GLENAN ASSIS DO LAGO

**Eletrônica Embarcada para Ensaio de Posicionamento
Dinâmico em Tanque de Provas**

São Paulo, 2008

GLENAN ASSIS DO LAGO

**Eletrônica Embarcada para Ensaaios de Posicionamento
Dinâmico em Tanque de Provas**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Naval.

São Paulo, 2008

GLENAN ASSIS DO LAGO

**Eletrônica Embarcada para Ensaaios de Posicionamento
Dinâmico em Tanque de Provas**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Helio Mitio Morishita

São Paulo, 2008

*Este trabalho é dedicado à minha mãe,
Iara R. Assis Lago e ao meu pai, Paulo L.
Lago que, se estivesse aqui, certamente teria
me apoiado em todos os passos dados.*

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Helio Mitio Morishita, pelo fundamental apoio e tempo despendido na condução deste trabalho.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade deste curso de mestrado e pelos recursos humanos e físicos disponibilizados.

À Ana Paula Brambila, pela compreensão e incentivo no decorrer deste trabalho.

Ao mestrando Lázaro Moratelli Jr, pelo constante apoio técnico e pelas valiosas horas despendidas nos ensaios em laboratório.

Ao Professor Doutor Eduardo Aoun Tannuri, pelas importantes dicas nos ensaios experimentais.

A Diego Garcia Lopes e aos demais alunos do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP que de alguma forma contribuíram para o andamento das atividades deste trabalho.

À Petrobrás, pelo incentivo técnico e pelo apoio financeiro para a confecção de todo o material utilizado nos estudos.

Sumário

Lista de Figuras.....	7
Lista de Tabelas.....	8
Resumo.....	9
Abstract.....	10
1. Introdução.....	11
1.1. Considerações gerais.....	11
1.2. Descrição de um SPD.....	15
1.3. Revisão Bibliográfica.....	19
1.4. Objetivos.....	22
2. Modelagem Matemática.....	23
2.1. Modelagem do veículo.....	23
2.1.1. Movimentos de baixa frequência.....	23
2.1.2. Movimentos de alta frequência.....	24
2.1.3. Modelo completo.....	25
2.1.4. Modelo para filtro de Kalman.....	25
2.1.5. Modelo completo e o sistema de medição.....	27
2.1.6. Modelo completo discretizado.....	29
2.2. Filtro de Kalman.....	29
2.2.1. Teoria.....	29
2.3. Controle.....	32
2.4. Alocação de empuxos.....	34
3. Aparato experimental.....	36
3.1. Aparato eletrônico.....	38
3.1.1. Comunicação embarcada.....	39
3.1.2. Módulos de rádio.....	40
3.1.3. Módulos de motor DC e de passo.....	41
3.1.4. Módulo central.....	42
3.2. Sistema de aquisição da posição do modelo no tanque de provas.....	44
3.3. Console central.....	48
3.4. Modelo em escala.....	53
3.4.1. Aparato mecânico.....	54
3.4.2. Propulsores (motores elétricos).....	55
4. Ensaios.....	57
4.1. Motores dos propulsores.....	57
4.2. Ensaios de empuxos.....	61
4.3. Ensaios com o modelo.....	63
4.3.1. Estabilização do Filtro de Kalman.....	64
4.3.2. Ensaios com modelo vazio.....	65
4.3.2.1. Ensaio 1: águas paradas, posição fixa.....	67
4.3.2.2. Ensaio 2: águas paradas, posição variável.....	71
4.3.3. Ensaios com modelo cheio.....	73
4.3.3.1. Ensaio 3: águas paradas, posição fixa.....	74
4.3.3.2. Ensaio 4: águas paradas, posição variável.....	75
4.3.3.3. Ensaio 5: incidência de vento.....	77
4.3.3.4. Ensaio 7: incidência de onda.....	81
5. Conclusões e sugestões.....	86
6. Referências Bibliográficas.....	88

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Primeiras instalações para exploração marítima	12
Figura 1.2 - Operação de alívio. Navio aliviador conecta-se próximo ao FPSO [1]	13
Figura 1.3 - Diagrama de blocos de um SPD	15
Figura 1.4 - Graus de liberdade num navio [13]	16
Figura 1.5 - Propulsores num navio com SPD	17
Figura 2.1 - Sistemas de coordenadas	23
Figura 2.2 - Diagrama do bloco de estimação e controle	32
Figura 2.3 - Realimentação para cada movimento	33
Figura 2.4 - Modelo com 3 propulsores: 1 principal e 2 em túnel	35
Figura 3.1 - Topologia utilizada nos experimentos de Hamamatsu [3]	36
Figura 3.2 - Topologia utilizada nos experimentos deste trabalho	37
Figura 3.3 - Arquitetura embarcada	39
Figura 3.4 - Módulos de comunicação sem fio	40
Figura 3.5 - Módulo transceptor Radiotronix	41
Figura 3.6 - Módulo acionador de motores (DC e passo)	42
Figura 3.7 - Diagrama de blocos interno do módulo central	42
Figura 3.8 - Esquema de alimentações no módulo de acionamento de motores	44
Figura 3.9 - Imagem da tela mostrando a localização dos pontos luminosos no modelo	45
Figura 3.10 - Varredura do algoritmo de localização	46
Figura 3.11 - Evidências da distorção conhecida como “barril” provocada pela lente da câmera	46
Figura 3.12 - Fluxograma dos dados em Visual Basic	48
Figura 3.13 - Tela principal do programa em Visual Basic	49
Figura 3.14 - Fluxograma das funções em Matlab / Simulink	50
Figura 3.15 - Estrutura do sistema com filtro de Kalman e bloco de controle	51
Figura 3.16 - Módulo de leitura da referência e posição real do modelo	51
Figura 3.17 - Bloco de controle e alocação de empuxos	52
Figura 3.18 - Bloco de escrita das rotações dos motores para o Visual Basic	52
Figura 3.19 - Bloco do filtro de Kalman implementado	53
Figura 3.20 - Algumas vistas do casco do modelo	54
Figura 3.21 - Desenho mecânico de um propulsor em túnel [4]	55
Figura 3.22 - Conjunto do propulsor em túnel montado	56
Figura 4.1 - Arquitetura de cada propulsor de um SPD (real ou experimental)	58
Figura 4.2 - Controles superior e inferior (localizado)	58
Figura 4.3 - Diagrama de malha fechada para o controle de motor DC	59
Figura 4.4 - Ensaio de implementação do controlador de rotação de um motor DC	61
Figura 4.5 - Bloco de alocação de empuxos com destaque para os movimentos do propulsor principal	63
Figura 4.6 - Inicialização do posicionamento dinâmico	64
Figura 4.7 - Estabilização do filtro de Kalman	65
Figura 4.8 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)	68
Figura 4.9 - Erros (X,Y, Ψ) obtidos num ensaio de posicionamento	69
Figura 4.10 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos	70
Figura 4.11 - Comparativo entre a solicitação de rotação do controlador e a curva filtrada	70
Figura 4.12 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)	71
Figura 4.13 - Trecho em detalhe do movimento em X. A oscilação observada é amortecida	72
Figura 4.14 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw	72
Figura 4.15 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos	73
Figura 4.16 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)	75
Figura 4.17 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)	76
Figura 4.18 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw	76
Figura 4.19 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos	77
Figura 4.20 - Incidência de vento a 45°	78
Figura 4.21 - Incidência de vento a 90°	78
Figura 4.22 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)	79
Figura 4.23 - Desvios em Ψ para os dois casos de incidência de vento	80
Figura 4.24 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw	81
Figura 4.25 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos	81
Figura 4.26 - Ensaio com ondas. Posição inicial do modelo e sentido do deslocamento da referência	82
Figura 4.27 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)	83
Figura 4.28 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw	84
Figura 4.29 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos	85

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Itens do projeto eletrônico	38
Tabela 3.2 - Dimensões do navio típico e do modelo em estudo	53
Tabela 3.3 - Posições dos motores no modelo.	54
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios com propulsores.....	62

Resumo

No Brasil a exploração do petróleo está crescendo cada vez mais principalmente com as atividades offshore devido às constantes descobertas de novas jazidas em alto mar. Isto cria a necessidade de embarcações que garantam operações mais seguras o que pode ser obtido com aquelas dotadas de sistemas de posicionamento dinâmico.

