

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Jacinaldo Balbino de Medeiros Junior

**VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA
INSPEÇÃO EM VASOS DE PRESSÃO
- Especificação técnica e desenvolvimento de
controle no sistema simplificado tipo pêndulo
invertido**

Recife

2015

Jacinaldo Balbino de Medeiros Junior

VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA INSPEÇÃO EM VASOS DE PRESSÃO

**- Especificação técnica e desenvolvimento de controle no
sistema simplificado tipo pêndulo invertido**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Área de concentração: Projetos.

Orientador: Prof. Dr. José Maria Andrade
Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Cerquinho
Cajueiro

Recife

2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

M488v Medeiros Junior, Jacinaldo Balbino de.
Veículo aéreo não tripulado para inspeção em vasos de pressão – especificação técnica e desenvolvimento de controle no sistema simplificado tipo pêndulo invertido / Jacinaldo Balbino de Medeiros Junior. - 2015.
82 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Maria Andrade Barbosa.
Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Cerquinho Cajueiro.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2.VANT. 3. Inspeção. 4. Pêndulo invertido. 5. Controle linear. 6. Controle adaptativo. I. Barbosa, José Maria Andrade (Orientador). II. Cajueiro, João Paulo Cerquinho (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-295

Jacinaldo Balbino de Medeiros Junior

**VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA INSPEÇÃO
EM VASOS DE PRESSÃO**
**- Especificação técnica e desenvolvimento de controle no
sistema simplificado tipo pêndulo invertido**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Área de concentração: Projetos

Trabalho aprovado. Recife, 15 de dezembro de 2015:

**Prof. Dr. Prof. Dr. José Maria Andrade
Barbosa
(Orientador)**

**Prof. Dr. João Paulo Cerquinho Cajueiro
(Coorientador)**

Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf

Prof. Dr. Pedro Manuel González del Foyo

Recife
2015

Agradecimentos

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Resumo

Este trabalho visa especificar um veículo aéreo não tripulado (VANT) para inspeção de vasos de pressão em ambiente industrial. Foram levantadas as restrições específicas ao tipo de veículo e a partir destas estipulou-se quais seriam os ensaios não destrutivos passíveis de serem realizados a bordo, a fim de possibilitar uma avaliação primária da condição estrutural do vaso sem a necessidade de para a operação deste.

Em paralelo desenvolveu-se o estudo do sistema de controle de estabilidade do veículo utilizando a planta do pêndulo invertido como uma simplificação do sistema dinâmico do VANT. Sobre esta nova planta foi desenvolvido dois sistemas de controle, um baseado na teoria clássica de controle (PID) e outro baseado na teoria de controles adaptativos (MRAS), onde estes foram avaliados com relação a qual atenderia mais satisfatoriamente a resolução do problema da estabilização do VANT.

O trabalho finaliza com uma análise das vantagens e desvantagens com relação a utilização dos VANTs para auxílio em inspeções industriais.

Palavras-chave:VANT. Inspeção. Pêndulo invertido. Controle linear. Controle adaptativo.

Abstract

This work aims to specify an unmanned aerial vehicle (UAV) for inspection of pressure vessels in an industrial environment. Specific restrictions on the type of vehicle were raised and from these it was stipulated which non-destructive tests could be carried out on board in order to enable a primary assessment of the structural condition of the vessel without the need for its operation.

In parallel, the study of the stability control system of the vehicle was developed using the inverted pendulum plan as a simplification of the UAV dynamic system. On this new plant two control systems were developed, one based on classical control theory (PID) and another based on the theory of adaptive controls (MRAS), where these were evaluated in relation to which would more satisfactorily solve the stabilization problem Of the UAV. The work ends with an analysis of the advantages and disadvantages with respect to the use of the UAVs to aid in industrial inspections.

Keywords: VANT. Inspection. Inverted pendulum. Linear control. Adaptive control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Campo magnético de fuga	19
Figura 2 – Refinarias no Brasil	23
Figura 3 – Módulo de câmera	25
Figura 4 – Câmera térmica	26
Figura 5 – Translação vertical.	29
Figura 6 – Rolamento.	29
Figura 7 – Arfagem.	30
Figura 8 – Guinada.	30
Figura 9 – Sistema simplificado.	31
Figura 10 – Ângulos de Euler.	32
Figura 11 – Graus de liberdade do sistema.	32
Figura 12 – Giroscópio mecânico	39
Figura 13 – Sistema de controle	42
Figura 14 – Resposta ao degrau	43
Figura 15 – Diagrama de blocos para um controle adaptativo	46
Figura 16 – Carta de vôo para o F4-E. Retirado de (WITTENMARK, 2008)	46
Figura 17 – Diagrama de blocos para o MRAS	47
Figura 18 – Diagrama de blocos para o Regulador Auto-Ajustável	48
Figura 19 – Respostas ao impulso e ao degrau do modelo	51
Figura 20 – Modelo do pêndulo invertido	54
Figura 21 – Planta experimental	59
Figura 22 – Sistema Anti Banda Morta	60
Figura 23 – Análise da zona-morta	60
Figura 24 – Compensação da zona-morta	61
Figura 25 – Comparação entre os atrasos com e sem o kernel de tempo-real	63
Figura 26 – Pacote de transmissão	63
Figura 27 – Pacote de recepção	63
Figura 28 – Pacote para o software Multichart	64
Figura 29 – Dados dos experimentos	66
Figura 30 – Identificação Potência x Ângulo	67
Figura 31 – Identificação Potência x Posição	68
Figura 32 – Identificação Posição x Ângulo	69
Figura 33 – Comparação entre previsão do modelo e medição real para uma entrada senoidal	69
Figura 34 – Comparação entre previsão do modelo e medição real para uma entrada quadrada	70

Figura 35 – Diagrama de Bode da relação Haste X Potência	71
Figura 36 – Diagrama de Bode da relação Posição X Potência	72
Figura 37 – Diagrama de Bode da relação Haste X Posição	72
Figura 38 – Topologia do controlador PID	73
Figura 39 – Topologia para controle do pêndulo invertido	74
Figura 40 – Malha de controle de ângulo - PID	74
Figura 41 – Malha de controle de posição - PID	75
Figura 42 – Posicionamento do carro com algoritmo PID	75
Figura 43 – Posicionamento da haste com algoritmo PID	76
Figura 44 – Variáveis de interesse com algoritmo PID	76
Figura 45 – Respostas ao impulso e ao degrau do modelo	77
Figura 46 – Implementação do MRAS no Simulink	78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações da câmera de vídeo	24
Tabela 2 – Especificações da câmera térmica	25
Tabela 3 – Relação digital x analógico	61
Tabela 4 – Tempos envolvidos no cálculo de atraso	62

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Estrutura do texto	13
2	ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	15
2.1	Análise de vibrações	15
2.2	Inspeção visual	16
2.3	Líquido penetrante	17
2.4	Partículas magnéticas	17
2.5	Ultrassom	19
2.6	Radiografia	21
2.7	Termografia	21
2.8	Cenário de inspeção	22
2.9	Ensaios escolhidos	23
3	VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)	27
3.1	Histórico/Estado da Arte	27
3.2	Movimentação básica	28
3.3	Modelagem matemática	30
3.4	Especificações	36
3.5	Aspectos práticos	37
3.5.1	Motor/Driver	37
3.5.2	Medição dos ângulos	37
3.6	Constatações práticas	40
4	CONTROLE	42
4.1	Controle linear	44
4.2	Controle adaptativo	45
4.2.1	Algoritmos de controle	45
4.3	Obtenção da função transferência	48
4.3.1	Sinal de entrada	50
4.4	Problemas de implementação	50
4.4.1	Atraso computacional	50
4.4.2	Rastreamento de parâmetros	51

5	PÊNULO INVERTIDO	53
5.1	Movimentação básica	53
5.2	Modelagem	54
5.3	Relação com o Quadricóptero	57
5.4	Implementação	58
5.4.1	Aspectos práticos	59
5.5	Interface com MATLAB	62
5.6	Identificação	64
6	CONTROLE DO PÊNULO INVERTIDO	71
6.1	Controle linear	71
6.2	Controle adaptativo	75
7	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81

1 Introdução

Vasos, reservatórios ou tanques são estruturas que se destinam a armazenar e/ou processar fluidos sob diversas condições. As dimensões destes vasos variam de alguns centímetros até cerca de 50 m, tanto de altura quanto de diâmetro (SANTIAGO, 2015). Eles devem ser projetados para resistir com segurança a pressões internas e externas, sendo de uso comum em refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas. Os vasos de pressão constituem um conjunto importante de equipamentos que abrangem os mais variados usos.

O projeto e a construção de vasos de pressão envolve uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas e materiais adequados para cada tipo de aplicação. A ocorrência de alguma falha pode acarretar consequências catastróficas, inclusive com perda de vidas, sendo considerado um equipamento de grande periculosidade.

Superado o estágio de projeto e construção, estes equipamentos devem receber manutenção preventiva e inspeções periódicas a fim de garantir a integridade estrutural de seus componentes. A inspeção de vasos, em especial os de grande porte, muitas vezes não é um problema trivial dado a hostilidade (temperatura, altura, gases tóxicos, etc.) frequentemente encontrada em seu ambiente de instalação. Portanto para este tipo de atividade é necessário a formação de profissionais qualificados, especializados em cada tipo de teste que deve ser utilizado para inspecionar cada tipo de vaso, juntamente com cursos sobre segurança do trabalho, trabalho em alturas, entre outros.

Apesar de toda qualificação necessária, o inspetor ainda está sujeito a um ambiente bastante insalubre, sendo em muitos casos necessário a alocação de mais de um funcionário para realização da inspeção. Devido a este cenário foi proposta a concepção de um veículo não-tripulado capaz de realizar os testes necessários a uma inspeção preliminar, sem a necessidade de submeter o inspetor ao ambiente hostil, contribuindo assim para uma menor ocorrência de acidentes de trabalho e a redução dos custos operacionais dos vasos.

Dentre os veículos aéreos não tripulados estudados os que demonstram características relevantes, do ponto de vista da aplicação desejada, são os da família dos multirotores. Eles possuem: capacidade de decolagem e pouso verticais, assim retirando um investimento com infraestrutura (Ex: Pista de pouso e decolagem); capacidade de transportar carga proporcional ao número de rotores, ou seja se for desejado transportar uma carga maior pode-se escolher apenas um modelo com mais motores; sistema mecânico simples quando comparado a outros veículos com características similares (Ex: Helicópteros), minimizando pontos de falhas e o custo com manutenção. Atrelado a todas estas vantagens está as principais desvantagens que são a necessidade de um sistema de controle capaz de realizar

a estabilização do mutirotor, pois sem ele o vôo se torna muito complexo para que uma pessoa consiga controlar, e o alto consumo de energia, que é proporcional ao número de rotores.

1.1 Objetivos

- Levantar os requisitos necessários para desenvolvimento de um sistema de inspeção, para vasos de pressão, baseado na utilização de veículos não tripulados (VANTs).
- Implementação do sistema do pêndulo invertido como forma de obter um modelo simplificado do VANT.
- Projetar e implementar sistemas de controle que sejam capazes de estabilizar o modelo simplificado.

1.2 Justificativa

Um VANT para inspeção necessita voar através de ambientes onde há risco de ignição por fagulha sem causar explosões, resistir a altas temperaturas por um tempo prolongado e enviar continuamente dados de diversos sensores ao inspetor.

Atualmente o ramo de manutenção na área petrolífera movimenta por volta de US\$ 8,8 bi, pesquisa realizada pela agência Brasil (BRASIL, 2015). Com a inserção deste veículo pretende-se minimizar o tempo e a periculosidade envolvida no procedimento de inspeção. A redução destes fatores implicam em reduções no custo final do procedimento, possibilitando inspeções mais frequentes e tornando o ambiente de trabalho mais seguro.

1.3 Estrutura do texto

No capítulo 2 será apresentado diversos tipos de ensaios utilizados para o controle da qualidade de forma não destrutiva pela indústria. Após a devida apresentação dos ensaios, será realizada a análise de quais métodos são relevantes ao projeto. Em seguida será especificado as características mínimas para o equipamento a ser utilizado em cada tipo de inspeção encolhida.

O capítulo 3 apresentará em que estado de desenvolvimento se encontra a tecnologia relacionada aos veículos aéreos não-tripulados (VANTS), justificativas para a escolha do modelo de veículo utilizado, descrição da movimentação do veículo escolhido, o modelamento matemático da atitude e posição do veículo quando submetido aos sinais de controle, seus requisitos mínimos para operação satisfatória no ambiente em questão,

alguns aspectos práticos que representam desafios de engenharia no desenvolvimento do projeto e, por fim, conclusões sobre a viabilidade do projeto.

O capítulo 4 irá expor duas vertentes para desenvolvimento do sistema de controle, uma clássica e outra adaptativa, assim como seus principais algoritmos de controle. Também será abordado as dificuldades e fenômenos associados à implementação dos algoritmos.

No capítulo 5 será abordado o sistema do pêndulo invertido utilizado como uma alternativa de baixo custo para o desenvolvimento dos algoritmos de controle. Nele será visto:

- A modelagem matemática do sistema real;
- Como e o que foi utilizado para construção do sistema físico;
- Como foi implementado o *hardware/software* para atuação e medição dos sensores;
- Qual foi o procedimento utilizado para descobrir qual a função transferência do sistema;
- Soluções utilizadas para resolução dos problemas encontrados durante a realização das etapas acima.

No capítulo 6 será visto como foi projetado e implementado os algoritmos de controle, das frentes clássica e adaptativa, responsáveis pela estabilização do pêndulo invertido. Constará, também, a análise sobre a qualidade dos controladores com relação a estabilização ao regime transitório e permanente.

2 Ensaios não-destrutivos

De acordo com a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos, ABENDI, os Ensaios Não destrutivos (END) são definidos como: “Técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção.” (ABENDI, 2015).

Assim são amplamente utilizados na indústria no controle da qualidade de produtos soldados, fundidos, forjados, laminados, entre outros (INDUSTRIAIS, 2015). Os ensaios não-destrutivos mais utilizados são listados a seguir e serão abordados nas seções subsequentes.

- Análise de vibrações
- Inspeção visual
- Líquido penetrante
- Partículas magnéticas
- Ultrassom
- Radiografia
- Emissão acústica
- Termografia

2.1 Análise de vibrações

O movimento vibratório de uma máquina é o resultado das forças dinâmicas que a excitam. Essa vibração se propaga por todas as partes da máquina, bem como para as estruturas interligadas a ela. Os efeitos de uma vibração severa são o desgaste e a fadiga, que certamente são responsáveis por quebras definitivas dos equipamentos.

Toda máquina apresenta um determinado nível de ruído e vibração normal devido a operação e a fontes externas. Entretanto, qualquer acréscimo no nível de vibração de uma máquina é o primeiro sinal de agravamento de um defeito: desalinhamento, empenamento do eixo, desgaste do rolamento, etc.

Cada máquina apresenta uma forma característica de vibração, em aspecto e nível. Todavia, máquinas do mesmo tipo apresentam variações no comportamento dinâmico. Isso se deve às variações de ajustes, tolerâncias e, principalmente, defeitos.

Cada elemento de máquina (mancais, rotores, engrenagens, etc...) induz uma excitação própria, gerando uma perturbação específica.

O comportamento dinâmico da máquina é uma composição das perturbações de todos os componentes, defeitos e excitações oriundos dos movimentos. Então, uma criteriosa medida das vibrações poderá indicar as principais causas (quais elementos ou defeitos) estão excitando a máquina. Portanto, em uma máquina as vibrações se dão em várias frequências devido às várias excitações, consequentemente o movimento em um ponto qualquer será a superposição de várias harmônicas.

Os diagnósticos para fins de manutenção, com o objetivo de identificar as possíveis causas destes movimentos são obtidos separando-se as harmônicas do sinal global e associando-as com os elementos defeituosos ou desvios de montagem.

A vantagem da monitoração de vibração para diagnóstico de defeitos reside na riqueza de informações que podem ser extraídas da análise de vibrações de máquinas rotativas, que constituem a grande maioria do parque de máquinas das indústrias.

Uma fonte de vibração na máquina dá origem a uma perturbação que se propaga pela estrutura da máquina até o ponto de detecção. Transdutores detectam a perturbação sob forma de sinal elétrico que é coletado e armazenado. Técnicas de análise, processamento e apresentação do sinal fornecem dados para diagnóstico do defeito por análise direta, junto com a análise de tendência e comparação com valores admissíveis, e então apresentam subsídios para que uma decisão possa ser tomada quanto à continuidade de operação ou ao planejamento de uma jornada de manutenção da máquina.

2.2 Inspeção visual

O ensaio é baseado no uso correto da luz como um detector. Analisando-se a direção, amplitude e fase da luz difundida ou refletida pela superfície de um objeto opaco, ou transmitida por um meio transparente, obtém-se as informações sobre o estado físico do objeto examinado.

Os ensaios visuais abrangem todas as técnicas que permitiam a direta observação de superfícies, o que os limitava à detecção de descontinuidades superficiais. Mais recentemente, a definição passou a cobrir todas as técnicas ópticas, mesmo aquelas mais sofisticadas, baseadas na detecção das interações entre os materiais e a luz visível (CAMPOS, 2015), e alguns dos métodos mais avançados permitem até a detecção de descontinuidades internas. O ensaio visual pode ser utilizado para detectar uma grande variedade de descontinuidades tais como trincas, corrosão, descoloração devido ao superaquecimento, erosão, deformação, irregularidades no acabamento superficial, erros de montagem em sistemas mecânicos, alterações dimensionais, etc.

Em casos mais simples, o ensaio pode até ser realizado a olho nu, com ou sem o auxílio de lente de aumento. A realização das sofisticadas técnicas de processamento de imagem é possível através do uso de sistemas de vídeo.

2.3 Líquido penetrante

O ensaio por líquidos penetrantes é considerado um dos melhores métodos de teste para detectar descontinuidades superficiais de materiais isentos de porosidade, como: metais ferrosos e não ferrosos, alumínio, ligas metálicas, cerâmicas, vidros, certos tipos de plásticos e materiais organo-sintéticos (METAL-CHEK, 2015). Líquidos penetrantes também são utilizados para a detecção de vazamentos em tubos, tanques, soldas e componentes.

Este método está baseado no fenômeno da capilaridade, que é o poder de penetração de um líquido em áreas extremamente pequenas devido a sua baixa tensão superficial. O poder de penetração é uma característica muito importante uma vez que a sensibilidade do ensaio é extremamente dependente deste.

O líquido penetrante é aplicado com pincel, pistola, com lata de aerossol ou mesmo por imersão da peça no tanque contendo o líquido.

Efetua-se a remoção deste penetrante da superfície por meio de lavagem com água ou remoção com solventes.

A aplicação de um revelador (pó branco) irá mostrar a localização para detecção de trincas superficiais e descontinuidades com precisão e grande simplicidade, embora suas dimensões sejam ligeiramente ampliadas.

Este método detecta descontinuidades em materiais fundidos tais como gota fria, trinca de tensão provocada por processos de têmpera ou revenimento, descontinuidades de fabricação ou de processo tais como trincas, costuras, dupla laminação, sobreposição de material, trincas em soldagem, trincas provocadas pela usinagem, fadiga do material e corrosão sob tensão.

2.4 Partículas magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas é utilizado na localização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos e pode ser aplicado tanto a peças acabadas quanto semi-acabadas e durante as etapas de fabricação. Ele é baseado no princípio de que as linhas de campo magnético em um material ferromagnético são distorcidas por uma descontinuidade do material, seja provocada por variações dimensionais abruptas, alguma descontinuidade estrutural (como trincas e porosidades) ou presença de qualquer material (inclusões) com propriedades magnéticas diferentes do metal base.

Se estas descontinuidades são abertas à superfície ou se estão suficientemente próximas à mesma, as linhas de fluxo distorcidas nesta região darão origem aos chamados campos de fuga, promovendo o aparecimento de pólos magnéticos, capazes de atrair partículas magnetizáveis para esta região, revelando-as.

As principais vantagens com partículas magnéticas são:

- É capaz de detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais
- Sua realização é relativamente simples e rápida
- A preparação das peças para o ensaio é simples, não havendo necessidade das possíveis descontinuidades estarem necessariamente abertas à superfície, como no ensaio de líquido penetrante
- O tamanho e a forma da peça inspecionada tem pouca ou nenhuma influência no resultado

Suas principais limitações são:

- Aplicável apenas aos materiais ferromagnéticos
- A forma e orientação das descontinuidades em relação ao campo magnético interferem fortemente no resultado do ensaio, sendo necessário, em muitos casos, a realização de mais de um ensaio na mesma peça
- Muitas vezes é necessário a desmagnetização da peça após a inspeção
- Em geral são necessárias correntes elétricas elevadas, que podem causar o aquecimento indesejado das partes examinadas

Campos de fuga

Se um ímã é dobrado numa forma semi-aberta ou fechada, as linhas do campo magnético se distorcem na região entre os pólos. Quando um campo magnético é induzido num material, as linhas de campo ficam inteiramente contidas no material, se este é homogêneo. Contudo se o material apresenta descontinuidades que modificam suas propriedades magnéticas, as linhas de campo se distorcem e podem sair e entrar novamente no material, gerando localmente pólos Norte e Sul, de forma que o material se comporta, nesta região, como um ímã, o que é ilustrado na figura 1.

