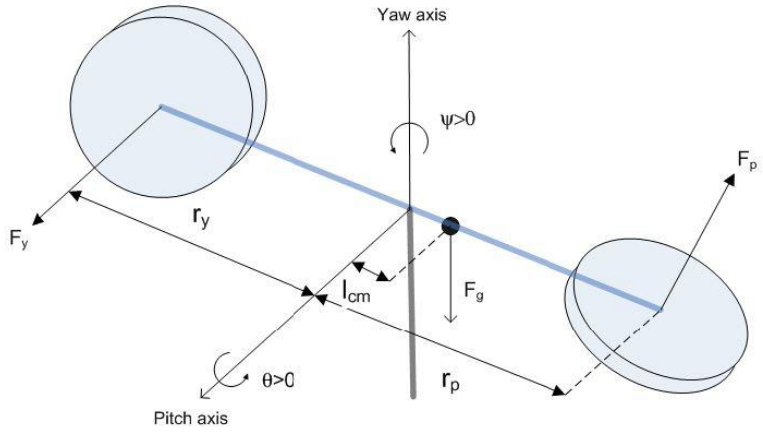
Neste capítulo, serão abordados aspectos físicos da estrutura experimental com intuito de explanar como o processo de movimentação é realizado e relatar detalhes sobre a construção da estrutura.

3.1 ANÁLISE DA DINÂMICA DO MOVIMENTO

A dinâmica de movimentação pode ser representada conforme o manual produzido pela Quanser®, referenciado em [13], no qual é realizado uma modelagem fenomenológica da planta, descrevendo a atuação de cada força.

No decorrer do texto, serão utilizados os termos arfagem e guinada, oriundas respectivamente dos termos em inglês *pitch* e *yaw*. A Figura 5 ilustra como é o movimento de arfagem e guinada, e demonstra melhor a divisão das forças.

Figura 5: Diagrama das forças na planta com dois graus de liberdade

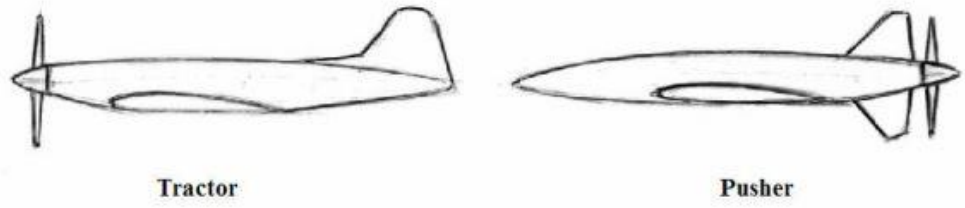


Fonte: [13]

Como ilustrado na figura acima, pode-se observar três forças (F_y, F_g, F_p), sendo que duas destas são geradas pelo sistema de propulsão, composto por motor mais hélice. O sistema de propulsão é um dos fatores que influenciam consideravelmente na dinâmica do movimento, pois o mesmo exerce as forças no movimento de guinada e, principalmente, de arfagem, para que a estrutura vença a força gravitacional. Os motores que compõem tal sistema têm seu desempenho caracterizado pelas curvas de potência e torque. A curva de potência pode ser obtida por meio de ensaios do motor em uma bancada apropriada, medindo o torque e a rotação do motor. Em motores aeronáuticos, a carga pode ser um freio dinamométrico, ou a própria hélice. A partir da utilização de diferentes tipos de hélices, variando assim a rotação e potência consumida, pode-se obter a potência gerada dentro da faixa de rotação de trabalho [14].

O sistema de propulsão em uma aeronave pode ser instalado utilizando-se duas configurações opostas; ou o sistema será "*tractor*" ou então "*pusher*" [14]. A topologia utilizada no presente trabalho adota a configuração "*tractor*". Em aeromodelos com esta configuração, a hélice é montada na parte frontal do motor, de forma que esta produz uma tração que puxa a aeronave através do ar. Atualmente, 99% das aeronaves em operação utilizam esta configuração [14]. Na Figura 6, estão ilustrados exemplos de ambas as configurações.

Figura 6: Exemplo de configurações "*tractor*" e "*pusher*"



Fonte: [15]

A hélice é um dos elementos fundamentais para o sistema de propulsão, sendo que sua função é fornecer a força de tração necessária para movimentar a estrutura. Resumindo, uma hélice é um aerofólio trabalhando em uma trajetória circular, com ângulo de ataque positivo em relação ao fluxo de ar. O desempenho de uma hélice depende de alguns fatores, entre eles pode-se citar: o diâmetro em função da rotação, a área das pás em função da absorção de potência e o passo [16].

As hélices possuem duas características principais, o diâmetro e o passo, normalmente representados em polegadas. O diâmetro representa a distância entre as pontas das pás, sendo uma hélice bi-pá (duas pás). Já o passo representa o avanço teórico que a hélice daria em uma única volta, ou seja, uma hélice 6x4 tem um diâmetro de 6” e seu passo é de 4”, indicando que a hélice se deslocaria 4” para frente a cada volta realizada. A partir destas definições, completando com alguns cálculos que podem ser observados em [16], consegue-se estimar qual é a hélice adequada para cada aplicação.

Na divisão das forças ilustrada na Figura 5, não constam todos os efeitos providos pelo sistema de propulsão. É notável que o conjunto (motor e hélice) do movimento de arfagem exerce força para apenas um lado de giro, pois a força de propulsão o direciona. A relação que explica como a estrutura da planta pode ser projetada sem que haja a inversão da rotação do motor no movimento de arfagem está baseada na forma com que as hélices atritam com o ar. Quando o atuador do movimento de arfagem atua sem que haja uma força considerável feita pelo atuador de guinada, o mesmo faz com que barra retorne, ou seja, no sentido oposto do movimento de arfagem. Na seção que explica a modelagem do sistema, será demonstrado melhor como a resposta ao degrau reage no sentido contrário, fazendo com que a função transferência seja negativa. Não foram feitos estudos para avaliar fenomenologicamente tal dinâmica, mas existem muitas referências bibliográficas na área de aeronáutica que explicam melhor o conceito, como em [14].

Vale ressaltar que a escolha do ponto do centro de massa da sustentação tem grande influência na dinâmica de movimentação. Na Figura 5, a força peso está posicionada a uma distância de l_{cm} do centro da barra para o sentido do atuador do movimento de arfagem. O intuito de deslocar o centro de massa da barra é fazer com que o sistema seja o mais parecido possível a um helicóptero. Em algumas referências bibliográficas, utiliza-se o termo força de sustentação para a função do atuador de arfagem, o qual recebe um maior peso conforme o deslocamento do centro de massa. A força de sustentação é uma força vertical de baixo para cima que depende principalmente do perfil da pá, da velocidade relativa do ar e do ângulo de ataque.

Porém, como a estrutura é imóvel, a força de sustentação da estrutura desenvolvida neste trabalho tem uma característica um pouco diferente. Com não se tinha parâmetros suficientes para escolher formalmente onde seria o centro de massa

adequado, foram feitas peças móveis para alocar os atuadores e permitir o ajuste empírico.

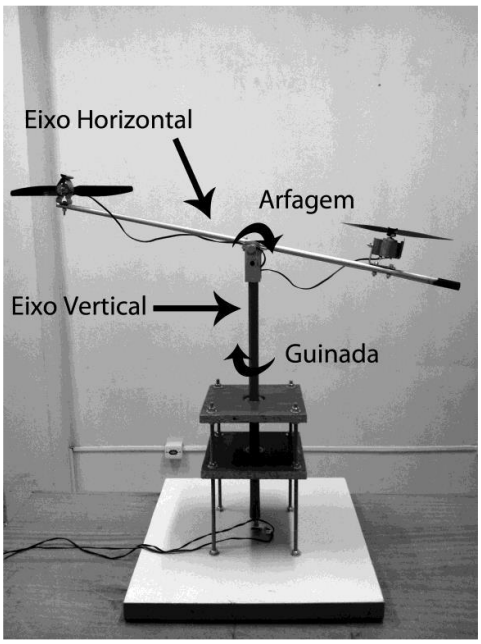
Por fim, no momento da montagem da planta, foram levados em consideração os princípios de movimentação estudados nesta seção.

3.2 TRABALHOS ANTERIORES NO DEE

Nesta seção será abordado sobre os aspectos construtivos que já tinha sido feito em trabalhos anteriores no Departamento de Engenharia Elétrica. A planta didática foi projetada inicialmente com intuito de seguir os seguintes aspectos: possuir uma estrutura armada de rolamentos afixados em placas de madeira, servindo de apoio para a haste vertical, caracterizando o grau de liberdade guinada. Na parte superior, foi usinada uma peça com rolamentos perpendiculares à estrutura citada anteriormente, a qual controla a movimentação de uma haste horizontal, caracterizando o grau de liberdade arfagem. Nesta haste vertical foram postos dois motores em suas extremidades que realizam a movimentação da estrutura. Toda esta armação era sustentada por uma base sólida feita de material compensado [7].

Na Figura 7, é possível visualizar as características previamente descritas, permitindo-se observar o projeto inicial da planta que foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 7: Estrutura original da planta didática

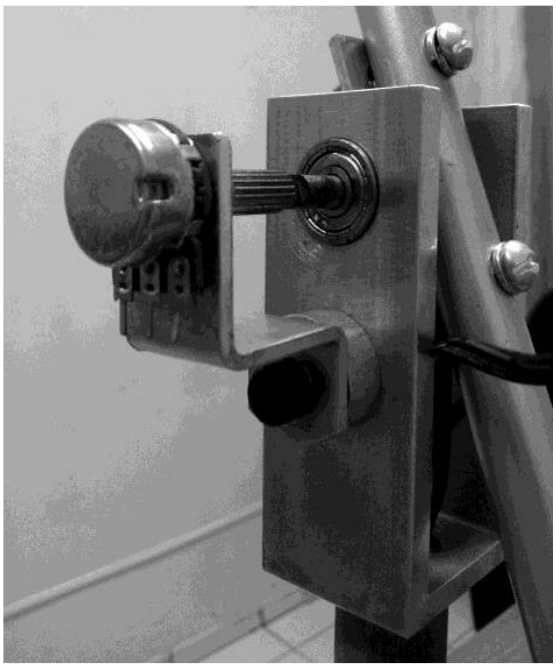


Fonte: [7]

Em relação à aquisição de dados, foi feito o projeto de sensoriamento utilizando-se resistores lineares acoplados às hastes dos graus de liberdade. Foram realizados testes utilizando-se potenciômetros, resistores variáveis, de precisão e comuns, para obter uma base de comparação entre os dois tipos. Logo, os autores da planta original concluíram que o emprego de potenciômetros comuns seria mais adequado, crendo que os potenciômetros de precisão poderiam apresentar leitura pouco suscetível a pequenas oscilações, enquanto os comuns teriam uma leitura mais estável. Além disso, como um dos propósitos do trabalho era reduzir ao máximo o custo, os potenciômetros de precisão tornariam a estrutura cara.

O acoplamento do sensor de medida do movimento de arfagem é ilustrado na Figura 8.

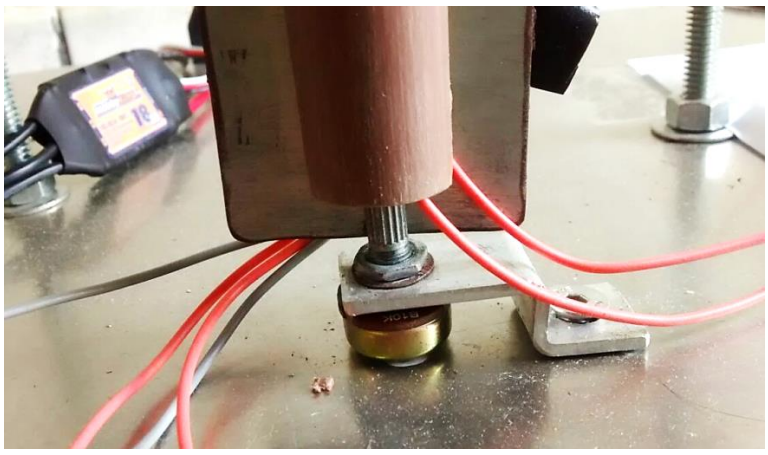
Figura 8: Acoplamento do eixo de arfagem ao eixo do potenciômetro



Fonte: [7]

Do mesmo modo, mas em proporções diferentes, foi feito o acoplamento da haste vertical ao sensor linear, como ilustrado na Figura 9. Assim, finalizou-se a parte física do sensoriamento.

Figura 9: Acoplamento do sensor do ângulo de guinada



Fonte: Próprio autor

As hélices acopladas aos motores nas extremidades da barra horizontal têm um ângulo de ataque fixo; em virtude disto, foram construídas estruturas mecânicas para fixar os ângulos de trabalho, permitindo que o sistema se comporte como SISO (*Single Input Single-Output*), do português Única Entrada e Única Saída, tanto quanto

o MIMO (*Multiple- Input e Multiple-Output*), do português Multiplas Entradas e Multiplas Saídas.

Os motores utilizados são motores de corrente contínua de simples aplicação, normalmente utilizados em protótipos eletrônicos. O controle de tais motores é feito diretamente pelos valores de tensão de entrada, proporcionando um torque bom para a aplicação do presente trabalho. Porém, a faixa linear de trabalho era muito pequena, complicando a utilização de técnicas simples.

Após a conclusão da parte física da planta didática, os autores deram início a testes práticos e tentativas de modelagem desta. Também foram feitos estudos similares em trabalhos de iniciação cientifica na mesma universidade, citados em [17] e [18]. Por meio destes, foi possível identificar mais detalhes sobre a estrutura proposta.

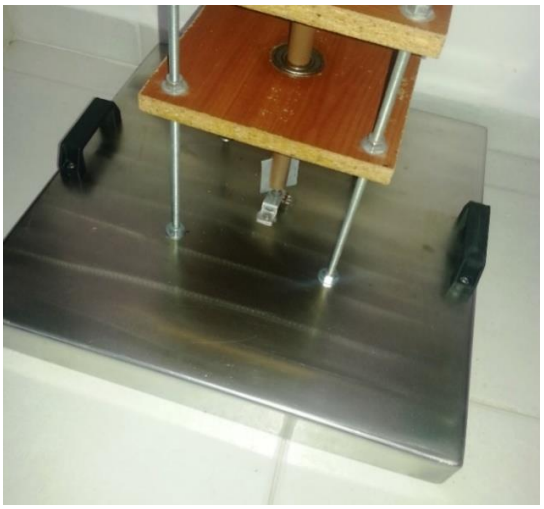
Segundo [18], as tentativas de modelagem paramétrica não atingiram um modelo ideal; entretanto, os testes preliminares realizados com o sistema de aquisição de dados implementados pelos autores permitiram mostrar as principais não linearidades no comportamento da estação de trabalho. Analisou-se qual seria a resposta ao degrau aplicado na planta, e concluiu-se que a planta apresentava algumas não linearidades não esperadas inicialmente, tais como: uma pequena faixa linear para atuação do controle, uma região de zona morta quando a entrada era muito baixa, atrasos na resposta dos atuadores e dos motores e imprecisão na leitura dos sensores de ângulo. Todas estas não linearidades foram ocasionadas pelas limitações físicas da planta.

3.3 MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS

A planta didática originalmente desenvolvida no trabalho de iniciação científica de acadêmicos do curso de Engenharia Elétrica, citada em [7], apresentava limitações físicas que afetavam diretamente nas ações de controle. No presente trabalho, buscou-se diminuir estas limitações com adaptações mecânicas projetadas com auxílio de um profissional da área. Vale ressaltar que as peças físicas expostas neste trabalho foram todas fabricadas pela Indústria RM – Indústria de Máquinas Frigoríficas, localizada na cidade de Chapecó/SC – endereço eletrônico citado em [19].

Inicialmente, procurou-se sanar os problemas de sustentação, de maneira a melhorar a aerodinâmica do modelo reduzindo-se zonas mortas, vibrações e atritos. A base que antes era feita de compensado, um material bem leve, foi substituída por uma estrutura em forma de bandeja, como mostra a Figura 10.

Figura 10: Estrutura base da planta didática



Fonte: próprio autor

A estrutura de suporte foi feita com chapa 2mm de INOX, dimensões de base de 350x350 mm e profundidade de 50 mm. Nesta bandeja, foram fixadas duas barras horizontais que foram utilizadas para prender as hastes verticais que suportam toda a planta. Este procedimento foi realizado com o intuito de garantir a fixação da estrutura, pois prender as hastes apenas na chapa superior da base não seria suficiente.

Na Figura 11, é possível observar os detalhes do projeto.

Figura 11: Parte inferior da base de sustentação da planta

Fonte: próprio autor

Na parte interna da armação, onde está a peça em “U” (ver Figura 12), a qual suporta a haste horizontal que comporta os motores em suas extremidades, foram substituídos os dois rolamentos, pelo fato de estarem gerando um atrito prejudicial à planta, inerente ao tempo de uso. Nesta peça, foi alterado o acoplamento da haste ao eixo perpendicular, que suportava todo o peço da haste. Anteriormente, esta junção era feita com parafusos unindo a haste horizontal ao eixo acoplado aos rolamentos, mas agora as duas peças estão soldadas. Com isso, os principais problemas de fixação entre o eixo e a haste foram sanados, a zona morta que existia na planta original não existe mais, fazendo com que a medida do ângulo de arfagem seja mais precisa. Tal estrutura de acoplamento modificada está ilustrada na Figura 12.