O projeto de um sistema de posicionamento dinâmico não é simples sob o ponto de vista de controle já que é um sistema não-linear multivariável sobreatuado; e não é barato devido aos elevados custos de implementação. Portanto, para se projetar adequadamente este tipo de sistema é imprescindível a elaboração de meios para ensaiar toda a estrutura real em desenvolvimento num tanque de provas utilizando modelos em escala.

Neste trabalho é mostrado o projeto, construção e testes da eletrônica embarcada de um aparato experimental para ensaios de veículos oceânicos em tanque de provas, cujo projeto baseou-se em aspectos técnicos importantes para seu bom funcionamento como a descentralização dos processamentos necessários, a comunicação sem fio robusta com um console central responsável pelo processamento de todos os algoritmos do controlador superior e a preocupação com a compatibilidade eletromagnética do sistema.

O console central consiste de uma interface de comunicação com o usuário e dos blocos de controle que são o filtro de Kalman, o controlador e o alocador de empuxos.

Nos ensaios o desempenho da eletrônica é averiguado experimentalmente e os excelentes resultados obtidos mostram que o modelo responde de acordo com os comandos do controlador, principalmente com relação aos controles localizados para cada motor de propulsor contribuindo assim para o bom comportamento do conjunto.

Abstract

In Brazil the exploitation of oil is increasing mainly with the offshore activities due to the new found deposits. This situation requires more safety vessels which can be achieved using dynamic positioning systems.

As a dynamic positioning system is a multivariable non linear and overactuated system, its design is not simple; and it is also not cheap due to high implementation costs. Therefore, the development of experimental environments to adequately study and design this type of system is essential.

This work shows the embedded electronic project and assembly of an experimental setup in order to test floating vessel models. The project was developed based on important technical aspects to guarantee a good performance like processing decentralization, robust wireless communication with a central console responsible by the all control algorithms and the concern with eletromagnetic compatibility of the system.

The central console is composed by a human interface, control and Kalman filter structures and a thruster alocation algorithm.

The performance of the electronic structure is verified experimentally during the tests and the excelent results show that the model works in accordance to the controller commands, mainly related to local thruster control which contributes to the good system behavior.

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

Esforços para avanços tecnológicos no âmbito de recursos energéticos têm sido cada vez maiores como aproveitamento de energias renováveis, aumento na variedade e quantidade de biocombustíveis e até mesmo recursos híbridos, ou seja, a possibilidade de utilização de dois ou mais combustíveis num mesmo ponto de consumo.

Dentre todos os recursos energéticos disponíveis, o petróleo ainda é a principal fonte energética que move indústrias, automóveis e um grande mercado de derivados do dia a dia e ainda terá vida longa já que a substituição do petróleo por outras fontes alternativas mais limpas não é uma ação imediata e demanda grandes negociações políticas e avanços tecnológicos muito maiores dos que estão sendo investidos ultimamente.

No Brasil as principais fontes de petróleo se localizam em alto mar e recentemente novas jazidas foram descobertas pela Petrobrás em águas profundas onde a sua exploração se torna mais difícil e os custos se elevam bastante. Com base nisso a tecnologia vem tentando acompanhar essas necessidades e novas alternativas surgem ao longo do tempo.

A exploração do petróleo no mar teve seu início no final do século XIX na Califórnia e Mar Cáspio em estruturas instaladas na costa marítima e que conseguiam explorar no máximo 6 metros de profundidade (Figura 1.1). [1]

Figura 1.1 - Primeiras instalações para exploração marítima

Um próximo passo na exploração de petróleo e gás natural foi o desenvolvimento de plataformas tipo jaqueta que são estruturas ainda utilizadas compostas por uma torre de sustentação presa ao fundo do mar com tubulações que levam o petróleo à superfície sendo este tipo de estrutura viável técnica e economicamente somente para profundidades de até 500m. Com as limitações de exploração encontradas até este momento, foram necessários os desenvolvimentos de outras estruturas como os sistemas de amarração utilizados em navios de perfuração e plataformas submersíveis. Na década de 90 surgiram os FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading Systems), que são navios petroleiros amarrados. Eles exploram, armazenam e processam o petróleo e são largamente utilizados até hoje.

Para os FPSO's são necessárias operações de alívio para transportar o petróleo da plataforma para uma unidade de armazenamento em terra, no entanto, cuidados devem ser tomados com relação aos movimentos dos navios aliviadores nas proximidades das plataformas para evitar colisões pela deriva da embarcação ou por agentes ambientais agindo sobre o navio já que durante a operação o aliviador fica conectado muito próximo ao FPSO por dutos para a passagem do material (Figura 1.2).

Figura 1.2 - Operação de alívio. Navio aliviador conecta-se próximo ao FPSO [1]

Os cuidados com os movimentos do navio aliviador próximo a um FPSO resumem em ajustar constantemente sua posição mantendo a distância de segurança desejada para evitar colisões. A melhor maneira de ajustar constantemente a posição do navio durante uma operação de alívio é através de um sistema de posicionamento dinâmico com mínima interferência humana.

Os primeiros estudos de implementação de um sistema de controle e posicionamento automáticos da embarcação em alto mar foram iniciados em 1961 com o “Eureka”, primeiro navio cuja posição era controlada automaticamente através de controladores analógicos bastante simples utilizando como referência um sistema de amarração. No final da década de 70 o conceito do SPD, ou Sistema de Posicionamento Dinâmico (*Dynamic Positioning*, ou somente DP, em inglês) estava bem estabelecido e de lá para cá vários seguimentos da indústria offshore passaram a utilizar estes sistemas [2]. A utilização de SPDs cresceu significativamente ao serem empregados nas operações de alívio para exploração de petróleo.

A construção de um navio equipado com um sistema de posicionamento dinâmico tem custo bastante elevado dada a complexidade da estrutura envolvida. A necessidade de ajustar todos os parâmetros do controle automático do SPD com a embarcação em alto mar para que se obtenha a melhor resposta às diversas situações ambientais é fundamental para que todas as operações ocorram de forma segura, no entanto, também há um custo bastante elevado e dificilmente é possível ensaiar o comportamento do SPD frente aos diversos cenários encontrados em alto mar. Dessa forma, torna-se necessário criar ambientes de simulação para o sistema projetado, seja um ambiente de simulação computacional ou um ambiente experimental com modelos em escala. O fato de estudar o comportamento de um navio real através de simulações computacionais ou ensaios experimentais faz com que os custos de preparo de uma embarcação sejam menores e os ajustes se tornem mais seguros, já que todos os parâmetros do SPD podem ser projetados em laboratório.

Um ambiente de simulação computacional contém modelos do navio em estudo e, de uma forma geral, permite rápidos resultados em quaisquer situações, no entanto, esses modelos obtidos na teoria podem conter distorções da realidade podendo levar a resultados equivocados, prejudicando os resultados finais. Já um ambiente de ensaios experimentais contém um modelo em escala da embarcação e instrumentos para fazer com que se movimente num tanque de provas e responda aos comandos de um SPD. Aliando-se os resultados de uma simulação computacional com os ensaios em tanque de provas, é possível fazer iterações entre as simulações e os ensaios para ajustar os modelos teóricos envolvidos e melhor definir parâmetros de controle para um SPD real.

O domínio de uma tecnologia nacional para a realização de ensaios com sistemas de posicionamento dinâmico é preocupação dos pesquisadores nacionais, e atualmente está sendo realizado um esforço conjunto entre a Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio de Janeiro e a Petrobrás para realizar experimentos nos tanques de provas existentes no Brasil.

1.2. Descrição de um SPD

Sistema de posicionamento dinâmico pode ser descrito como um sistema capaz de manter o posicionamento de uma embarcação em alto mar utilizando para isso somente os motores e atuadores integrados ao barco, sem que seja necessário o auxílio de algum tipo de amarração, como âncoras. [2].

A manutenção de um comportamento em alto mar pode ser vista como a não alteração de uma posição desejada fixa ou de uma certa distância a partir de uma referência, por exemplo, o movimento relativo a uma plataforma.

A Figura 1.3 mostra um diagrama de blocos de um SPD com filtro de Kalman em que o sistema basicamente lê a posição e aproamento da embarcação, realiza a estimação dos estados do navio, compara com uma referência e realiza a correção atuando nos motores disponíveis, ou seja, o controle de um SPD é um sistema de malha fechada.