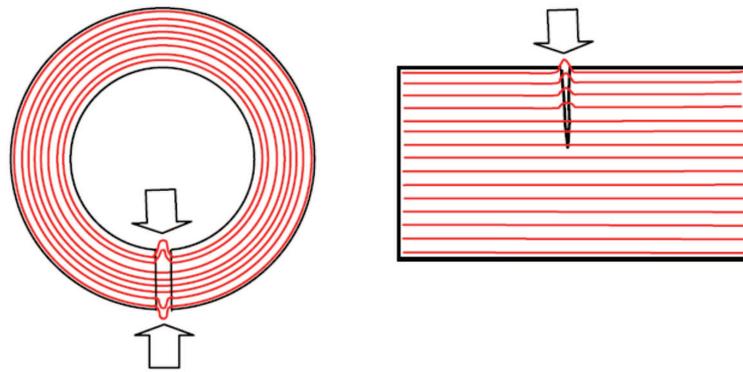


Figura 1 – Campo magnético de fuga

Partículas

As partículas magnéticas receberam este nome e ele tem sido usado por razões históricas, mas na verdade elas são facilmente magnetizáveis e não devem reter um magnetismo residual elevado. Elas são, em geral, uma combinação de finas partículas de ferro e óxido de ferro, com a aparência, quando secas, de uma farinha fina como a de trigo, e são o principal consumível usado neste ensaio. Seu tamanho varia entre $0,2 \mu\text{m}$ e $0,4 \text{mm}$, com distribuição granulométrica bem controlada. Elas podem ser coloridas (também chamadas de visíveis) ou fluorescentes. As características desejáveis para as partículas são:

- Alta permeabilidade magnética
- Baixa retentividade
- Tamanho e forma bem controlados
- Atóxicas
- Devem estar livres de sujeira, graxa e outros materiais que comprometam o seu uso

Quanto ao modo de utilização, as partículas podem ser aplicadas a seco ou em suspensão em um líquido, em geral água ou um derivado leve de petróleo.

2.5 Ultrassom

No início dos anos cinquenta só era possível determinar defeitos internos através de ensaios radiográficos (raio-X ou gama). Em 1942, Firestone utilizara o princípio da ecossonda ou ecobatímetro para exames de materiais (ANDREUCCI, 2015). Em 1945 o ensaio de ultrassom passou a ser utilizado pela indústria. Atualmente cada vez mais surgem inovadoras tecnologias que utilizam as ondas sonoras como meio interação com

os materiais, exemplo disso são as novas técnicas *Phased Array* e *TOFD* (*Time-of-flight diffraction ultrasonics*).

O ensaio por ultrassom caracteriza-se em um método não destrutivo amplamente utilizado pela indústria para controle de qualidade e estudos de integridade de equipamentos e materiais, tanto a nível interno como superficial. Através deste princípio é possível medir espessuras de vários tipos de peças, como por exemplo tubos metálicos. Este método é especialmente importante no estudo de degradação porque permite avaliar a evolução de processos de corrosão ou de desgaste. O método de ensaio consiste na introdução de um feixe sonoro de alta frequência originada de um aparelho eletrônico, na peça em estudo, com o objetivo de detetar discontinuidades e ao mesmo tempo determinar o seu tamanho, forma e localização. O feixe sonoro sofre reflexões em interfaces da peça, visto que defeitos como fissuras, poros, inclusões diversas, falta de fusão e até mesmo diferentes tipos de matérias, atuam como interface ao feixe sonoro logo é possível fazer uma detecção destes defeitos e detetar diferentes espessuras. Este método também pode ser usado para determinar diferenças na estrutura do material e de propriedades físicas.

Suas principais vantagens são:

- A inspeção pode ser realizada a partir de uma superfície e detetar discontinuidades no interior do material, bem como dimensioná-las corretamente
- Permite detectar discontinuidades internas e superficiais
- Permite medir espessuras em vários materiais, bem como detectar a presença de corrosão ou desgastes dos materiais
- Descontinuidades de pequena dimensão podem ser detectadas
- É um ensaio que apresenta várias técnicas de inspeção, permitindo assim avaliar várias dimensões e vários tipos de materiais (várias estruturas)
- Possibilidade de realizar o ensaio sem que a produção seja parada, isto é, localizar discontinuidades de fabricação em linhas de montagem
- O ensaio pode ser realizado em materiais com elevadas temperaturas, utilizando o equipamento adequado
- O equipamento é bastante leve, portátil e de fácil utilização

Suas principais limitações são:

- Descontinuidades que estão orientadas paralelamente ao feixe sonoro, normalmente não serão detectadas, necessitando de varreduras em vários ângulos ou direções.

- Materiais fundidos podem apresentar grãos muito grosseiros, isto é, a estrutura dos materiais podem inviabilizar o ensaio
- Superfícies irregulares podem reduzir a eficácia do ensaio
- Em geral, este método requer um elevado grau de experiência e de formação, tanto na execução do ensaio como na análise das descontinuidades
- Os sinais apresentados durante o ensaio podem ser mal interpretados, o que pode levar ao registro de uma descontinuidade que não existe ou não registrar todas as descontinuidades presentes no material ensaiado
- Na maioria das vezes necessita de um meio acoplante para que as ondas acústicas sejam transmitidas a estrutura a ser ensaiada

2.6 Radiografia

O ensaio de radiografia industrial é um método não destrutivo, que se baseia na diferente absorção de radiação penetrante, tal como, os raios-X e raios- γ , pelo material em estudo (metal fundido, soldas, entre outros), para localizar variações de espessuras, defeitos ou falhas. A espessura máxima das peças a ser ensaiada depende do tipo de material. Os ensaios poderão ser realizados tanto em um câmara de exposição quanto, com a utilização de equipamentos portáteis, em campo. A radiografia foi o primeiro método de ensaio não destrutivo utilizado pela indústria para descobrir e quantificar defeitos internos em materiais. Este tornou-se num ensaio não destrutivo muito valioso, contudo possui um risco relativamente alto que consiste na exposição acidental do radiologista à radiação (raios-X, raios- γ) que deve ser controlada.

Devido às diferenças da densidade e geometrias do material bem como o tipo de descontinuidades apresentadas pelo mesmo, o feixe de radiação (radiação penetrante) sofrerá uma maior ou menor absorção pela peça em estudo, logo essa absorção diferenciada poderá ser detectada através de um filme ou outro sistema de detecção. Esta variação que é registrada irá indicar a existência de uma falha ou defeito interno na peça em estudo. Este método tem um enorme campo de aplicações podendo ser usado, em soldas de chapas de navios, oleodutos, peças fundidas na indústria automobilística, materiais plásticos entre outros.

2.7 Termografia

Todos os corpos que existem irradiam energia sob a forma de raios infravermelhos. Com uma câmera termográfica é possível “ver” esta energia que a olho “nú” não é visível,

auxiliando assim, por meio da diferença de temperaturas, a identificação de áreas com possíveis ocorrências de problemas antes que eles ocorram.

Atualmente a termografia tem aplicações em inúmeros setores; na indústria automobilística é utilizada no desenvolvimento e estudo do comportamento de pneumáticos, desembaçador do pára-brisa traseiro, freios, no sistema de refrigeração, turbo, etc.. Na siderurgia tem aplicação no levantamento do perfil térmico dos fundidos, durante a solidificação, na inspeção de revestimentos refratários dos fornos.

Suas principais limitações são:

- Variações na distribuição de temperatura podem ser muito pequenas para serem detectadas
- Discrepâncias muito pequenas podem ser mascaradas, pelo “ruído de fundo”, e permanecer sem detecção

2.8 Cenário de inspeção

O cenário utilizado como base para inferir os requerimentos mínimos necessários dos equipamentos utilizados para inspeção foi obtido através da análise das informações climáticas próximas às principais refinarias terrestres situadas no território brasileiro.

Analisando os dados da figura 2 e de (AMARANTE et al., 2001) é possível obter uma noção dos intempéries climáticos aos quais serão submetidos os dispositivos a bordo.

Assim, diante do exposto, foi definido que o veículo de inspeção trabalharia sobre as seguintes circunstâncias:

- Distância ao objeto inspecionado: 50 cm
- Distância do veículo ao solo: 15 m
- Velocidade máxima do vento: 8 m/s
- Temperatura máxima do ambiente: 45 °C
- Temperatura mínima do ambiente: 10 °C
- Temperatura máxima da superfície do objeto a ser inspecionado: 400 °C
- Temperatura mínima da superfície do objeto a ser inspecionado: 10 °C



Figura 2 – Refinarias no Brasil

2.9 Ensaios escolhidos

Visando a operação em um veículo aéreo não tripulado, foram selecionados ensaios que se enquadrassem nas restrições inerentes a este. Tais limitações abrangem aspectos como consumo energético, dimensões, peso etc. Portanto os que foram considerados como melhores candidatos, pelo menos para a versão de validação do projeto, são os seguintes ensaios:

- Inspeção visual
- Termografia

Os outros ensaios foram descartados pelos seguintes motivos:

Análise de vibrações: Exige que se tenha um histórico do comportamento vibracional da estrutura, além de ser mais eficiente se for instalado de forma permanente na estrutura.

Partículas magnéticas: Dificuldade na aplicação das partículas de forma autônoma e em grandes alturas. Dificuldade no acoplamento e geração do campo magnético na estrutura.

Ultrassom: Dificuldade em realizar o acoplamento acústico, entre o transdutor ultrassônico e a estrutura, de forma autônoma e sem sujar a superfície. Necessidade de preparação da superfície para a realização do ensaio.

Radiografia: Periculosidade de utilização de equipamento radioativo, grande consumo de energia entre outros.

Inspeção visual

As especificações para este ensaio foram baseadas a partir do cenário de inspeção e do objetivo desta inspeção, que neste trabalho refere-se a verificação de ocorrência de pontos de corrosão e de peças soltas.

A dimensão dos alvos da inspeção interferem diretamente nas características da câmera a ser utilizada. Assumindo que a menor dimensão que se deve ser diferenciada é um quadrado de 1 por 1 mm e que será utilizado uma lente com Campo de Visão (FOV - Field of Vision) de 25°, é possível calcular a resolução, em pixel, mínima necessária da câmera a ser utilizada através da equação 2.1. Onde R é a resolução desejada em pixel, R_E a resolução espacial e D a distância da câmera ao objeto filmado. Portanto, assumindo que a câmera localizada no veículo estará a uma distância máxima de 50cm o objeto a ser inspecionado, pode-se inferir as especificações mínimas da câmera utilizada para a inspeção visual como as vistas na tabela 1.

$$R = \frac{\pi \cdot FOV \cdot D}{180 \cdot R_E} \quad (2.1)$$

Tabela 1 – Especificações da câmera de vídeo

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura de operação mínima	5 a 50	°C
Mínima transferência de dados	30 ¹	fps
Campo de visão	25	°
Resolução espacial mínima @ 50 cm	1x1	mm
Resolução mínima	218x218	pixel
Peso máximo	50	g

Uma das possíveis câmeras, disponíveis no mercado, é o módulo OV7725 visto na figura 3. Este módulo é idealizado de forma que a captura da imagem possa ser realizada facilmente através de um microcontrolador, o que é uma característica bastante interessante uma vez que pretende-se, justamente, que o microcontrolador embarcado faça a captura dos dados, que neste caso é a própria imagem, a bordo e os envie ao usuário.

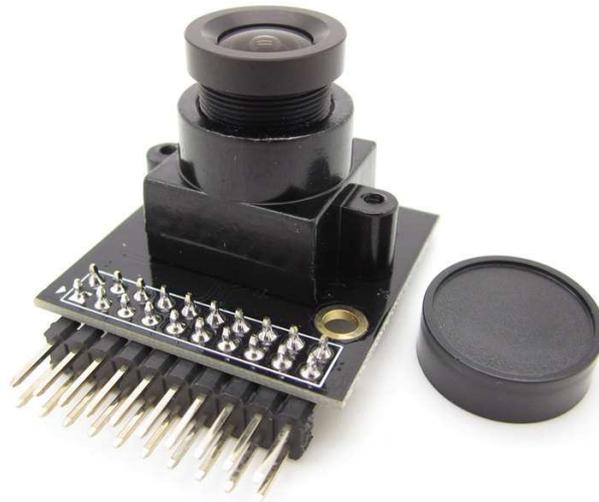


Figura 3 – Módulo de câmera

Termografia

As especificações para este ensaio foram baseadas a partir do cenário de inspeção e do objetivo desta inspeção, que neste trabalho refere-se a busca por locais onde o isolamento térmico possa estar comprometido.

Tais especificações são análogas às descritas no ensaio anterior, portanto, para a inspeção térmica foi discriminado a utilização de uma câmera sensível à radiação infra vermelha, com características vistas na tabela 2.

Tabela 2 – Especificações da câmera térmica

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura de operação mínima	5 a 50	°C
Faixa de medição mínima	5 a 500	°C
Mínima transferência de dados	30	fps
Campo de visão	25	°
Resolução espacial mínima @ 50 cm	1x1	mm
Resolução mínima	218x218	pixels
Peso máximo	300	g

Uma das câmeras que atende a estas especificações e possui um custo relativamente baixo é a Flir A35 (Figura 4). Ela é projetada para aplicações na área de automação industrial para monitoramento de processos, assim permitindo o acesso à suas imagens a partir de um microcontrolador além ser extremamente leve, característica essa que é de fundamental importância na aplicação em questão.



Figura 4 – Câmera térmica

3 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)

3.1 Histórico/Estado da Arte

Muitos dispositivos de instrumentação tais como acelerômetros, giroscópios, barômetros e bússolas, passaram, com o avanço da tecnologia, a ter dimensões milimétricas (contando com o encapsulamento) e massa da ordem de miligramas. O crescente uso destes dispositivos em bens de consumo (a exemplo de celulares) contribuiu bastante para produção em larga escala, tornando-os cada vez mais acessíveis e baratos. Houve também evolução em outras tecnologias, como a das baterias (cuja relação peso por carga fica cada vez menor) e de materiais compostos, como a fibra de carbono, que possibilitam uma estrutura altamente resistente e ao mesmo tempo bem leve. Estes fatos impulsionaram o surgimento de pequenas naves aéreas, em especial as não tripuladas conhecidas com VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado). As naves baseadas em propulsão elétrica, por possuírem maior simplicidade mecânica logo um grande potencial de miniaturização, foram alvo de grande desenvolvimento.

Entre os principais VANTs elétricos estão os aviões, helicópteros, quadricópteros e dirigíveis. Há um grande destaque para os helicópteros que têm alto grau de manobrabilidade, boa capacidade de carga e capacidade de pouso e decolagem vertical, o que permite seu uso tanto em ambientes internos quanto externos. Sua principal desvantagem é o alto consumo de energia, mas que vem se tornando menos expressiva devido ao avanço no setor de armazenamento de energia (baterias).

Quadrirotores, também chamados quadricópteros ou quadrotores, representam um conceito emergente de helicópteros utilizados em veículos aéreos não tripulados (VANTs). Este tipo de veículo tem quatro rotores de sustentação com hélices de passo fixo localizados nas extremidades do veículo. Os sentidos de rotação das hélices torna desnecessário um rotor auxiliar para cancelar o torque gerado pelos rotores principais, tal como em um helicóptero convencional. Isto faz com que o quadricóptero apresente vantagem com relação ao helicóptero convencional, pois permite que o veículo seja manobrado apenas variando a velocidade de rotação de cada rotor, dispensando o uso de mecanismos complexos para o ajuste do ângulo de ataque das pás do rotor utilizados em helicópteros convencionais.

Estes conceitos de helicópteros com vários rotores, embora tenham surgido por volta de 1920 (FERNANDES, 2011), ficaram esquecidos por décadas devido a dificuldade da estabilização do mesmo, o que, na época, era de inteira responsabilidade do piloto. No entanto, nos últimos anos, eles ganharam visibilidade dado o avanço de vários fatores e têm sido alvo de vários estudos nos quesitos de modelo matemático para descrição da dinâmica

do helicóptero e sistema automatizado de estabilização (MICHAEL, 2014; LUUKKONEN, 2011; ELKHOLY, 2014).

Desenvolvimentos tecnológicos em VANTs ocorreram na academia, na indústria e na comunidade de projetos *open-source*. Os quadricópteros tornaram-se bastante populares, devido a sua facilidade em se adequar a diversas situações, a simplicidade de seu mecanismo com relação aos helicópteros convencionais e vantagens semelhantes aos mesmos. Em 2015 espera-se que as vendas de VANTs cheguem a 400 mil unidades movimentando cerca de US\$ 130 milhões, 50% a mais que o ano passado (PIMENTEL, 2015).

Projetos universitários conseguiram vôo estável e muitos têm conseguido alguma autonomia e atividades relacionadas a utilização de vários quadricópteros na forma de *enxame inteligente*. Projetos amadores também existem, permitindo a qualquer um construir um quadricóptero a partir de esquemas abertos disponibilizados na internet, além da facilidade de se encontrar peças *plug and play*.

Além dos projetos que são filiados a uma universidade existe uma comunidade de entusiastas não-acadêmicos crescendo rapidamente. Segue uma breve lista de projetos abertos disponibilizados que possuem mais relevância no que diz respeito a quadricópteros.

- **AeroQuad, ArduCopter:** Os projetos abertos mais populares recentemente combinaram forças para se tornar o que é, de longe, a comunidade mais ativa de entusiastas, profissionais, acadêmicos, etc, quando o assunto é quadricóptero e multirotor.
- **KKcopter:** Um projeto muito simples, mas bem sucedido para o software multirotor, dado as limitações de *hardware*.

3.2 Movimentação básica

Foi escolhido um conjunto de quatro entradas que fornecem saídas independentes que favorecem a manobrabilidade do quadricóptero e têm grandezas relativamente fáceis de serem mensuradas, como poderá ser observado mais adiante, para serem utilizadas na realimentação do sistema de controle. Tal conjunto será mostrado a seguir, onde todas as descrições dos movimentos serão dadas em relação ao sistema de coordenadas V e será utilizado a seguinte legenda:

- Seta azul: Vetor força de empuxo gerada pela hélice
- Seta verde: Sentido de rotação da hélice
- Seta laranja: Movimentação final do sistema

1. Translação vertical (U_1)

Este movimento corresponde apenas a translação do corpo na direção do eixo z , dado pelo aumento ou decremento igualitário da velocidade das hélices. A Figura 5 mostra a direção do movimento e o empuxo vertical gerado por cada hélice.

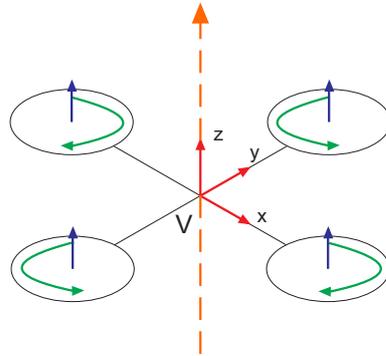


Figura 5 – Translação vertical.

2. Rolamento - Roll (U_2)

Neste movimento é realizado uma rotação em torno do eixo Y , através da geração de velocidades de rotação diferentes para os motores localizados sobre o eixo X . Esta manobra deve ser realizada de forma que se mantenha o empuxo vertical a fim de não perder altitude. A Figura 6 mostra a direção do movimento e o empuxo vertical gerado por cada hélice.

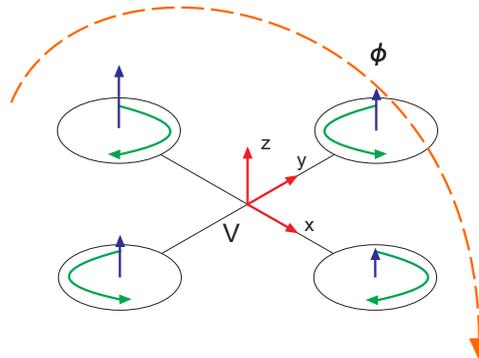


Figura 6 – Rolamento.

3. Arfagem - Pitch (U_3)

Este movimento é análogo ao anterior, onde a diferença está no fato de que a rotação ao invés de ser ao redor do eixo Y será ao redor do eixo X . Esta manobra também deve ser realizada de forma que se mantenha o empuxo vertical. A Figura 7 mostra a direção do movimento e o empuxo vertical gerado por cada hélice.

4. Guinada - Yaw (U_4)

Neste movimento o quadricóptero gira, de modo controlado, em torno do eixo Z .

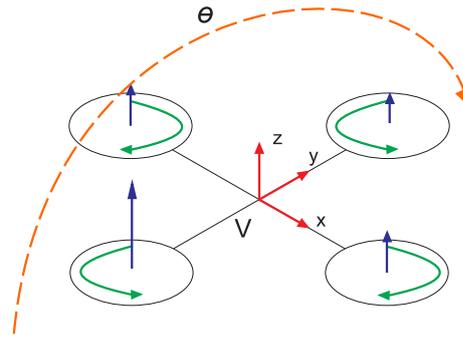


Figura 7 – Arfagem.

Graças a disposição das hélices e sentidos de rotação diferentes é possível gerar ou anular um torque, em relação ao eixo Z, sobre todo o veículo apenas ajustando a diferença de velocidade entre as hélices que giram no sentido horário e anti-horário. As velocidades devem ser alteradas de forma que surja um torque resultante sem comprometer o empuxo vertical. A Figura 8 mostra a direção do movimento e o empuxo vertical gerado por cada hélice.

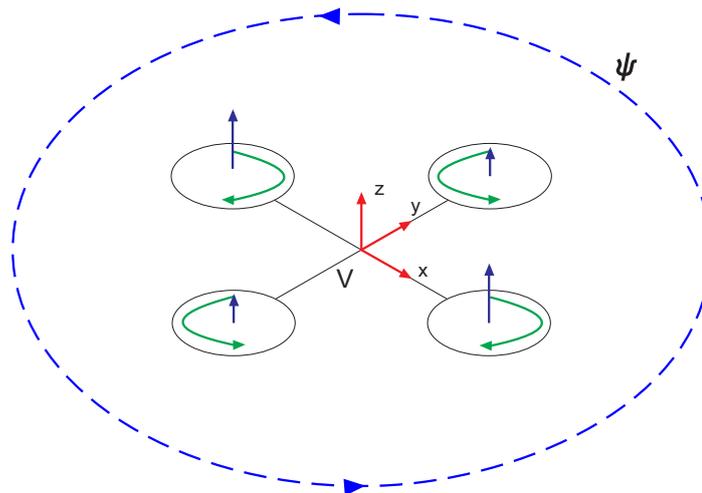


Figura 8 – Guinada.

No modelo apresentado, os movimentos de arfagem e guinada são matematicamente idênticos, uma vez que está sendo considerado um sistema perfeitamente simétrico com relação a rotações. Em um caso prático, esta distinção é feita por parte do operador através de uma marcação no veículo, apenas para efeito de *feedback* visual.