Figura 12: Peça que liga a haste horizontal e a haste vertical

Fonte: próprio autor

Outra dificuldade que a planta apresentava era o suporte, o qual fixava o motor à haste horizontal. Foi necessário fazer dois suportes idênticos. Vale ressaltar que o material utilizado para a confecção é o INOX. O projeto da peça de conexão dos motores na hasta horizontal está descrito abaixo, com os seguintes passos:

a) Escolheu-se um tubo com o diâmetro inteiro igual ao diâmetro externo da haste horizontal, com medida de 13mm;
b) Cortou-se o tubo em uma medida escolhida intrinsicamente, medindo 5mm, para que não pesasse muito e que ao mesmo tempo fornecesse o suporte desejado;
c) Para servir como base que unisse o motor à peça, foram cortadas duas peças em forma de círculo com diâmetro de 35mm, e feitos em cada uma quatro furos para fixar com parafusos o motor e as peças;
d) Foi utilizada a solda para unir o pedaço de tubo e peça em forma de círculo;
e) Para prensar o tubo à haste horizontal, foi feito um furo na peça e com um parafuso através do furo, foi possível realizar tal fixação.

A Figura 13 ilustra os detalhes das peças desenvolvidas.

Figura 13: suporte dos motores

Fonte: próprio autor

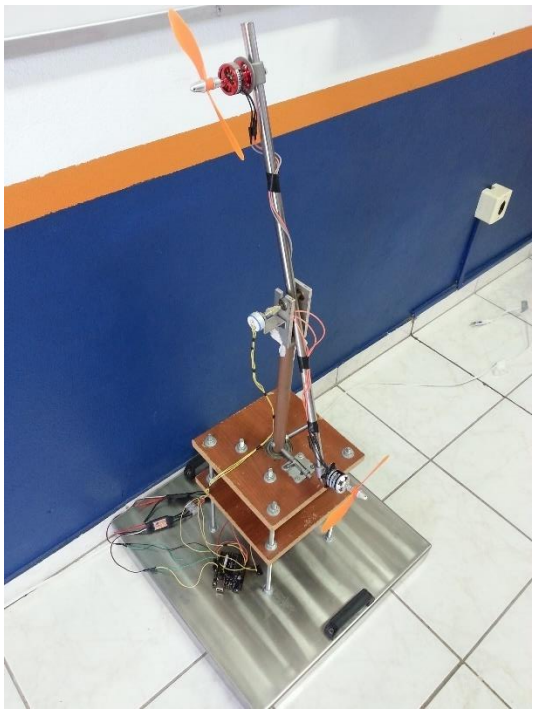
Fez-se necessário alterar os potenciômetros utilizados originalmente devido ao fato que os potenciômetros comuns não apresentavam uma leitura precisa (ver mais detalhes na Seção 3.4.4). Visto isso, para posicionar os potenciômetros na planta, foi necessário projetar outras peças, pois o potenciômetro de precisão escolhido é maior que o potenciômetro original da planta. Tais peças apenas foram alongadas horizontalmente e foi aumentado o furo onde o potenciômetro é encaixado. A Figura 14 mostra uma das novas peças de um dos eixos.

Figura 14: Suporte do potenciômetro na planta

Fonte: próprio autor

Na Figura 15, está ilustrada a planta como um todo. Mais fotos da estrutura renovada podem ser observadas nos apêndices deste trabalho.

Figura 15: Planta modificada



Fonte: próprio autor

3.4 ELEMENTOS DE SENSORIAMENTO E ATUAÇÃO

Com base na revisão bibliográfica feita neste trabalho, pode-se concluir que os elementos elétricos de sensoriamento e atuação na planta, originalmente utilizados em [7], não foram suficientemente eficazes para executarem as funções desejadas. Então foram analisados e testados elementos substitutos para cada função. Neste item, pretende-se descrever as vantagens da escolha em relação àqueles projetados na planta original.

3.4.1 Motor *Brushless* EMAX CF2805

Os motores *Brushless* EMAX CF2805 - 2840 KVA são tipicamente utilizados em aeromodelos com peso até 400 g. Na busca pelo motor mais adequado para a aplicação, foram trocadas informações com pessoas que já fizeram trabalhos semelhantes e que possuíam experiência sobre o assunto.

Inicialmente, pensou-se em utilizar o motor *Brushless* EMAX modelo CF2822, o qual foi utilizado no trabalho citado em [9], e bem-conceituado pelo autor, porém este modelo apresentava-se muito potente para a aplicação necessária neste

trabalho. Então, buscando pelo motor do referido, chegou-se à conclusão que o modelo CF2805 era suficiente para tal aplicação. Na sessão de testes práticos será melhor explicado uma comparação entre os motores utilizados.

Na Tabela 1, segue as especificações do motor escolhido.

Tabela 1: Especificações do motor *Brushless* EMAX CF2805

Modelo	CF2805
Fabricante	EMAX
Peso	29 g
Dimensões	22x5 mm
Potência	106 W p/ bateria 2s
Tensão de trabalho	7 a 9 V
KV	2840 rpm/V
Corrente Máxima	12 A para hélice 6x4 ou 14,4 A para hélice 7x4
Hélices recomendadas	6x4, 7x4

Fonte: [20]

As hélices escolhidas foram de 6x4.Tal escolha deve-se à recomendação do fornecedor.

As vantagens de se utilizar os motores *Brushless* EMAX são que não possuem um valor alto de mercado, podem ser adquiridos facilmente em *websites* de compras e também em lojas de aeromodelismo. Tais motores consomem pouca energia, pelo fato de trabalharem em baixa tensão. Por fim, a vantagem que mais sobressaiu para a escolha, foi a de que são facilmente controláveis com o *driver* de potência recomendado. Na Figura 16, é apresentado o *design* do motor.

Figura 16: Motor *Brushless* EMAX CF2805

Fonte: [20]

3.4.2 Motor *Brushless* EMAX XA2212

Após realizados alguns testes com o motor *Brushless* EMAX CF2805, notou-se que se fazia necessário um motor menos agressivo para o movimento de arfagem. Logo, buscou-se contatar pessoas com experiência no assunto e analisar as especificações do motor, para encontrar a melhor opção. O motor escolhido foi o *Brushless* EMAX XA2212 de 980 RPM/V. Tal motor é bem utilizado para equipar multi-rotores como quadricópteros, hexacópteros ou octocópteros, além de aviões treinadores com até 1,2 metros de envergadura. Em conjunto com uma hélice 10x5, fornece até 880 g de empuxo com um consumo de 15,1 A em sua rotação máxima. Uma característica comum dos motores EMAX é o baixo consumo de energia, e o fato de que podem ser alimentados com tensão baixa, visto que a planta não é móvel; o gasto é reduzido pelo fato de que não é necessária a utilização de baterias. A Tabela 2 apresenta mais algumas especificações do motor.

Tabela 2: Especificações do *Brushless* EMAX XA2212

Modelo	XA2212
Fabricante	EMAX
Peso	52 g
Dimensões	28,5x29 .3 mm
Potência	181 W p/ bateria 2s
Tensão de trabalho	7,4 a 11,1 V
KV	980 rpm/V
Corrente Máxima	12,3 A para hélice 9x6 ou 15,1 A para hélice 10x5
Hélices recomendadas	9x6, 10x5

Fonte: [21]

As hélices utilizadas para ambos os motores foram as mesmas, de dimensão 6x4, pois percebeu-se que utilizando hélices menores, a força empuxo diminuiria, aumentando a zona de atuação linear. Também, em consultas com especialistas na área, certificou-se de que as hélices menores das recomendadas não causariam danos ao motor.

A Figura 17 apresenta o modelo do motor.

Figura 17: Motor EMAX XA2212

Fonte: [21]

3.4.3 Driver de Controle da Velocidade Eletrônico – ESC

Um controle eletrônico de velocidade, mais conhecido no inglês por *Electronic Speed Control* – ESC, é um circuito eletrônico que executa a função de variar a velocidade de motores, a direção e, possivelmente, também age como um freio dinâmico. Os ECSs são frequentemente utilizados em aeromodelos elétricos controlados por frequência de rádio. Principalmente, são utilizados para o controle de motores *Brushless*, pois faz-se necessária a energização das bobinas de forma alternada. Sendo mais específico, o ESC atua como um conversor de energia, transformando o nível de tensão contínua em tensão alternada [22].

O ESC interpreta a informação de controle não como movimento mecânico, como acontece em servo motores, mas ele varia a taxa de comutação de uma rede de transistores de efeito de campo FETs, do inglês *Field Effect Transistor*, o que faz com que o próprio motor emita sua característica de alta-frequência, especialmente perceptível em velocidades baixas. Uma das vantagens que o ESC possibilita ao operador é a de permitir uma variação bem mais suave e mais precisa da velocidade do motor de uma forma muito mais eficiente do que o tipo mecânico com uma bobina resistiva [22]. Na Figura 18, está ilustrado o modelo do ESC utilizado.

Figura 18: *Driver* ESC HobbyKing 20 A

Fonte: [23]

O ESC geralmente aceita um sinal de entrada PWM (*Pulse-Width Modulation*, no português modulação por largura de pulso) de 50 Hz, cuja largura de pulso varia de 1 ms a 2 ms. Quando fornecida com uma largura de pulso de 1 ms, à frequência de 50 Hz, o ESC responde desligando o motor DC conectado a sua saída. Um sinal de entrada de 1,5 ms de largura de impulso aciona o motor a aproximadamente metade da velocidade. Quando apresentado com sinal de entrada de 2,0 ms, o motor funciona a toda velocidade [22].

3.4.4 Potenciômetro Vishay SPECTROL 357

O potenciômetro linear da marca Vishay SPECTROL é de precisão por possuir as especificações elétricas descritas na Tabela 3, as quais tornaram a escolha deste produto mais adequada para a aplicação, principalmente pelo erro baixo na leitura dos valores. Os autores da planta original, referenciados em [7], haviam concluído que os potenciômetros de precisão eram inviáveis pelo custo elevado. Porém, o potenciômetro escolhido neste trabalho foi utilizado em outro trabalho semelhante, citado em [9], para exercer a mesma função desejada neste trabalho. O potenciômetro executa a função de medir os ângulos de arfagem e guinada na planta e repassar um valor analógico para o microcontrolador. O fato do potenciômetro utilizado apresentar leitura precisa tornou o projeto mais eficaz, já que anteriormente não existia muita leitura do erro em pequenas variações.

Os dados expostos na Tabela 3 foram retirados da folha de dados do componente [24].

Tabela 3: Especificações elétricas do potenciômetro

Parâmetros	**Respostas**	
Resistência total	10kΩ	
Tolerância	**Padrão** ± 20%	**Especial** ± 10%
Linearidade	**Padrão** ± 2,0%	
Suavidade de saída	Máximo de 0,1%	
TCR	Máximo de ± 600 ppm/ºC	
Potência	1,0 Watt em 70 ºC e para 0 Watt em 125 ºC	

Fonte: [24]

A Figura 19 ilustra a imagem do potenciômetro.

Figura 19: Potenciômetro Vishay SPECTROL 357

Fonte: [24]

3.5 ESTRUTURA EXPERIMENTAL DE CONTROLE

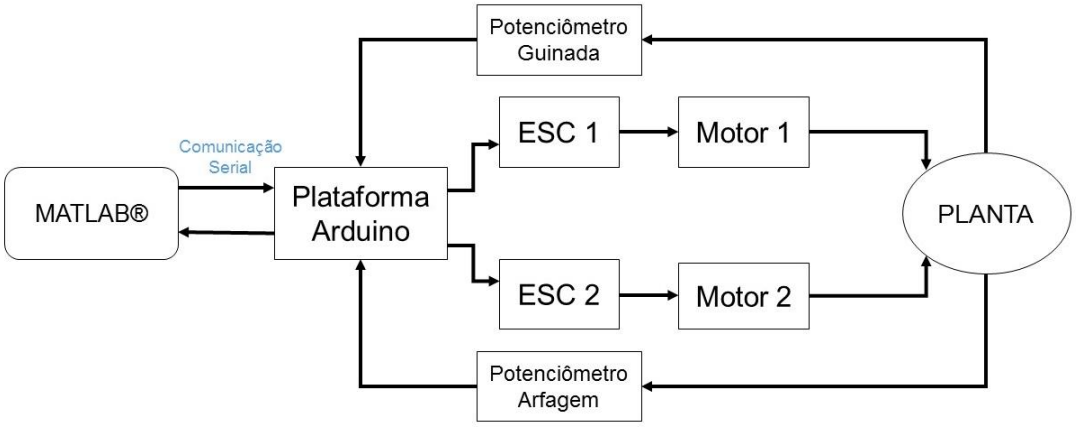
Para implementar a malha de controle, foi utilizado um circuito digital microcontrolado, onde as ações de controle são enviadas pelo *software* MATLAB®. A flexibilidade dos microcontroladores e a possibilidade de realizar comunicação de dados com o computador, sem a necessidade de protocolos complexos ou *hardwares* sofisticados, fazem desta a opção mais viável para se utilizar como estrutura experimental de controle.

Plataformas de prototipagem eletrônica de *hardware* livre vêm se popularizando no mundo todo. Essas plataformas não exigem a compra de licenças, que geralmente

tem um elevado custo, além do fato de que os projetos desenvolvidos utilizando essa plataforma podem ser compartilhados com qualquer pessoa. Essas e outras características fazem com que as plataformas, também chamadas *open-source*, sejam uma boa escolha.

Antes de descrever cada item ponto a ponto, a Figura 20 ilustra o esquema de ligação entre todos os elementos de sensoriamento e de controle da planta.

Figura 20: Esquema de ligação da estrutura de controle



Fonte: próprio autor

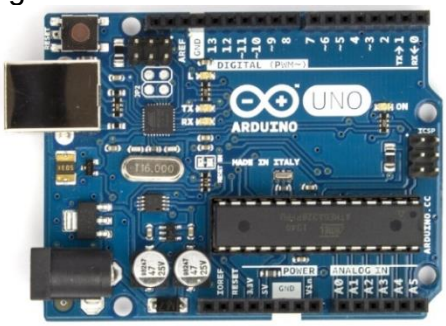
A comunicação serial feita entre o MATLAB® e a plataforma Arduino apresenta um atraso de milissegundos para que os dados sejam enviados. Muitas vezes este atraso ocorre por utiliza-se dos conversores A/D e D/A da plataforma Arduino, as quais dependem da capacidade de processamento do microcontrolador. As características do microcontrolador serão apresentadas a seguir. Entretanto, vale ressaltar que este atraso não atrapalha consideravelmente no funcionamento, apenas o mesmo deverá ser considerado nas etapas de modelagem da planta e projeto do controlador. No Capítulo 4, que apresenta a modelagem do sistema, serão apresentados mais detalhes da proporção do atraso de comunicação.

3.5.1 Plataforma de desenvolvimento Arduino

A plataforma Arduino é uma das plataformas de *hardware* e *software* livre que mais tem sido utilizada mundialmente [25]. Utilizando um microcontrolador ATmega328 da Atmel, família AVR, essa placa permite acesso direto a todos os pinos de entrada e saída do microcontrolador, além de uma interface *USB-Serial* que

permite a programação do microcontrolador diretamente pela porta USB do computador, não sendo necessária a remoção do microcontrolador da placa, ou até mesmo a utilização de gravadores específicos. O modelo de placa escolhido para ser utilizado no presente trabalho é o Arduino Uno, mostrado na Figura 21.

Figura 21: Plataforma Arduino Uno



Fonte: [26]

Além das vantagens de *hardwares* já citadas, o ambiente de desenvolvimento fornecido pelo fabricante é de fácil utilização, com várias instruções implementadas com código simplificado como, por exemplo, leitura e escrita serial, leitura e escrita analógica.

Outro aspecto que também favorece a utilização dessa plataforma é o amplo suporte *on-line* disponibilizado pelo fabricante, além dos diversos projetos disponibilizados livremente na internet.

3.5.2 Microcontrolador ATmega328

O microcontrolador ATmega328, embarcado na plataforma Arduino, é um microcontrolador RISC de arquitetura Harvard de 8 bits. Esse microcontrolador possui uma frequência de operação máxima de 20MHz. Alguns recursos disponíveis são [27]:

- 32 Kbytes de memória *flash*;
- 2 Kbytes de memória RAM;
- 23 pinos de entrada e saída configuráveis;
- 3 temporizadores (2 de 8 bits e 1 de 16 bits);
- 6 canais PWM;
- 8 canais de conversão analógico-digital de 10 bits.

Além de fazer a aquisição e tratamento dos sinais analógicos vindos do circuito da estrutura da planta, o microcontrolador será responsável por realizar a comunicação com o computador para enviar esses dados para o mesmo, além de enviar o sinal PWM de 50 Hz no comando do *driver* ESC, para que o mesmo acione os motores em uma determinada velocidade.