Figura 1.3 - Diagrama de blocos de um SPD

Além do controle da posição e aproamento, alguns sistemas também fazem o controle de trajetória e até mesmo o posicionamento da embarcação baseado nas condições ambientais em que a embarcação é automaticamente alinhada de forma a minimizar os esforços ambientais sobre ela e minimizar o consumo de combustível.

Uma embarcação (ou qualquer outro corpo) pode realizar movimentos em seis graus de liberdade, sendo três de rotação e três de translação. A Figura 1.4 mostra esses movimentos num navio.

Figura 1.4 - Graus de liberdade num navio [13]

Para o seu posicionamento é suficiente controlar apenas movimentos realizados no plano horizontal, ou seja, o avanço (surge) e a deriva (sway), os quais caracterizam a posição do navio, e o aproamento (yaw). Os demais movimentos não influenciam e não são controlados durante uma operação. Os três movimentos de interesse são medidos e comparados com uma situação desejada, ou seja, a referência (set-point). O sistema de posicionamento trabalha no sentido de minimizar o erro da comparação efetuada.

Um sistema de posicionamento dinâmico é constituído por um conjunto de sub-sistemas integrados que executam cada um uma tarefa distinta num SPD.

Sub-sistema de energia: é responsável por gerar, a partir de alternadores acoplados aos motores diesel, energia elétrica para toda a embarcação e, por conseguinte, para o sistema de posicionamento dinâmico.

Sub-sistema de atuação: os propulsores da embarcação fazem parte desse sub-sistema. São responsáveis por fazer a embarcação se movimentar fora de uma

operação de posicionamento dinâmico utilizando normalmente os motores principais e o leme e por funcionarem como elementos atuadores finais numa operação de posicionamento em conjunto com os motores configurados em túnel, os quais são instalados transversalmente no casco bem como os azimutais, que têm a vantagem de girar 360° e assim direcionar o empuxo gerado (Figura 1.5) . O número de atuadores num barco depende do seu tamanho, potência e redundância requeridas nas operações.

Figura 1.5 - Propulsores num navio com SPD

Sub-sistema de sensoriamento: é responsável por localizar a embarcação no plano horizontal e informar esta posição ao SPD para que os cálculos de possíveis correções possam ser feitos. O número de sensores e tipos de sensores instalados depende da precisão desejada na operação de posicionamento e na redundância requerida para a aplicação.

Algumas informações de condições ambientais são utilizadas pelo SPD a fim de realizar o controle por pré-alimentação (ou feedforward) através de sensores instalados por toda a embarcação. Esse tipo de controle compensa as perturbações de baixa frequência como, por exemplo, as perturbações causadas pelo vento. Já a consideração das forças provenientes de ondas e correntezas tem seu estudo intensificado apenas recentemente. A inclusão dessas medidas na malha de pré-alimentação melhoraria bastante a performance do SPD, já que tais

correções são feitas apenas quando a perturbação é medida pelo deslocamento da embarcação [1].

Sub-sistema de controle superior: é composto pela interface direta com os operadores através de computadores, consoles e telas de informação e por sistemas de aquisição e comunicação para realizar a interface com os diversos sensores instalados na embarcação. É responsável por executar todos os algoritmos que recebem as posições dos sensores e calculam as correções a serem feitas baseadas numa referência (ou set-point). Esses algoritmos podem ser desde os clássicos PIDs com movimentos desacoplados (um controlador para cada movimento: sway, surge e yaw) até os controladores baseados em modelos, os quais consideram as modelagens da embarcação e das forças ambientais.

Este sub-sistema é também responsável por realizar a alocação de empuxos. O resultado de um algoritmo de controle de SPD é um conjunto de forças e torques necessários para a execução da correção necessária, no entanto, este conjunto de forças e momentos precisa ser transferido para cada atuador da embarcação. Este é o processo de alocação de empuxos (ou TAL – Thruster Allocation Logic).

Sub-sistema de controle inferior: este sub-sistema é encontrado em cada atuador da embarcação (propulsores, azimutais e leme) e é responsável por garantir a rotação ou posição informadas pelo algoritmo de alocação de empuxos integrado ao sub-sistema de controle superior. Cada atuador tem seu próprio modo de controle (PID, robusto etc) e seu próprio conjunto de sensores.

O desenvolvimento dos mais modernos sistemas de posicionamento dinâmico é geralmente precedido de ensaios com modelos em escala reduzida em tanques de prova com a finalidade de se estudar as características dos propulsores e atuadores, dos algoritmos de controle e obter informações com relação a margens de segurança e, com isso, aperfeiçoar o projeto e deixá-lo mais robusto. Os resultados experimentais obtidos em ambientes de estudo de SPD podem ser extrapolados para aplicações reais auxiliando dessa forma o desenvolvimento de

novas tecnologias e o aprimoramento das existentes nesse importante ramo de exploração de petróleo em águas profundas.

1.3. Revisão Bibliográfica

Um sistema de posicionamento dinâmico integra conhecimentos de diversas áreas da engenharia, como naval, mecânica, matemática, elétrica e eletrônica, no entanto, neste trabalho será dada ênfase no desenvolvimento de um aparato experimental capaz de auxiliar nos estudos de controle de um SPD e realização de experimentos em laboratório.

Os controladores utilizados nesses sistemas evoluíram bastante ao longo de sua história, a saber:

Controladores de primeira geração: baseados no filtro cunha para eliminar os movimentos de alta frequência da embarcação e utilizavam-se de leis de controle clássico.

Controladores de segunda geração: utilizam filtro de Kalman embora a lei de controle seja a clássica. A utilização do filtro de Kalman foi proposta inicialmente por Balchen et al. [19] e desde então diversas propostas têm sido publicadas para a lei de controle. Ainda são largamente utilizados em muitos sistemas comerciais e são baseados em controladores PID multivariáveis com realimentação das variáveis de estado do modelo da embarcação.

Demais controladores: controladores ótimo tipo H_∞ foram tão importantes para os avanços dos SPDs quanto o filtro de Kalman [2], no entanto filtro de Kalman ainda é muito mais utilizado. H_∞ robusto foi desenvolvido para atender a casos de sistemas incertos e, de forma mais robusta, contemplar os erros de modelagem inerentes a qualquer modelagem teórica. Controladores Fuzzy foram também estudados para SPDs e, apesar de permitir que o projeto de controle seja mais rapidamente elaborado que nos demais tipos de controladores, podem apresentar

problemas para algum cenário não previsto no mapeamento de casos da lógica fuzzy.

Outro tópico que merece igual nível de profundidade nos estudos e que no entanto não recebe grande destaque na literatura é a alocação de empuxos. Há que se pensar também em algoritmos para a alocação do empuxo entre os propulsores de uma embarcação visando otimizar a utilização dos mesmos, redução de consumo de combustível e eficiência nos movimentos já que um navio com SPD é em geral sobreatuado, ou seja, o controlador fornece componentes de força em surge, sway e momento em yaw e o navio não tem apenas um motor para cada movimento, mas pode ter vários motores inclusive azimutais operando em conjunto.

Os controladores atuais baseados em filtro de Kalman, embora operem satisfatoriamente na maioria das situações, exigem um ajuste grande de parâmetros e o seu desempenho é degradado quando as condições ambientais se tornam severas. Em vista disto tem havido diversas propostas para garantir um bom desempenho do sistema em diversos estados de mar, por exemplo, o controle baseado em observadores não lineares [20]. Este controlador é baseado na teoria da passividade onde, segundo seus autores, é reduzido o número de parâmetros a serem estimados. Já um controle baseado em backstepping foi proposto por Fossen [21] e Mesquita [22].

Estudos de desempenho de um SPD com controladores deslizantes e robustos baseado na norma H_{∞} são apresentados em Tannuri [1] e [11].

Os trabalhos de caráter experimental são encontrados em Santos [14] e Lago e Veras [7] onde os autores desenvolveram um ambiente para o estudo de sistemas de posicionamento dinâmico em tanque de provas. Para isso foram desenvolvidos dois sistemas de localização da embarcação no tanque: o primeiro baseado em sensores de ultra-som e o segundo baseado em visão artificial. Um modelo simples em escala foi confeccionado e uma eletrônica em caráter experimental foi desenvolvida para o acionamento dos motores de potência.