3.3 Modelagem matemática

O quadricóptero pode ser modelado em primeira aproximação como constituído por hastes finas, porém resistentes dispostas na forma de “mais”(+). Na extremidade de cada haste existe um motor com hélices conectadas diretamente ao rotor. Todas as hélices estão

perfeitamente equilibradas e equidistantes do centro. Uma outra aproximação é considerar que o centro de massa se localiza no cruzamento dos eixos.

Para controlar o torque gerado pela rotação de cada hélice e manter a simetria do sistema utilizam-se duas hélices que giram no sentido horário e duas no sentido anti-horário, contudo mantendo a direção do vento soprado sempre para baixo. Assim não há a necessidade de adicionar mais uma hélice para controlar este torque, como é o caso dos helicópteros comuns através da hélice de cauda.

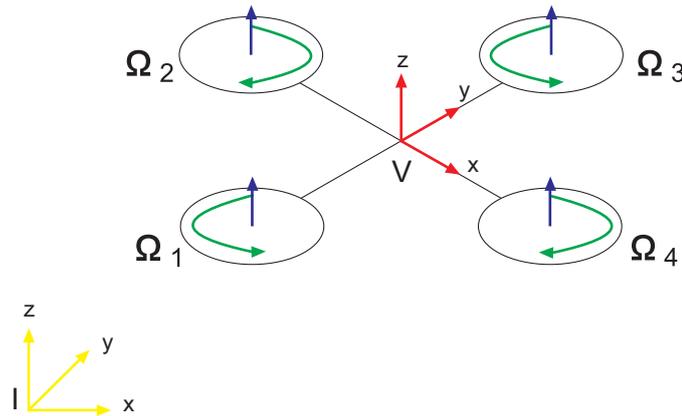


Figura 9 – Sistema simplificado.

Na Figura 9 ilustra o sistema a ser modelado. Onde o sistema de coordenada I é um sistema de coordenadas inercial (Piloto) e V um sistema de coordenadas com origem no centro de massa do quadricóptero, Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 e Ω_4 são as velocidades de rotação dos rotors na direção especificada pelas setas curvas (verdes) em cada rotor. As setas (azuis) perpendiculares ao plano das hélices representa a amplitude do empuxo gerado por cada rotor. O sistema inercial (I) relaciona-se com o não inercial (V) por uma translação e pelos ângulos de Euler vistos na Figura 10.

É fácil perceber que o problema a ser modelado trata-se de um sistema mecânico dotado de seis graus de liberdade. Ou seja, existem seis conjuntos independentes de deslocamentos e/ou rotações que determinam completamente a posição absoluta do corpo rígido (quadricóptero), como visto na Figura 11. Contudo, no sistema, existem apenas quatro entradas (motor + hélice) e portanto só há a possibilidade de se controlar de forma independente, no máximo, quatro graus de liberdade. Devido a forma como sistema como foi concebido é possível resolver a desigualdade em seu máximo, assim dispondo de controle independente de quatro graus de liberdade, que são:

- Rotação em “X”
- Rotação em “Y”
- Rotação em “Z”

pode-se determiná-las de maneira fácil. Assim, sobre este ponto de vista, a formulação de Euler-Lagrange é uma boa solução já que ela não requer a determinação das forças de restrição.

Esta formulação repousa sobre as seguintes Leis:

1. Terceira Lei de Newton:
“A toda ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade”
2. Segunda Lei de Newton:
“A taxa de variação da quantidade de movimento linear é igual à força total aplicada”
3. Lei de Euler:
“A taxa de variação da quantidade de movimento angular é igual ao torque total aplicado sobre o corpo”

Uma vez que o sistema a ser modelado pode ser aproximado por um único corpo rígido, a modelagem segundo o formalismo de Newton-Euler requer igual nível de esforço para extração das equações comparado à Euler-Lagrange.

Nesta dissertação a modelagem será realizada a partir dos princípios de Newton e Euler, pois seu raciocínio mostra-se mais intuitivo ao autor.

Modelo a partir de Newton-Euler

Existe uma diferença crucial entre os movimentos linear e angular, pois enquanto no linear a massa do corpo pode ser considerada constante, na maioria dos casos, no angular a matriz de inércia pode ser ou não constante dependendo do referencial adotado. Em geral não é constante e varia com o tempo.

Portanto uma forma de contornar este problema é, além do sistema de coordenadas inercial (observador - I), definir-se um sistema cartesiano móvel no centro de massa (V) (que em muitos casos também representam o centro geométrico), uma vez que esta definição implica em:

- Matriz de inércia invariante no tempo;
- Simetrias do corpo podem simplificar várias equações;

Outra vantagem de se definir este segundo sistema de coordenadas é o fato de que as medições realizadas a bordo do corpo são mais facilmente interpretadas nesta referência, como será visto nos capítulos seguintes.

A dinâmica de um corpo rígido com 6 graus referenciada ao sistema inercial I de liberdade é descrita pela equação 3.1.

$$\begin{bmatrix} m \cdot I_{d_{3 \times 3}} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \mathbf{E}_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_V \\ \dot{\omega}_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_V \times (m \cdot V_{LIN_V}) \\ \omega_V \times (\mathbf{E}_V \cdot \omega_V) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_V \\ \tau_V \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Onde $I_{d_{3 \times 3}}$ representa a matriz identidade 3x3, $0_{3 \times 3}$ representa a matriz nula 3x3, m representa a massa do corpo, V_{LIN} representa o vetor velocidade linear, ω representa o vetor velocidade angular, E representa a matriz momento de inércia, F representa o vetor de forças aplicadas e τ representa o vetor de torques aplicados. O índice V associado às grandezas mencionadas na equação 3.1 indicam que estas são relativas ao sistema de coordenadas localizado no veículo.

Definindo o vetor Λ , que representa as Forças Generalizadas, de acordo com a equação 3.2.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} F_V & \tau_V \end{bmatrix}_T \quad (3.2)$$

É possível reescrever a equação 3.3 como:

$$M_V \dot{\nu} + C_V(\nu)\nu = \Lambda \quad (3.3)$$

Onde ν é o vetor velocidade generalizada, $C_V(\nu)$ representa a matriz centrípeta de Coriolis (BRESCIANI, 2008) e M_V é a matriz de inércia.

$$\nu = \begin{bmatrix} V_V & \omega_V \end{bmatrix}^T \quad (3.4)$$

$$M_V = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \mathbf{E}_V \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$C_V(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -mS(V_V) \\ 0_{3 \times 3} & -S(\mathbf{E}_V \omega) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Onde $S(x)$ é o operador anti-simétrico.

Agora analisando as contribuições das forças, tem-se:

- Contribuição gravitacional G_V :

$$G_V = \begin{bmatrix} T \cdot F_{gV} \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg \sen \theta \\ mg \cos \theta \sen \phi \\ mg \cos \theta \cos \phi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

- Contribuição do efeito giroscópico $O_V(\nu)$:

$$O_V(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ J_{TP} \begin{bmatrix} -\dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \Omega \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Onde J_{TP} é o vetor momento de inércia calculado em torno do eixo de cada rotor e $\Omega = [\Omega_1 \ \Omega_2 \ \Omega_3 \ \Omega_4]^T$ é o vetor das velocidades angulares de cada rotor.

- Contribuição dada pelas entradas U_V :

$$U_V = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2) \\ bl(U_4^2 - U_2^2) \\ bl(U_3^2 - U_1^2) \\ d(U_2^2 + U_4^2 - U_1^2 - U_3^2) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Onde l é a distância entre o centro do quadricóptero e o rotor, b é o coeficiente de empuxo da hélice e d é o coeficiente de arrasto da hélice.

Voltando a equação 3.3, têm-se que:

$$M_V \dot{\nu} + C_V(\nu)\nu = G_V + O_V\Omega + U_V \quad (3.10)$$

Resolvendo a equação 3.10 para as acelerações, encontra-se:

$$\begin{aligned} \ddot{X}' &= (\dot{Y}'\dot{\psi} - \dot{Z}'\dot{\theta}) + g \sin \theta \\ \ddot{Y}' &= (\dot{Z}'\dot{\phi} - \dot{X}'\dot{\psi}) + g \cos \theta \sin \phi \\ \ddot{Z}' &= (\dot{X}'\dot{\theta} - \dot{Y}'\dot{\phi}) + g \cos \theta \cos \phi \\ \ddot{\phi} &= \frac{E_{YY} - E_{ZZ}}{E_{XX}} \dot{\theta}\dot{\psi} - \frac{J_{TP}}{E_{XX}} \dot{\theta}\Omega + \frac{U_2}{E_{XX}} \\ \ddot{\theta} &= \frac{I_{ZZ} - E_{XX}}{E_{YY}} \dot{\phi}\dot{\psi} - \frac{J_{TP}}{E_{YY}} \dot{\phi}\Omega + \frac{U_3}{E_{YY}} \\ \ddot{\psi} &= \frac{E_{XX} - E_{YY}}{E_{ZZ}} \dot{\phi}\dot{\theta} + \frac{U_4}{E_{ZZ}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

A fim de obter um modelo em que as translações sejam expressas de forma menos complexa, referencia-se todas as translações ao referencial inercial (I), formando assim um sistema de referência híbrido. Obtendo:

$$\begin{aligned}
\ddot{X} &= (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\
\ddot{Y} &= (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\
\ddot{Z} &= -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\
\ddot{\phi} &= \frac{E_{YY} - E_{ZZ}}{E_{XX}} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_{TP}}{E_{XX}} \dot{\theta} \Omega + \frac{U_2}{E_{XX}} \\
\ddot{\theta} &= \frac{E_{ZZ} - E_{XX}}{E_{YY}} \dot{\phi} \dot{\psi} - \frac{J_{TP}}{E_{YY}} \dot{\phi} \Omega + \frac{U_3}{E_{YY}} \\
\ddot{\psi} &= \frac{E_{XX} - E_{YY}}{E_{ZZ}} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{U_4}{E_{ZZ}}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Apesar de haver seis variáveis que definem o movimento, o quadricóptero, por só apresentar quatro entradas (os quatro rotores) independentes, só tem a capacidade de controlar independentemente quatro das seis variáveis. Encontra-se na literatura vários trabalhos que utilizam as variáveis ϕ , θ , ψ e Z , pois foi observado que é possível realizar os movimentos em X e Y a partir da combinação das variáveis escolhidas. Por exemplo, consegue-se um movimento em X inclinando na direção de ϕ e variando a entrada referente ao deslocamento em Z (U_1). O movimento em Y pode ser realizado de forma análoga ao invés de inclinar na direção de ϕ inclina-se na direção de θ .

3.4 Especificações

Visando o ambiente de trabalho na indústria petrolífera no Brasil, foi especificado as condições mínimas que o veículo deve satisfazer para proporcionar uma inspeção adequada. Estas condições são:

- Empuxo mínimo: 2 kg
- Autonomia com carga útil mínima: 40 min
- Temperatura de operação: 0 - 70 °C em qualquer componente do veículo
- Estabilidade espacial: 10 cm sobre ventos de até 48 km/h

Onde são baseadas no equipamento necessário para realização da inspeção, relação peso x autonomia, temperatura superficial dos componentes localizados no local da inspeção e velocidade média do vento sobre 95% do território brasileiro segundo (Técnicas, 1988).

O empuxo mínimo justifica-se pela utilização de:

- Estrutura em fibra de carbono com peso aproximado de 800 g

- Bateria com peso aproximado de 200 g
- Conjunto de motores e hélices com peso aproximado de 200 g
- Câmera térmica com peso aproximado de 300 g
- Câmera visível com peso de aproximado 50 g

3.5 Aspectos práticos

Nesta seção será descrito alguns aspectos que, na prática, dificultam ou inviabilizam a implementação do sistema de controle de movimentação e estabilidade do VANT.

3.5.1 Motor/Driver

Uma das suposições impostas ao modelo matemático realizado para o VANT é que todos os componentes são iguais, entretanto isso nem sempre é verdadeiro principalmente quando se fala de motores. Um aspecto que atrapalha bastante o trabalho do sistema de estabilização do veículo é justamente o fato de um mesmo sinal de entrada ao *driver* do motor não garante que os mesmos girem na mesma velocidade. Isto pode fazer com que até mesmo um sistema de controle bem projetado torne-se instável.

Para corrigir ou amenizar este efeito pode ser implementado um subsistema de controle, executando de forma bem mais rápida (Pelo menos 10 vezes) que o resto do sistema de controle, com a finalidade de garantir a unicidade entre entrada e saída para todos os motores. Ou seja, um mesmo sinal de controle irá levar a rotações idênticas mesmo que os motores e/ou *drivers* sejam ligeiramente diferentes uns dos outros.

3.5.2 Medição dos ângulos

Um dos fatores mais importantes para a estabilização do veículo é saber seu posicionamento espacial sem a interferência de um agente externo. Para isso se recorre a um dispositivo chamado Unidade de Medição Inercial (em inglês IMU - Inertial Measurement Unit) que possui um conjunto de sensores, como acelerômetro, giroscópio, barômetro e magnetômetro, que juntos possibilitam a orientação espacial do veículo.

Acelerômetro

O acelerômetro é um equipamento utilizado para mensurar a aceleração própria, que é aquela estabelecida através da relação entre velocidade e tempo acrescida da sensação de peso medida em um dado referencial.

Acelerômetros podem se basear em diversos efeitos físicos tais como: acelerômetro piezoelétrico, acelerômetro por indução magnética, e acelerômetro de capacitância. Este

último, utiliza um mecanismo conhecido como sensor capacitivo de aceleração, baseado em MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), para medir tanto as forças de acelerações estáticas quanto dinâmicas.

Esses dispositivos são utilizados principalmente em sistemas de posicionamento, sensores de inclinação e sensores de vibração. Sua aplicação em larga escala na indústria automotiva promoveu a redução do preço e popularização da tecnologia, que pode ser encontrada até em relógios de pulso, alguns aparelhos de telefonia móvel e videogames.

Atualmente existem basicamente dois tipos de produtos no mercado, os modelos mais sofisticados e caros que atendem principalmente as indústrias automotiva e militar, e os modelos mais simples e baratos voltados para a eletrônica de consumo.

Na Terra, quando consideramos o acelerômetro colocado em uma superfície plana a medição será de aproximadamente 9.81 m/s^2 , ou 1 g. Na maioria dos casos, a aceleração é tratada como um vetor usado para detectar a orientação do dispositivo em relação à Terra, mais precisamente pitch (inclinação) e roll (rotação).

Giroscópio

Os giroscópios são utilizados para medir orientação. No entanto a palavra giroscópio é utilizada em um sentido muito amplo, os empregos mais comuns são para:

- Equipamento para manter a orientação
- Equipamento para medição de ângulo - Mecânico
- Equipamento para medição de ângulo - Eletrônico

Um giroscópio mecânico normalmente consiste de um disco rotativo, onde os eixos ligados a ele são capazes de se deslocar livremente em qualquer orientação, como na figura 12. Eles podem ser utilizados tanto para medição ângulos em relação a um referencial inercial, quanto para manter a orientação de um dispositivo (Ex: foguetes).

Um giroscópio microeletromecânico (MEMS) é muito semelhante, mas em vez de disco giratório que consiste em um tipo de ressonador vibrando. A ideia é a mesma, um objeto de vibração tende a continuar vibrando no mesmo plano que as suas bases de apoio.

Um giroscópio MEMS mede a velocidade angular, a partir do qual pode-se calcular o ângulo pela integração da velocidade, como visto na equação 3.13. Em um sistema de controle discreto, tipicamente se toma medições do giroscópio em intervalos de tempo constantes, e obtém-se uma estimativa da distância que inevitavelmente leva a erros ao longo do tempo.

$$\theta(t) = \theta(t - 1) + \omega dT \quad (3.13)$$

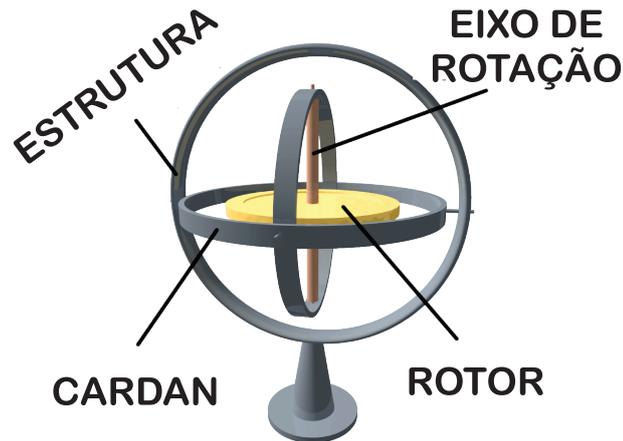


Figura 12 – Giroscópio mecânico

Define-se $\theta(t)$ o ângulo estimado para o tempo atual, $\theta(t - 1)$ o último ângulo estimado, ω a velocidade angular e dT o intervalo de tempo dT como o tempo percorrido durante um ciclo.

A partir deste ponto, a menos que seja explicitamente dito o contrário, a palavra giroscópio será empregada para referir-se aos giroscópios MEMS.

Fusão de sensores

Observando as medições do acelerômetro e do giroscópio, nota-se que o giroscópio tem leitura boa (Amplitude do ruído é menor que 25% da amplitude do sinal), mas apresenta oscilação. O acelerômetro, por outro lado apresenta muito ruído (Amplitude do ruído é maior que 25% da amplitude do sinal), mas o desvio é zero. A solução para isso é fundir essas duas leituras de sensores para formar uma leitura mais precisa. Existem duas abordagens principais de fusão de dados:

- Filtro de Kalman
- Filtro Complementar

Segundo seu criador Rudolph. E. Kalman, o filtro de Kalman é uma solução recursiva para o problema de filtragem de dados discretos em um sistema linear. Dados alguns valores iniciais, pode-se prever e ajustar os parâmetros do modelo através de cada nova medição, obtendo a estimativa do erro em cada atualização. A sua habilidade para incorporar os efeitos de erros e sua estrutura computacional fez com que o filtro de Kalman tivesse um amplo campo de aplicações, especialmente no que se refere à análise de trajetórias em visão computacional.

O filtro Complementar é uma abordagem mais intuitiva e fácil de implementar que filtro de Kalman. A idéia do filtro complementar se baseia em definir proporções, ou “pesos”, a cada fonte de dados e somá-los depois. A fórmula geral seria algo como:

$$Fusão = K_1 \cdot S_1 + K_2 \cdot S_2 + K_3 \cdot S_3 \dots K_n \cdot S_n \quad (3.14)$$

Onde $K_1, K_2, K_3 \dots K_n$ são as relações de confiança (ou “pesos”) que tem em uma base de dados. Quanto menor a taxa, menor sua confiança. Vale lembrar que a soma de todos os pesos têm que completar a unidade.

Neste trabalho, para minimizar o esforço computacional na estimação dos ângulos, optou-se por utilizar diretamente a medição do acelerômetro para obtenção dos ângulos e apenas fazer uso do giroscópio para medição da velocidade angular. Este método surge intuitivamente quando se pensa em aplicar um controlador PID como forma de estabilizar o sistema, este controlador faz uso do valor do ângulo, da derivada do ângulo e da integral do ângulo. Então pode-se utilizar diretamente o valor do ângulo (obtido através do acelerômetro) e a velocidade angular (obtida através do giroscópio) como entradas para realização dos cálculos necessários.

Magnetômetro

São instrumentos empregados na medição da intensidade e, possivelmente, da direção e sentido de campos magnéticos. Magnetômetros são amplamente utilizados para medir o campo magnético da Terra. Há dois tipos de magnetômetros: escalares e vetoriais, magnetômetros escalares medem apenas a magnitude do campo magnético e os vetoriais são capazes de medir a magnitude e o sentido do campo magnético na direção em que estão alinhados.

Assim ele pode ser utilizado, análogo ao acelerômetro, para estimação dos ângulos com relação aos pólos magnéticos terrestres.

3.6 Constatações práticas

A realização de testes no sistema do veículo é bastante complicado devido aos seguintes fatos:

- Alto consumo de energia que são fornecida por baterias, acarretando em um grande período de carga da bateria para um curto período de utilização;
- Grande custo para reparo caso haja algum incidente;
- Dificuldade em manter a estrutura fixa para a realização de testes.

Outro fator importante é que as especificações do sistema são fortemente dependentes dos dispositivos que serão acoplados à estrutura do VANT. Assim dificultando a realização do projeto de controladores, uma vez que ainda não se tem definido de forma definitiva o que será utilizado.

Portanto foi escolhido realizar o estudo sobre uma plataforma mais “estável”, menos custosa e com uma estrutura mecânica já estabelecida. O sistema escolhido foi o do pêndulo invertido que possui uma modelagem matemática análoga, assim, em teoria, um algoritmo de controle que estabilize este sistema pode ser facilmente migrado para o sistema do VANT.

4 Controle

Em um sistema de controle típico, a variável do processo é o parâmetro do sistema que precisa ser controlado, um sensor é usado para medir a variável de processo e fornecer *feedback* para o sistema de controle. O *setpoint* é o valor desejado ou comando para a variável de processo e a diferença entre a variável de processo e o *setpoint*, denominada erro, é usada pelo algoritmo do sistema de controle para determinar a saída desejada do atuador, que por sua vez, irá acionar o sistema (Planta). Isto é chamado de um sistema de controle em malha fechada e é ilustrado na figura 13.