3.5.3 MATLAB®

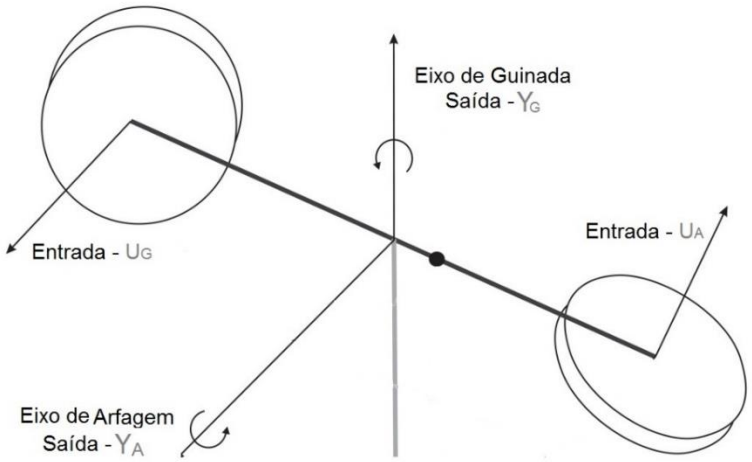
MATLAB® (acrônimo de *MATrix LABoratory*) é um *software* interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. Ele integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar, onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional [28].

Além disso, é possível conectar qualquer dispositivo ou instrumento que tenha interface serial diretamente ao MATLAB® [29]. Essa funcionalidade torna muito conveniente a utilização do MATLAB®, visto que a plataforma Arduino possui uma interface serial de fácil utilização, e esta poderá ser utilizada para a transferência de dados e comandos entre o MATLAB® e o hardware.

4 MODELAGEM DO SISTEMA

O sistema que será modelado neste capítulo é composto por duas entradas (U_A e U_G), e duas saídas (Y_A e Y_G). A Figura 22 representa o diagrama do sistema MIMO.

Figura 22: Diagrama de entradas e saídas



Fonte: Editado de [13]

Pode-se citar duas técnicas diferentes de chegar no modelo fenomenológico da planta. Uma delas é a partir da decomposição de forças, como pode ser observado no manual da Quanser em [13]. As equações encontradas na referência são usadas para achar a energia potencial e energia cinética de translação. Outra técnica é utilizar a decomposição da energia potencial da posição da barra para aproximar o modelo da planta. Além disso, pode-se utilizar técnicas de modelagem considerando o sistema como uma caixa preta, onde nem todos os processos não são conhecidos.

A técnica de modelagem utilizada foi a identificação paramétrica. Optou-se por escolher aquela que fosse a mais simples e prática. Esta técnica é baseada na coleta de dados das características de entradas-saída. A identificação do modelo matemático será realizada por meio da ferramenta computacional *System Identification* do Matlab®.

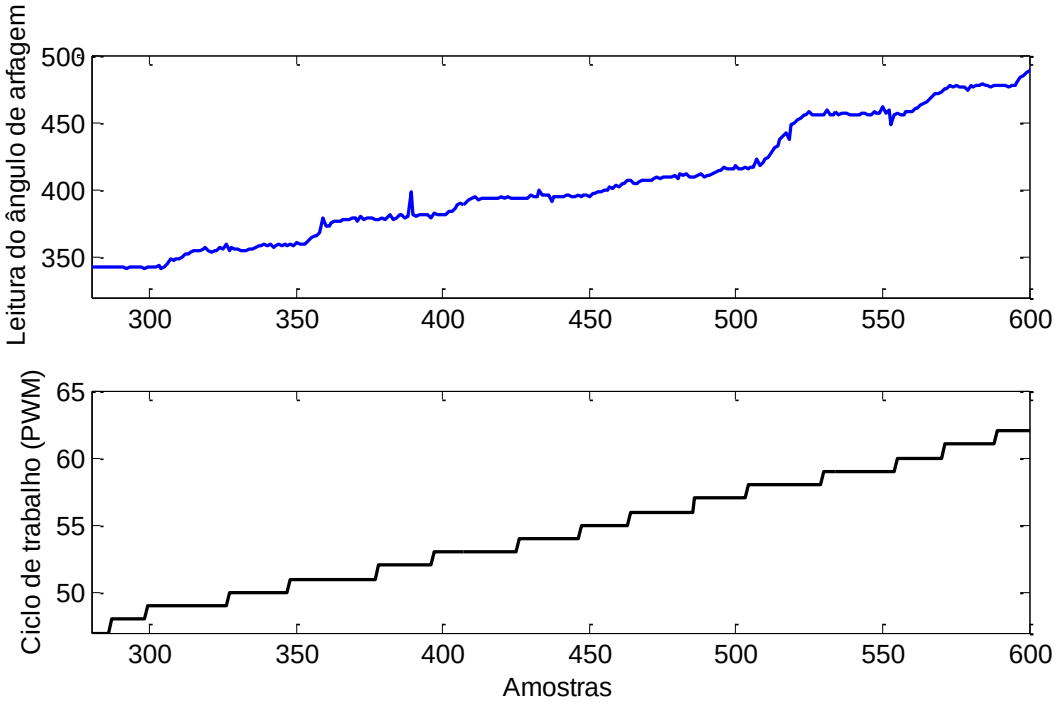
O tempo de amostragem utilizado para compor os modelos foi de 0,05 segundos, pois foram feitos testes para medir a proporção do atraso para leitura e escrita do A/D e D/A, e chegou ao valor aproximado de 0,04 segundos. Com isso, foi considerado este atraso nas etapas do projeto de modelagem.

Por fim, neste capítulo serão apresentadas duas seções: uma com a modelagem do sistema SISO de arfagem, e na sequência, o sistema completo MIMO, arfagem e guinada, representado no espaço de estados.

4.1 SISTEMA SISO: ÂNGULO DE ARFAGEM

O processo realizado foi aplicar diferentes degraus no atuador da arfagem, entrada U_A. Observou-se a resposta com a leitura do ângulo de arfagem pela saída Y_A, com o ângulo de guinada totalmente bloqueado fisicamente, apenas com o motor ligado em uma velocidade constante com intuito de simular um distúrbio que futuramente teria na modelagem do sistema MIMO. A Figura 23 ilustra os degraus aplicados para a aquisição dos dados. O modelo da planta foi obtido do tempo em função da leitura A/D com resolução de 10 bits variando de 0 a 1023 e a escrita D/A descrita pelo sinal PWM variando de 0 a 180.

Figura 23: Medição para a obtenção do modelo do ângulo de arfagem



Fonte: próprio autor

Para encontrar o modelo, foi utilizado um dos degraus na faixa central da Figura 23, por considerar a faixa mais linear da resposta. Pode-se observar que nos degraus das extremidades, o comportamento da planta difere bastante. Logo, é notável que a

planta não é linear. Inserindo os dados entrada e saída no *software* MATLAB®, obteve-se a seguinte função transferência $G_A(s)$ no domínio da frequência:

$$G_A(s) = \frac{Y_A(s)}{U_A(s)} = \frac{18{,}114}{(0{,}6442 \cdot s + 1)} \tag{4.1}$$

Para $Y_A(s)$, a leitura do ângulo de arfagem resultante da variação do ciclo de trabalho $U_A(s)$ aplicada no atuador da movimentação de arfagem. O modelo encontrado apresenta uma fidelidade de 68,34%. Vale salientar que tal fidelidade é afetada pela existência de ruídos de medida e das não linearidades desprezadas no método de identificação utilizado.

4.2 SISTEMA MIMO: ÂNGULOS DE ARFAGEM E DE GUINADA

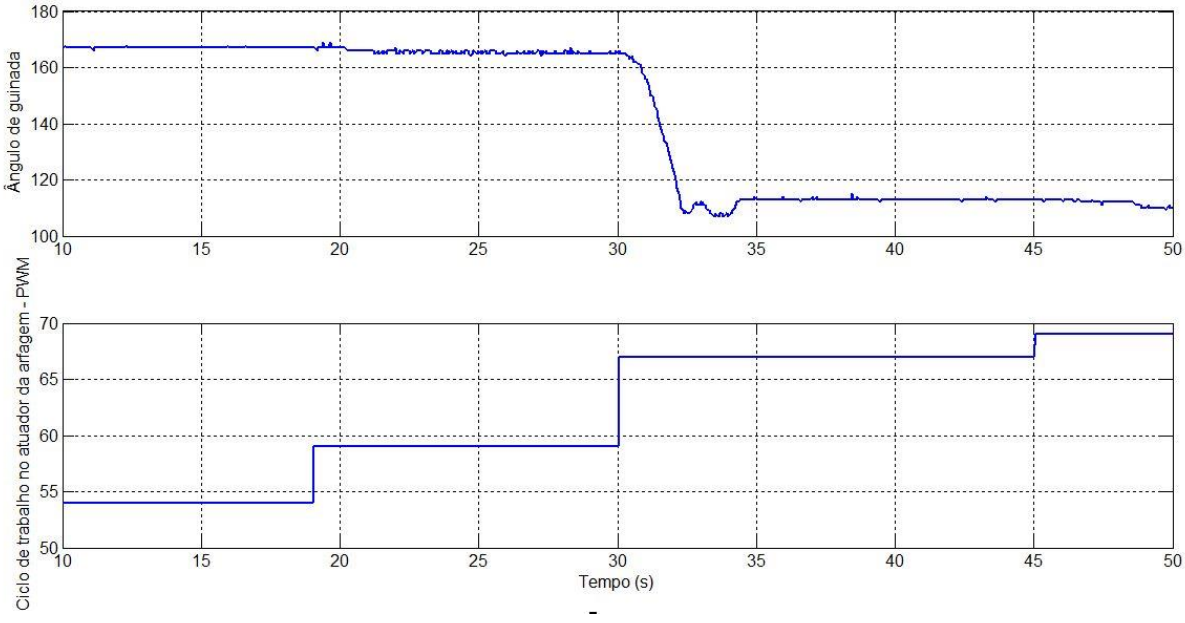
A planta didática desenvolvida neste trabalho apresenta aspectos físicos que podem variar conforme o tempo de uso e também conforme o próprio ambiente onde está inserida. Por se tratar de um sistema que depende dos propulsores e de sensores de precisão, o modelo pode alterar. Neste trabalho não foram feitos estudos para comprovar a real mudança no modelo conforme as variações físicas e de ambiente. Visto isso, foi realizado novamente o processo de modelagem da resposta ao degrau do ângulo de arfagem para eliminar a chance de obtenção de um modelo descasado.

Sendo assim, para se chegar ao modelo do sistema MIMO, foi necessário analisar a influência na resposta dos dois ângulos, tanto com degraus aplicados no mesmo eixo em questão e também no outro ângulo. Por exemplo, foram aplicados degraus no atuador do eixo de arfagem e foram lidos os valores de ângulo de arfagem e guinada. Este procedimento foi feito devido ao fato de que o sistema está diretamente acoplado e cada entrada de propulsão interfere nas duas saídas de forma diferente.

Logo, para medir esta ligação entre os eixos, foi seguido o seguinte procedimento: as duas saídas são representadas de forma que enquanto aplicou-se degraus em um dos atuadores, o outro manteve-se no ponto de operação desejado. Como o sistema possui duas entradas e duas saídas, foram obtidas quatro funções transferência, então as Figuras 24, 26, 28 e 30 ilustram o degrau escolhido para cada modelo. Como base de comparação com algo mensurável, aproximadamente três unidades no intervalo de 0 a 1023 referem-se a um graus.

Sendo assim, primeiramente foi aplicado ao atuador da guinada um ciclo de trabalho (PWM) de 34, com intuito de manter tal eixo em uma posição linear. Logo em seguida, representado pela Figura 24, foram aplicados alguns degraus no atuador da arfagem.

Figura 24: Resposta no ângulo de guinada com degrau no atuador de arfagem e valor constante no atuador da guinada



Fonte: próprio autor

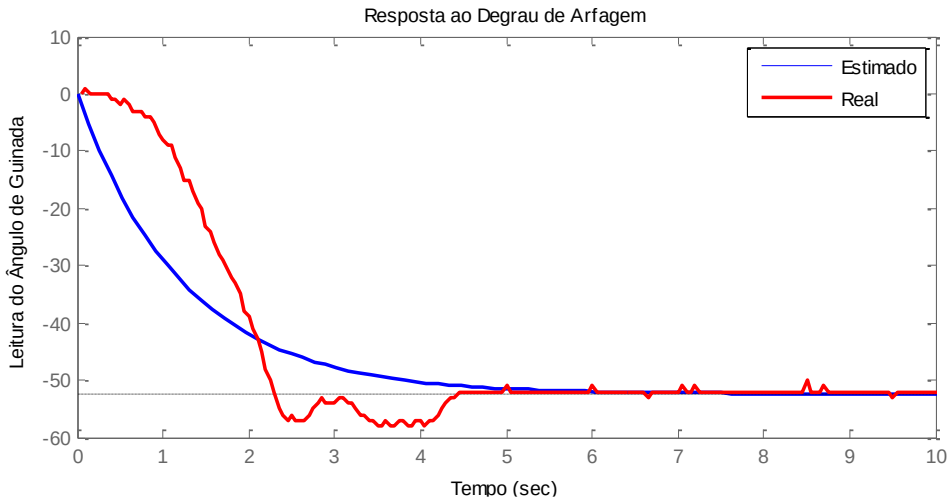
É possível notar que pequenos degraus no ciclo de trabalho no atuador da arfagem não influenciam no ângulo de guinada. Em virtude disso, foi necessário atribuir um degrau com amplitude consideravelmente grande. Outro ponto interessante é o fato de que a resposta ao degrau foi negativa, mostrando a influência das pás das hélices no sistema, conforme citado na Seção 3.1.

Utilizando o degrau imposto em trinta segundos, A Equação (4.2) apresenta a função transferência ($G_{G_Gc}(s)$) para variação no ciclo de trabalho (PWM) na resposta do ângulo de guinada:

$$G_{G_Gc}(s) = \frac{Y_G(s)}{U_A(s)} = \frac{-6,6516}{(1+1,2401 \cdot s)} \tag{4.2}$$

A Figura 25 apresenta a comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência. O modelo encontrado apresenta uma fidelidade de 68,4%.

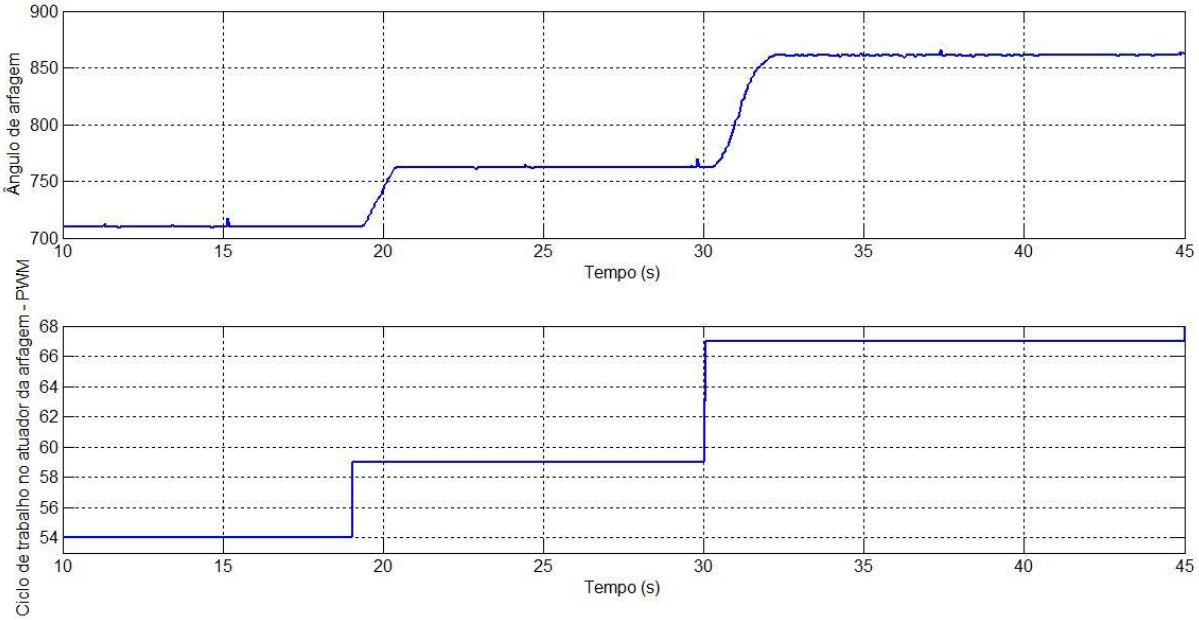
Figura 25: Comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência



Fonte: próprio autor

Em seguida, a partir da Figura 26, foi obtida a função transferência da variação do ângulo de arfagem com o ciclo de trabalho na guinada constante no valor 34.