Em Hamamatsu [3] foi realizado controle não linear em tempo real para o controle de trajetórias de embarcações. Mostra também um algoritmo ótimo para a alocação de empuxos dos atuadores e o tratamento do problema de alocação de empuxos em caso de falha de um atuador. O estudo é simulado computacionalmente e ensaiado com modelos em tanque de provas.

O sistema de visão artificial desenvolvido por Lago e Veras [7] e utilizado como importante ferramenta em ensaios reais foi bastante aperfeiçoado no decorrer do presente trabalho como, por exemplo, a inclusão de equações de correção da distorção da imagem e melhorias no rastreamento da embarcação no tanque de provas. Outros trabalhos correlatos [8] e [9] foram desenvolvidos no mesmo período.

No trabalho de Lago et al. [5], resultados de simulações computacionais foram comparados com ensaios experimentais num tanque de provas utilizando para isso um modelo em escala reduzida contendo apenas dois motores configurados em túnel e um motor principal. Mesmo utilizando um modelo com configurações bastante simples, os resultados ensaiados ficaram bastante próximos daqueles simulados no tanque numérico da USP (ambiente dedicado para a simulação de estruturas navais da Universidade de São Paulo).

Em outro trabalho de Lago et al. [6] os autores fazem uma análise de algoritmos de filtragem baseado em filtro de Kalman. Simulações são realizadas no tanque numérico da USP e três métodos de detecção da frequência de onda são estudados e comparados: o primeiro e o segundo são métodos que utilizam a técnica RPEM (Recursive Prediction Error Method) juntamente com o filtro de Kalman; já o terceiro método, proposto pelos autores, considera uma frequência de onda para cada movimento da embarcação, resultando em três variáveis adicionais para a estimação do filtro de Kalman.

1.4. Objetivos

Atualmente o Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP, além de investigar novas abordagens de controle, está construindo um modelo em escala reduzida para a realização de ensaios de posicionamento dinâmico. Esse modelo tem uma estrutura mecânica confeccionada pelo próprio Departamento e uma estrutura eletrônica, composta por módulos de potência para o acionamento dos diversos atuadores presentes na embarcação, módulos de comunicação via rádio e por fim, um módulo central responsável por gerenciar o funcionamento do modelo.

Os objetivos deste trabalho são:

- O desenvolvimento e implementação de toda a eletrônica que será embarcada no modelo;
- Implementação de controles localizados em cada propulsor do modelo;
- Integração da eletrônica com os componentes eletromecânicos embarcados;
- Ensaios com o modelo reduzido em tanque de provas empregando o material desenvolvido para verificação do funcionamento de toda a estrutura.

2. Modelagem Matemática

2.1. Modelagem do veículo

Este capítulo contém as modelagens necessárias para o entendimento do movimento de um corpo rígido em meio fluido no plano horizontal e o direcionamento da abordagem para a organização dos experimentos propostos. O movimento no plano horizontal tem parcelas de baixa frequência provocadas por agentes ambientais (corrente, vento e onda) e de alta frequência provocadas pelas forças de primeira ordem das ondas. Os sistemas de posicionamento dinâmico controlam somente os movimentos de baixa frequência, já que para controlar as perturbações de alta frequência seria necessário um montante de energia muito alto, além de provocar respostas bruscas dos atuadores do navio.

2.1.1. Movimentos de baixa frequência

Os movimentos de uma embarcação são tradicionalmente escritos em dois sistemas de coordenadas distintos (Figura 2.1): o primeiro é um sistema fixo à Terra, OXYZ, e o outro é fixo ao navio [12].

Figura 2.1 - Sistemas de coordenadas

A origem do sistema G_1 é na intersecção da secção média do navio com o plano longitudinal de simetria do mesmo. As equações resultantes, em relação ao sistema de coordenadas solidário à embarcação, são:

$$\begin{aligned}
(m + M_{11})\ddot{x}_{1L} - (m + M_{22})\dot{x}_{2L}\dot{x}_{6L} - M_{26}\dot{x}_{6L}^2 + B_{11}\dot{x}_{1L} &= F_{1Total} \\
(m + M_{22})\ddot{x}_{2L} + M_{26}\ddot{x}_{6L} + (m + M_{11})\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{22}\dot{x}_{2L} + B_{26}\dot{x}_{6L} &= F_{2total} \\
(I_Z + M_{66})\ddot{x}_{6L} + M_{26}\ddot{x}_{2L} + M_{26}\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{66}\dot{x}_{6L} + B_{26}\dot{x}_{2L} &= F_{6Total}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

onde I_z é o momento de inércia com relação ao eixo vertical; m é a massa da embarcação, B_{ij} são coeficientes de amortecimento, M_{ij} são termos de massa adicional e a força total dada por $F_{iTotal} = F_{iE} + F_{iT} + F_{iM}$ onde F_{1E} , F_{2E} , F_{6E} são as forças ambientais (corrente, vento e onda) de surge, sway e yaw; F_{1T} , F_{2T} , F_{6T} as forças e o momento gerados pelo sistema de propulsão e F_{1M} , F_{2M} , F_{6M} as forças e momento gerados por linhas de amarração caso existam. As variáveis $\dot{x}_1$ e $\dot{x}_2$ são as velocidades de baixa frequência de surge e sway e $\dot{x}_6$ a velocidade angular do movimento de yaw.

Já a posição e o aproamento da embarcação com relação ao sistema fixo à Terra são obtidos da seguinte relação, onde L é o índice que indica movimentos de baixa frequência.

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_L \\ \dot{Y}_L \\ \dot{\psi}_L \end{pmatrix} = T(\psi_L) \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix}; \quad T(\psi_L) = \begin{pmatrix} \cos(\psi_L) & -\sin(\psi_L) & 0 \\ \sin(\psi_L) & \cos(\psi_L) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

2.1.2. Movimentos de alta frequência

Os movimento de alta frequência são decorrentes das forças de onda de primeira ordem, e são modelados segundo os Operadores de Amplitude de Resposta (RAOs), que representam as funções de transferência entre o movimento e a onda incidente [1]. A abordagem baseia-se na linearidade da resposta dos movimentos de alta frequência e no desacoplamento com relação aos movimentos de baixa frequência.

As ondas do mar são descritas pelo espectro de potência da elevação da superfície livre $S(w)$. O espectro de potência P_{ii} do movimento de alta frequência x_{iH} do navio é, portanto dado por:

$$P_{ii}(w) = 2pRAO_i(w, b)^2 S(w) \quad 2.3$$

onde b é o ângulo de incidência da onda.

Através da realização temporal do espectro 2.3 é possível determinar um modelo linear para os movimentos de alta freqüência da embarcação.

2.1.3. Modelo completo

O modelo linear completo da embarcação reúne os modelos de baixa freqüência e alta freqüência anteriormente discutidos. Neste caso, tem-se:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ \mathcal{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ \mathcal{Y}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_H \\ Y_H \\ \mathcal{Y}_H \end{pmatrix} \quad 2.4$$

2.1.4. Modelo para filtro de Kalman

Para fins de controle utilizando o filtro de Kalman é conveniente expressar a dinâmica da unidade flutuante de modo alternativo para os movimentos de baixas e altas freqüências.

Para movimentos em baixas freqüências vale a expressão

$$\dot{x}_L = A_L x_L + B_L F_T + A_{EL} F_{EL} + E_L w_L \quad 2.5$$

sendo

$$A_L = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & T(\mathcal{Y}_L) \\ 0_{3 \times 3} & -M^{-1}D \end{bmatrix};$$

$$A_{EL} = B_L = E_L = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ M^{-1} \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} m + M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m + M_{22} & Mx_G + M_{66} \\ 0 & Mx_G + M_{26} & I_z + M_{66} \end{pmatrix};$$

$$D = \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & B_{26} \\ 0 & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix}$$

O vetor de estados, neste caso, fica $\mathbf{x}_L = (X_L \ Y_L \ y_L \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_6)^T$. 2.6

F_T é um vetor composto pelas forças e momentos dos propulsores, F_E é outro vetor formado por forças externas de baixa frequência e pelo momento associado (incluindo forças ambientais e de eventuais amarrações existentes). M é a matriz de massas (incluindo massas adicionais) e D é uma matriz de amortecimentos. Já ω_L é um vetor contendo ruído branco Gaussiano de média zero com covariância Q_L ($\omega_L \sim N(0, Q_L)$).