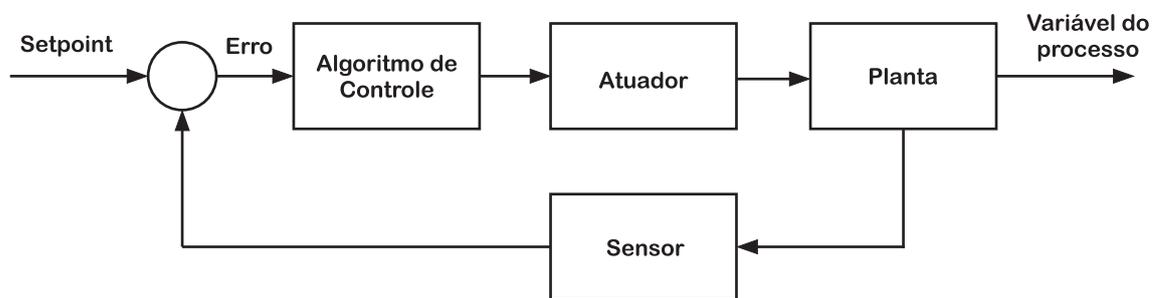


Figura 13 – Sistema de controle

O processo de projeto de um controlador começa pelos requisitos de desempenho. Uma das formas de avaliar o desempenho é através da resposta ao degrau, medida pela aplicação de um degrau ao *setpoint*, em seguida é medida a resposta da variável de processo. Geralmente, a resposta é quantificada pelas características da onda de resposta que podem ser observadas na figura 14.

Tempo de subida: Tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do estado estacionário, ou valor final.

Sobrepasso percentual: Valor que a variável de processo ultrapassa o valor final, expresso como uma porcentagem do valor final.

Tempo de estabilização: Tempo de estabilização é o tempo necessário para a variável do processo chegar dentro de uma determinada porcentagem (normalmente 5%) do valor final.

Erro de regime estacionário ou permanente: Diferença final entre as variáveis do processo e o *setpoint*.

Tolerância: Margem aceitável para o erro de regime estacionário.

Tempo de pico: Tempo em que se alcança o máximo sobrepasso.

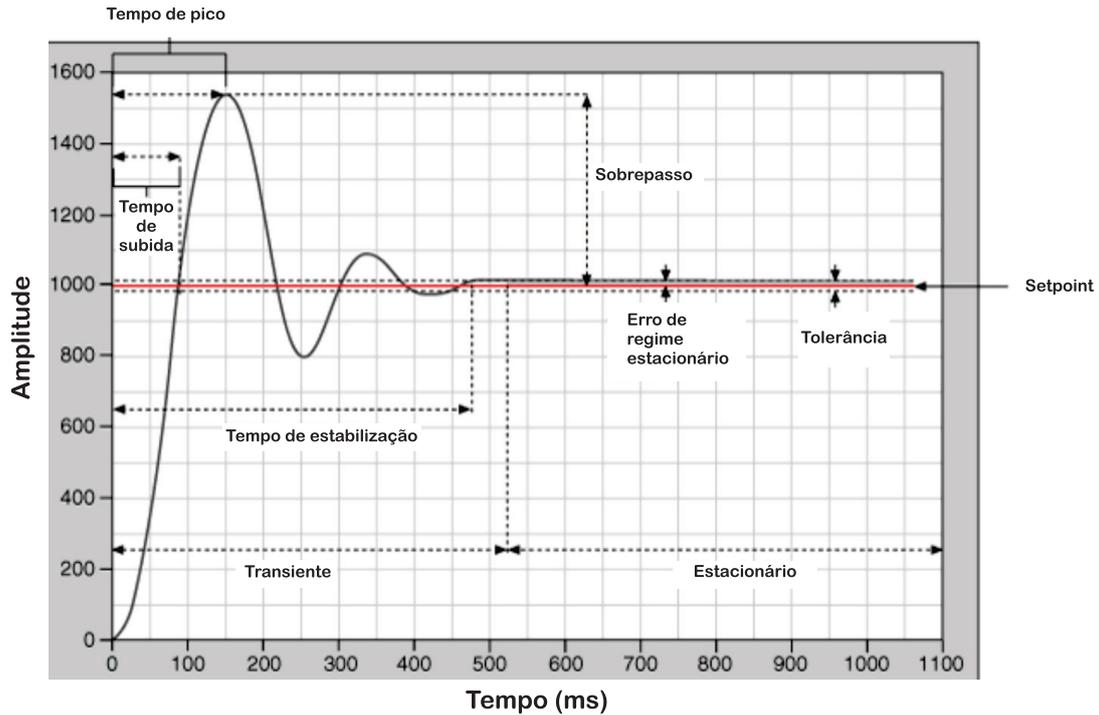


Figura 14 – Resposta ao degrau

Depois de definir os requisitos de desempenho, é importante definir as condições de pior caso as que o sistema de controle deverá suportar. A medida de quão bem o sistema de controle é capaz de superar os efeitos dos distúrbios é conhecida como a rejeição de distúrbios do sistema de controle.

Deve-se também levar em conta que a resposta do sistema pode mudar ao longo do tempo ou ser não linear. Um sistema não linear produz uma resposta desejada em um ponto de operação mas não em outro. Por exemplo, uma câmara parcialmente preenchida com um líquido vai apresentar uma variação de temperatura pelo efeito de um aquecedor muito mais rápida do que quando estiver mais cheia deste mesmo líquido. A robustez do sistema de controle é entendida como a medida com que o sistema irá tolerar os distúrbios e as não-linearidades.

Alguns sistemas apresentam um comportamento chamado tempo morto. Tempo morto é um atraso entre o momento que ocorre uma mudança da variável de processo e quando essa mudança pode ser observada. Por exemplo, se um sensor de temperatura é colocado longe de uma válvula de entrada de água fria, ele não irá medir a mudança da temperatura imediatamente se a válvula for aberta ou fechada. Tempo morto também pode ser causado por um atuador do sistema ou por uma saída lenta, demorando para responder ao comando de controle, por exemplo, uma válvula lenta para abrir ou fechar. Uma fonte comum de tempo morto em fábricas de produtos químicos é o atraso causado pelo fluxo do fluido através de tubulações. Todos os sistemas abordados neste texto têm tempo morto considerado muito pequeno quando comparado com a dinâmica do processo.

Outro comportamento não desejado presente em vários sistemas é a zona-morta. A zona-morta consiste em uma região onde não há variação na saída uma movimentação mesmo com variação da entrada. Imagine um caso hipotético onde existe um elevador sem contrapeso e o motor DC utilizado para fazê-lo subir e descer. Acionando o motor com uma tensão pequena ($V \gtrsim 0$) este não terá torque suficiente para vencer a força de atrito e o peso do elevador. Agora, fazendo a tensão aplicada ao motor subir gradativamente será alcançado um ponto ($V = k$) onde o elevador começará a se mover, indicando que o torque produzido superou a força de atrito e o peso do elevador. Assim, como não há movimento para entrada de tensão (V) maior que zero, caracteriza uma região de zona-morta.

Um exemplo é um motor elétrico, com tensão pequena que não é suficiente para vencer o atrito estático na carga. Quando a força aplicada (F) é menor que a força de atrito (F_{at}) o bloco não se movimenta, quando a força F supera o valor de F_{at} o bloco entra em movimento pela ação de uma força resultante (F_r) que tem valor igual a diferença entre a força aplicada e a força de atrito ($F_r = F - F_{at}$).

4.1 Controle linear

Sistemas de controle lineares usam realimentação negativa linear para produzir um sinal de controle com base nas variáveis, observadas com o objetivo de manter o processo controlado dentro de uma região de funcionamento aceitável.

A saída a partir de um sistema de controle linear para o processo pode ser controlado na forma de um sinal diretamente variável, tal como uma válvula que pode ser de 0 ou 100% aberto ou em qualquer lugar entre estes valores.

Os controladores lineares são desenvolvidos a partir da teoria clássica de controle e tem o PID como um de seus principais algoritmos de controle.

PID

O PID é o algoritmo de controle mais usado na indústria e tem sido utilizado em todo o mundo para diversos sistemas de controle. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional, que permite aos engenheiros operá-los de uma forma simples e direta.

Sua ação baseia-se em três tipos de ações: proporcional, integral e derivativa.

A componente proporcional depende apenas da diferença entre o ponto de ajuste e a variável de processo. Esta diferença é referida como o termo de erro. O ganho proporcional (K_p) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Por exemplo, se o termo de erro tem uma magnitude de 10, um ganho proporcional de 5 produziria uma resposta

proporcional de 50. Em geral, aumentar o ganho proporcional aumenta a velocidade da resposta do sistema de controle. No entanto, se o ganho proporcional é muito grande, a variável de processo começará a oscilar. Se K_p é aumentado ainda mais, as oscilações ficarão maior e o sistema ficará instável e poderá oscilar até mesmo fora de controle.

A componente integral soma o termo de erro ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno erro fará com que a componente integral aumente lentamente. A resposta integral varia ao longo do tempo a menos que o erro seja zero, portanto, o efeito é o de conduzir o erro de regime estacionário para zero.

A componente derivativa é proporcional à taxa de variação da variável de processo, seu efeito é fazer com que a saída diminua se a variável de processo está aumentando rapidamente. Aumentar o parâmetro do tempo derivativo (T_d) faz com que o sistema de controle reaja mais fortemente a variações no erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Na prática, a maioria dos sistemas de controle utilizam o tempo derivativo (T_d) muito pequeno, pois a resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo. Se o sinal de *feedback* do sensor é ruidoso ou se a taxa de malha de controle é muito lenta, a resposta derivativa pode tornar o sistema de controle instável.

4.2 Controle adaptativo

Informalmente, “adaptar-se” significa mudar o comportamento a fim de acomodar-se a novas circunstâncias. A partir disto um controle adaptativo é um controle que tem a capacidade de modificar seus parâmetros em resposta a mudanças na dinâmica do processo a ser controlado ou por alguma perturbação externa. Através dos anos houve várias tentativas de se definir formalmente o controle adaptativo, neste trabalho a definição de controle adaptativo será um controlador com parâmetros ajustáveis e um mecanismo para ajuste dos parâmetros.

O controle torna-se não linear em virtude do mecanismo de ajuste dos parâmetros. Ele, contudo, se baseia em controladores lineares. Um controle adaptativo pode ser pensado como tendo dois laços: um que é uma realimentação normal com o processo e o controle e outro onde é calculado o ajuste dos parâmetros. A figura 15 mostra o diagrama em blocos de um sistema com controle adaptativo genérico.

4.2.1 Algoritmos de controle

Nesta seção serão descritos os quatro principais tipos de sistemas adaptativos: escalonador de ganho, controle adaptativo por modelo de referência, regulador auto-ajustável e controle dual.

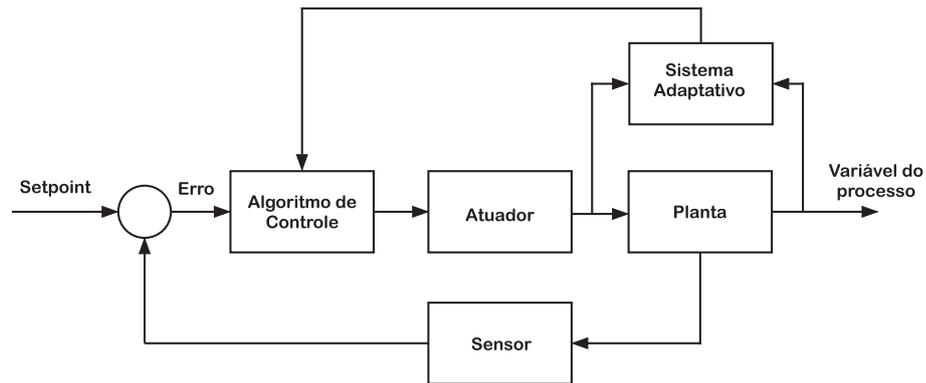


Figura 15 – Diagrama de blocos para um controle adaptativo

Escalonador de ganho

Em muitos casos é possível encontrar variáveis mensuráveis que se correlacionam com mudanças na dinâmica do processo, nestes casos, é possível definir os parâmetros do controlador como função destas variáveis. Este conceito se originou no desenvolvimento de sistemas de controle de vôo, onde a velocidade e a altitude são medidas e utilizadas como entrada para escalonar os ganhos do controlador. Tipicamente os parâmetros do controlador são variados de forma discreta dentro de um conjunto pré-definido como mostra a figura 16, onde são indicadas quatro condições de vôo, ou seja, são projetados controladores fixos para diversas regiões de operação da planta e o algoritmo de controle adaptativo consiste em selecionar qual destes controladores é o mais adequado dado o estado do sistema estimado pelas variáveis medidas.

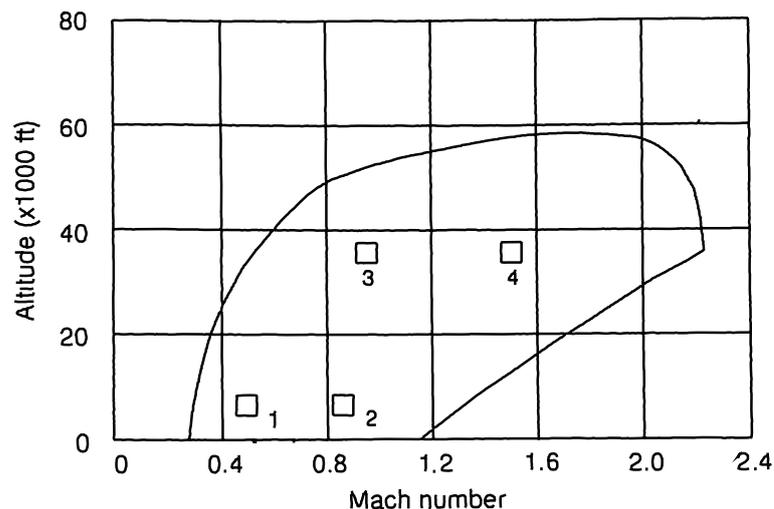


Figura 16 – Carta de vôo para o F4-E. Retirado de (WITTENMARK, 2008)

O escalonador de ganho é um método conveniente apenas se a dinâmica da planta varia de forma bem conhecida em função de poucas variáveis facilmente medidas. Se o número de regiões de operação da planta for elevado, o esforço necessário para projeto pode ser muito grande, pois é necessário projetar-se um controlador para cada uma destas

regiões. Outra dificuldade inerente a este método é a prova de estabilidade do controlador resultante: mesmo que se prove a estabilidade de todos os controladores associados a cada uma das regiões de operação, não há garantias de que ao se chavear entre eles o sistema resultante continuará estável.

Sistema adaptativo por modelo de referência (MRAS)

O MRAS (do inglês Model Reference Adaptive System) é originalmente proposto como solução para o problema em que os parâmetros de performance são especificados em relação a um modelo de referência. A partir deste modelo obtém-se como a saída do processo deveria, idealmente, responder ao sinal de entrada. O MRAS basicamente consiste em dois loops (Figura 17): o interno que corresponde a uma realimentação ordinária composta pelo processo e o controlador, e o externo que ajusta os parâmetros do controlador de modo a minimizar a diferença entre a saída do modelo de referência a saída do processo. O MRAS foi originalmente introduzido para controle de vôo, onde, neste caso, o modelo de referência descreve a resposta desejada para a aeronave em relação aos movimentos do joystick.

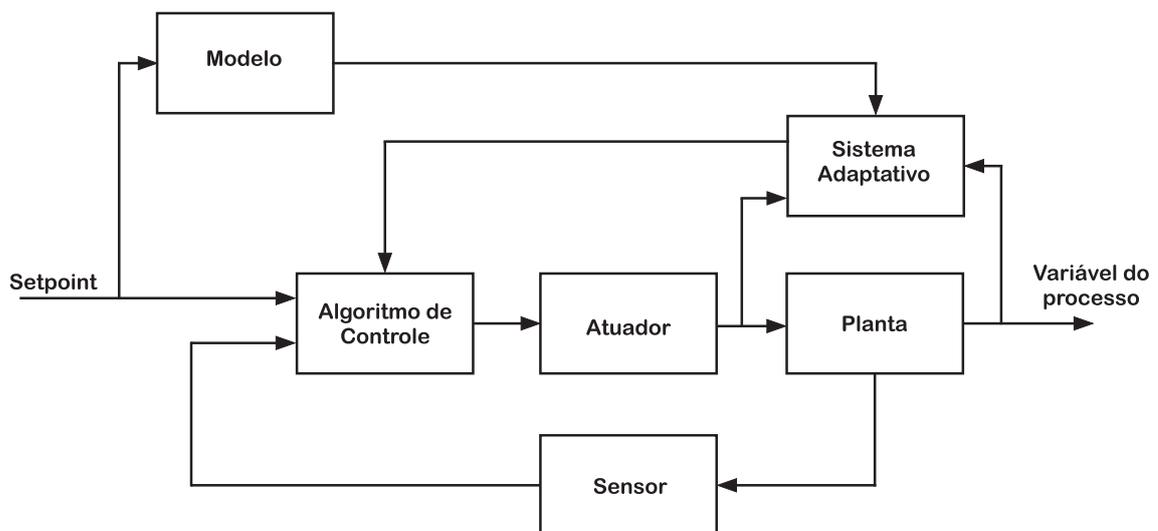


Figura 17 – Diagrama de blocos para o MRAS

O problema chave do MRAS é determinar o mecanismo de ajuste de modo que seja obtido um sistema estável e que convirja para o erro zero. Um mecanismo clássico, utilizado no MRAS original, é descrito pela equação 4.1 e é conhecido como *MIT rule*.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (4.1)$$

Nesta equação, e representa a diferença entre a saída y real e a saída do modelo de referência y_m ($e = y - y_m$) e θ é o parâmetro do controlador. O valor de $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ é a sensibilidade do erro com relação ao parâmetro θ . O parâmetro γ determina a taxa de adaptação. Na

prática, na maioria das vezes, não é possível achar uma solução exata para a derivada de sensibilidade sendo necessário realizar aproximações.

Regulador Auto-Ajustável

O Regulador Auto-Ajustável (STR - Self-Tuning Regulator) é obtido quando utiliza-se dos parâmetros estimados do processo como entrada para resolução de um problema de projeto de um controlador. Pode ser visto o diagrama de blocos desse tipo de estratégia na figura 18. O STR é composto por dois sub-sistemas, um interno e outro externo: O interno consiste no processo com um controle por realimentação simples e o externo é composto pelo sistema de estimação de parâmetros e pelo sistema de projeto de controlador. É o sistema externo que introduz a adaptabilidade de todo o processo, pois é nele onde são obtidos os parâmetros que irão alterar o controlador a partir de dados estimados e das especificações desejadas.

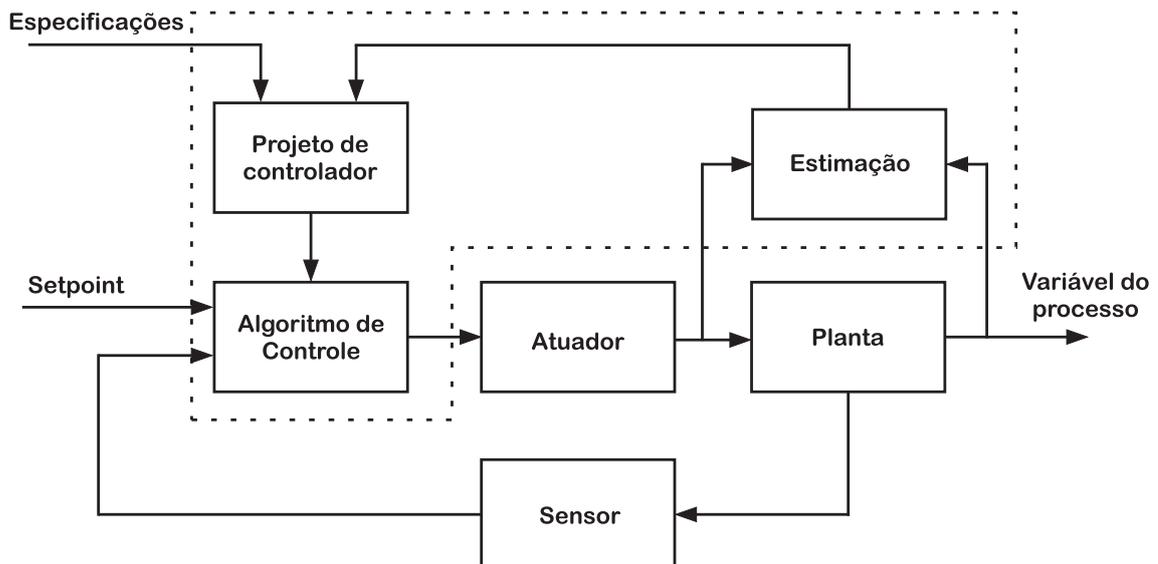


Figura 18 – Diagrama de blocos para o Regulador Auto-Ajustável

Os reguladores auto-ajustáveis são bastante flexíveis com respeito a escolha do algoritmo de projeto do controlador e dos métodos de estimação de parâmetros.

4.3 Obtenção da função transferência

Para o projeto de controladores é de fundamental importância o conhecimento do comportamento do sistema a ser controlado, pois toda teoria de controle parte do pressuposto que já se sabe ou que irá ser descoberto de alguma forma. A descrição deste comportamento é, geralmente, dado através de equações matemáticas ou, mais comumente chamada, modelo matemático do sistema.

Existem basicamente duas opções para a obtenção destes modelos:

Identificação analítica de sistemas ou modelagem fenomenológica: Envolve a análise da dinâmica do sistema físico e o desenvolvimento de um modelo matemático para o mesmo a partir da física do processo.

Identificação computacional de sistemas ou modelagem empírica: Envolve a coleta de dados das características de entrada X saída do sistema e utilização destes para obtenção de um modelo matemático que consiga reproduzir tal comportamento.

A partir da década de 90 aumentou a busca por métodos de obter modelos matemáticos a partir de dados observados e não unicamente das equações que descrevem o fenômeno físico do processo. Este fato deve-se, principalmente, ao aumento da complexidade dos sistemas a serem controlados, o que inviabilizava a possibilidade de obter as equações básicas a priori. Outro fator importante nesta mudança de foco foi a diminuição do custo e o aumento do desempenho dos computadores.

Os elementos principais para a identificação do sistema consiste (WITTENMARK, 2008):

Projeto do experimento: Consiste basicamente da escolha dos tipos de entradas que serão utilizadas para excitar o sistema.

Aquisição das informações referentes a entrada e saída: É responsável por armazenar os dados adquiridos para uma posterior análise.