Figura 26: Resposta no ângulo de arfagem com degrau no atuador de arfagem e valor constante no atuador da guinada



Fonte: próprio autor

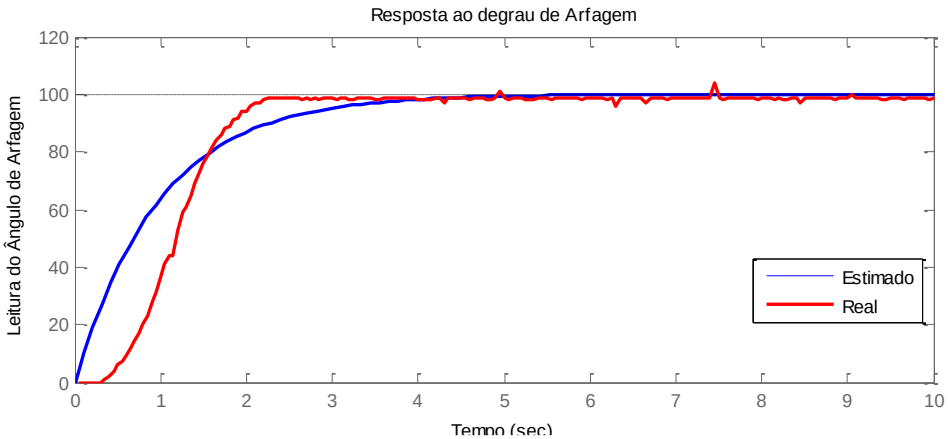
A função de transferência (G_{A_Gc}) obtida para a variação do ângulo de arfagem com a guinada constante é:

$$G_{A_Gc} = \frac{Y_A(s)}{U_A(s)} = \frac{12,50}{(1+0,9848 \cdot s)} \quad (4.3)$$

para Y_A, a variação da medida ângulo de arfagem resultante da variação de clico de trabalho (PWM) no atuador. É possível notar que a função de transferência é um pouco diferente daquela obtida na Seção 4.1.

A Figura 27 apresenta a comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência. O modelo encontrado apresenta uma fidelidade de 74,2%.

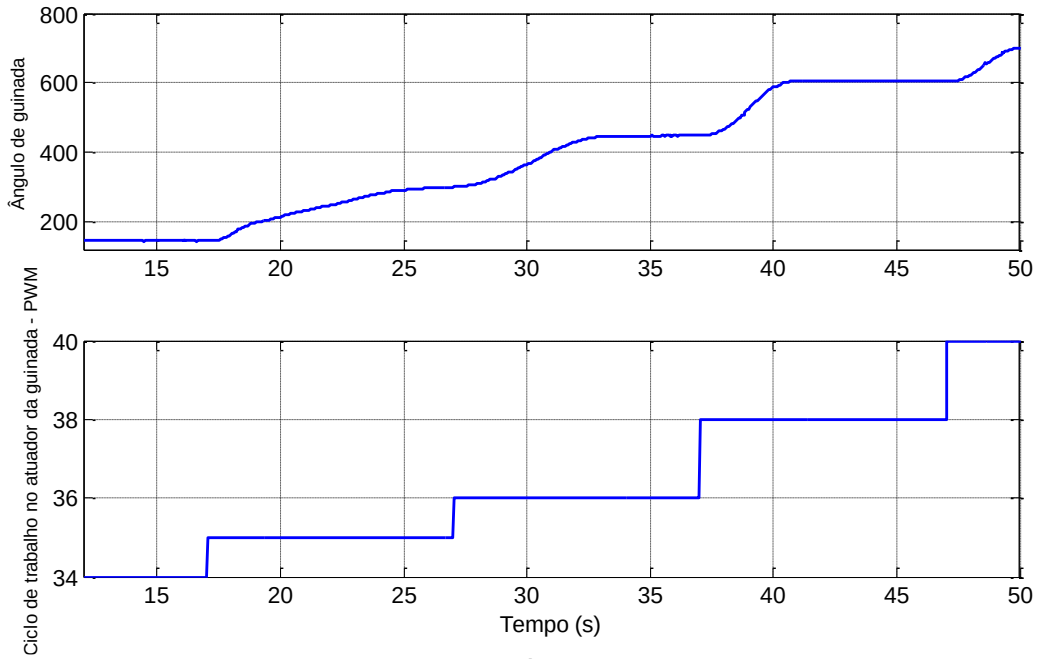
Figura 27: Comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência



Fonte: próprio autor

Agora, manteve-se o atuador da arfagem em um ângulo baixo, com ciclo de trabalho de 65, onde a resposta é mais linear. Na Figura 28, está representada a resposta no ângulo de guinada com o seu atuador aplicando degraus.

Figura 28: Resposta no ângulo de guinada com degrau no atuador de guinada e valor constante no atuador da arfagem



Fonte: próprio autor

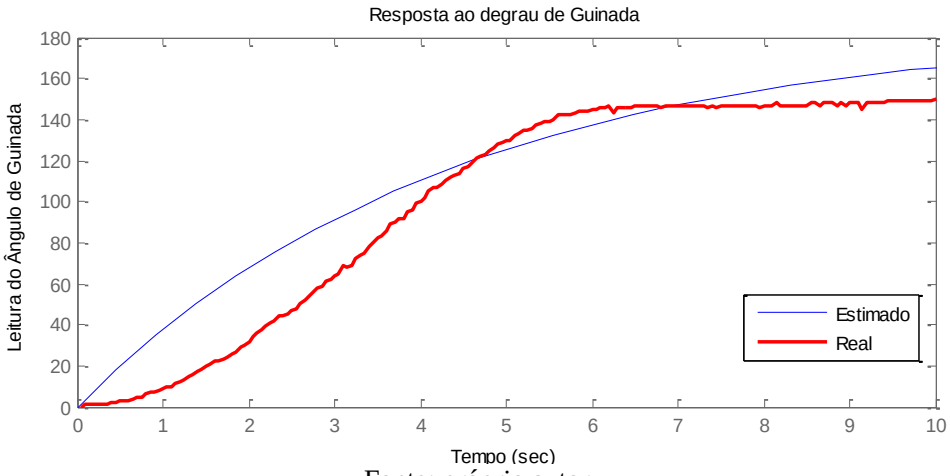
É interessante notar na Figura 28 o quão não linear é a planta, pois a cada degrau aplicado, ela apresenta uma resposta diferente. A Equação (4.4) representa a função transferência para a resposta do ângulo de guinada no degrau aplicado em 27 segundos até 37 segundos.

$$G_{G_Ac}(s) = \frac{Y_G(s)}{U_G(s)} = \frac{183,9}{1 + 4,3593 \cdot s} \tag{4.4}$$

para Y_G, a variação da medida ângulo de guinada resultante da variação de ciclo de trabalho no atuador.

A Figura 29 apresenta a comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência. O modelo encontrado apresenta uma fidelidade de 80,01%.

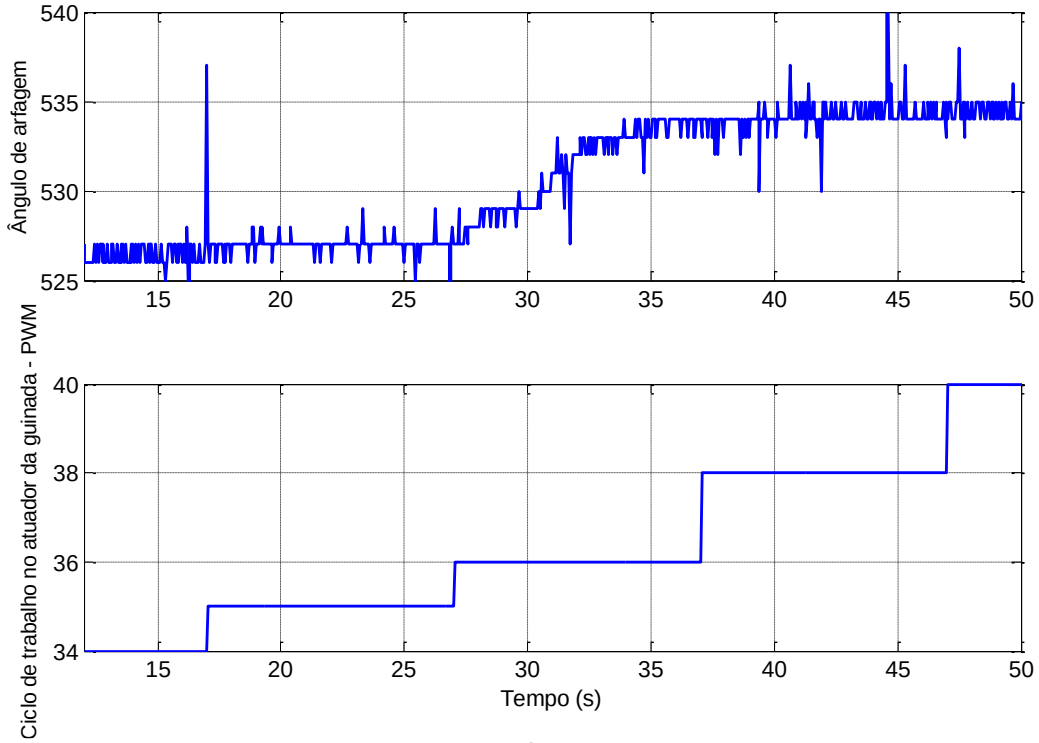
Figura 29: Comparação entre os dados reais da leitura do ângulo de guinada e a resposta obtida da função transferência



Fonte: próprio autor

Por fim, obteve-se a resposta no ângulo de arfagem que mede a influência dos degraus da guinada, ilustrada na Figura 30.

Figura 30: Resposta no ângulo de arfagem com degrau no atuador de guinada e valor constante no atuador da arfagem



Fonte: próprio autor

O sinal dos valores da leitura A/D do ângulo de arfagem aparenta apresentar ruído porque os valores são muito baixos, como pode ser observado pela escala do eixo Y da Figura 30, onde tem-se uma variação de 525 a 535. Por mais que o potenciômetro seja de precisão, essas leves oscilações na leitura são inevitáveis.

Pode-se observar que a influência dos degraus no atuador de guinada não é tão relevante no sistema, conforme mostra a Figura 30, pois nota-se a baixa variação na leitura do ângulo da arfagem. Em outros testes feitos, pôde-se notar que se a rotação do motor de arfagem estiver alta, esta influência é praticamente nula. A função transferência está representada pela Equação (4.5).

$$G_{A_Ac}(s) = \frac{Y_A(s)}{U_G(s)} = \frac{13,099}{(1+11,90 \cdot s)} \tag{4.5}$$

A Figura 31 apresenta a comparação entre os dados reais e a resposta obtida por meio da função transferência. O modelo encontrado apresenta uma fidelidade de 68,21%.

Figura 31: Comparação entre os dados reais da leitura do ângulo de arfagem e a resposta obtida da função transferência

Fonte: próprio autor

Visto que se tem um sistema MIMO 2x2 (duas entradas e duas saídas), seguindo o método utilizado em [30], considerando um sistema linear e invariante no tempo, tem-se as quatro funções transferências citadas nas Equações (4.2), (4.3), (4.4) e (4.5).

$$\frac{Y_A(s)}{U_A(s)} = G_{A_Gc}(s) \qquad \frac{Y_G(s)}{U_A(s)} = G_{G_Gc}(s)$$
$$\frac{Y_A(s)}{U_C(s)} = G_{A_Ac}(s) \qquad \frac{Y_G(s)}{U_G(s)} = G_{G_Ac}(s) \tag{4.6}$$

Assim, as relações de entrada-saída para o processo podem ser escritas como:

$$Y_A(s) = G_{A_Gc}(s)\cdot U_A(s) + G_{A_Ac}(s)\cdot U_G(s) \tag{4.7}$$

$$Y_G(s) = G_{G_Gc}(s)\cdot U_A(s) + G_{G_Ac}(s)\cdot U_G(s) \tag{4.8}$$

Logo, substituindo os valores obtidos em (4.3) e (4.5), obteve-se a função transferência de saída para o ângulo de arfagem.

$$Y_A(s) = \frac{12,50\cdot U_A(s)}{(1+0,9848\cdot s)} + \frac{13,099\cdot U_G(s)}{(1+11,90\cdot s)} \tag{4.9}$$

Substituindo as equações obtidas em (4.2) e (4.4), obteve-se a função transferência da saída para o ângulo de guinada.

$$Y_G(s) = \frac{-6,6516\cdot U_A(s)}{(1+1.2401\cdot s)} + \frac{183,9\cdot U_G(s)}{(1+4,3593\cdot s)} \tag{4.10}$$

A partir disso, foi aplicado a Transformada Z nas Equações (4.9) e (4.10), com um período de amostragem T=0,05s:

$$Y_A(z) = \frac{(0,6188\cdot z - 0,616)\cdot U_A(z) + (0,05492\cdot z - 0,0522)\cdot U_G(z)}{z^2 - 1,9463\cdot z + 0,947} \tag{4.11}$$

$$Y_G(z) = \frac{-(0,2629\cdot z - 0,260)\cdot U_A(z) + (2,097\cdot z - 2,014)U_G(z)}{z^2 - 1,9491\cdot z + 0,9496} \tag{4.12}$$

As Equações (4.11) e (4.12) representam as funções transferência discretizadas para a variação em torno do ponto de operação do sistema.

4.2.1 Representação no espaço de estados

O projeto do controlador LQR requer que a representação do sistema esteja definida no espaço de estados. Assim, a partir das funções transferência apresentadas nas Equações (10) e (11), aplicando o conceito de operador atraso [31], tem-se:

$$\begin{aligned} & y_A(k+2) - 1,9463 \cdot y_A(k+1) + 0,947 \cdot y_A(k) \\ & = 0,6188 \cdot u_A(k+1) - 0,616 \cdot u_A(k) \\ & + 0,05492 \cdot u_G(k+1) - 0,0522 \cdot u_G(k+1) \end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned} & y_G(k+2) - 1,9491 \cdot y_G(k+1) + 0,9496 \cdot y_G(k) \\ & = -0,2629 \cdot u_A(k+1) + 0,260 \cdot u_A(k) \\ & + 2,097 \cdot u_G(k+1) - 2,014 \cdot u_G(k) \end{aligned} \tag{4.14}$$

Agora deslocando as equações acima no tempo:

$$\begin{aligned} & y_A(k+1) = 1,9463 \cdot y_A(k) - 0,947 \cdot y_A(k-1) \\ & + 0,6188 \cdot u_A(k) - 0,616 \cdot u_A(k-1) \\ & + 0,05492 \cdot u_G(k) - 0,0522 \cdot u_G(k-1) \end{aligned} \tag{4.15}$$

$$\begin{aligned} & y_G(k+1) = 1,9491 \cdot y_G(k) - 0,9496 \cdot y_G(k-1) \\ & - 0,2629 \cdot u_A(k) + 0,260 \cdot u_A(k-1) \\ & + 2,097 \cdot u_G(k) - 2,014 \cdot u_G(k-1) \end{aligned} \tag{4.16}$$

Considerando a equação diferencial do estado conforme a Equação (4.17), pode-se representar em notação matricial discreta:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) \tag{4.17}$$

onde $x(k+1)$ é a derivada de $x(k)$, a matriz A de dimensões (n x n) é a matriz do sistema, B é a matriz de entrada com dimensões (n x m), $x(k)$ é o vetor de estados (n x 1) e u é o vetor de entradas do sistema com dimensão de (m x 1). Sendo que, neste caso, n é igual a 6 e m é igual a 2. Já saída do sistema é dada pela Equação (4.18), onde C é a matriz de saída (n x n) e D é uma possível relação direta entre a saída e entrada [32].

$$y(k) = C \cdot x(k) + D \cdot u(k) \tag{4.18}$$

Logo, contendo as duas Expressões (4.15) e (4.16) discretizadas das medidas futuras dos ângulos de arfagem e guinada, e utilizando o que foi citado acima, a representação de espaços de estados é dada por:

$$\begin{bmatrix} y_A(k+1) \\ y_G(k+1) \\ y_A(k) \\ y_G(k) \\ u_A(k) \\ u_G(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,9463 & 0 & -0,947 & 0 & -0,616 & -0,0522 \\ 0 & 1,9491 & 0 & -0,9496 & 0,260 & -2,014 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A(k) \\ y_G(k) \\ y_A(k-1) \\ y_G(k-1) \\ u_A(k-1) \\ u_G(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,6188 & 0,05492 \\ -0,2629 & 2,097 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A(k) \\ u_G(k) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

A Equação (4.20) mostra a ponderação da saída do sistema.

$$\begin{bmatrix} y_A(k) \\ y_G(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A(k) \\ y_G(k) \\ y_A(k-1) \\ y_G(k-1) \\ u_A(k-1) \\ u_G(k-1) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

O modelo apresentado foi utilizado tanto para o controlador LQR projetado neste trabalho, quanto para o projeto de controle preditivo projetado por um acadêmico do curso de mestrado do PPGEEL.