As forças F_E são forças ambientais cujo comportamento tem variação lenta e desconhecida, e podem ser modeladas por:

$$\dot{F}_E = \omega_{FL} \quad 2.7$$

onde ω_{FL} é um vetor contendo ruído branco Gaussiano de média zero e matriz de covariância dada por Q_{FL} ($\omega_{FL} \sim N(0, Q_{FL})$).

Para o equacionamento dos movimentos em altas frequências considere x_{iH} a saída de um sistema linear com função de transferência $h(s)$ e excitação $w_H(s)$ (ruído branco gaussiano com potência espectral unitária ($P_{w_H w_H}(w) = 1$)). Saelid et al. [23] propuseram a seguinte função de transferência:

$$h(s) = \frac{2ZW_0 S_w s}{s^2 + 2ZW_0 s + W_0^2} \quad 2.8$$

sendo z um fator de amortecimento e w_0 a freqüência de pico do espectro $P_{ii}(w)$. Reescrevendo o modelo em variáveis de estado (e para o índice H representando movimento de alta freqüência), têm-se:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{x_i} &= x_{iH} \\ \dot{x}_{iH} &= -2zw_0 x_{iH} - w_0^2 x_{x_i} + w_{iH}, \text{ para os três graus de liberdade } i = 1, 2 \text{ ou } 6\end{aligned}\quad 2.9$$

Observa-se que as freqüências de pico para os três graus de liberdade são iguais, pressupondo-se que são próximas à freqüência de pico da onda.

Para o vetor de estado dado por $x_H = (x_{x_1} \ x_{x_2} \ x_{x_6} \ x_{1H} \ x_{2H} \ x_{6H})^T$, o modelo completo de alta freqüência fica:

$$\dot{x}_H = A_H x_H + E_H w_H \quad 2.10$$

para

$$A_H = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -w_0^2 I_{3 \times 3} & -2zw_0 I_{3 \times 3} \end{pmatrix};$$

$$E_H = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

e vetor w_H composto por ruídos brancos gaussianos de média zero e matriz de covariância $Q_H (w_H \sim N(0, Q_H))$.

2.1.5. Modelo completo e o sistema de medição

Num sistema de posicionamento dinâmico o sistema de medição realiza a localização da embarcação no ambiente medindo três componentes somadas:

- Movimento de baixa freqüência;

- Movimento de alta frequência;
- Ruídos inerentes ao sistema de medição.

Dessa forma, reescrevendo o modelo completo obtido, tem-se:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{F}_T + \mathbf{E}\boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{z} &= \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}\end{aligned}\tag{2.11}$$

ou seja, o sinal medido ($\mathbf{z}$) por um sistema de localização da embarcação fornecerá:

$$\mathbf{z} = \begin{pmatrix} X_L + X_H + v_X \\ Y_L + Y_H + v_Y \\ \mathcal{Y}_L + \mathcal{Y}_H + v_y \end{pmatrix}\tag{2.12}$$

onde $\mathbf{v} = [v_X \quad v_Y \quad v_y]^T$ é um vetor contendo ruído branco de média zero $\mathbf{R}$ ($\mathbf{v} \sim N(0, \mathbf{R})$) que representa um erro adicional do sistema de localização.

As matrizes $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{E}$ e $\mathbf{H}$ são dadas pela associação óbvia das equações 2.5, 2.7, 2.10 e 2.12.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_L \\ x_H \\ F_{EL} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_L^{6 \times 6} & 0^{6 \times 6} & A_{EL}^{6 \times 3} \\ 0^{6 \times 6} & A_H^{6 \times 6} & 0^{6 \times 3} \\ 0^{3 \times 6} & 0^{3 \times 6} & 0^{3 \times 3} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_L^{6 \times 3} \\ 0^{6 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} \end{pmatrix};$$

$$E = \begin{pmatrix} E_L^{6 \times 3} & 0^{6 \times 3} & 0^{6 \times 3} \\ 0^{6 \times 3} & E_H^{6 \times 3} & 0^{6 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} & I^{3 \times 3} \end{pmatrix};$$

$$H = \begin{pmatrix} I^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} & I^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} \end{pmatrix}.$$

2.1.6. Modelo completo discretizado

Como mencionado anteriormente, a abordagem da modelagem visa chegar numa forma mais adequada para aplicação em experimentos em laboratório, ou seja, de modo que possa ser executado num ambiente computacional. Dessa forma, o modelo composto pelos movimentos de alta frequência e baixa frequência e pelo sistema de referência deve estar na forma discreta, para posterior aplicação no Filtro de Kalman.

Uma forma simples de discretizar o modelo é considerar a seguinte aproximação por “backward difference” $\dot{x}[k] \cong \frac{x[k] - x[k-1]}{\Delta t}$, sendo Δt o intervalo de amostragem. Obtém-se, por conseguinte, o modelo completo discretizado:

$$\begin{aligned} x[k] &= f(x[k-1], F_T[k-1], w[k-1]) \\ z[k] &= Hx[k] + v[k] \\ f(\cdot, \cdot) &= (A(x)\Delta t + I)x[k-1] + B\Delta t F_T[k-1] + E\Delta t w[k-1] \end{aligned} \tag{2.13}$$

2.2. Filtro de Kalman

2.2.1. Teoria

O filtro de Kalman fora introduzido em sistemas de posicionamento dinâmico na segunda geração de controladores e permitiu avanços significativos nesta área. É responsável por estimar os estados do modelo da embarcação e fornecer tais estimativas para que o controlador possa calcular os erros de posição e

aproamento e gerar as forças para cada direção. Essa estimação é capaz de distinguir os movimentos de baixa e alta frequência, além dos esforços ambientais incidentes sobre a embarcação. Deve-se ressaltar que o filtro de Kalman deve ser projetado levando-se em conta o modelo da embarcação e sistema de medição incluindo os ruídos de medição.

Há dois estágios no algoritmo do Filtro de Kalman: predição e correção. O primeiro estima quais são os próximos valores das variáveis de estado do modelo, e o segundo leva em conta a medida do sistema de referência e corrige os ganhos internos do preditor para que possa realizar predições subseqüentes mais acuradas. Essa capacidade de corrigir seus ganhos internos de forma a melhorar as predições é uma grande vantagem do Filtro de Kalman, pois os erros de modelagem e até mesmo do sistema de referência acabam sendo minimizados nessas operações.

Para a construção do filtro de Kalman, considerar:

$\bar{x}$ a estimativa a priori,

$\hat{x}$ a estimativa a posteriori,

$\bar{X}$ a matriz de covariância do erro de estimação a priori,

$\hat{X}$ a matriz de covariância do erro de estimação a posteriori,

K a matriz de ganhos de Kalman,

e incorporando o modelo discretizado da equação 2.13, o equacionamento do filtro de Kalman discreto fica [1]:

Predição:

$$\bar{x}[k+1] = f(\hat{x}[k], F_T[k], 0)$$

$$\bar{X}[k+1] = \Phi \hat{X}[k] \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T$$

2.14

$$\text{com } \Phi = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}[k]} ;$$

$$\Gamma = E\Delta t ;$$

$$Q = \begin{pmatrix} Q_L & 0 & 0 \\ 0 & Q_H & 0 \\ 0 & 0 & Q_{F_{EL}} \end{pmatrix}$$

Correção:

$$\begin{aligned} K[k] &= \bar{X}[k]H^T (H\bar{X}[k]H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}[k] &= \bar{x}[k] + K[k](z[k] - H\bar{x}[k]) \\ \hat{X}[k] &= (I - K[k]H)\bar{X}[k] \end{aligned} \tag{2.15}$$

O termo $(z[k] - H\bar{x}[k])$ recebe o nome de inovação e representa o erro entre a medida e a previsão feita no intervalo anterior.

Uma forma de melhor visualizar as influências dos termos nas equações do Filtro de Kalman é trabalhar com dois extremos. Considera-se o caso em que o modelo apresenta bastante fidelidade com a realidade e um sistema de medição bastante ruim. Esta situação equivale, portanto, a considerar uma norma da matriz de covariância Q pequena e uma norma da matriz R elevada. Analisando tais efeitos nas equações de correção, verifica-se que a norma da matriz de ganhos K será pequena e, conseqüentemente, o vetor de estados corrigido se aproxima do valor previsto na iteração anterior. Com isso, o filtro passa a desprezar as medidas ruins do sistema de referência dando mais peso para os valores previstos pelo seu modelo interno.