Escolha da estrutura do modelo: Consiste em definir o tipo da função transferência que se pretende obter a partir dos dados capturados. Quando possível deve-se partir de um modelo fenomenológico que indique o formato da função transferência e dê um significado físico para os coeficientes. Isto permite avaliar se os valores obtidos são plausíveis.

Estimação dos parâmetros do modelo: Representa o algoritmo utilizado para estimação dos coeficientes do modelo.

Validação do modelo: Comparação da saída do modelo com a saída do sistema usando entradas diferentes daquelas utilizadas na etapa 4.

Essas etapas constituem o sistema de identificação *offline*, cuja característica principal é a aquisição de vários conjuntos de dados para uma posterior análise.

Outro tipo de identificação é chamada *online* ou “em tempo-real”, a qual é caracterizada por atualizar o modelo matemático para o processo a cada medida realizada. Ou seja, não é necessário capturar um ou mais conjuntos de dados para se obter uma resposta, como é o caso do *offline*. No entanto, isto implica em que a etapa de validação não é

realizada e assim não se tem garantias que o modelo dado como resposta representa o sistema físico em questão ou é apenas uma equação matemática que ajusta bem os dados fornecidos ao sistema de identificação.

A estimação de modelos em tempo-real é a peça chave para o funcionamento de vários algoritmos de controle adaptável. Os parâmetros obtidos são utilizados como entrada para um sistema automático de projeto do controlador, que desenvolve um controlador que atenda as especificações passadas pelo usuário a partir destas informações.

4.3.1 Sinal de entrada

As propriedades dos sinais utilizados como entradas do sistema são cruciais para a qualidade das estimativas. Por exemplo, é obvio que não se consegue estimar nenhum parâmetro¹ com uma entrada fixa em zero.

Portanto é fácil perceber que será obtido tão mais informações sobre a sistema quanto mais ele é estimulado, ou seja, quanto mais componentes de frequência estiverem presentes no sinal de entrada maior será a capacidade de obter um modelo condizente com a realidade.

Neste sentido têm-se o “Ruído branco” que é o termo dado ao ruído imprevisível completamente aleatório, como o chiado que você ouve no rádio fora de sintonia. Ele tem a propriedade de ter componentes de frequência em todo o espectro. Contudo obter um sinal completamente aleatório é difícil do ponto de vista computacional. Para solucionar isto recorre-se ao sinal binário pseudo-aleatório (PRBS) que é um sinal facilmente gerado computacionalmente e que também pode ter essa propriedade.

O PRBS é um sinal calculado de forma recursiva e se repete a cada m bits, no entanto quanto maior o valor de m mais aleatório irá parecer.

4.4 Problemas de implementação

Nesta seção serão abordados aspectos que, por muitas vezes, são ignorados ou esquecidos, mas que influenciam diretamente no funcionamento do sistema de controle. Em alguns casos ignorar algum destes aspectos pode fazer com que até sistemas de controle “bem projetados” não sejam efetivos em controlar o sistema desejado.

4.4.1 Atraso computacional

Devido a conversões analógico-digital, digital-analógico e tempo de computação, existe um atraso entre a obtenção da medida e a ação efetiva sobre o sistema. Este atraso

¹ Com exceção do *offset*

é chamado de atraso computacional e depende de como foi implementado a lei de controle. Dois modos podem ser vistos na figura 19: caso 19a a variável medida no tempo t_k é usada para computar o sinal de controle aplicado no tempo t_{k+1} ; caso 19b o sinal de controle é aplicado assim que acaba o tempo necessário para sua computação.

A principal desvantagem do caso 19a é a adição de um atraso desnecessário enquanto que no caso 19b a principal desvantagem é a possibilidade de mudança no tempo de atraso a depender da carga computacional ou mudanças no programa. O projeto do controle deve levar em consideração o atraso computacional em ambos os casos.

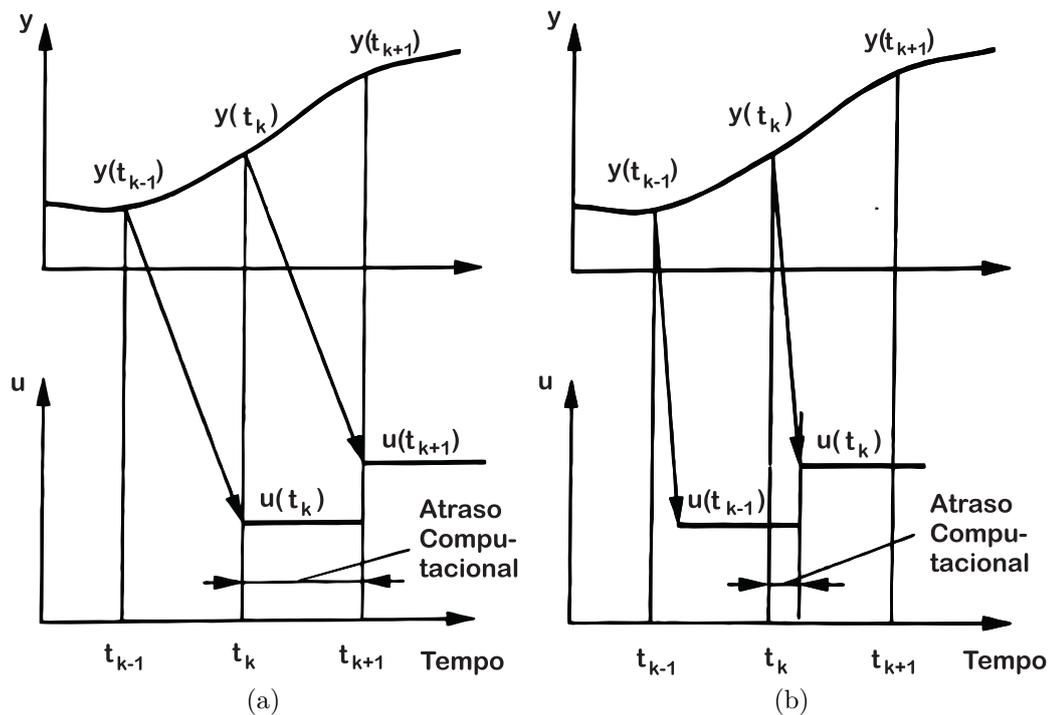


Figura 19 – Respostas ao impulso e ao degrau do modelo

No caso 19b é desejável que o atraso seja o menor possível. Uma regra comum é desprezar atrasos menores que 10% do período de amostragem. Vale ressaltar que em sistemas *multitasking* pode acontecer que o atraso computacional varie.

4.4.2 Rastreamento de parâmetros

Uma importante propriedade de um controlador adaptativo é a habilidade de rastrear variações na dinâmica do processo. Para fazer isto é necessário desprezar informações antigas, embora este processo envolva em um compromisso. Se os parâmetros são constantes, é desejável que sua estimação tenha base em várias medidas a fim de reduzir a influência das perturbações. Se os parâmetros estão mudando, porém, é desejado que o sistema valorize mais as informações mais recentes.

Uma maneira de descartar dados antigos é o esquecimento exponencial. Ele é baseado na suposição que a função de perda dos mínimos quadrados pode ser substituída pela função de perdas em que a informação antiga é descontada exponencialmente. Ou seja, a importância dos dados atuais é maior, em relação aos mais antigos, de forma exponencial.

5 Pêndulo Invertido

O pêndulo invertido é um problema clássico abordado em sistemas de controle, sendo alvo de muitos estudos por ter comportamento intrinsecamente não linear e poder ser construído com um baixo custo.

Ele tem como uma de suas implementações mais frequente, o apoio de uma haste sobre um carro. O carro tem a capacidade de mover-se ao longo do eixo x , enquanto a haste pode rotacionar em um plano vertical, paralelo ao eixo de movimentação do carro.

O sistema deve ser controlado de modo que a haste permaneça levantada na posição vertical, além de ser resistente a perturbações.

Este problema implica em um sistema acoplado onde o movimento do carro interfere tanto na posição angular da haste quanto na posição linear do conjunto carro e haste. Se o pêndulo sai da posição de equilíbrio, ele começa a cair e o carro, por sua vez, deve se mover de modo a restaurar a situação de equilíbrio da haste. Como uma única entrada influencia duas variáveis de saída (A posição e o ângulo) este sistema é mais complicado de se controlar do que parece à primeira vista, contudo segundo (TEIXEIRA; SODRÉ; JUNIOR, 2006) ele é um sistema totalmente controlável apesar desta característica.

Apesar de se tratar de um sistema mecânico bastante simples, várias situações práticas podem ser analisadas a partir dos conceitos envolvidos em seu estudo. O conceito de pêndulo invertido móvel tem sido utilizado em várias aplicações como, por exemplo, veículos de transporte humano como o *Segway*.

5.1 Movimentação básica

O sistema do pêndulo invertido, a ser analisado, possui apenas dois graus de liberdade. Eles são:

- Translação do carro
- Rotação da haste

Vale ressaltar que o sistema, do modo que foi apresentado, pode ser representado em apenas duas dimensões sem perda de informação.

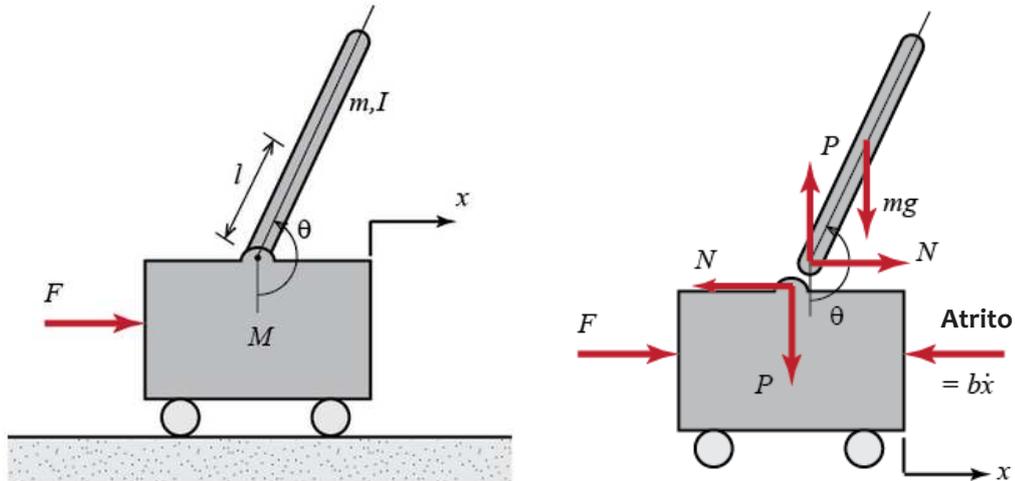


Figura 20 – Modelo do pêndulo invertido

5.2 Modelagem

Na figura 20 pode-se observar o sistema considerado para o modelo matemático. Será considerado os seguintes parâmetros:

- M - Massa do carro;
- m - Massa do pêndulo;
- b - Coeficiente de atrito viscoso entre o carro e a guia;
- l - Distância do apoio ao centro de massa do pêndulo;
- I - Momento de inércia do pêndulo;
- F - força aplicada ao carro;
- x - Posição linear do carro;
- θ - Posição angular do pêndulo.

Através da 2ª lei de Newton encontra-se as equações de movimento 5.1 e 5.2.

$$-Pl\sin(\theta) - Nl\cos(\theta) = I\ddot{\theta} \quad (5.1)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin(\theta) = -ml\ddot{x}\cos(\theta) \quad (5.2)$$

Estas equações descrevem um problema não linear, contudo toda teoria clássica de controle baseia-se em sistemas lineares. Portanto deve-se, primeiramente, linearizar as

equações em torno da região em que se deseja trabalhar. Neste trabalho existem duas regiões de interesse, a entorno de $\theta = 0$ (Estaticamente estável) e entorno de $\theta = \pi$ (Estaticamente instável). Para θ próximo de 0 (Haste para baixo) é válida as seguintes aproximações:

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \text{sen}(\theta) \rightarrow \theta \quad (5.3)$$

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \text{cos}(\theta) \rightarrow 1 \quad (5.4)$$

$$-Pl\theta - Nl = I\ddot{\theta} \quad (5.5)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\theta = -ml\ddot{x} \quad (5.6)$$

E para a região próxima de $\theta = \pi$ (Haste para cima):

$$\lim_{\theta \rightarrow \pi} \text{sen}(\theta) = -\theta \quad (5.7)$$

$$\lim_{\theta \rightarrow \pi} \text{cos}(\theta) = -1 \quad (5.8)$$

$$Pl\theta + Nl = I\ddot{\theta} \quad (5.9)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl\theta = ml\ddot{x} \quad (5.10)$$

Analisando estas equações no domínio de Laplace, obtém-se para θ próximo de 0:

$$\left. \frac{X(s)}{F(s)} \right|_{\theta \rightarrow 0} = \frac{(I + ml^2)s^2 + mgl}{s^4[(I + ml^2)(M + m) - (ml)^2] + (I + ml^2)bs^3 + mgl(M + m)s^2 + mglbs} \quad (5.11)$$

$$\left. \frac{\Theta(s)}{F(s)} \right|_{\theta \rightarrow 0} = \frac{-mls^2}{s^4[(I + ml^2)(M + m) - (ml)^2] + (I + ml^2)bs^3 + mgl(M + m)s^2 + mglbs} \quad (5.12)$$

E para θ próximo de π :

$$\left. \frac{X(s)}{F(s)} \right|_{\theta \rightarrow \pi} = \frac{(I + ml^2)s^2 - mgl}{s^4[(I + ml^2)(M + m) + (ml)^2] + (I + ml^2)bs^3 - mgl(M + m)s^2 - mglbs} \quad (5.13)$$

$$\left. \frac{\Theta(s)}{F(s)} \right|_{\theta \rightarrow \pi} = \frac{mls^2}{s^4[(I + ml^2)(M + m) + (ml)^2] + (I + ml^2)bs^3 - mgl(M + m)s^2 - mglbs} \quad (5.14)$$

É fácil perceber que as equações para os dois pontos de interesse são bastante similares a menos dos sinais de alguns termos e do termo que multiplica s^4 no denominador. Realizando-se a aproximação que $(I + ml^2)(M + m) \gg (ml)^2$ e supondo o coeficiente de atrito viscoso b muito pequeno, ainda pode-se reduzir as equações de movimento para as vistas abaixo:

$$\theta \approx \pi: \quad \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2(M + m)} \quad (5.15)$$

$$\frac{\Theta(s)}{F(s)} = \frac{ml}{(M + m)[(I + ml^2)s^2 - mgl]} \quad (5.16)$$

$\theta \approx 0$:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2(M + m)} \quad (5.17)$$

$$\frac{\Theta(s)}{F(s)} = \frac{ml}{(M + m)[(I + ml^2)s^2 + mgl]} \quad (5.18)$$

Segundo (RICCI, 2015) a transferência para um motor de corrente contínua que relaciona a potência aplicada P com a velocidade angular Ω tem o formato da equação 5.19. Onde τ representa uma constante de tempo mecânica e K um fator de escala.

$$G_m(s) = \frac{\Omega(s)}{P(s)} = \frac{K}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (5.19)$$

A força aplicada ao carro pode ser extraída através da 2ª Lei de Newton, como visto nas equações abaixo.

$$F_m = (M + m)a \quad (5.20)$$

$$F_m = (M + m)\frac{dv}{dt} \quad (5.21)$$

$$v = \omega R \quad (5.22)$$

Onde,

F_m - Força gerada pelo motor;

a - Aceleração sobre a massa total do sistema;

v - Velocidade linear do carro;

ω - Velocidade angular do eixo do motor;

R - Fator de escala para conversão de velocidade angular para linear

Resolvendo no domínio de Laplace, têm-se:

$$F_m(s) = \frac{(M + m)Rs}{(s + \frac{1}{\tau})}P(s) \quad (5.23)$$

Assim associando 5.23 com 5.15 e 5.16 obtém-se o modelo final para a planta em estudo linearizada para $\theta \approx 0$, como sendo:

$$\frac{X(s)}{P(s)} = \frac{KR}{s(s + \frac{1}{\tau})} \quad (5.24)$$

$$\frac{\Theta(s)}{P(s)} = \frac{mlKR s}{(s + \frac{1}{\tau})[(I + ml^2)s^2 + mgl]} \quad (5.25)$$

5.3 Relação com o Quadricóptero

Agora que o pêndulo invertido já foi formalmente apresentado é mais fácil correlacioná-lo com o quadricóptero.

A primeira vista os dois sistemas não aparentam ter correlação, no entanto observando atentamente pode-se tirar algumas conclusões:

Semelhanças

Quadricóptero

- Objetivo Principal: Controlar X , Y e Z
- Objetivo Intermediário: Controlar θ , ψ e ϕ
- É possível controlar X , Y e Z através dos ângulos θ , ψ e ϕ
- Uma vez controlado os ângulos θ , ψ e ϕ é possível controlar X , Y e Z através destes

Pêndulo Invertido

- Objetivo Principal: Controlar X
- Objetivo Intermediário: Controlar θ
- Uma vez controlado o ângulo θ é possível controlar X através deste

Diferenças

Quadricóptero

- Sistema com 6 graus de liberdade
- Não ocorre inversão no sentido de rotação dos motores
- É possível controlar X , Y e Z através dos ângulos θ , ψ e ϕ
- Limitação de deslocamento linear a depender do espaço ambiente disponível

Pêndulo Invertido

- Sistema com 2 graus de liberdade
- Ocorre inversão no sentido de rotação dos motores (Sensível a efeitos de banda morta)
- Limitação de deslocamento linear da ordem de 1.5 m

Basicamente pode-se utilizar a mesma lógica de controle em ambos os casos, ambas baseadas em sistemas de controle de posição linear e angular de forma acopladas.

5.4 Implementação

O sistema experimental utilizado (Figura 21) consiste de uma haste móvel acoplada a um carro. O carro move-se de forma horizontal sobre um trilho enquanto a haste apenas pode realizar movimentos de rotação em um plano paralelo ao de movimentação do carro. O carro é composto por um perfil de aço retangular que serve de fixação mecânica para o encoder absoluto utilizado para medição do ângulo. A movimentação do sistema é realizada através de um motor DC (Matrix Pro Lathe Motor 65T fabricado pela Integy) vinculado a uma caixa de redução planetária 8:1 que por sua vez está vinculado a um sistema de pinhão e correia dentada.

Para medição do ângulo e posição foram utilizados dois encoders absolutos AC58, fabricados pela Hengstler com 12 bits de precisão em uma única volta, 12 bits para contagem de voltas e saída paralela.

Todo o arranjo foi conectado ao ambiente de tempo real do Simulink através do microcontrolador Tiva C da Texas Instruments. O microcontrolador possibilita a leitura dos encoders e atuação no motor através de uma comunicação serial RS232 com o computador, o que permite acelerar o desenvolvimento e análise dos mais variados algoritmos de controle.

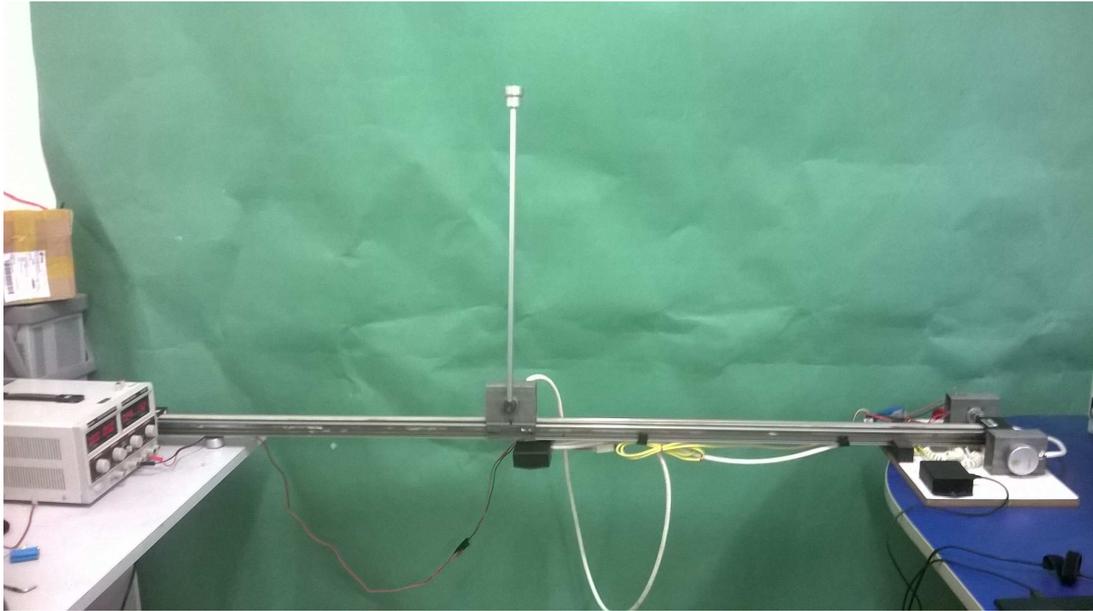


Figura 21 – Planta experimental

5.4.1 Aspectos práticos

Vários parâmetros que não foram considerados na modelagem matemática apresentada têm grande impacto na realização do sistema de controle. A seguir será exposto os aspectos, relacionados a implementação prática, que foram bastante relevantes para realização deste trabalho.

Outro aspecto relevante é com relação à dificuldade em se conseguir mensurar as variáveis necessárias para realização do controle das variáveis de interesse.

Motores

O motor apresenta uma não-linearidade conhecida como zona-morta. A zona-morta consiste em uma região onde não há uma movimentação do carro mesmo que a potência fornecida ao motor não seja nula. Este efeito pode ser visto como a força necessária para vencer o atrito estático entre o carro e o trilho.

Para analisar o efeito da zona-morta realizou-se um experimento com uma entrada de potência na forma de um onda triangular para determinar qual a potência necessária para que o carro inicie o movimento a partir do estado de velocidade zero. O resultado pode ser visto na figura 23.