5 PROJETO DA MALHA DE CONTROLE

O presente trabalho apresentará duas técnicas de controle utilizadas para efeito de comparação. As duas técnicas que serão apresentadas são o proporcional-integral (PI) para controle da posição do ângulo de arfagem (como SISO) e o regulador linear quadrático (LQR do inglês *Linear Quadratic Regulator*) com ação integral LQRI, utilizado para o controle de posição de ambos os ângulos da planta (como MIMO). Nesta seção será demonstrado qual foi o procedimento utilizado para chegar nos parâmetros de cada controlador.

5.1 PROPORCIONAL-INTEGRAL

O controlador proporcional-integral tem características que tornam a implementação e sintonia simples; por isso, hoje em dia, é um dos controladores mais utilizados nas mais diversas aplicações envolvendo controle de processos. Inicialmente, será introduzido um breve detalhamento da ação de controle proporcional-integral, onde no domínio no tempo contínuo a ação é regida, conforme [32], pela Equação (5.1):

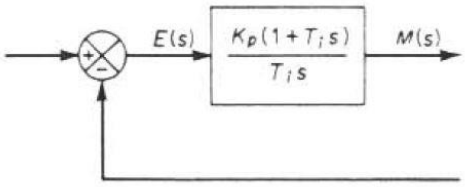
$$m(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \tag{5.1}$$

ou a função de transferência do controlador é expressa pela Equação (5.1).

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \tag{5.2}$$

onde K_p representa a sensibilidade proporcional ou ganho, e T_i representa o tempo integral. Tanto K_p como T_i são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_p afeta tanto a parte proporcional como a parte integral da ação de controle. O inverso do tempo integral T_i é denominado taxa de restabelecimento. A taxa de restabelecimento é o número de vezes por minuto que a parte proporcional da ação de controle é duplicada [32]. A Figura 32 mostra um diagrama de blocos de um controlador proporcional-integral.

Figura 32: Diagrama de blocos controlador PI



Fonte: [32]

Vale ressaltar que o controlador PI foi escolhido pelo fato de o modelo da planta para o ângulo de arfagem ter sido aproximado em um sistema de ordem 1, onde existe apenas um polo deslocado da origem. Sendo assim, concluiu-se que colocar um polo na origem e um zero deslocado para a esquerda do eixo $j\omega$ seria o ideal para eliminar o erro em regime permanente e tornar a planta com aceleração mais suave.

A Equação (4.1) descreve o modelo da planta utilizado. A fim de simplificar o projeto, foi estipulado a seguinte estrutura de controlador, que pode ser vista na Equação (5.3).

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_p \cdot (s + K_i)}{s} \tag{5.3}$$

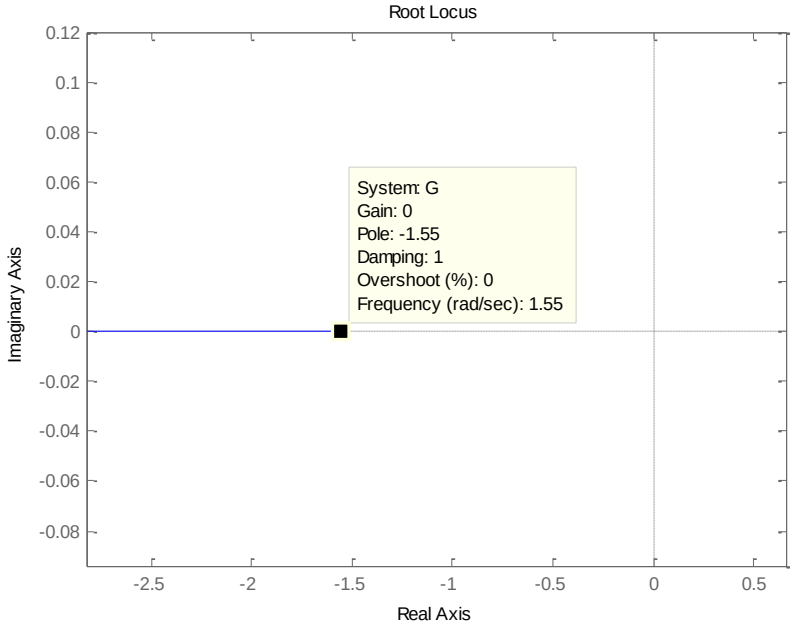
onde, $K_i = \frac{1}{T_i}$ será o ganho do integrador.

Para o projeto dos ganhos do controlador PI, na Figura 33 pode-se observar o lugar geométrico das raízes em malha aberta, por meio do *software* MATLAB®. A partir do local das raízes de malha aberta, buscou-se manter as características da planta, a qual apresenta resposta lenta no ângulo de arfagem. Sendo assim, foi imposto para K_i o valor de 0,2, e para K_p o valor de 0,03. A Equação (5.4) mostra a função transferência de malha fechada, calculada via *software*.

$$H_{mf}(s) = \frac{0,844 \cdot (s + 0,20)}{(s^2 + 2,40 \cdot s + 0,16)} \tag{5.4}$$

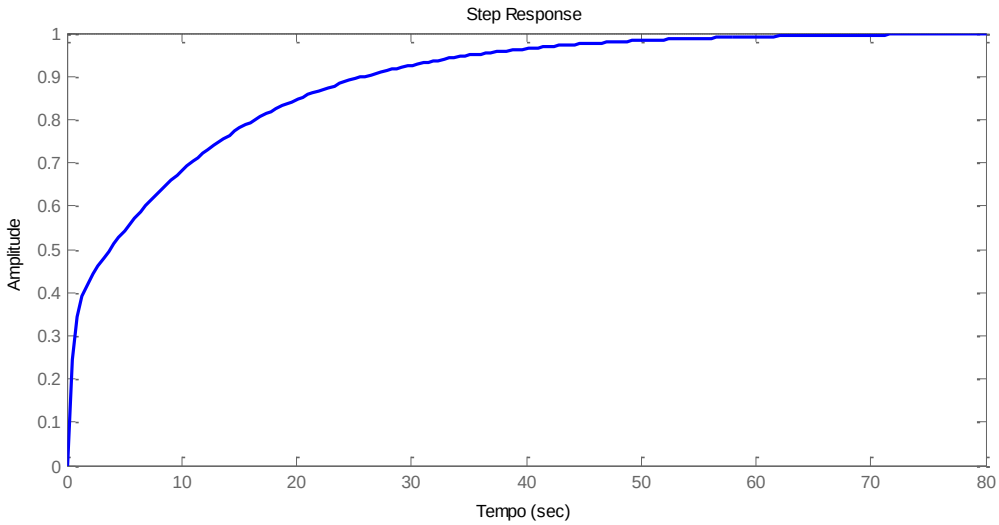
Portanto, aplicando um degrau unitário em simulação, pode-se observar a resposta conforme a Figura 34.

Figura 33: Lugar geométrico das raízes em malha aberta



Fonte: próprio autor

Figura 34: Resposta ao degrau de malha fechada



Fonte: próprio autor

É notável que o projeto do controlador apresentou uma resposta ao degrau bem lenta, porém pequenos ajustes nos ganhos podem ser feitos caso a resposta na prática não fique adequada. A implementação do controlador PI permite a variação dos parâmetros facilmente, esta foi feita seguindo o livro de controle digital do [33], no

capítulo que trata de controle empírico. Conforme o sistema de comunicação realizado neste trabalho, o processo de cálculo de controle foi feito no próprio *software* MATLAB® e via porta serial. Os dados são transmitidos à plataforma Arduino para que a mesma execute a ação de controle. Por fim, os resultados práticos neste controlador serão apresentados na Seção 6.1.

5.2 REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO

Nesta seção, será apresentada uma introdução sobre a técnica de controle e, em sua maior parte, o método de projeto do controlador descrevendo cada etapa que foi desenvolvida no *software* MATLAB®.

O Regulador Linear Quadrático (LQR, do inglês *Linear Quadratic Regulator*), é um controlador ótimo, que é bastante utilizado atualmente em diversas aplicações por apresentar boas características de desempenho, e por ser de simples implementação. Outro motivo para a aplicação da técnica é o fato de que, em disciplinas optativas da área de controle, é utilizado para estudo de controle ótimo.

Enquanto a teoria de controle convencional se baseia nas relações entrada-saída, ou seja, na função de transferência, a teoria moderna de controle se fundamenta na descrição por meio de um sistema de *n* equações diferenciais de primeira ordem que podem ser combinadas numa equação diferencial vetor-matricial de primeira ordem [32]. A representação matricial do controle moderno está representada na Seção 4.2.1 após feito a modelagem do sistema. Será utilizado tais matrizes para o cálculo do controlador.

Antes da etapa de cálculos dos parâmetros do controlador, é interessante verificar a controlabilidade e a observabilidade do sistema. Um sistema é dito controlável no instante t_0 se for possível, por meio de um vetor de controle sem restrição, transferir o sistema de qualquer estado inicial (x_{t_0}) para qualquer outro estado num intervalo de tempo finito [32]. Seja o sistema representado no espaço de estados, a matriz de controlabilidade é dada por:

$$M_C = [B \left| AB \right| ... \left| A^{n-1}B \right]] \tag{5.5}$$

O sistema dado pela Equação (5.5) é de estados completamente controláveis se e somente se os vetores $B\left|AB\right|...\left|A^{n-1}B\right.$ forem linearmente independentes, ou seja, se matriz M_c *(n x n)* for de posto *n* [32]. O teste de controlabilidade do sistema neste trabalho foi feito utilizando um comando MATLAB® chamado *crtb*. A matriz A do modelo do sistema é (6 x 6). O posto da matriz M_c resultou em 6; logo, o sistema modelado é controlável. Já o sistema é observável se, somente se, existir um tempo T finito em que o estado inicial *x(0)* possa ser determinado a partir do histórico de *y(t),* dado o controle *u(t)* [32]. Logo, o sistema é dito observável se, e somente se, a matriz M_o *(n x nm)* for de posto *n*, ou seja, se tiver *n* vetores-coluna linearmente independentes [32].

$$M_o = \left[C^T \left| A^T C^T \right| ... \left| (A^T)^{n-1} C^T \right. \right] \tag{5.6}$$

Utilizando o comando *obsv* do MATLAB®, obteve-se a matriz M_o, e o posto desta matriz resultou em 4. Logo, conclui-se que o sistema não é observável. Acredita-se que devido ao fato de que as variáveis de entrada estão incluídas nos estados, são, na realidade, dados passados das saídas e das ações de controle. Entretanto, tal fato não impede a aplicação do LQR, pois é possível obter o estado a partir das medições da saída e do uso de memórias das saídas e ações de controle passadas.

Após feitos os testes de controlabilidade e observabilidade, considerando que o sistema é discreto, linear e controlável, o mesmo pode ser expressado pela Equação (5.7).

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k+1) \tag{5.7}$$

Sendo A uma matriz (n x n), B uma matriz (n x m). O principal objetivo do LQR é determinar a matriz K que é a matriz de ganho de retroação de estados, mas para isso precisa-se primeiro encontrar a lei de controle que minimiza J, sendo J o índice de desempenho [32].

$$J(x_0) = \min_{(U(k))} \sum_{i=0}^{\infty} (x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k)) \tag{5.8}$$

O argumento J representa a soma da energia dos estados e do sinal de controle que deve ser minimizado em relação ao sinal de controle $u(k)$. A matriz Q é semi-definida positiva que penaliza a convergência dos estados e a matriz R é

definida positiva que penaliza o esforço dos sinais de controle. Sendo K um vetor (1 x n), tem-se que a solução é:

$$u(k) = -K \cdot x(k) \tag{5.9}$$

A lei de controle ótimo é dada pela Equação (5.9); logo, se os elementos da matriz K forem determinados de modo a minimizar o índice de desempenho. Onde K é definido por:

$$K = (R + B^T PB)^{-1} B^T PA \tag{5.10}$$

E P é a solução obtida por meio da Equação de Riccati [32], que é mostrada na Equação (5.11).

$$A^T PA - P - A^T PB(R + B^T PB)^{-1} PA + Q = 0 \tag{5.11}$$

O objetivo do projeto do LQR é chegar a um LQRI. O procedimento de projeto do controle LQRI é o mesmo do LQR. A diferença entre os dois está no modelo da planta, que deverá ser acrescido da ação integral dos erros. Tal etapa é necessária caso seja desejado um rastreador sem erro em regime permanente para planta sem integrador. Para se obter a matriz K minimizada, deve-se acrescentar dois estados que estão associados ao erro integrativo da planta. Para se acrescentar os dois estados, as matrizes A, B e C, citadas na Equações (4.19 e 4.20), devem ser expandidas conforma a Equação (5.12).

$$\begin{bmatrix} y_A(k+1) \\ y_G(k+1) \\ y_A(k) \\ y_G(k) \\ u_A(k) \\ u_G(k) \\ \omega_A(k+1) \\ \omega_G(k+1) \end{bmatrix} = A_I \begin{bmatrix} y_A(k) \\ y_G(k) \\ y_A(k-1) \\ y_G(k-1) \\ u_A(k-1) \\ u_G(k-1) \\ \omega_A(k) \\ \omega_G(k) \end{bmatrix} + B_I \begin{bmatrix} u_A(k) \\ u_G(k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_A(k) \\ y_G(k) \end{bmatrix} = C_I \begin{bmatrix} y_A(k) \\ y_G(k) \\ y_A(k-1) \\ y_G(k-1) \\ u_A(k-1) \\ u_G(k-1) \\ \omega_A(k) \\ \omega_G(k) \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

sendo que ω_A representa a soma do erro no ângulo de arfagem e ω_G representa a soma do erro no ângulo de guinada. As matrizes expandidas podem ser representadas da seguinte maneira.

$$A_I = \begin{bmatrix} A_{(n_x n)} & 0_{(n_x p)} \\ -C_{(p_x n)} & I_{(p_x p)} \end{bmatrix}, B_I = \begin{bmatrix} B_{(n_x p)} \\ 0_{(p_x p)} \end{bmatrix}, C_I = \begin{bmatrix} C_{(p_x n)} & 0_{(p_x p)} \end{bmatrix}$$
$$n = 6$$
$$p = 2 \tag{5.13}$$

Logo, para encontrar os coeficientes do controlador LQR, utilizou-se a função pronta do MATLAB® chamada “DLQR”, do inglês *Linear-Quadratic Regulator Design*, usado para sistemas discretos. Esta função calcula a matriz do ganho ótimo segundo a lei do LQR que minimiza função custo, como foi descrito anteriormente. Nesta função, deve-se inserir as matrizes A_I, B_I e C_I expandidas do sistema juntamente com a matriz ótima Q do controlador, a qual define uma relação entre os coeficientes proporcionais, integrais e derivativos do controlador, e a matriz R que está relacionada à energia que é empregada na ação de controle. Os valores de Q e R foram ajustados empiricamente em:

$$Q = \begin{bmatrix} 1\times10^{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1\times10^{4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1\times10^{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1\times10^{4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\times10^{8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5\times10^{8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 280 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 560 \end{bmatrix} \qquad (5.14)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1\times10^{8} & 0 \\ 0 & 5\times10^{8} \end{bmatrix}$$

A escolha dos termos das matrizes foi feita de forma empírica; visto que o sistema possui um faixa linear pequena dos atuadores, buscou-se minimizar ao máximo a energia gasta para corrigir erros pequenos. Os termos da matriz Q referidos aos termos integradores foram ajustados com mais precisão para que o erro em regime minimizasse ao máximo.

A partir do sistema expandido, com estes termos definidos, tem-se que a matriz de ganho ótimo é:

$$\begin{bmatrix} u_A(k) \\ u_G(k) \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} 0,9116 & 0,0873 \\ -0,0959 & 0,3017 \\ -0,8540 & -0,0819 \\ 0,0869 & -0,2771 \\ -0,5793 & -0,0226 \\ 0,1372 & -0,5922 \\ -0,0012 & -0,0001 \\ 0,0003 & -0,0007 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \cdot \begin{bmatrix} y_A(k) \\ y_G(k) \\ y_A(k-1) \\ y_G(k-1) \\ u_A(k-1) \\ u_G(k-1) \\ \omega_A(k) \\ \omega_G(k) \end{bmatrix} \qquad (5.15)$$

Por fim, conclui-se que o projeto da ação de controle LQR com integrador pode ser implementado de uma forma simples por se utilizar controle digital, onde o código de controle está inserido no *software* MATLAB®. Além disso, existe uma liberdade na alteração dos parâmetros das matrizes Q e R, pois a minimização da função custo também é feita no *software*; logo, permite que o acadêmico ajuste os ganhos da forma que optar. Esse é um dos motivos de estabelecer a comunicação entre a plataforma Arduino e o MATLAB®.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados experimentais do controlador projetado nesta seção.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, serão descritos todos os resultados alcançados durante o trabalho de conclusão de curso, dividindo em testes feitos em cada movimento dos dois graus de liberdade e também na integração de ambos os movimentos.

Além de resultados experimentais equivalentes aos controladores PI e LQR, projetados pelo autor deste trabalho, foi inserido uma seção final com resultados do projeto do controlador preditivo feito pelo mestrando Rodolfo Lauro Weneirt, a fim de mostrar que a planta também serve para a aplicação de malhas mais complexas e que pode ser utilizada como uma ferramenta de ensino para diversas disciplinas de controle.