A outra situação é quando o modelo não é bom, com muitas imprecisões e o sistema de referência fornece medidas bastante acuradas. Isto equivale a dizer que a norma de Q é elevada e a norma de R é pequena. Neste caso, o filtro de Kalman teria as estimações de estados baseadas fortemente nas medições do sistema de referência, desprezando, portanto, as previsões do modelo interno.

Em casos intermediários, o filtro de Kalman tende a corrigir seus vetores de ganhos de forma a encontrar um melhor peso para as medidas do sistema de referência e para as previsões do modelo interno.

2.3. Controle

Esta seção irá descrever como serão implementadas as malhas de realimentação para o controle do SPD

O objetivo é corrigir a posição da embarcação utilizando-se da estrutura interna mostrada na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Diagrama do bloco de estimação e controle

Para obter a força de comando para os atuadores, o controlador compara as posições estimadas pelo filtro de Kalman para cada grau de liberdade com a referência desejada gerando um sinal de erro ao qual posteriormente são aplicados os ganhos proporcional e derivativo (PD) e somadas as forças ambientais estimadas pelo Filtro de Kalman. Como resultado obtém-se as forças de comando também para cada direção de movimento.

A lei de controle considerada nos ensaios deste trabalho é dada por:

$$F = K_p T^{-1}(\gamma)(h_R - \hat{h}) + K_p K_D(\dot{h}_R - \dot{\hat{h}}) + F_e \quad 2.16$$

onde:

F é a força de comando resultante;

K_P e K_D são respectivamente ganhos proporcional e derivativo;

$T^{-1}(y)$ é a matriz de transformação do sistema de referência fixo para o solidário à embarcação;

h_R e $\hat{h}$ são respectivamente as posições de referência e estimada;

n_R e $\hat{n}$ são respectivamente as velocidades de referência e estimada;

F_e é a estimativa das forças ambientais.

O bloco do controlador PD pode ter seus parâmetros estimados através de técnicas de controle clássico, como por exemplo, alocação de pólos. Desconsiderando o amortecimento e o acoplamento entre os movimentos da embarcação no plano, pode-se escrever:

$$(M + M_{ii})\ddot{x}_{iL} = F_{iT} + F_{iEL}, \text{ para } i = 1, 2 \text{ ou } 6 \quad 2.17$$

Para os três movimentos (i) da embarcação, tem-se o diagrama de blocos da Figura 2.3:

Figura 2.3 - Realimentação para cada movimento

Resolvendo-se, por álgebra elementar de blocos, obtém-se a seguinte função de transferência em malha fechada:

$$\frac{X_{ireal}(s)}{X_{idesejado}(s)} = \frac{D_i s + P_i}{(M + M_{ii})s^2 + D_i s + P_i} \quad 2.18$$

Para alocar os pólos de forma conveniente, pode-se escolhê-los da forma $-w_n z \pm w_n j$, permitindo escrever:

$$\frac{D_i}{M + M_{ii}} = 2w_n z ; \quad \frac{P_i}{M + M_{ii}} = w_n^2 \quad 2.19$$

O ajuste da frequência natural w_n e do fator de amortecimento z pode então ser feito. Geralmente esses valores são escolhidos de forma a ter $0,01 \leq w_n \leq 0,03$ e $0,7 \leq z \leq 1,0$ e podem ainda sofrer alguns ajustes quando o sistema for instalado na embarcação, baseado em provas em alto mar.

2.4. Alocação de empuxos

A lógica de alocação de empuxos é responsável por entregar para cada atuador da embarcação o empuxo ou momento necessários para que a força resultante, solicitada pelo controlador, seja obtida. Uma característica interessante é que as lógicas de alocação de empuxos geralmente são feitas no sentido de minimizar o consumo de combustível da embarcação.

Neste trabalho será implementada a lógica conhecida por “matriz da pseudo - inversa”, que minimiza a somatória quadrática dos empuxos a serem entregues para cada atuador.

A alocação resultante é dada por

$$T = (A^T A)^{-1} A^T F_T, \quad 2.20$$

onde $F_T = (F_{1T} \ F_{2T} \ F_{6T})^T$ representa as forças e momentos resultantes do controlador do SPD. Já a matriz A é definida como:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & . & 1 & 0 & . & 0 & c_{1+n_{azim}} & . & c_{n_{prop}} \\ 0 & . & 0 & 1 & . & 1 & s_{1+n_{azim}} & . & s_{n_{prop}} \\ -x_{2,1P} & . & -x_{2,n_{azim}P} & x_{1,1P} & . & x_{1,n_{azim}P} & -c_{1+n_{azim}}x_{2,(1+n_{azim})P} + s_{1+n_{azim}}x_{1,(1+n_{azim})P} & . & -c_{n_{prop}}x_{2,n_{prop}P} + s_{n_{prop}}x_{1,n_{prop}P} \end{pmatrix} \quad 2.21$$

sendo $c_i = \cos(a_{iP})$ e $s_i = \sin(a_{iP})$. a_{iP} é o ângulo azimute quando um propulsor tipo azimutal se encontra em operação e x_i é a posição do propulsor em relação à secção média da embarcação.

Da equação 2.20 a parcela $(A^T A)^{-1} A^T$ é a pseudo – inversa que é um modo matemático para se realizar a inversa de uma matriz não quadrada, já que num SPD a saída do controlador fornece uma força em Surge, outra em Sway e um momento em Yaw, e a embarcação geralmente tem mais de três atuadores.

O modelo a ser ensaiado (Figura 2.4) tem três atuadores: dois propulsores configurados em túnel (forças F_2 e F_3) e um propulsor principal (força F_1).

Figura 2.4 - Modelo com 3 propulsores: 1 principal e 2 em túnel

Sendo F_x , F_y as forças surge e sway e F_z igual ao momento de yaw, a seguinte relação se aplica:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & -1 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad 2.22$$

3. Aparato experimental

Como já mencionado, um sistema de posicionamento dinâmico é bastante complexo dado a modelagem nada trivial de uma embarcação, os recursos de estimação de estados do modelo realizada pelo filtro de Kalman e o complexo tratamento da alocação de empuxos quando se têm muitos atuadores. Somando esses fatores à implementação de um SPD numa embarcação real (adaptação de atuadores quando o navio não os tiver) e a inerente necessidade de diversos ajustes dos parâmetros dos controladores, torna-se de grande valia o prévio estudo do comportamento de um SPD em ambientes de simulação computacional e de ensaios com modelos em escala reduzida.

Nesse sentido, um aparato experimental foi preparado para a realização de ensaios no tanque de provas do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP e é bastante semelhante ao aparato desenvolvido para os ensaios em [3]. A Figura 3.1 mostra o aparato experimental utilizado nos ensaios e pode-se dizer que o que foi desenvolvido neste trabalho é parecido, mas com algumas alterações de topologia, como por exemplo, a utilização de links de rádio no lugar de rede wireless; de câmera no lugar do conjunto de feixe laser e prisma e de módulos microcontrolados no lugar de um computador embarcado.

Fig.1 Controlled object (model ship)

Fig.2 Arrangement of Actuators

Figura 3.1 – Topologia utilizada nos experimentos de Hamamatsu [3]

O aparato experimental desenvolvido neste trabalho consiste basicamente nos módulos mostrados na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Topologia utilizada nos experimentos deste trabalho.

- Câmera (sistema de aquisição da posição): consiste numa câmera de vídeo sobre o tanque e um algoritmo de localização executado no console central;
- Console central: responsável por executar os algoritmos de localização do modelo, algoritmos de controle e por comunicar com a embarcação via rádio frequência;
- RF (Módulos de rádio): realizam a comunicação sem fios entre o console central e os módulos embarcados;
- Módulo central: consiste no módulo principal embarcado e é responsável por gerenciar a comunicação com o console em terra e com os demais módulos embarcados;
- Módulos de controle localizados: são responsáveis por realizar um controle de rotação ou posição localizado em cada atuador instalado.

Os itens subseqüentes descrevem em detalhes os módulos desenvolvidos e mostra também todo o aparato mecânico preparado (casco, propulsores).

3.1. Aparato eletrônico

É responsável por controlar todos os atuadores da embarcação como controle de rotação dos motores principal e túnel, e controle da posição do leme e motor azimutal. Realiza também a comunicação necessária via rádio com o console central.