Uma vez determinada a potência necessária para vencer o atrito estático, nas duas direções, realiza-se a correção deste efeito apenas adicionando este fator à potência de entrada, como pode ser visto na equação 5.26 e implementado pelo código na figura 22.

$$P_{saida} = \begin{cases} P_{entrada} + P_e^+, & P_{entrada} > 0 \\ P_{entrada} - P_e^-, & P_{entrada} < 0 \end{cases} \quad (5.26)$$

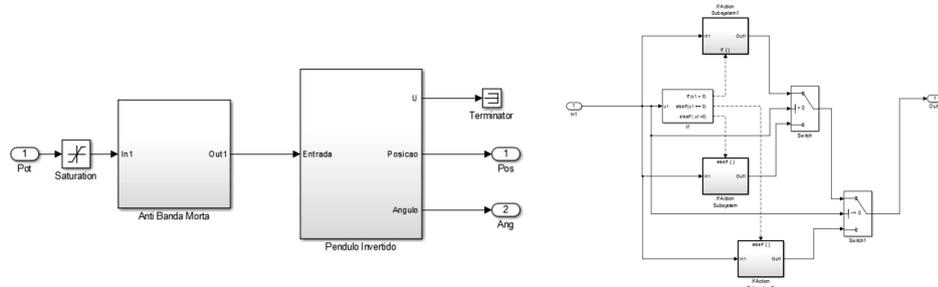


Figura 22 – Sistema Anti Banda Morta

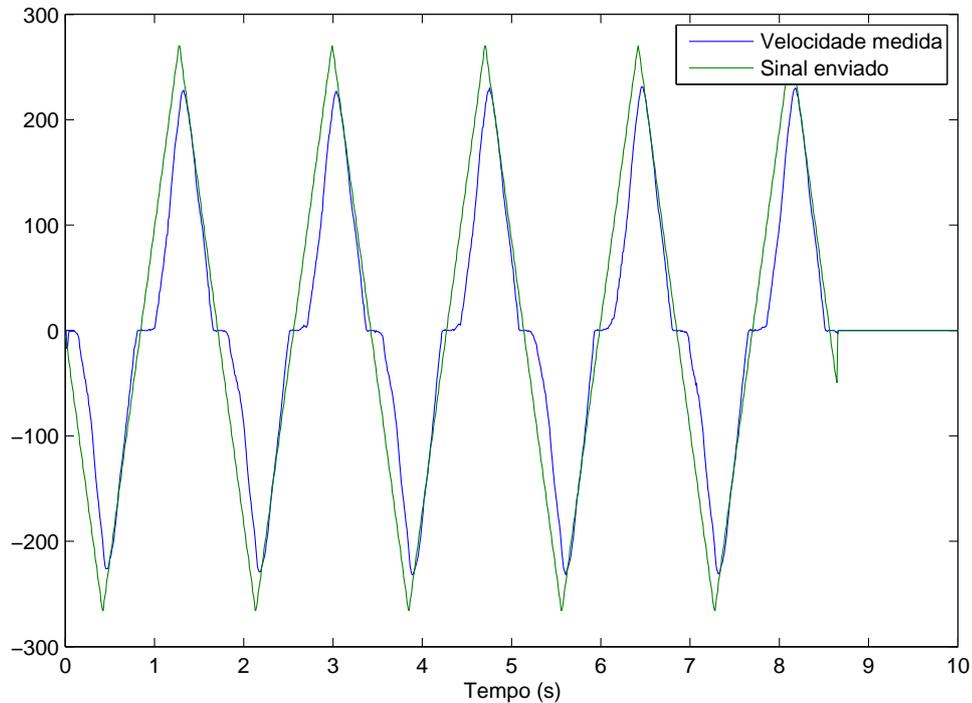


Figura 23 – Análise da zona-morta

O resultado desta modificação pode ser visto na figura 24, onde não mais se observa a região de banda-morta.

Leitura do encoder

O encoder utilizado possui uma interface paralela para transmissão de dados, ou seja, cada bit que informa a posição do rotor tem sua saída em um fio. Uma vez que o encoder tem uma resolução de 12 bits em uma única volta e mais 12 bits para a contagem de voltas, tem-se a necessidade de realizar pelo menos 24 ligações ao microcontrolador

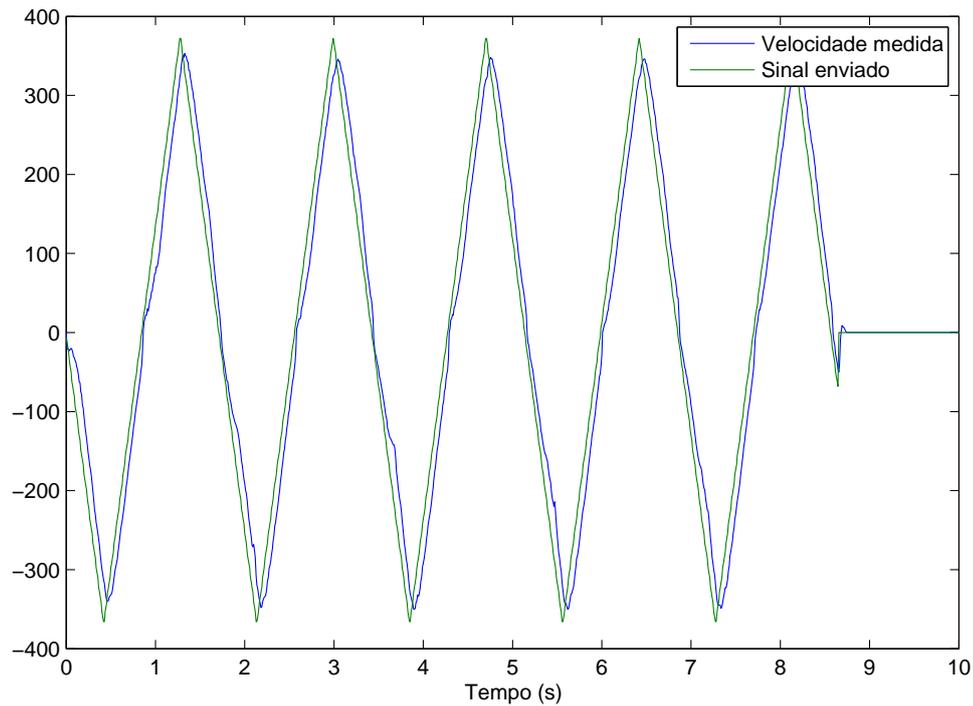


Figura 24 – Compensação da zona-morta

por encoder. Além disto a representação analógica dos valores lógicos dos bits é dada pela tabela 3, onde nota-se que o valor da representação do valor lógico 1 depende da tensão de alimentação do dispositivo, tensão esta que é especificada pelo fabricante como podendo variar entre 10 e 30 V. No entanto estes níveis não possibilitam a leitura direta através do microcontrolador pois ele só permite níveis entre, no máximo, 0 e 5 V.

Tabela 3 – Relação digital x analógico

Saída lógica	Saída analógica
1	$V_{cc} - 1.8 \text{ V}$
0	$\leq 1.2 \text{ V}$

Portanto, dado o grande número de conexões que seriam necessárias e a tensão de saída, a leitura dos mesmos foi implementada através de um circuito de serialização e condicionamento da tensão, composto por cinco registradores de deslocamento, onde cada registrador tem como entrada oito saídas dos encoders. Os dados provenientes de cada registrador de deslocamento são lidos serialmente enquanto os dados dos cinco registradores são lidos simultaneamente pelo microcontrolador que, por sua vez, tem a tarefa de remontar os bits em sua posição original. Neste arranjo são necessários apenas 7 fios para realizar a leitura sendo uma redução significativa na quantidade de ligações, frente as 36 ligações inicialmente necessárias. Destes 7 fios, 5 são responsáveis pela transmissão de dados, 1 pelo clock de transmissão serial e 1 para carregamento no registrador de uma nova leitura.

5.5 Interface com MATLAB

Para dispor de uma maior flexibilidade na extração de dados e implementação do sistema de controle foi implementada uma interface de comunicação entre o Matlab/Simulink e o microcontrolador. Esta interface permite que o Simulink consiga capturar os dados provenientes dos encoders em tempo-real e armazená-los e realizar o cálculo do sinal de controle. Após a realização dos cálculos necessários, é enviado ao microcontrolador, também em tempo-real, o valor do sinal de controle.

Comunicação

Foi utilizado a transmissão de dados serial com velocidade de 115200 bits por segundo emulada através de uma porta usb. A alta taxa de transmissão permite com que o tempo gasto para acesso ao microcontrolador seja muito pequeno em relação aos demais tempos envolvidos, como mostra a tabela 4.

Tabela 4 – Tempos envolvidos no cálculo de atraso

Intervalo de amostragem	10 ms
Tempo para transmissão/recepção de um pacote	≈ 0.12 ms
Tempo de cálculo	< 0.01 ms

Tempo-Real

Tempo-real é uma expressão que se refere a sistemas em que o tempo de execução de uma determinada tarefa independe da carga do sistema. Este tempo de execução de uma operação pode ser curto ou longo, mas o que importa para sistemas de controle é que a tarefa seja executada em um tempo determinístico. Um sistema de tempo-real trabalha com ordem de agendamento das tarefas e o gerenciamento de recursos para executar tarefas críticas no tempo correto ou informar imediatamente que a tarefa não poderá ser executada.

Assim, o objetivo de um sistema de tempo real rígido é garantir que todos os prazos sejam cumpridos. Essas garantias fortes são necessários em sistemas para os quais a falta de reação em um determinado intervalo de tempo causaria grande perda de alguma maneira.

O Matlab permite operações em tempo-real através da instalação do *kernel* de tempo-real disponibilizado pela Mathworks. Este *kernel* faz com os tempos necessários para realização dos cálculos e comunicação com o microcontrolador tenham valores determinísticos, o que não é uma característica dos sistemas operacionais instalados na maioria dos computadores utilizados. Ele informa ao sistema operacional que o processo e suas

threads têm prioridade mais alta possíveis e com isso é possível alcançar valores de atrasos com desvio padrão da ordem de $35 \mu s$.

Na figura 25 pode-se ver a diferença entre o atraso introduzido em uma comunicação serial entre o PC e o microcontrolador através de uma implementação sem o *kernel* de tempo-real e com o *kernel*.

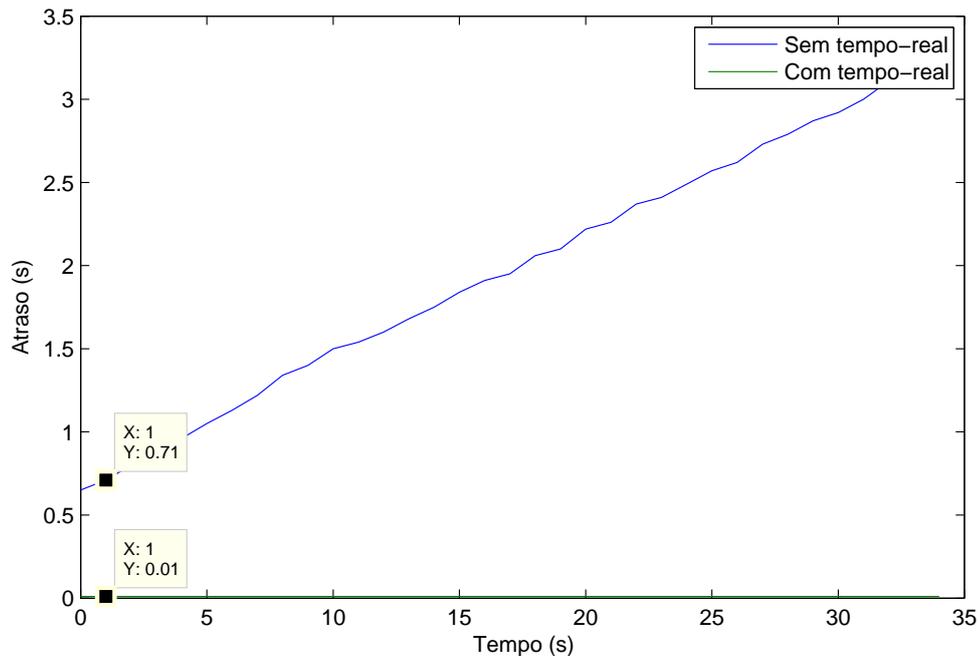


Figura 25 – Comparação entre os atrasos com e sem o kernel de tempo-real

Protocolo de comunicação

Para comunicação entre o microcontrolador e o PC foi estabelecido um protocolo de comunicação específico. Este protocolo roda sobre a comunicação RS232 e é definido pelos pacotes de transmissão (Figura 26) e recepção (Figura 27).

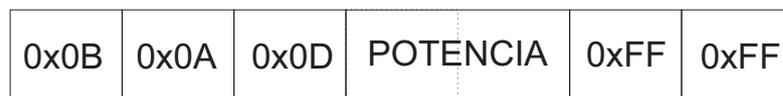


Figura 26 – Pacote de transmissão

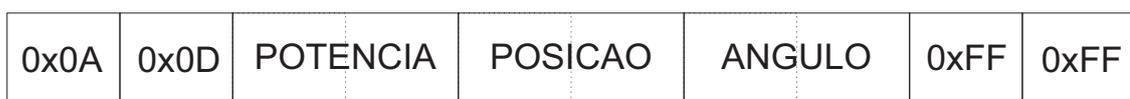


Figura 27 – Pacote de recepção

Na transmissão são enviados três *bytes* de início/sincronização, dois *bytes* referentes a potência desejada para o acionamento do motor e três *bytes* que indicam o fim do pacote.

Foi utilizado o software *Multichart* para o desenvolvimento e depuração do sistema de comunicação, ele desenha gráficos para conjuntos de três informações de 2 *bytes*, através do protocolo visto na figura 28. Devido a isto o tamanho das informações trafegadas foram adequadas a este padrão.



Figura 28 – Pacote para o software *Multichart*

Na recepção são recebidos dois *bytes* de início/sincronização, dois *bytes* referentes a potência desejada, dois *bytes* referentes a posição do carro, dois *bytes* referentes ao ângulo da haste, dois *bytes* referentes a potência desejada e três *bytes* que indicam o fim do pacote. A informação de potência desejada é transmitida de volta ao PC a fim de analisar se o sistema está sofrendo efeitos de atraso de transporte inseridos pela comunicação entre o PC e o microcontrolador.

Um ponto importante é que, dado este protocolo, a informação referente a posição não é transmitida com toda a resolução do *encoder*. Isto justifica-se pelo fato de que o tamanho da guia de movimentação do carro é limitado (1,5 m) e que a relação de rotação(voltas)/deslocamento(cm) ser de 1 para 7, assim sendo necessário aproximadamente 21,4 voltas para percorrer todo o percurso. Sabendo o número de voltas máximo, são necessários 5 *bits* para contabilizar o número de voltas inteiras mais 12 *bits* para as frações de voltas, totalizando em 17 *bits* para representação completa de toda a guia. No entanto, mesmo reduzindo a quantidade de informação necessárias para o envio, a quantidade de informações a ser enviada ainda supera em um *bit* o espaço destinado à mesma pelo protocolo. Para resolver impasse optou-se por não enviar o *bit* menos significativo uma vez que a perda de resolução não será de grande influencia no funcionamento do sistema de controle. Falando de forma quantitativa, sabe-se que em uma revolução completa do motor o carro percorre uma distância de 7 cm, com isso é possível afirmar que a resolução do *encoder*, em termos de distância, é de $17\mu m$. Portanto o descarte do *bit* menos significativo implica em alteração da resolução para $34\mu m$.

5.6 Identificação

A compensação da zona morta (Seção 5.4.1) tornou o sistema mais linear na região de interesse (Figura 24), possibilitando a extração de equações lineares que estabeleçam a relação entre o sinal de entrada e as posições do carro e da haste. Foi utilizado o procedimento descrito na seção 4.3.

Projeto do experimento

Foram realizados seis experimentos: três deles usando como entrada o sinal *PRBS* e os outros três usando o sinal degrau. Todos os experimentos foram realizados com o pêndulo em sua posição estável, ou seja, para baixo, uma vez que não é possível realizar qualquer experimento na sua posição com a haste para cima, pois nesta posição o sistema é intrinsecamente instável, levando a grandes variações do ângulo, que impediria a linearização. No entanto, como a equação que modela o sistema é a mesma para as duas posições apenas variando um sinal (Equações 5.16 e 5.18, pode-se aproveitar os parâmetros obtidos nos experimentos com a haste para baixo para inferir os coeficientes para a posição com a haste para cima.

Para todos os experimentos foi escolhido 100 Hz como frequência de amostragem. Esta frequência foi escolhida de forma comportar a análise de um sistema com sinais de posição linear e angular com frequências máximas de 50 Hz segundo o Teorema da Amostragem e aproximadamente 10 Hz do ponto de vista prático no trabalho com sistemas de controle.

De posse dos dados, os mesmos foram inseridos no software de identificação de sistemas do Matlab o IDENT. Este software procura minimizar o erro entre a saída real e a saída de um modelo, para isto o usuário apresenta ao programa um formato para a equação e o software calcula os parâmetros que tornam o erro entre as saídas mínimo.

Resultados

Foram capturados os dados vistos na figura 29, que por simplicidade visual mostra apenas três dos seis experimentos.

A partir dos dados obtidos obteve-se três relações entre as variáveis do sistema. Foi analisado a relação potência x ângulo, obtendo uma aproximação mínima de 87,80% e máxima de 93,43% para todos os experimentos, como pode ser visto na figura 30.

Nesta identificação foi extraída a função transferência vista na equação 5.27.

$$tf1 = \frac{1021.8(s^2 + 0.04465s + 0.06804)}{s(s + 15.84)(s^2 + 0.07811s + 17.58)} \quad (5.27)$$

Realizando a análise de pólos e zeros juntamente com o formato da equação teórica, nota-se que são cabíveis simplificações que tornam compatível a equação obtida experimentalmente com a esperada teoricamente. Chegando assim na equação 5.28, que despreza a existência de um pólo real na posição $s = -15.84$ devido a sua grande distância dos demais pólos do sistema além de desprezar o atrito entre o carro e o eixo de rotação da haste. Estas aproximações não impactam muito a fidelidade do modelo extraído com

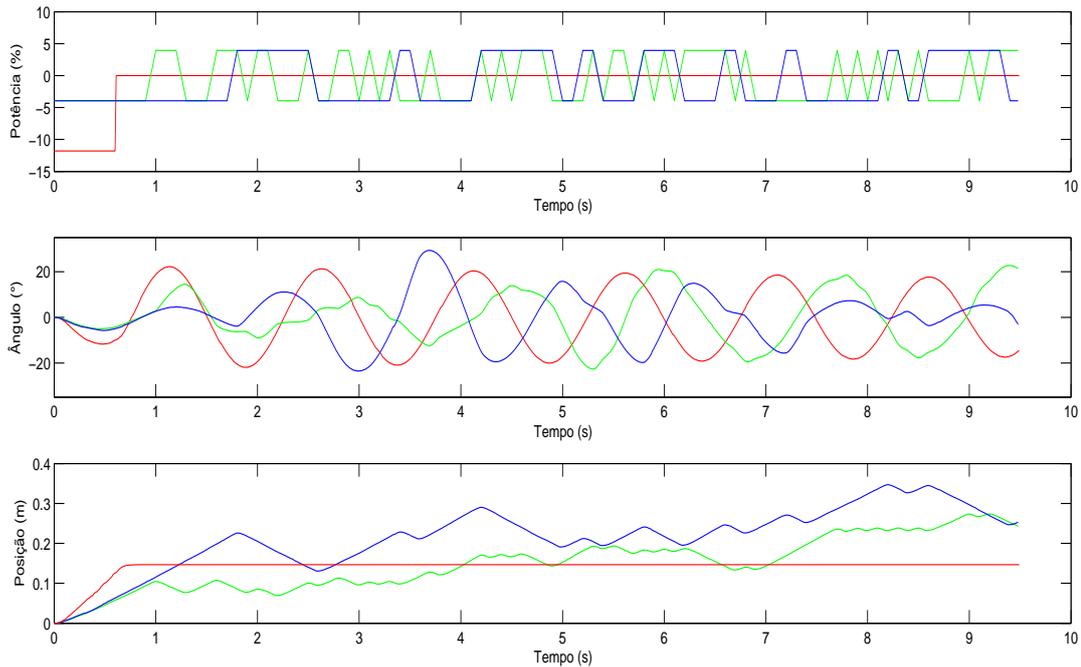


Figura 29 – Dados dos experimentos

os dados reais, apresentando uma aproximação de $\approx 75\%$ com os dados reais no pior dos casos o que ainda é considerado aceitável.

$$tf_phi_entrada = \frac{54.858s}{s^2 + 17.6} \quad (5.28)$$

Analisando a relação potência x posição foi obtido, através do IDENT, a equação 5.29, que proporciona uma aproximação mínima de 75,15% e máxima de 95,79% para o conjunto de dados estudados, como visto na figura 31.

$$tf9 = \frac{-22401(s^2 + 0.3749s + 0.2278)}{(s + 15.9)(s + 0.0294)(s^2 + 0.4417s + 0.1533)} \quad (5.29)$$

Após análise de pólos e zeros juntamente com o formato da equação teórica, chega-se a uma versão simplificada (Equação 5.30) desprezando o pólo existente em $s = -15.9$ pelos mesmos motivos da equação anterior e cancelando os zeros e pólos complexos conjugados dados por $s = -0.1875 \pm 0.4389i$ e $s = -0.2208 \pm 0.3233i$, respectivamente, devido a sua grande proximidade um com o outro. As aproximações realizadas não têm grades impactos com relação a fidelidade do modelo extraído, apresentando uma aproximação de $\approx 58\%$ com os dados reais no pior dos casos o que ainda é considerado aceitável devido a desconsideração de fenômenos como variação do atrito com a posição, no modelo.