Os gráficos dos resultados que serão apresentados neste capítulo começam a partir dos dez segundos de amostragem pois, como são utilizados motores que habitualmente são usados em aeromodelos, é necessário que estes sejam partidos do ciclo de trabalho zero até chegar ao ponto de funcionamento. Ou seja, os motores são partidos em malha aberta e, logo em seguida, o controle entra em ação.

Vale ressaltar que o controlador PI utiliza as malhas de arfagem e guinada independentes uma da outra (SISO), já o LQR e o preditivo permitem o projeto acoplado (MIMO).

6.1 RESULTADOS PI

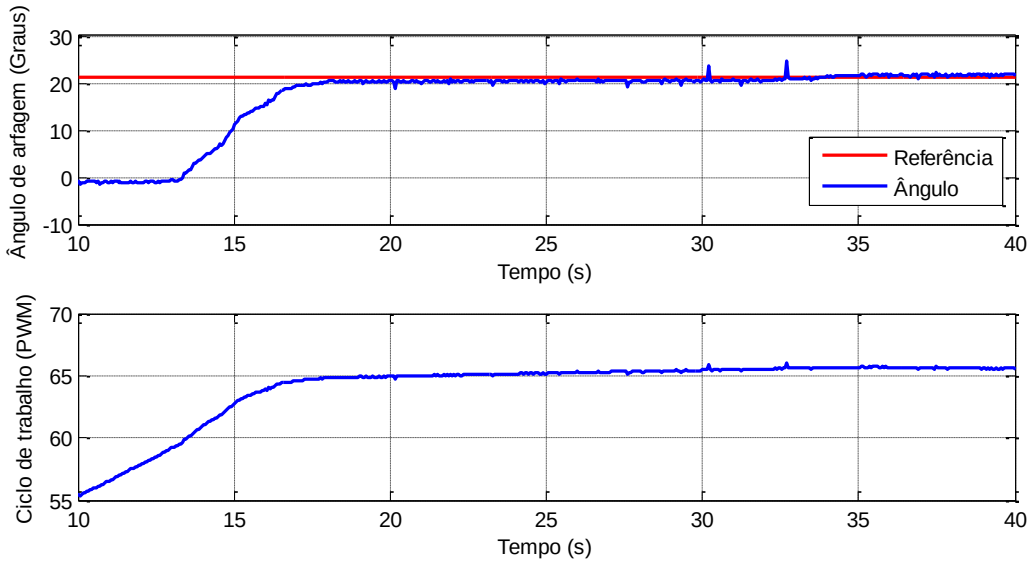
Após projetado o controlador a partir do modelo encontrado por identificação, foram iniciados os testes experimentais no movimento de arfagem. Inicialmente, o controlador mostrou-se agressivo e não se conseguia manter os atuadores na faixa linear de atuação. Um possível motivo dos resultados indesejados foi que o método de identificação paramétrica implementado pelo Matlab® não conseguiu alcançar uma aproximação linear muito boa. Então, foi diminuído em dez vezes o ganho do integrador do projeto descrito na seção 5.1, tornando o controle mais suave, e alcançando a região linear do atuador.

Na Figura 35, é possível observar a resposta da planta buscando seguir uma referência de ângulo. E, na parte inferior da imagem, é ilustrado o sinal enviado ao motor a fim de representar a energia gasta pelo controlador para corrigir o erro. Neste

primeiro caso, utilizou-se uma referência fixa. Pode-se observar que pelo fato de o controlador possuir um termo integrativo, o erro em regime permanente é nulo.

No gráfico abaixo, a referência de ângulo imposta está representada pela linha vermelha; a medida em graus do ângulo de arfagem e o sinal PWM imposto ao atuador estão em azul.

Figura 35: Referência em 21º no movimento de arfagem e resposta do atuador



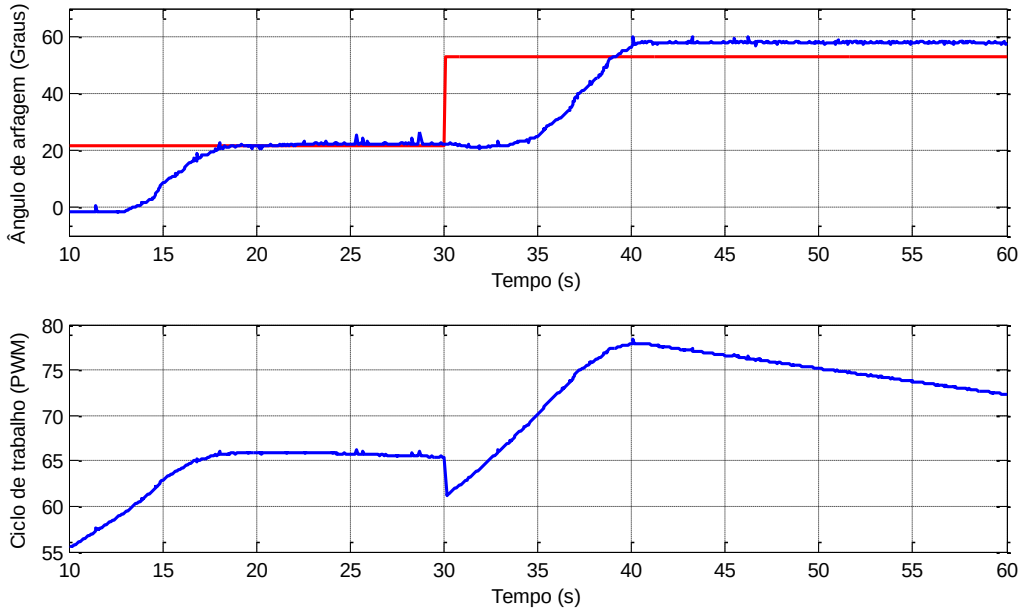
Fonte: próprio autor

O ângulo 0º expressa que a barra está em repouso e o ângulo de 120º expressa o ângulo máximo até a saturação.

Algo importante de comentar é o fato de que a dinâmica do movimento é bem lenta, o que pode ser observado também na planta semelhante à deste trabalho, referenciada em [13].

Já na Figura 36, foi imposto que a referência variasse de um ângulo ao outro, formando um degrau na referência, com intuito de observar a resposta do atuador a uma variação, e também ter noção do tempo de estabilização.

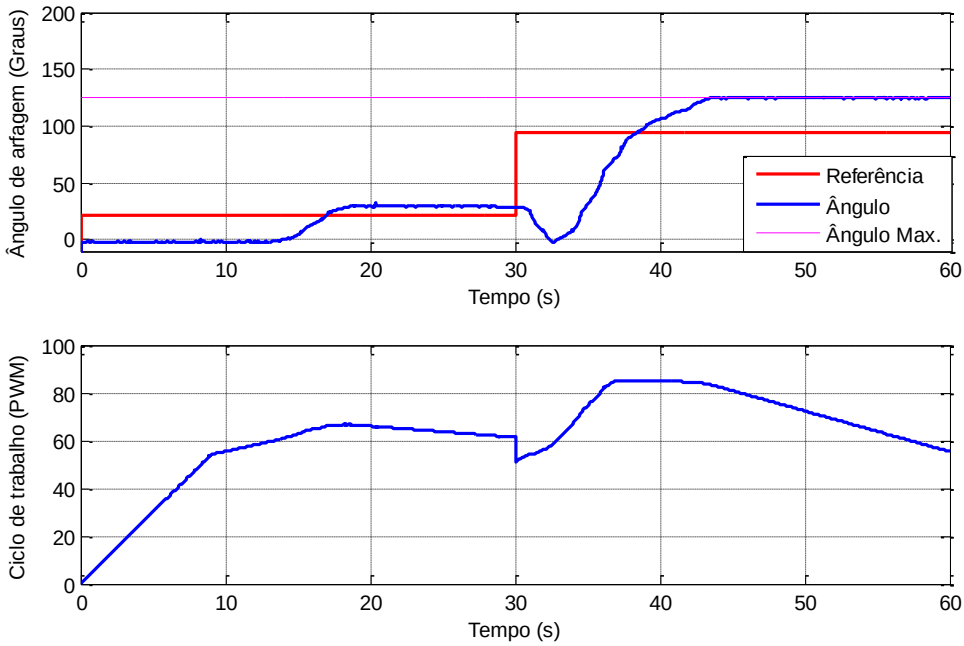
Figura 36: Referência variando de 21º para 53º no movimento de arfagem e a resposta do atuador



Fonte: próprio autor

A partir de aproximadamente 100º de inclinação da barra, o controlador tende a não conseguir estabilizar na posição imposta, pelo fato de já estar gastando bastante energia para manter tal posição. Com isso, com qualquer variação brusca do erro, torna-se difícil voltar ao ponto desejado. Deve-se lembrar que o ângulo de saturação da planta é de 120º, contando que a posição de repouso da barra está em 0º. A Figura 37 mostra qual a resposta da planta para ângulos de arfagem muito altos.

Figura 37: Resposta do controle PI em ângulos de arfagem próximos a saturação



Fonte: próprio autor

Por fim, pôde-se tirar algumas conclusões sobre os resultados do projeto do controlador PI. É notável que o controle funcionou bem; porém, não se mostrou tão preciso, e apresentou leves erros em regime permanente. Por se tratar de uma planta não linear, era previsto que um controlador linear PI teria certas limitações para controlar a planta. Entretanto, analisando pelo ponto de vista didático, com a possibilidade de se aplicar técnicas comumente utilizadas em disciplinas bases de controle, o benefício é poder analisar e verificar as diferenças de cada topologia de controle linear.

6.2 RESULTADOS LQR

Nesta seção, serão apresentados os resultados do controlador LQR com integrador. Após terem sido feitas variações nos parâmetros do controlador LQR, foi possível notar qual a influência das matrizes Q e R na resposta do sistema. Entretanto, a matriz Q possui muitas variáveis, e por isso não foi possível analisar todos os termos.

Inicialmente, observou-se que, utilizando valores baixos para a matriz K, a planta não atuava dentro da faixa linear; ou seja, a energia aplicada para cada variação de erro era muito grande e o sistema entrava em regime de oscilação. Para

reduzir tal agressividade do controlador, os parâmetros associados às variáveis de entrada foram elevados consideravelmente. A partir desta alteração, foi possível analisar os demais parâmetros da diagonal da matriz Q.

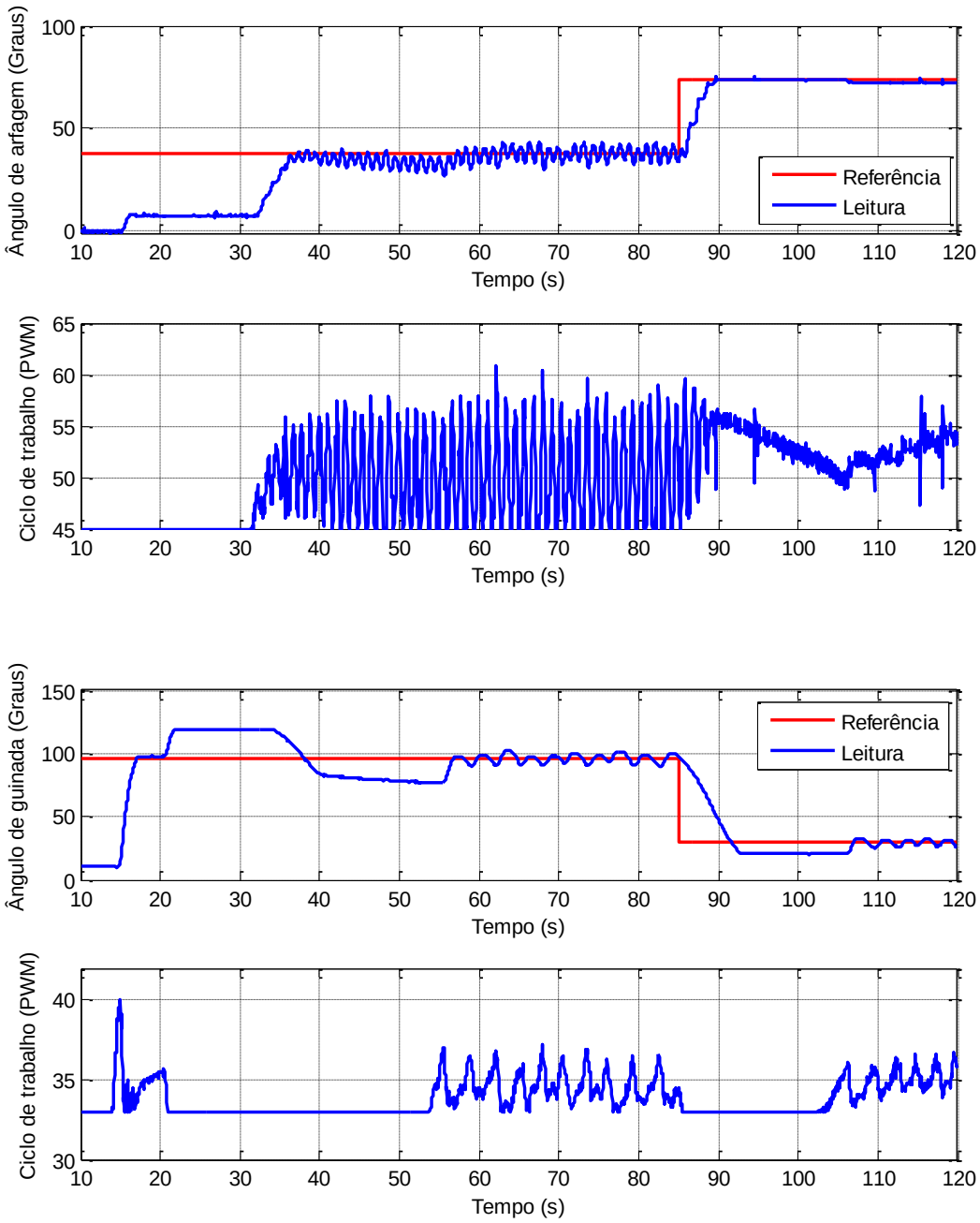
Nos testes iniciais, mesmo aumentando os valores da matriz R, a oscilação no atuador do ângulo de arfagem continuou, mas o ângulo de guinada mostrou uma resposta boa, mesmo com leves oscilações. A matriz Q e a R nos testes iniciais estão abaixo.

$$Q = \begin{bmatrix} 1\times10^{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1\times10^{4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1\times10^{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1\times10^{4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\times10^{8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5\times10^{8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 300 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 560 \end{bmatrix} \qquad (6.1)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1\times10^{8} & 0 \\ 0 & 5\times10^{8} \end{bmatrix}$$

A Figura 38 apresenta os resultados de arfagem e guinada com os ganhos obtidos a partir das matrizes na Equação (6.1). Com isso, pretendia-se verificar qual era a influência na prática de cada parâmetro da diagonal.

Figura 38: Resultados do LQRI com oscilações no ângulo de arfagem e guinada



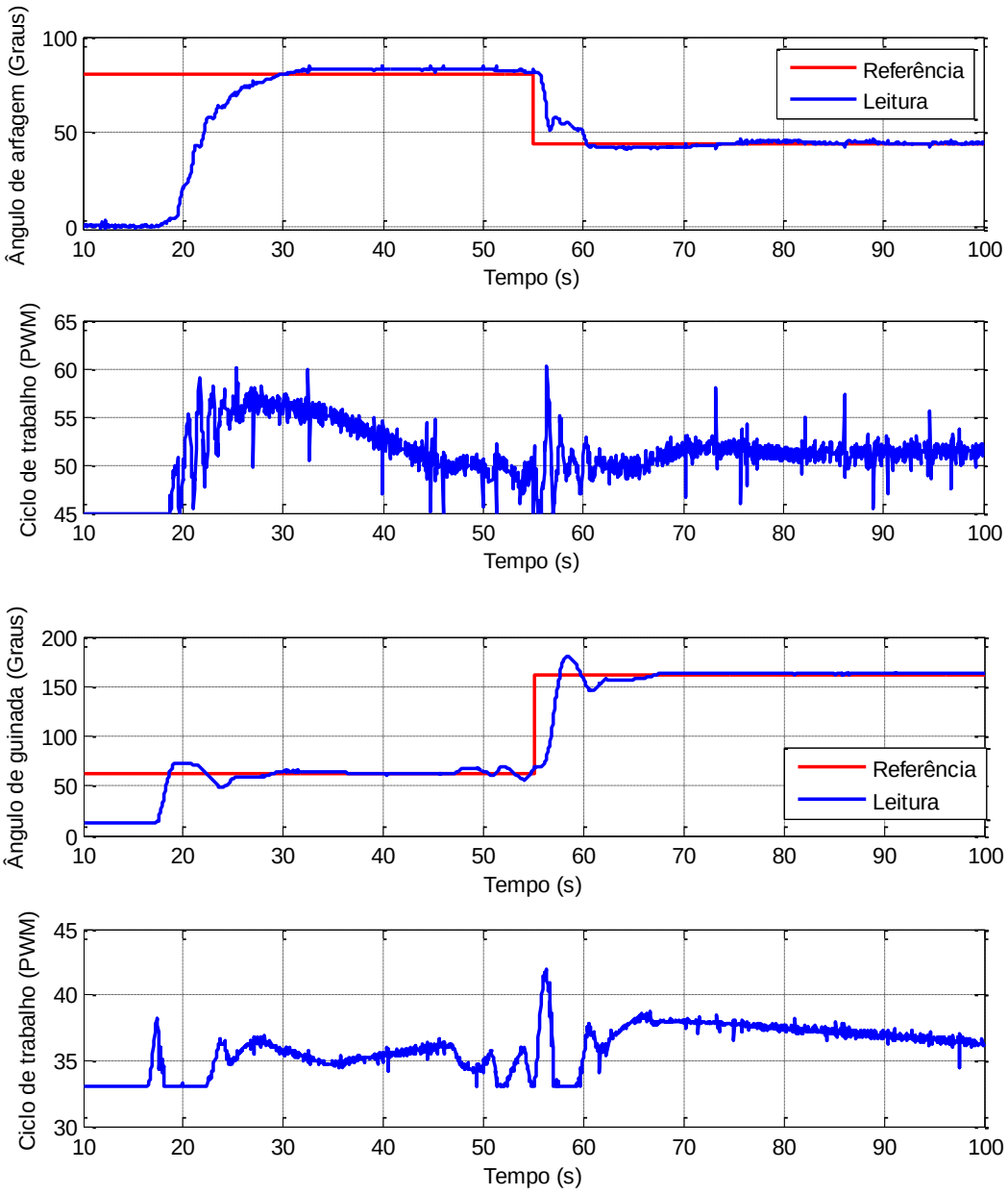
Fonte: próprio autor

A partir deste teste inicial, observou-se que o sistema de controle tendia a corrigir primeiro o ângulo de guinada e, logo em seguida, corrigir o ângulo de arfagem.