O projeto eletrônico poderia ter sido concebido de diversas formas, no entanto, durante seu desenvolvimento os principais itens a seguir passaram a compor a arquitetura do sistema:

Tabela 3.1 - Itens do projeto eletrônico

Item do projeto eletrônico	Justificativa para compor a arquitetura
Módulos de controle de motores localizados	Descentraliza o processamento embarcado, pois há um microcontrolador para comandar cada motor de propulsor
Rede de comunicação embarcada	Padrão RS485. Garante a comunicação entre os microcontroladores de todos os módulos do modelo minimizando a interferência de ruídos eletromagnéticos externos
Módulo embarcado central	Processa a comunicação com o console central em terra e com todos os demais módulos embarcados gerenciando possíveis falhas do sistema como falhas em propulsores e falta de comunicação externa

Um conceito implícito e bastante importante que foi considerado no projeto foi elaborar uma arquitetura com pouca emissão de ruídos eletromagnéticos e bastante imunidade a este tipo de interferência. Este conceito é muito importante

para garantir o bom funcionamento do aparato eletrônico em qualquer ambiente sem que sofra interferências ou interfira em outros equipamentos.

Como resultado, a arquitetura do sistema embarcado ficou bastante simples, porém eficiente e robusta já que conta com um sistema de comunicação entre módulos via rede RS485 e com itens de segurança como desligamento de motores caso haja falta de comunicação com o console em terra.

A Figura 3.3 mostra os módulos que compõem a arquitetura embarcada.

Figura 3.3 - Arquitetura embarcada

3.1.1. Comunicação embarcada

A configuração de rede padrão RS485 é utilizada. Este tipo de comunicação é largamente utilizado no meio industrial por garantir robustez na comunicação entre dois ou mais pontos por distâncias que podem chegar a centenas de metros. Esta robustez se dá pela comunicação por um par de fios em modo diferencial, ou seja, os demais pontos que estão recebendo os dados de um transmissor, conseguem lê-los via diferença de tensão entre esses dois fios da rede. Se uma perturbação externa atinge a rede e as tensões desses fios é afetada, os ruídos aparecem

igualmente nesses fios e os receptores continuam lendo os dados enviados pois sempre o fazem pela diferença entre os fios fazendo com que a perturbação não seja sentida.

Outro fator importante na escolha dessa rede de comunicação é o fato de que, se somente um módulo fosse usado para acionar os diversos motores do modelo, alguns fios com aproximadamente 2m de comprimento seriam usados nas interconexões criando assim um sistema com forte emissão de ruído eletromagnético no ambiente em que está. A explicação para isso são as correntes relativamente altas e sujeitas à frequências resultantes do controle de velocidade dos motores resultando em antenas emissoras de ruídos podendo, com isso, interferir negativamente em outros equipamentos próximos aos locais de ensaios.

3.1.2. Módulos de rádio

São responsáveis por realizar a comunicação via rádio entre o console central em terra e o sistema embarcado no modelo. Foram desenvolvidos no sentido de conseguir comunicação confiável, transparente e que permita ensaios com distâncias de até 400m em visada direta. A Figura 3.4 mostra um módulo de rádio fechado e outro aberto para visualização da eletrônica interna.

Figura 3.4 - Módulos de comunicação sem fio

Os módulos de rádio têm as seguintes características: etapa conversora de níveis e módulo transceptor de rádio. A etapa conversora realiza a conversão entre os níveis de tensão de uma rede RS232 (utilizada para interfacear com o módulo central) e os níveis de tensão TTL, que são lidos e enviados pelo módulo

transceptor. Este módulo transceptor é um produto da empresa Radiotronics [18] (Figura 3.5) e agrega diversas funções importantes para o bom funcionamento do link de rádio. Tais funções se resumem em:

Figura 3.5 - Módulo transceptor Radiotronics

- Espalhamento espectral: evita a interferência de outros equipamentos operando na mesma faixa de frequências;
- CRC: cada pacote de dados enviado recebe ao seu final mais um bloco contendo um resultado matemático que é verificado no módulo receptor. Esta verificação, quando o resultado é válido, garante que o pacote de dados foi entregue corretamente sem perda ou alteração de informação;
- Canais de operação: os módulos transceptores podem ser configurados em até 32 canais diferentes. Este recurso é importante se outros sistemas estiverem operando nas proximidades.

3.1.3. Módulos de motor DC e de passo

Esses módulos foram desenvolvidos de forma a poder controlar tanto motores de corrente contínua quanto motores de passo (Figura 3.6). Eles são formados por duas pontes H que podem ser configuradas da seguinte forma:

- Uma ponte H: controla um motor de corrente contínua com controle de velocidade via variação da largura do pulso (PWM) aplicado no motor.
- Duas pontes H: controla um motor de passo independentemente do seu tipo: unipolar ou bipolar.

Figura 3.6 - Módulo acionador de motores (DC e passo)

3.1.4. Módulo central

Este módulo é responsável por gerenciar todas as tarefas da eletrônica embarcada. A Figura 3.7 mostra sua arquitetura interna.

Figura 3.7 - Diagrama de blocos interno do módulo central

Um microcontrolador principal executa toda a comunicação via interface sem fio com o console em terra como a forma de acionamento de todos os atuadores e envio de status. É responsável também pela coleta e gravação de dados em memória não volátil (EEPROM), leitura de eventuais entradas digitais e de sensores com saída analógica que por ventura venham a ser instalados no modelo.

Outro microcontrolador, secundário, é responsável exclusivamente por gerenciar a comunicação do módulo central com todos os módulos de acionamento dos atuadores. Faz a varredura de todos esses módulos e detecta falhas ou paradas de comunicação. A dedicação exclusiva desse microcontrolador é importante por não executar outras funções embarcadas e garantir o correto funcionamento dos demais módulos a ele conectados.

Uma fonte chaveada distribui alimentação para os componentes do módulo central e também para a interface de rádio e os módulos de controle de atuadores. A isolamento de caminhos de corrente elétrica no sistema como um todo é importante para evitar ao máximo problemas com ruídos e quedas de tensão nos barramentos sensíveis, ou seja, barramentos que alimentam outros microcontroladores, sensores, memórias etc. A Figura 3.8 mostra como essa separação foi feita.

Figura 3.8 - Esquema de alimentações no módulo de acionamento de motores

Nota-se que as alimentações de potência e de eletrônica sensível vêm por caminhos diferentes e que a junção dos terras (referências de tensão) dos dois blocos é feita somente num ponto, próximo ao conector de potência. Isso evita, por exemplo, que ruídos provocados pela modulação em largura de pulso (PWM) do controle de velocidade dos motores interfira no funcionamento do microcontrolador presente nesta placa.

3.2. Sistema de aquisição da posição do modelo no tanque de provas

Este sistema de aquisição consiste numa câmera de vídeo instalada no eixo longitudinal sobre o tanque (como na Figura 3.2 acima) cujo campo de visão abrange 5m x 5m do tanque de provas o que representa uma área suficiente para os ensaios de posicionamento dinâmico já que o controle de posição é feito em torno de um ponto fixo não necessitando de grandes áreas disponíveis; e serve também para ensaios de acompanhamento de trajetória para curtas distâncias do tanque. Este sistema de aquisição foi desenvolvido em [7] e teve continuidade e alguns aperfeiçoamentos em [8] e [9].

As imagens da câmera analógica colorida (KODO KC-512NTX) são enviadas com resolução de 330 linhas para uma placa de aquisição de vídeo instalada no console em terra. Uma biblioteca de aquisição de imagens realiza a captura quadro a quadro dos sinais gerados e disponibiliza, a cada quadro amostrado, uma matriz contendo a cor RGB (componentes Red, Green e Blue de uma determinada cor) de cada ponto (pixel) do quadro adquirido.

Para a localização da embarcação no tanque, vários algoritmos de processamento de imagem poderiam ser desenvolvidos para este fim, no entanto, optou-se por utilizar um algoritmo simples, porém eficiente e que não tomasse demasiado processamento do console central, a saber:

Na embarcação em estudo são instalados dois LEDs (Light Emitter Diode – diodos emissores de luz) de cores distintas como vermelho e azul sendo um na proa e outro na popa. Quando um quadro da câmera é adquirido e a matriz de cor de cada ponto da imagem capturada, o algoritmo faz o rastreamento da figura em busca dos dois pontos coloridos e distintos. Ao encontrá-los (e não ocupam somente um ponto da imagem) o algoritmo localiza o centro desse ponto luminoso (Figura 3.9) e guarda seu valor. Como as cores são distintas e pré-determinadas, é possível saber qual deles é a popa e qual é a proa.