$$tf5 = \frac{-1511.8}{s + 1.135e - 07} \quad (5.30)$$

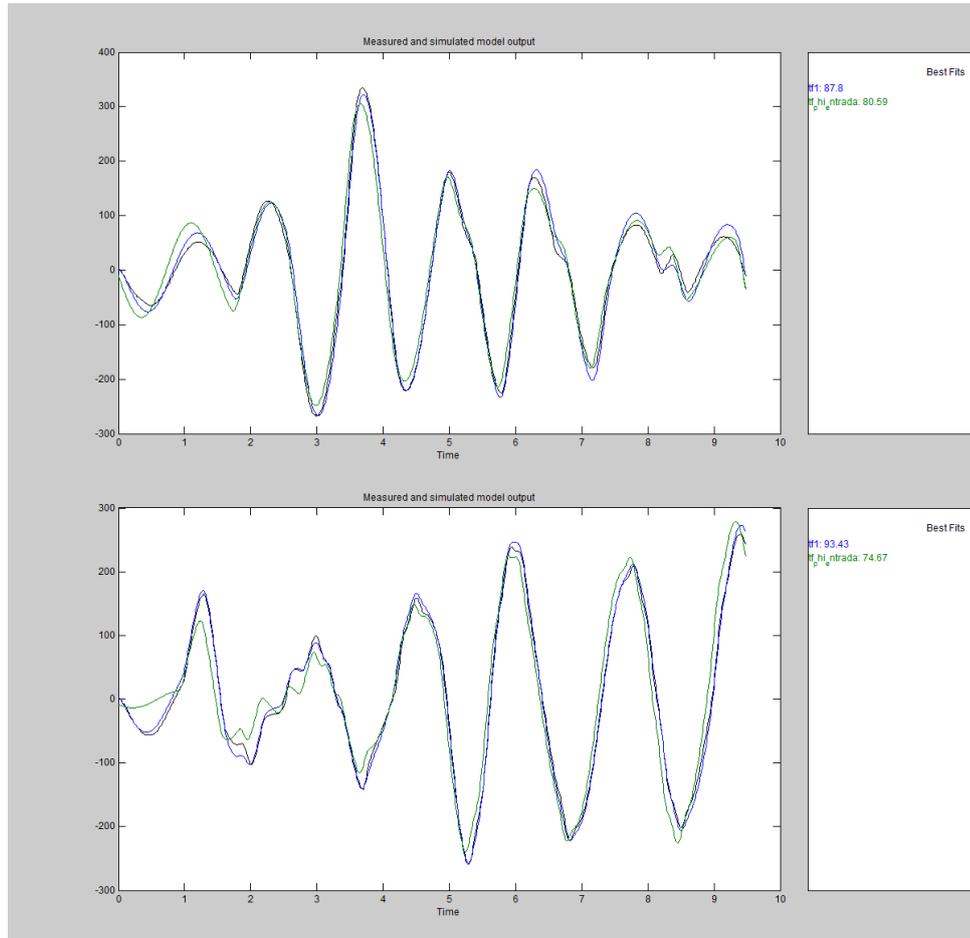


Figura 30 – Identificação Potência x Ângulo

Analisando-se a relação entre posição e ângulo obteve-se a equação 5.31 que teve aproximação mínima de 91,46% e máxima de 97,94%, como visto na figura 32. Valores bem mais consistentes que os encontrados anteriormente, devido ao fato que esta relação é independente de vários mecanismos geradores de não linearidades, como variação do atrito com a posição, folgas no sistema de transmissão de força e não linearidades inerentes do motor.

$$tf_{10} = \frac{-0.039187(s + 0.1559)(s - 0.132)}{s^2 + 0.05567s + 17.6} \quad (5.31)$$

Fazendo a comparação entre o esperado teoricamente e o obtido notou-se que poderia-se realizar uma aproximação para adequar a equação obtida ao formato esperado. Esta aproximação consiste em juntar os zeros $s = -0.1559$ e $s = 0.132$ em um zero duplo na origem além de considerar que não há atrito entre o carro e o eixo da haste, gerando assim a equação 5.32 que aproxima de maneira razoável as curvas desejadas, obtendo uma aproximação de $\approx 87\%$ no pior dos casos.

$$tf_{\text{phi_pos_2}} = \frac{-0.043176s^2}{s^2 + 17.6} \quad (5.32)$$

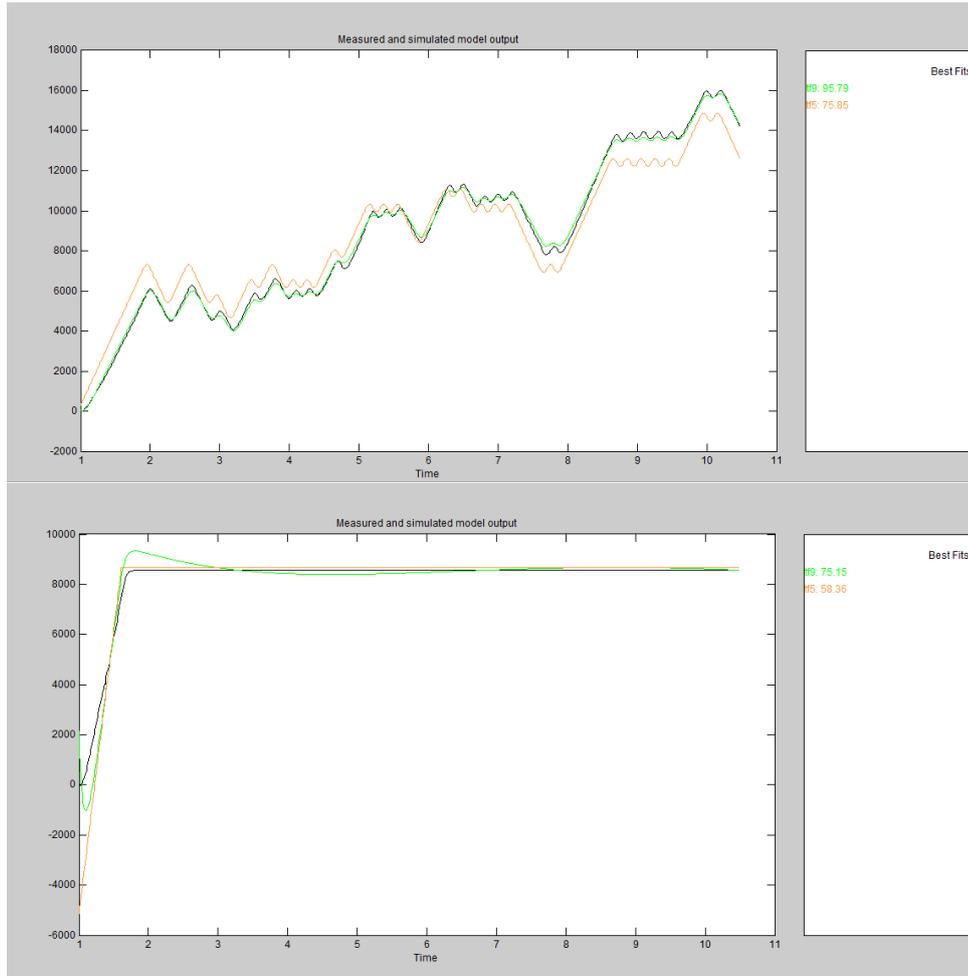


Figura 31 – Identificação Potência x Posição

Como resultado final foi obtido, em tempo real, a comparação entre o sistema real e o modelo. As figuras 33 e 34 mostram as respostas para o ângulo quando o carro é submetido a uma entrada senoidal e a uma entrada quadrada, respectivamente.

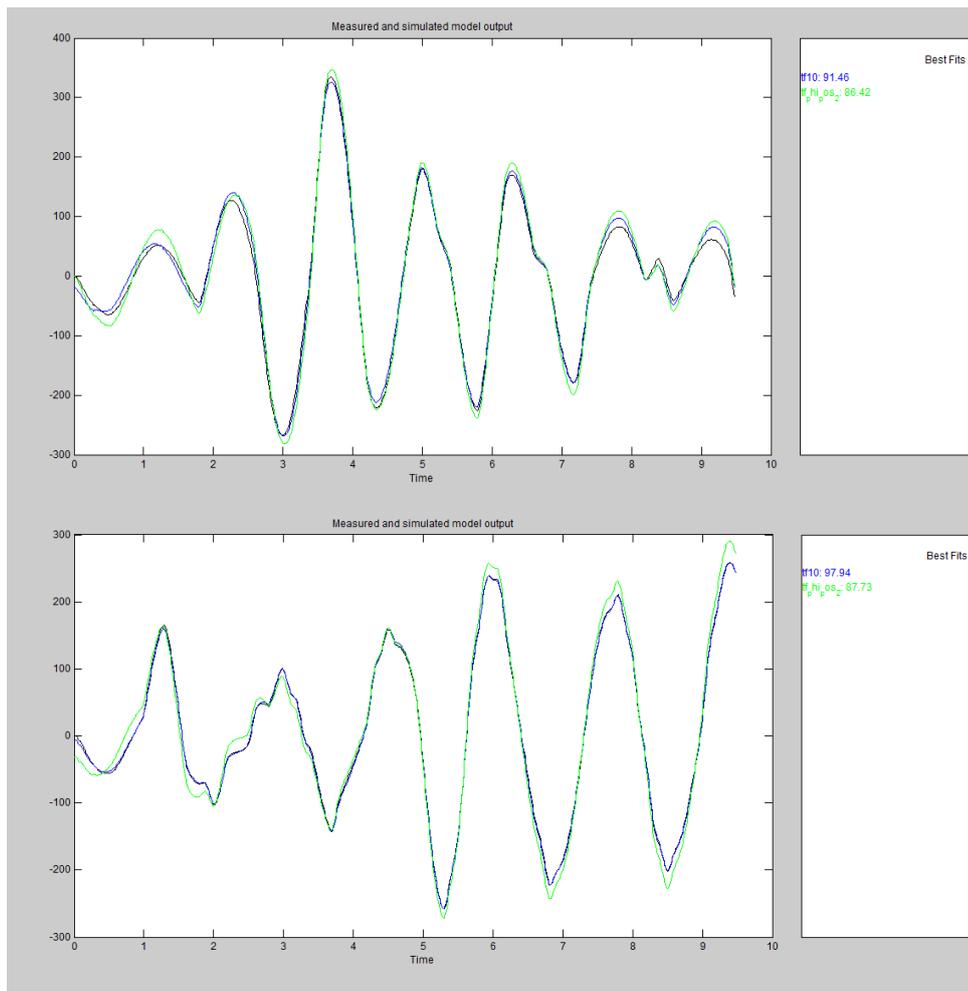
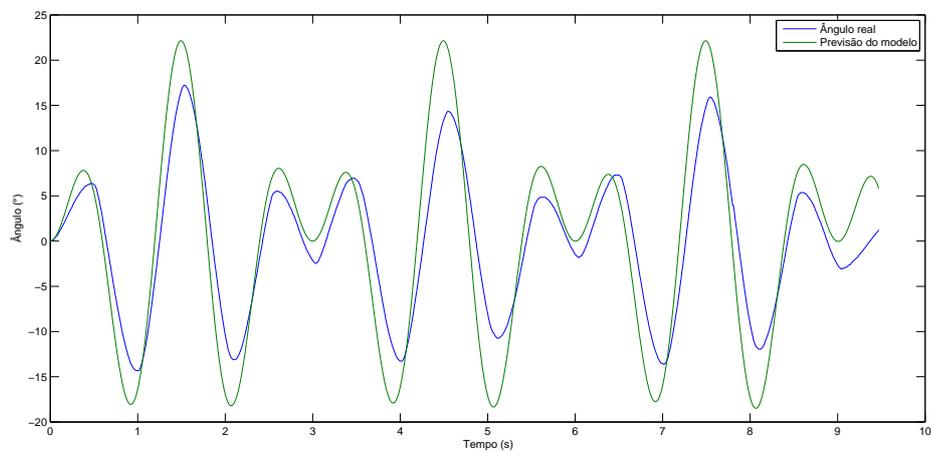
Figura 32 – Identificação Posição x $\hat{\text{Ângulo}}$ 

Figura 33 – Comparação entre previsão do modelo e medição real para uma entrada senoidal

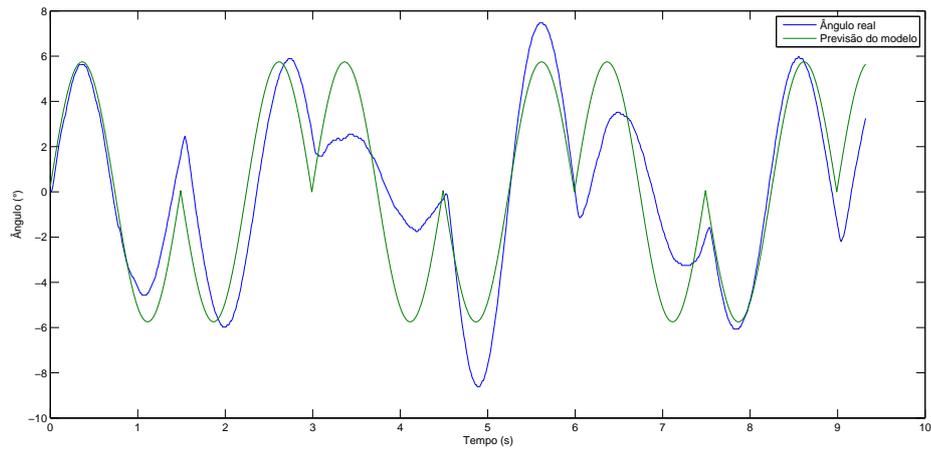


Figura 34 – Comparação entre previsão do modelo e medição real para uma entrada quadrada

6 Controle do pêndulo invertido

Foram implementadas duas topologias de sistemas de controle para a estabilização do sistema do pêndulo invertido, uma baseada no controle moderno (controle linear) e a outra baseada em controles adaptativos.

Lembrando que os controladores serão implementados digitalmente e portanto deve-se primeiramente definir qual a frequência de amostragem utilizada. Analisando as funções transferências obtidas no capítulo 5 é possível inferir, através de seus diagramas de Bode (Figuras 35, 36 e 37), que a frequência máxima em que o sistema fornece uma resposta útil é da ordem de 30 rad/s ou seja 4.78 Hz. Assim uma amostragem da ordem de 50 Hz já estaria bem especificada do ponto de vista de sistemas de controle, no entanto, como para realização dos experimentos de extração da função transferência foi utilizado uma frequência de 100 Hz e a escolha desta não implicará em prejuízos à implementação do sistema, optou-se por adotar uma amostragem com 100 Hz para implementação de todos os sistemas de controles desenvolvidos neste trabalho.

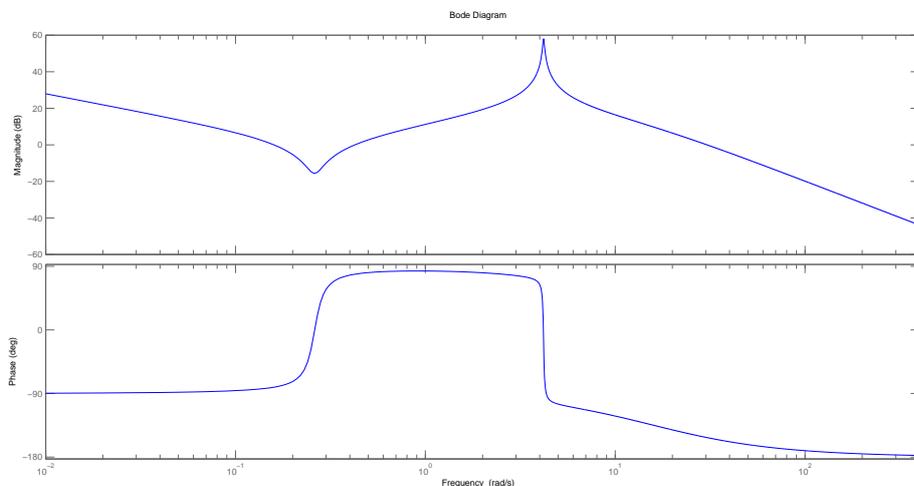


Figura 35 – Diagrama de Bode da relação Haste X Potência

6.1 Controle linear

Para o controle baseado na teoria clássica foi escolhido o controlador PID. Este controlador foi montado com a topologia vista na figura 38 e seus parâmetros foram ajustados manualmente com base na relação causa e efeito dos controladores proporcional, integral e derivativo e no controlador calculado com base na função transferência obtida.

Esta topologia difere da convencional em dois principais aspectos:

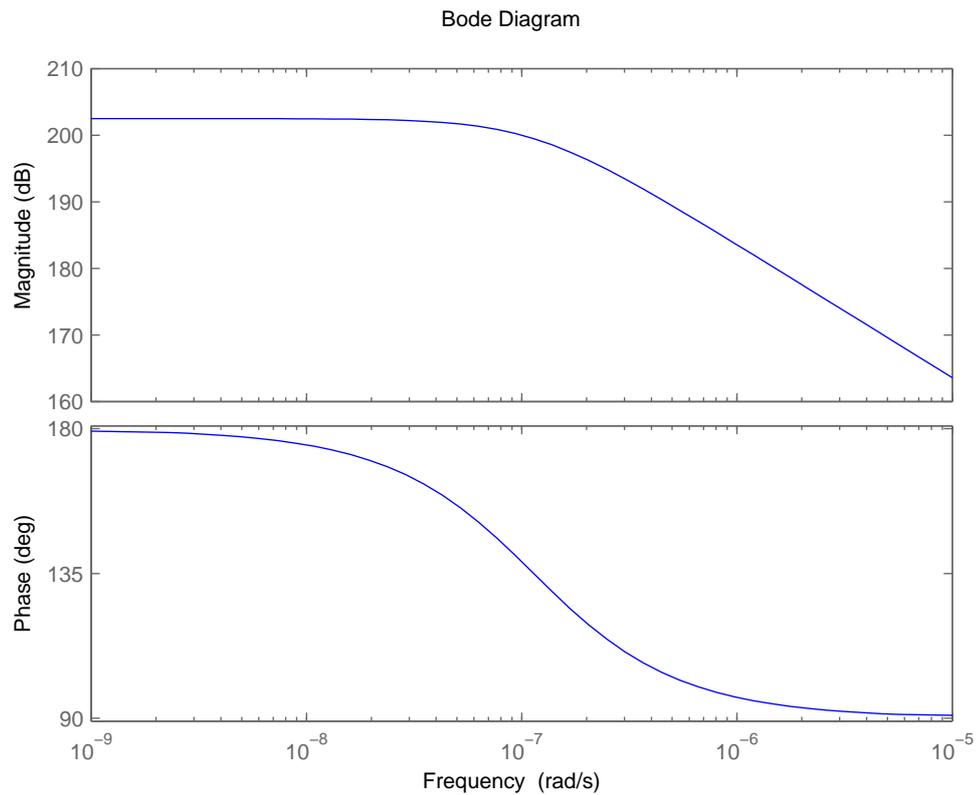


Figura 36 – Diagrama de Bode da relação Posição X Potência

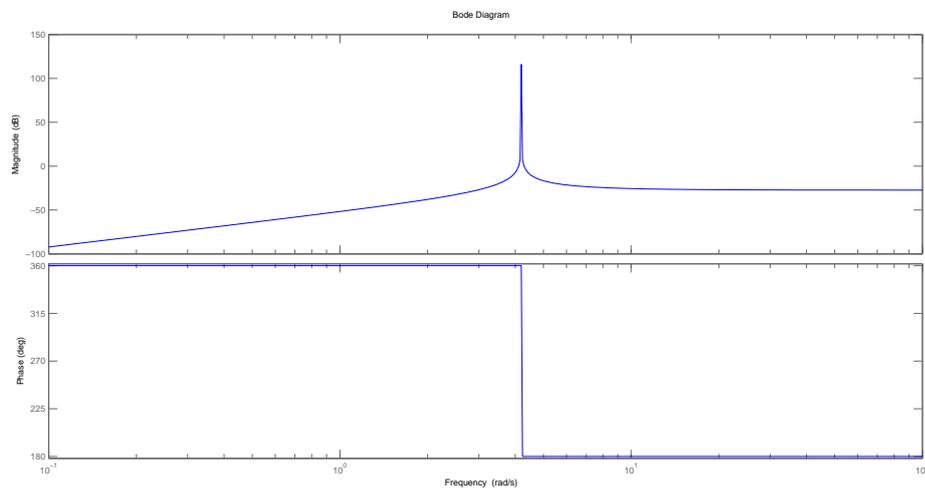


Figura 37 – Diagrama de Bode da relação Haste X Posição

1. A entrada do controlador derivativo é a própria grandeza a ser controlada. Esta alteração faz com que o controlador derivativo se torne imune a variações abruptas do setpoint (Ex: Entrada degrau). Caso não fosse feita esta mudança, a entrada de sinais com grandes derivadas neste tipo de controlador poderia instabilizar o sistema.
2. O controlador integrativo possui uma saturação. Isto faz com que o efeito de *wind-up*

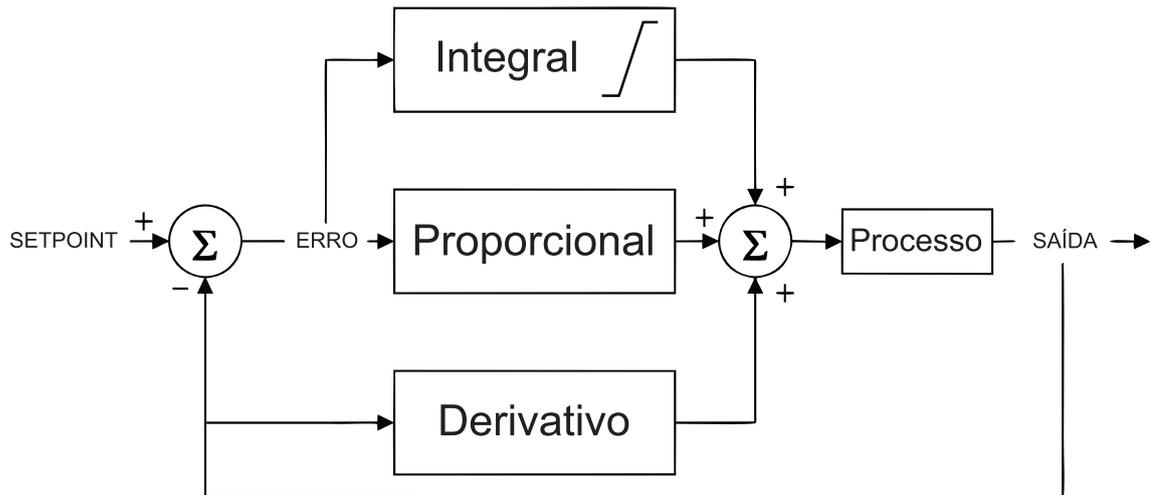


Figura 38 – Topologia do controlador PID

seja reduzido. No entanto essa alteração resulta em um controlador não linear que se não for bem administrado pode causar a instabilidade do sistema.