Visto que havia oscilação no ângulo de arfagem, foi multiplicado por dez as componentes da matriz Q, que são referidas à leitura atual, e à leitura passada do ângulo de arfagem. Em algumas unidades, foi reduzido o termo que se refere à soma de erro do ângulo.

Acreditou-se que isso pudesse melhorar a resposta, pois assim as leves variações nos ângulos de arfagem fossem mais ponderadas nos ganhos da matriz K. O resultado que está apresentado na Figura 39 representa o projeto demostrado na seção 5.2, a Equação (5.14). A referência de ângulo de arfagem inicialmente foi de 81º e depois de 44º, sendo que o ângulo zero é no instante em que a barra está em repouso. A referência de ângulo de guinada inicialmente foi de 63º, e em 55 segundos mudou para 162º, sendo que o ângulo zero está em uma das limitações físicas criadas na planta para que a estrutura não gire 360º. A imagem de como foi implementada esta saturação pode ser visualizada no Apêndice A.

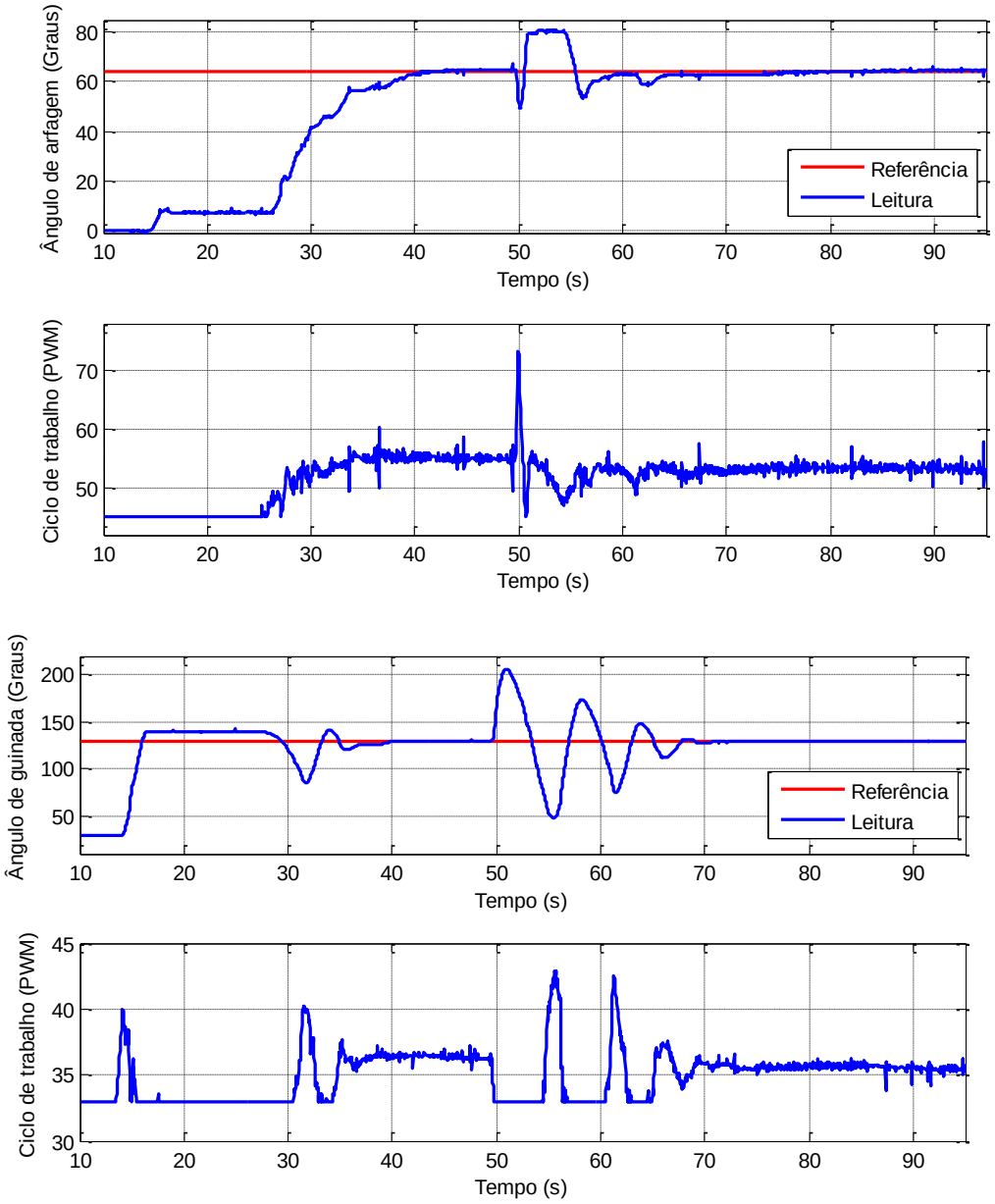
Figura 39: Resultados do controlador LQR



Fonte: próprio autor

Pôde-se observar que a oscilação no ângulo de arfagem praticamente não existe mais; porém, a dinâmica de controle se tornou mais lenta. No manual desenvolvido pela Quaser®, referenciado em [13], foi desenvolvido um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) onde os ganhos são computados usando o algoritmo do LQR. Os resultados experimentais apresentados neste manual também mostram que a dinâmica da planta é lenta, e que pode apresentar erros em regime se os ganhos não estiverem bem ajustados.

Figura 40: Resultado dos ângulos de arfagem e guinada aplicando um distúrbio em 50 segundos

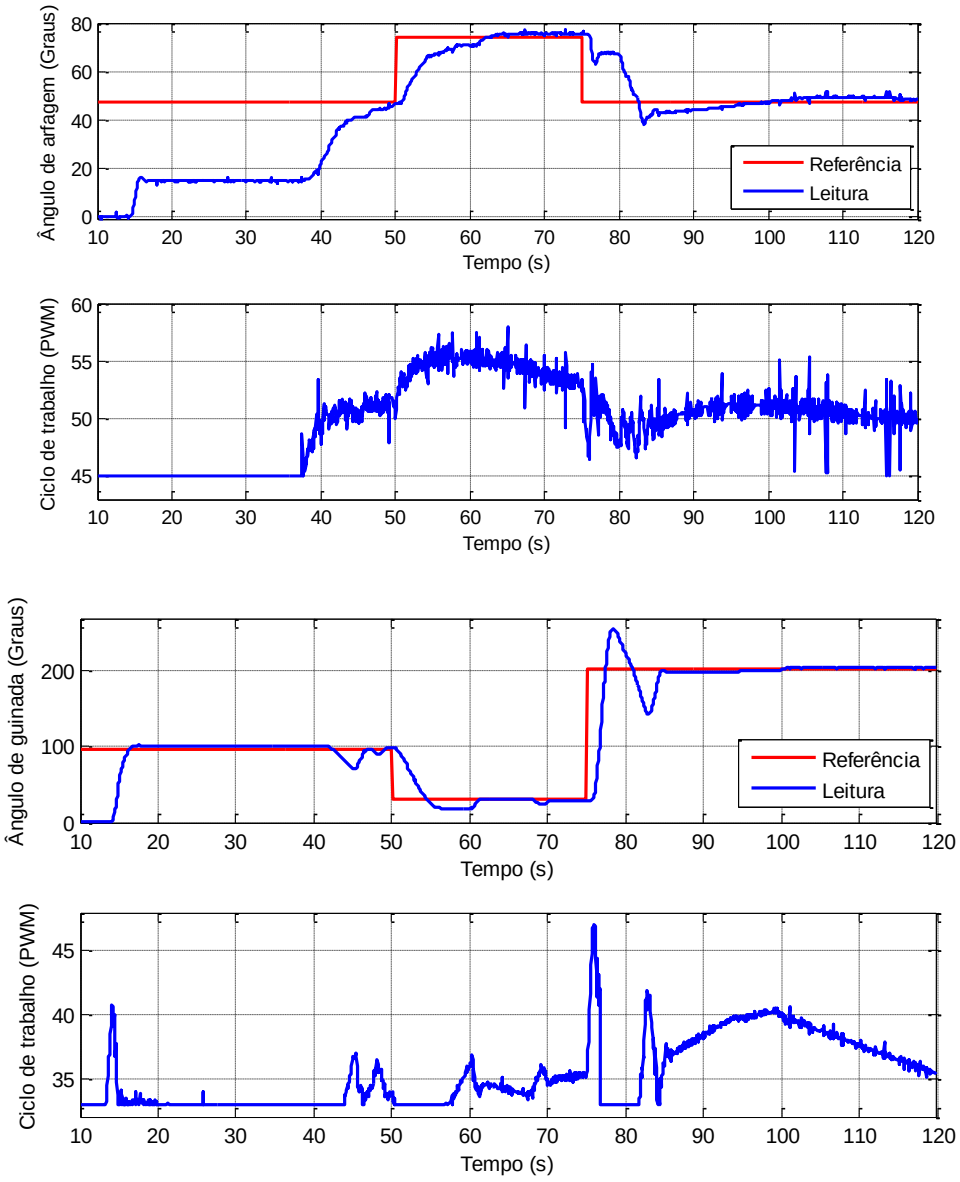


Fonte: próprio autor

Para verificar qual seria a reação do controlador se fosse imposto um distúrbio externo, neste caso, foi simulado uma colisão na haste. Inicialmente, a haste chegou ao ponto de equilíbrio seguindo a referência e, em seguida, no instante de 50 segundos, foi aplicado um distúrbio consideravelmente forte. Como o distúrbio foi manual, não temos a exata proporção. A Figura 40 apresenta os gráficos das respostas de guinada e arfagem antes e após o distúrbio.

Para verificar ainda melhor a resposta do controle, foi mudada três vezes a referência de ambos os ângulos. A Figura 41 apresenta as respostas dos ângulos de guinada e arfagem, e na parte inferior, os seus respectivos valores de ciclo de trabalho aplicados nos atuadores.

Figura 41: Resultado com a mudança três vezes de referência



Fonte: próprio autor

Por fim, conclui-se que a malha de controle LQR obteve bons resultados; apesar de apresentar uma dinâmica lenta, consegue seguir a referência como desejado.

6.3 RESULTADOS CONTROLE PREDITIVO

Como já citado na introdução neste capítulo, o desenvolvimento do controle preditivo foi projeto pelo mestrando Rodolfo L. Weneirt, e o autor deste trabalho apenas auxiliou na etapa de implementação. Tal controlador foi desenvolvido pelo mestrando como trabalho final da disciplina “Tópicos Especiais em Controle Preditivo – TCT”, a qual a professora orientadora deste trabalho ministra. Pretende-se mostrar os resultados obtidos apenas para comprovar a validade da planta didática desenvolvida, e mostrar como ela pode ser utilizada em trabalhos das disciplinas de controle, e até mesmo em futuras pesquisas de diferentes técnicas de controle.

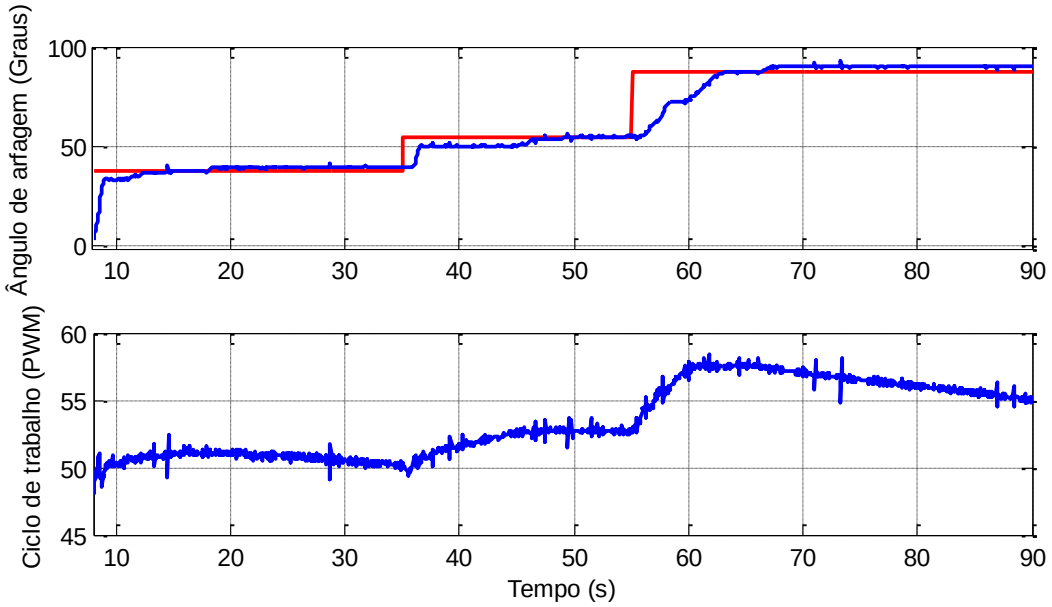
A fim de contextualizar qual controlador foi aplicado, será inserida uma breve explicação e algumas referências que foram utilizadas.

O Controle Preditivo Baseado em Modelo (MBPC ou MPC) é uma técnica de controle que tem por objetivo a minimização de uma função custo. As saídas futuras para um determinado horizonte de predição N, são preditas em cada instante de tempo t usando o modelo do processo [34].

O controle preditivo empregado na planta didática utiliza a técnica MPC, onde as saídas futuras para um dado horizonte de predição N são calculadas para cada período de amostragem utilizando o modelo do processo. A sequência de ações de controle é então otimizada pela minimização de uma função custo. O primeiro elemento da sequência ótima é então aplicado à planta. Esse processo é repetido a cada período da amostragem. Para tal projeto, utilizou-se também a referência [35] como base.

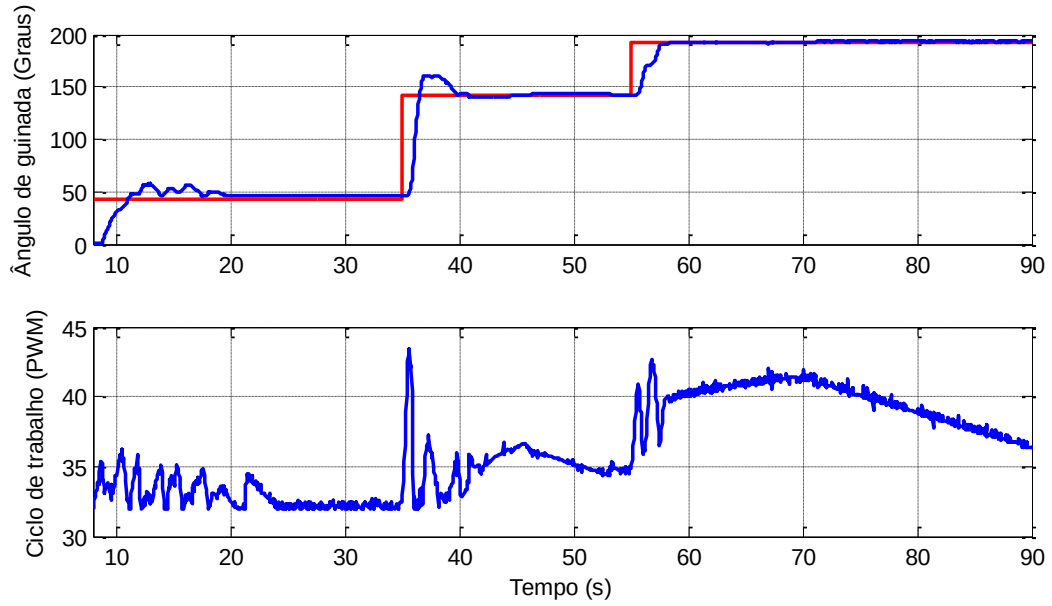
Após o projeto e implementação do código, foram feitos alguns testes práticos na planta até chegar ao ponto ideal. A Figura 42 e 43 apresentam os resultados do controle preditivo aplicado na planta.

Figura 42: Resultado do controle predito sem restrições no ângulo de arfagem



Fonte: próprio autor

Figura 43: Resultado do controle predito sem restrições no ângulo de guinada



Fonte: próprio autor

Nota-se que a resposta foi rápida e os picos de ciclo de trabalho não foram agressivos, tornando o movimento bem suave até a referência.

6.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MALHAS DE CONTROLE

As três técnicas aplicadas neste capítulo são técnicas de controle linear. Entretanto, tem-se que a planta apresenta dinâmica não linear, conforme as imagens citadas no capítulo da modelagem. Sendo assim, conclui-se que os controladores lineares funcionaram muito bem, apesar das adversidades e até possível descasamento da planta. Outro ponto em comum entre as malhas é o fato de que a dinâmica do movimento é lenta, e de que, se a intenção era acelerar o sistema, muitas vezes a planta tendia a oscilar.

Os resultados da malha de PI em comparação com os resultados obtidos pelo LQR foram um tanto piores, apresentando leves erros em regime permanente; porém, tais resultados são da malha de arfagem, na qual foram projetados o PI e o LQR. Vale lembrar que a malha de PI foi projetada desconsiderando a influência do ângulo de guinada, pois o mesmo encontrava-se travado. Na modelagem da influência do atuador de guinada no ângulo de arfagem foi visto que existe uma influência positiva ao movimento de arfagem. Outro fato que foi constatado é que em ângulos muito próximos à saturação superior, que seriam os 120º, os atuadores se comportam de uma forma muito agressiva.

Já os resultados da malha LQR e preditivo, que utilizavam a modelagem completa do sistema, apresentaram bons resultados. A partir disto, conclui-se que os resultados obtidos de uma forma geral demostram o potencial da planta tanto para disciplinas de graduação e pós-graduação, quanto para pesquisa.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou todo o procedimento de reformulação física da planta didática. Na execução destes procedimentos, o acadêmico autor deste trabalho teve contato com a área de Engenharia Mecânica, trabalhando na parte do desenvolvimento de peças novas em parceria com a Indústria RM Máquinas Frigoríficas, e profissionais especializados. Nesta etapa, dificuldades foram encontradas, pois o suporte técnico da parte mecânica não se encontrava na cidade de Joinville. Sendo assim, algumas adaptações na parte mecânica tiveram que ser implementas com o conhecimento do acadêmico e com materiais fornecidos pelo grupo PET Engenharia Elétrica, do qual o autor participa. A reestruturação da planta demandou um tempo considerável no andamento deste trabalho, pois um dos objetivos principais era poder deixar a planta pronta para utilização. Entretanto, uma atividade interdisciplinar é relevante para o crescimento profissional do acadêmico.

De uma forma geral, para a reformulação da planta, que exerce praticamente a mesma função de uma profissional de custo aproximando a R$ 25.000,00, foi gasto em torno de 2% deste valor. Os gastos foram, em sua maioria, com dispositivos eletrônicos como os motores, os *drivers* de acionamento, e as peças mecânicas. Entretanto, se comparado o valor gasto com o valor comercial, a ideia de criar uma planta de baixo custo fica dentro da expectativa.

O método utilizado para a modelagem do sistema mostrou-se válido e apresentou um resultado bem aproximado ao real, visto que os controladores conseguiram adaptar-se de forma a controlar a planta. Vale destacar que as limitações físicas da planta foram consideradas no modelo, como por exemplo, a perturbação gerada pelo cabeamento dos sensores e dos motores até a placa do microcontrolador. Além disso, por se tratar de um sistema que depende da propulsão, as condições climáticas, como vento, temperatura e umidade influenciam diretamente na resposta da planta.

Por fim, acredita-se que os resultados das malhas foram válidos e cumpriram a missão desejada, que era de comprovar que a planta pode adaptar-se a diferentes técnicas de controle e está pronta para utilização.

7.1 CONTRIBUIÇÕES

O presente trabalho gerou, analisando o que foi desenvolvido, as seguintes contribuições principais:

- Desenvolvimento de uma planta didática para o estudo de técnicas de controle, desde básicas até avançadas, permitindo a utilização tanto na graduação como na pós-graduação;
- Estudo de método de modelagem de sistema MIMO, pouco visto na graduação;
- Estudo de plantas N-DOF com comparações entre diferentes técnicas construtivas.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Dada a planta didática desenvolvida e os estudos realizados, sugere-se para trabalhos futuros as seguintes considerações:

- Realizar melhorias estruturais na planta de um modo geral, como:
    - Eliminar os distúrbios gerados pela fiação;
    - Substituir o cano de PVC que suporta a haste por um cano mais firme que não gere vibrações na estrutura;
    - Melhorar o acoplamento entre eixo e potenciômetro; e
    - Implantar proteções em torno das hélices;
- Criar interface gráfica para o usuário, sendo que este não precise ter acesso ao código base e possa utilizar a planta didática com facilidade;
- Desenvolver roteiros de procedimentos para utilização da planta;
- Aplicar técnicas de controle não linear ou técnicas mais avançadas;
- Embarcar o sistema por completo, dispensando a utilização da plataforma Arduino, e que apenas se utilize o microcontrolador ATEMEGA328;
- Aplicar diferentes técnicas de modelagem de sistema, a fim de garantir que o modelo se aproxime ao máximo do ideal;
- Modelar em função da raiz quadrada da entrada (u) para anular pelo menos uma não linearidade;
- Limitar o máximo erro integrado, no integrador, para evitar *wind-up.*

BIBLIOGRAFIA

[1] BORNE, T. Robotização: Implicações políticas e securatárias do uso de drones na era digital. **Revistra Conjuntura Astral**, v. 5, p. 100, Abril 2014.

[2] DOMINGUES, J. M. B. **Quadrotor prototype**. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 2009.

[3] BASTOS, T. R. Pesquisa e Tecnologia. **GloboRural**, 2015. Disponivel em: <http://revistagloborural.globo.com/Noticias/Pesquisa-e-Tecnologia/noticia/2015/05/15-usos-de-drones-na-agricultura-e-na-pecuaria.html>. Acesso em: 05 out. 2015.

[4] LOPES, R. V. **Modelagem e controle preditivo de um helicóptero de três graus de liberdade**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos - SP. 2007.

[5] MAGALHÃES JUNIOR, Z. R. . L. R. V. MODELAGEMDE UM HELICÓPTERO ELÉTRICO EM UMA PLATAFORMA 3DOF. **XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, São Carlos - SP, Agosto 2012.

[6] BELOLI, A. S. R. . C. M. S. M. . F. J. L. Construção de uma planta didática de baixo custo com dois graus de liberdade para aplicação de técnicas de controle. **Incitel**, 2013.

[7] CAMPO, A. B. Projeto e simulação de um controlador digital para um sistema aeroestabilizador. **Integração**, São Paulo, 2007.

[8] MARCIANO, P. C. R. **Módulo laboratorial baseado em foss para educação em engenharia de controle com estratégia P²BL**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora - MG, p. 42. 2014.

[9] BREGANON, R. **Controle de Arfagem e Guinada de um Sistema de Hélices Paralelas**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 82. 2009.

[10] QUANSER. Disponivel em: <http://www.quanser.com/products/3dof_helicopter>. Acesso em: 10 out. 2015.

[11] HOUPIS, J. J. D. E. C. H. **Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares**. 2ª. ed. Guanabara Dois: [s.n.], 1984.

[12] INC., Q. **Quanser 2 DOF Helicopter**. User and control manual. [S.l.]. 2006.

[13] SOUZA, J. R. D. **Análise de Desempenho de Hélices para Aplicação em Aeronaves Não Tripuladas**. Tese de mestrado na área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 159. 2011.

[14] GOMES, R. M. **UAV - Veículo Aéreo Não Tripulado**. [S.l.]. 2009.

[15] RODRIGUES, L. E. M. J. E. **Fundamentos da Teoria Aeronáutica - Aplicações ao Projeto SAE-Aerodesign**. 1ª. ed. São Paulo: Instituto de Ciência e Tecnologia de São Paulo, v. 1, 2010.

[16] CAVALCA, M. S. M. . D. O. G. B. Controle de uma planta didática com 2 graus de liberdade. **24º Seminário de Iniciação Científica UDESC**, Joinville - SC, 2013.

[17] BELOLI, A. S. R. . C. M. S. M. . F. J. L. A 2DOF LOW COST CONTROL WORKSTATION FOR CONTROL. **22nd International Congress of Mechanical Engineering**, Ribeirão Preto - SP, 3-7 Novembro 2013.

[18]. **RM Máquinas Frigoríficas**. Disponivel em: <http://www.rmindustria.com.br/>. Acesso em: 03 ago. 2015.

[19] IFLY Eletric Hobby. **Motor Brushless EMAX CF2805 - 2840 kva**. Disponivel em: <http://www.iflye.com.br/motor-brushless-emax-cf2805-2840-kva-pr-40-341339.htm>. Acesso em: 16 maio 2015.

[20] MOTOR Brushless EMAX XA2212. **iFly eletric Hobby**. Disponivel em: <http://www.iflye.com.br/motor-brushless-emax-xa2212-980-kv-pr-362-341339.html>. Acesso em: 10 ago. 2015.

[21] WIKIPÉDIA. **Electronic Speed Control**. Disponivel em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control>. Acesso em: 13 maio 2015.

22 HOBBYKING. **SS Series 25-30A ESC**. Disponivel em: <http://www.hobbyking.com>. Acesso em: 16 maio 2015.

[23] PROESI - Componetes Eletrônicos. **Potenciômetro Vishay SPECTROL 357**. Disponivel em: <http://proesi.com.br/componentes-eletricos/potenciometro-botao-e-knob/potenciometro-de-precisao-1-volta-sem-fim/potenciometro-spectrol-357-1-volta-sem-fim-10k.html>. Acesso em: 16 maio 2015.

[24] BIANCHI, A. J. **Processamento de Áudio em tempo real em plataformas**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 120. 2013.

[25] ARDUINO. **Products**. Disponivel em: <http://www.arduino.cc/en/Main/Products>. Acesso em: 16 maio 2015.

[26] ATMEL. **ATmega328 Datasheet**. Disponivel em: <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>. Acesso em: 11 Maio 2015.

[27] WIKIPÉDIA. **MATLAB**. Disponivel em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/MATLAB>. Acesso em: 11 Maio 2015.

[28] MATHWORKS. **Seriel Interface and MATLAB**. Disponivel em: <http://www.mathworks.com/products/instrument/supported/serial.html>. Acesso em: 11 Maio 2015.

[29] CAVALCA, E. B. **Análise de abordagens de controle preditivo aplicadas em um motor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2013.

[30] PRADO JR., A. **Controle Digital (Apostila)**. UDESC. Joinville. 1986.

[31] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª. ed. [S.l.]: Livros Técnicos e Ciêntificos S.A, 1998.

[32] HEMERLY, E. M. **Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos**. 2ª. ed: Edgard Blücher, 2000.

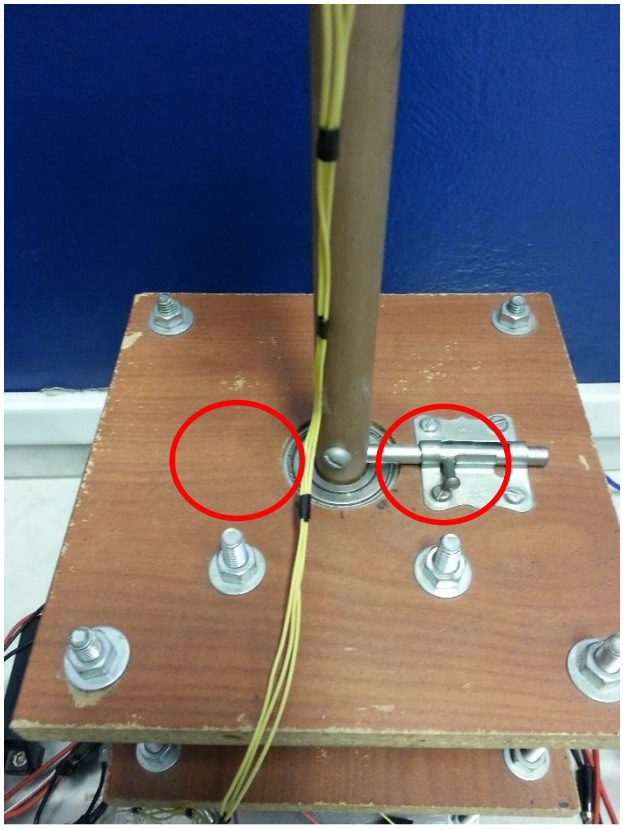
[33] BORDONS, E. F. C. A. C. **Model Predictive Control**. 1ª. ed: British Library, v. 1, 1962.

[34] BO, A. P. L. **Concepção de uma plataforma experimental para estudos de controle de um modelo reduzido de helicóptero**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 113. 2004.

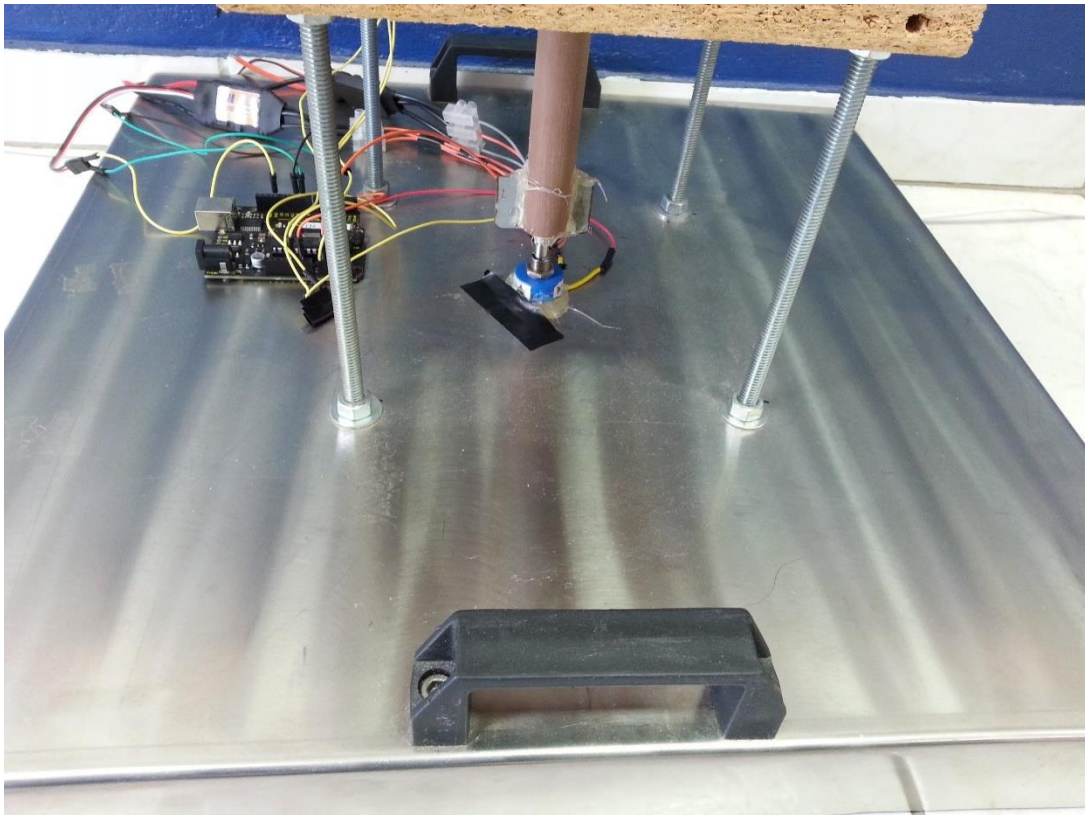
[35] MARIANA S. MATOS, R. K. H. G. T. Y. **Controle Preditivo de um Sistema de Levitação Magnética com Robustez a Incertezas de Ganho**. Instituto Tecnológico de Aeronaútica. São José dos Campos.

APÊNDICE A – Estrutura de limitações físicas do ângulo de guinada

Tal estrutura foi projetada a fim de limitar que a planta gire mais de 360º. O total da faixa de atuação é de 270º. Os limitadores estão marcados por um círculo em vermelho.



APÊNDICE B – Acoplamento entre o potêniometro ao eixo do ângulo de arfagem

APÊNDICE C – Haste que colide com os pinos colocados para limitar que o ângulo de guinada gire 360º

APÊNDICE D – Acoplamento do potênciometro ao eixo de guinada e também a estrutura de base da planta