Para controlar as duas variáveis de interesse do sistema (posição do carro x e a posição angular ϕ) optou-se por realizar um controle em cascata, onde primeiramente implementa-se um controlador que estabiliza a posição angular para ângulos próximos a $\phi = \pi$ (haste para cima) independente da posição do carro. Uma vez controlado a posição angular a mesma é utilizada para controlar a posição do carro utilizando o seguinte fato, quando se deseja estabilizar o ângulo da haste em um valor menor que π o carro move-se para a esquerda, fazendo com que a haste se incline na direção desejada, e em seguida mova-se para a direita, de forma acelerada, a fim de manter a haste com a inclinação desejada. De forma análoga segue o movimento do carro para ângulos maiores que π , obtendo um movimento final para a esquerda. O único pré-requisito desta metodologia é que o sistema de controle interno (controle da haste) seja muito mais rápido que o sistema externo (controle da posição do carro), ou seja, o tempo de assentamento do *loop* interno seja bem menor que o do *loop* externo. A topologia utilizada para os controladores pode ser melhor entendida através da figura 39.

A implementação do controle PID para o ângulo pode ser visto na figura 40. Observa-se que ainda foi necessário a inclusão de uma banda-morta atuando sobre o erro que serve como entrada para as ações integral e proporcional. Isto fez com que o setpoint deixe de ser apenas um valor e se torne uma faixa de valores a fim de minimizar as constantes inversões de rotação do motor que movimenta dada pelo mínimo desvio do setpoint.

O controlador da posição (Figura 41) foi implementado de forma análoga ao do ângulo, mantendo as características já citadas. No entanto ainda foi necessário a introdução de dois filtros do tipo passa baixa: um para a suavização do sinal adquirido pelo encoder,

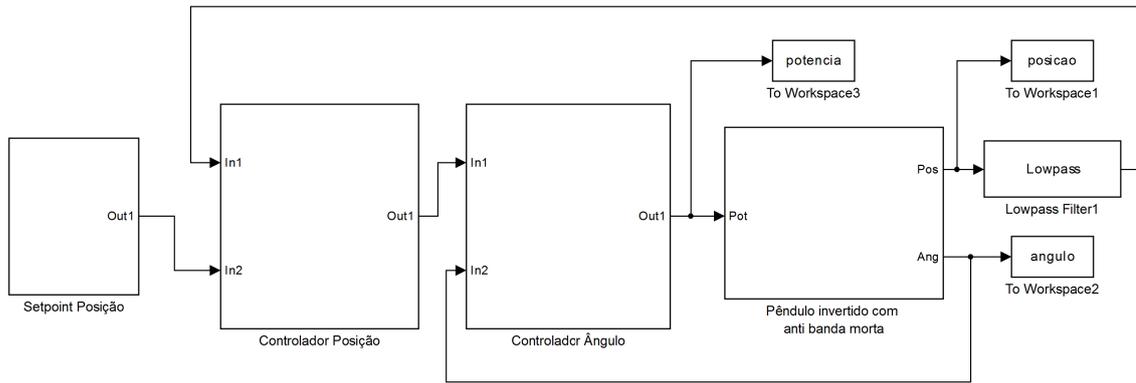


Figura 39 – Topologia para controle do pêndulo invertido

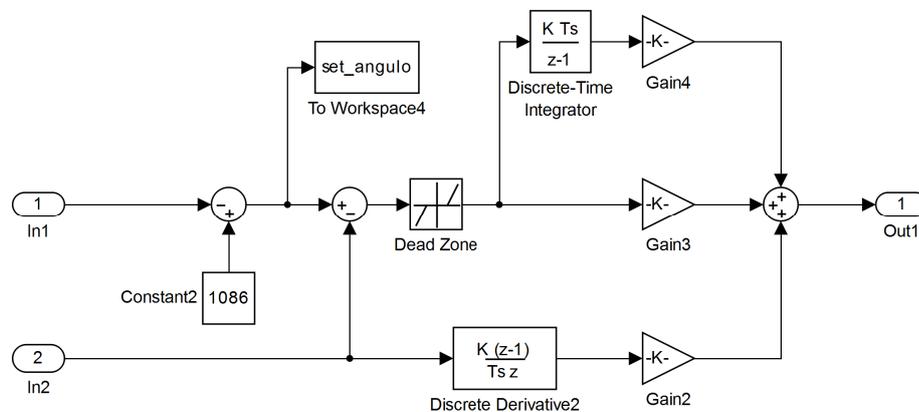


Figura 40 – Malha de controle de ângulo - PID

uma vez que ele captura, juntamente com a informação da posição, um sinal indesejado inserido pelo efeito de *backlash* (Efeito dado pelo intervalo vazio entre os dentes das engrenagens do sistema de transmissão) e outro para suavização da derivada, que apesar do filtro anterior ainda se encontrava sem estes filtros não seria possível a utilização do controlador derivativo visto que o efeito de *backlash* e as inversões de movimento necessárias para a estabilização do ângulo inserem componentes de alta frequência no sistema.

O resultado do sistema de controle completo pode ser observado nas figuras 42, 43 e 44. Na figura 42 têm-se a comparação entre a resposta real do ângulo e o desejado, onde se pode extrair informações relevantes sobre a qualidade do sistema de controle, como:

- Máximo sobrepasso: 1.17 cm
- Erro máximo em regime permanente: 0.42 cm
- Tempo máximo de assentamento: 2.8 s
- Recuo máximo: 2 cm

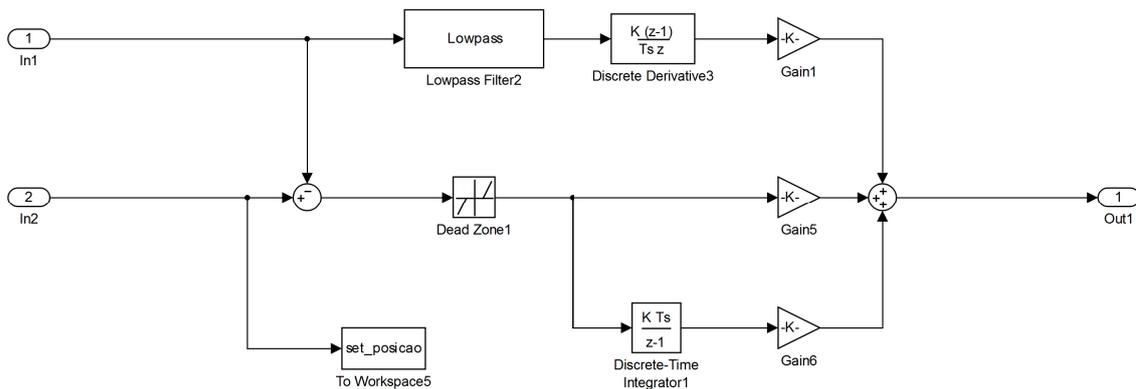


Figura 41 – Malha de controle de posição - PID

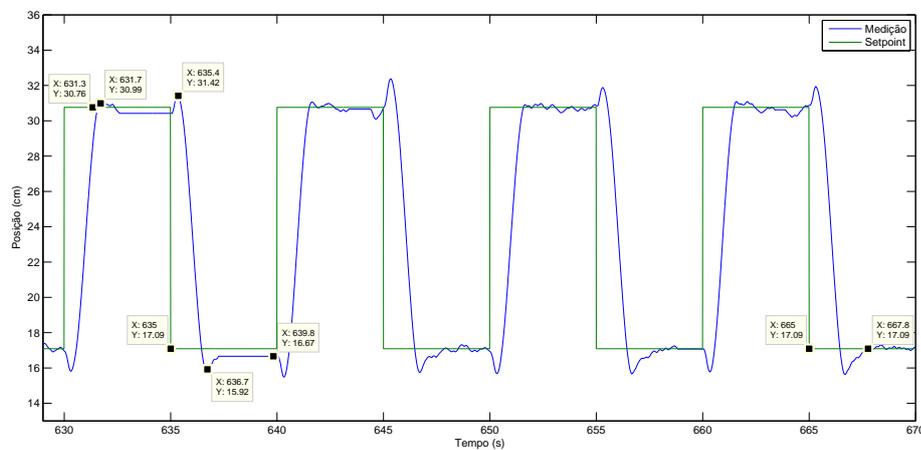


Figura 42 – Posicionamento do carro com algoritmo PID

Em relação ao ângulo observa-se, na figura 43, que o ângulo não teve variações maiores que $0,5^\circ$ quando em regime permanente e maiores que 3° no regime transitório. Também observa-se uma frequência de oscilação da ordem de 3Hz para o regime permanente, o que remete a compensações suaves para ajuste do ângulo.

6.2 Controle adaptativo

Para a implementação do controle adaptativa foi escolhido o projeto de um controlador MRAS baseado na realimentação de saída para um caso geral. Novamente foi utilizado o controle em cascata para realização do controle das duas variáveis de interesse. Para o controle interno do ângulo foi escolhido o modelo descrito pela equação discreta 6.1 como função transferência desejada para o comportamento do sistema Potência do motor X Ângulo.

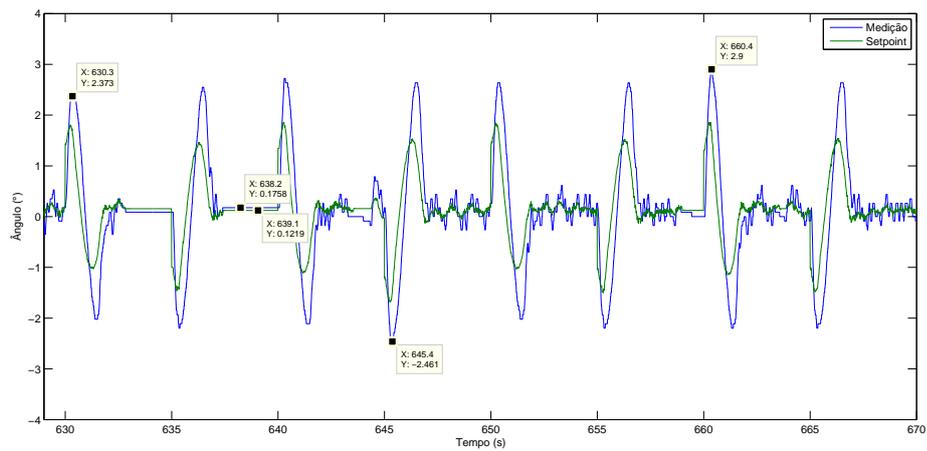


Figura 43 – Posicionamento da haste com algoritmo PID

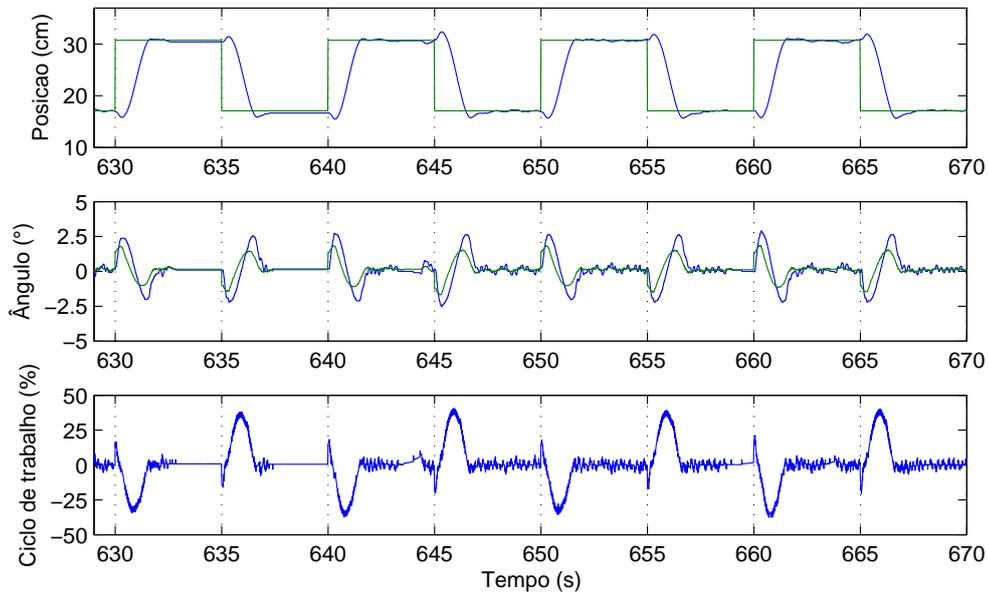


Figura 44 – Variáveis de interesse com algoritmo PID

$$Modelo = \frac{4.9767 \cdot 10^{-5}z + 4.9535 \cdot 10^{-5}}{z^2 - 1.9859z + 0.9860} \quad (6.1)$$

Este modelo possui respostas ao degrau e ao impulso, vistas nas figura 45, que representam o comportamento devido à mudança de setpoint e a tolerância a distúrbios, respectivamente.

Foi simulando em ambiente Simulink o comportamento do algoritmo de adaptação visto na figura 46.

Não foi possível obter resultados com a utilização dos controles adaptativos uma vez que uma das principais suposições não pôde ser satisfeita. Esta suposição fala que os

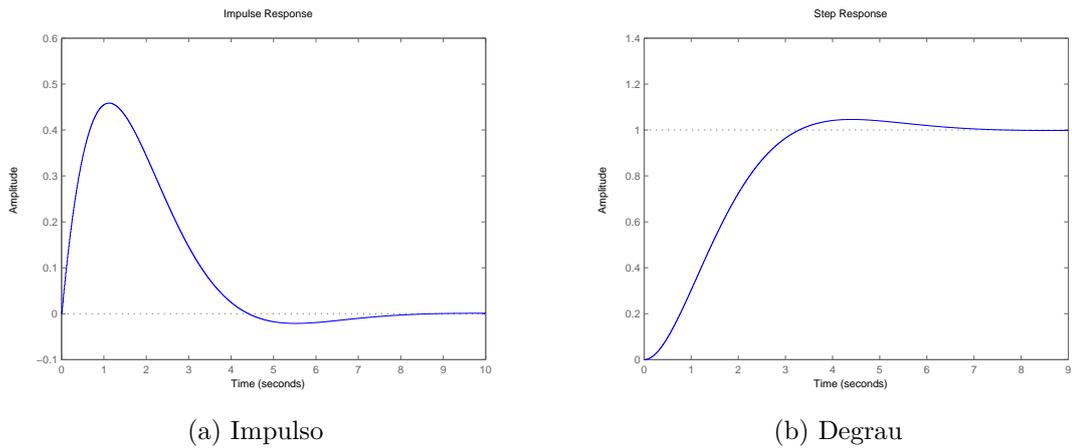


Figura 45 – Respostas ao impulso e ao degrau do modelo

parâmetros variam lentamente em relação aos tempos envolvidos no sistema, o que não é o caso da não-linearidade da zona-morta.

A variação abrupta entre o coeficiente de atrito entre o carro e o trilho, responsável pela zona-morta, faz com que o sistema não tenha tempo de adaptar-se e conseqüentemente deixe que a haste caia.

7 Conclusão

Neste trabalho foi especificado um veículo aéreo não tripulado para aplicação em inspeção de vasos de pressão.

Um levantamento dos ensaios não destrutivos mais utilizados na indústria revelou quais seriam cabíveis de serem realizados remotamente embarcados em um de um VANT. esta análise levou em conta questões como tamanho, peso, metodologia e energia necessárias à realização do ensaio, dadas as restrições inseridas pelo veículo que transportará os equipamentos. Foram escolhidos os seguintes ensaios:

- Inspeção visual
- Termografia

Os requisitos necessários para funcionamento do veículo foram obtidos por meio de uma análise fenomenológica da movimentação e das possíveis cargas (Material necessário aos ensaios não destrutivos) a bordo do mesmo, culminando em:

- Empuxo mínimo: 2 kg
- Autonomia com carga útil mínima: 40 min
- Temperatura de operação: 0 - 70 °C
- Estabilidade espacial: 10 cm sobre ventos de até 48 km/h

O último aspecto mencionado e a forma como é realizada a movimentação do veículo implica na necessidade de um sistema de controle eficiente e robusto. Como, no entanto, não dispomos de VANT para o desenvolvimento de um sistema de controle, optou-se por desenvolver o sistema de controle em uma plataforma simplificada, adequada para desenvolvimento de sistemas de controle e que tinha boa parte de seus componentes presentes no Laboratório de Eletrônica e Prototipagem Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, o pêndulo invertido.

Dois sistemas de controle foram desenvolvidos e aplicados ao pêndulo invertido: um PID e um adaptativo (MRAS). O controle adaptativo não teve sucesso na realização da estabilização do pêndulo dado que as não linearidades apresentadas pelo sistema real comprometiam a principal suposição realizada para o desenvolvimento do controlador, que era a de que os parâmetros do modelo variam lentamente. Já o controlador PID mostrou-se bastante robusto com relação a operação em regiões com não linearidades e variações

de parâmetros do modelo (Ex: massa do pêndulo), obtendo os seguintes parâmetro de desempenho.

- Máximo sobrepasso: 1,17 cm
- Erro máximo em regime permanente: 0,42 cm
- Tempo máximo de assentamento: 2,8 s
- Recuo máximo: 2 cm

Em suma, a utilização de veículos aéreos não tripulados como instrumentos de auxílio na inspeção em estruturas de difícil acesso reduz a exposição do inspetor a riscos e minimiza o tempo necessário para obter informações relevantes sobre o equipamento sob inspeção. Como estes aspectos influenciam diretamente sobre os custos relacionados ao funcionamento do equipamento, qualquer variação sobre eles implicam em uma alteração no custo final para fabricação de um determinado produto. No entanto para realizar tal trabalho é necessário um veículo bastante estável sob condições adversas, como já especificado, e isto remete em se ter um sistema de controle robusto ou adaptável.

Portanto conclui-se que embora a inspeção auxiliada por VANTs acarrete em ganhos, tanto financeiros quanto com a saúde do operador, há uma necessidade da implementação de um sistema de controle que corresponda as especificações. Atrelando um maior custo inicial ao desenvolvimento, mas que pode ser suprimido pelo ganho a médio e longo prazo.

Referências

- ABENDI. *ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO*. 2015. <<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>>. [Online: acessado 15/08/2015]. Citado na página 15.
- AMARANTE, O. A. C. D. et al. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. [S.l.: s.n.], 2001. <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico>. [Online; acessado 10/07/2015]. Citado na página 22.
- ANDREUCCI, R. *Ensaio por Ultra-Som*. 2015. <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAADI8AD/ultrason>>. [Online: acessado 18/08/2015]. Citado na página 19.
- BRASIL, E. A. *Petrobras reduz em 37% investimento para os próximos quatro anos*. 2015. <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-06/investimentos-da-petrobras-entre-2015-2019-priorizam-pre-sal-e-serao-37>>. [Online: acessado 13/11/2015]. Citado na página 13.
- BRESCIANI, T. *Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter*. [S.l.]: Department of Automatic Control, Lund University, 2008. Citado na página 34.
- CAMPOS, D. *Inspeção Visual*. [S.l.]: CEFET/BA, 2015. <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAvKYAB/inspecao-visual>>. [Online; acessado 11/06/2015]. Citado na página 16.
- ELKHOLY, H. talla M. N. *Dynamic Modeling and Control of a Quadrotor Using Linear and Nonlinear Approaches*. Dissertação (Mestrado) — School of Sciences and Engineering, Abril 2014. [Online: acessado 21/06/2015]. Citado na página 28.
- FERNANDES, N. dos S. Design and construction of a multi-rotor with various degrees of freedom. 2011. [Online: acessado 20/06/2015]. Citado na página 27.
- INDUSTRIAIS, L. S. End - ensaios não destrutivos. 2015. [Online; acessado 11/06/2015]. Citado na página 15.
- LUUKKONEN, T. Modelling and control of quadcopter. 2011. [Online: acessado 20/06/2015]. Citado na página 28.
- METAL-CHEK. *Líquidos Penetrantes*. 2015. <<http://www.metalchek.com.br/ensaios-nao-destrutivos/liquidos-penetrantes>>. [Online; acessado 11/06/2015]. Citado na página 17.
- MICHAEL, N. Quadrotor modeling and control. 2014. [Online: acessado 20/06/2015]. Citado na página 28.
- PIMENTEL, F. *Mercado dos drones voa alto em 2015*. 2015. B!T magazine. [Online: acessado 10/11/2015]. Citado na página 28.
- RICCI, M. C. MODELO MATEMÁTICO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA. Documentação disponível online, acessado em 20/05/2015. 2015. Citado na página 56.

SANTIAGO, E. F. Apostila de vasos de pressão. 2015. [Online: acessado 10/06/2015]. Citado na página 12.

TÉCNICAS, A. A. B. de N. *Forças devido ao vento em edificações*. Av. 13 de Maio, 13 - 28º andar, Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988. Citado na página 36.

TEIXEIRA, F. S.; SODRÉ, J. L. D. F.; JUNIOR, M. R. *O SISTEMA DINÂMICO PÊNDULO INVERTIDO: MODELAGEM E PROJETO DE CONTROLADORES POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL*. 2006. <http://www.netsoft.inf.br/aulas/7_EAC_Sistemas_Realimentados/MathLab_pendulo_invertido.pdf>. [Online; acessado 15/06/2015]. Citado na página 53.

WITTENMARK, K. J. Åström; B. *Adaptive Control*. 2ª. ed. 31 East 2nd Street, Mineola, N.Y. 11501: Dover Publications, Inc., 2008. Citado 3 vezes nas páginas 7, 46 e 49.