Figura 3.9 – Imagem da tela mostrando a localização dos pontos luminosos no modelo

Na amostragem seguinte, o algoritmo realiza a varredura apenas ao redor do ponto localizado na amostra anterior (Figura 3.10) e localiza com isso sua atual posição na amostra. Essa pequena varredura em torno do ponto anterior é

possível dado que a dinâmica da embarcação é lenta e o ponto não apresenta deslocamento considerável entre amostras.

Figura 3.10 - Varredura do algoritmo de localização

Na câmera utilizada foi instalada uma lente 2,5 mm cujo campo de visão obtido é relativamente grande (como dito anteriormente de 5 m X 5 m), no entanto, os quadros adquiridos apresentam uma distorção conhecida como tipo “barril” (Figura 3.11) e necessita que seja corrigida para a correta leitura da posição do modelo no tanque de provas.

Figura 3.11 - Evidências da distorção conhecida como “barril” provocada pela lente da câmera.

As imagens adquiridas passam então por um algoritmo de correção da distorção provocada pela lente e são entregues continuamente para o algoritmo de posicionamento.

O método de correção radial proposto por Gibbon [15] reconstrói a imagem via correção ponto a ponto da mesma através do raio entre o ponto que corresponde ao centro da câmera e o ponto a ser corrigido. A equação é dada por:

$$r_{ui} = r_{di} (1 + k r_{di}^2)$$

3.1

onde r_{ui} é a distância corrigida (em pixels) entre o ponto central da imagem até o ponto em questão e r_{di} é a distância distorcida (em pixels) lida imediatamente após a aquisição imagem. A constante k deve ser determinada via prévia calibração que consiste em:

- Posicionar a câmera sobre o tanque de dimensões conhecidas;
- Medir a distância r_{ui} entre o centro da imagem e um ponto (na linha horizontal) interior aos limites do tanque.
- Calcular qual deveria ser o valor correto de r_{di} através de $r_{di} = \frac{Res_h m_r}{2m_t}$, onde Res_h é a resolução (em pixels) de uma linha da câmera; m_r é a medida real em metros do centro da imagem até o ponto escolhido e m_t é a metade da largura do tanque (em metros).
- Feito isso, basta encontrar k a partir dos resultados anteriores e da equação 3.1.

A imagem adquirida apresenta um erro entre a posição real da embarcação e a posição interpretada através dos finitos pontos da imagem. É imediato notar que a correção da distorção tipo “barril” leva a erros de valores diferentes ao longo do raio do quadro, já que os pontos precisam ser esticados ou encolhidos para a reconstrução do quadro correto. Nos ensaios realizados, o erro de medição no centro da imagem foi de 0,5 cm enquanto que nas bordas da imagem o erro obtido foi de aproximadamente 2,1 cm. Num primeiro momento este aumento no erro parece ser bastante prejudicial para o sistema de localização, no entanto, não há degradação da operação de posicionamento dinâmico.

3.3. Console central

É responsável por executar os algoritmos necessários para a localização e controle da posição da embarcação. Realiza também o algoritmo de alocação de empuxos e a transmissão via rádio para o modelo no tanque de provas.

Os algoritmos de localização e controle da embarcação são implementados em dois programas: o de localização via visão artificial em Visual Basic, e o de filtragem e controle em Simulink / Matlab.

Figura 3.12 – Fluxograma dos dados em Visual Basic

A Figura 3.12 mostra um fluxograma dos dados dentro do programa feito em Visual Basic. A imagem adquirida pela câmera é enviada para o programa via uma biblioteca multimídia. Esta imagem passa pelo algoritmo de correção da mesma e detecção dos pontos relativos à proa e à popa dos quais é possível inferir qual o

centro de massa da embarcação e seu respectivo aproamento. Estas posições, juntamente com as referências definidas pelo usuário na tela do programa são colocadas num arquivo texto que será lido pelo Simulink a fim de executar as operações de filtragem e controle. A Figura 3.13 mostra a tela principal do programa em Visual Basic.

Figura 3.13 - Tela principal do programa em Visual Basic.

Ainda na tela principal o usuário pode alterar as referências a qualquer momento do ensaio (botão “Set Point”) bem como definir a posição atual da embarcação como sendo a referência (botão “SP pos. atual”).

A Figura 3.14 mostra um fluxograma dos dados no ambiente do Simulink / Matlab. Os dados de posição do centro de gravidade e aproamento da embarcação são lidos via arquivo texto e passados para o módulo do Filtro de Kalman.

Figura 3.14 - Fluxograma das funções em Matlab / Simulink

Neste módulo o algoritmo de filtragem é executado, as variáveis de estado estimadas e passadas para o módulo de controle, onde o algoritmo de controle PD é executado. Como resultado, obtém-se os empuxos necessários para corrigir a posição e aproamento da embarcação, no entanto, esses empuxos precisam ser alocados para cada propulsor da embarcação. Para tanto, o módulo de alocação de empuxos aplica o algoritmo de alocação e converte o empuxo em rotação, já que esta é a grandeza enviada para cada propulsor e que pode ser garantida via controle de rotação localizado (vide capítulo 4.1 do ensaio dos motores dos propulsores). As figuras a seguir (3.15, 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19) mostram, em diagramas de blocos, maiores detalhes da implementação em Simulink.

Figura 3.15 - Estrutura do sistema com filtro de Kalman e bloco de controle.

A Figura 3.15 acima mostra a estrutura do sistema de filtragem / controle. No bloco de leitura a posição é enviada para o filtro de Kalman juntamente com as forças obtidas do módulo controlador. Neste módulo entram a referência e o vetor de estados estimado no filtro de Kalman para a execução do controle PD.

Figura 3.16 - Módulo de leitura da referência e posição real do modelo.

A Figura 3.16 acima mostra o módulo de leitura. São lidas a referência e a posição vindas do programa de visão artificial em Visual Basic.

A Figura 3.17 mostra o bloco contendo o controlador mais à esquerda e a alocação de empuxos mais à direita. Os empuxos entram no bloco de alocação de empuxos em Newton e saem em RPM (rotações por minuto).

Figura 3.17 - Bloco de controle e alocação de empuxos.

A Figura 3.18 mostra o bloco de escrita. A força e os empuxos obtidos do controlador são enviados para o programa de visão artificial em Visual Basic para que finalmente possam ser enviados para a embarcação via comunicação sem fio.

Figura 3.18 - Bloco de escrita das rotações dos motores para o Visual Basic.

A Figura 3.19 ilustra o bloco do filtro de Kalman implementado no console central em terra. Nota-se que há funções separadas para a realização da predição e da correção do filtro.

Figura 3.19 - Bloco do filtro de Kalman implementado.

3.4. Modelo em escala

O modelo em escala preparado para os ensaios de SPD representa um petroleiro da classe Suezmas típico em escala de 1:125.

As dimensões do navio típico e do modelo em escala estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dimensões do navio típico e do modelo em estudo

Dimensões principais	Navio típico	Modelo (escala 1:125)
Comprimento total (Loa)	272,75 m	2182 mm
Comprimento entre perp. (Lpp)	258,00 m	2064 mm
Boca	46,00 m	368 mm
Pontal	24,40 m	195 mm
Calado de projeto	16,20 m	130 mm
Calado de escantilhão	17,50 m	140 mm
Calado lastreado	8,13 m	65 mm
Deslocamento carregado	175181 ton	89,7 Kg
Deslocamento lastreado	54194 ton	27,7 Kg

3.4.1. Aparato mecânico

Foi construído pelo Departamento de Engenharia Naval e Oceânico da USP e se resume nas partes mecânicas, atuadores como leme, motor principal e túnel bem como a superestrutura do mesmo. A Figura 3.20 ilustra o casco do modelo construído.

Figura 3.20 - Algumas vistas do casco do modelo

Ainda na Figura 3.20 observam-se os propulsores que serão instalados no modelo, e na Tabela 3.3 as suas posições são então determinadas em função da escala utilizada.

Tabela 3.3 - Posições dos motores no modelo.

Propulsor	Localização		Diâmetro		Empuxo	
	Navio (m)	Modelo (mm)	Navio (m)	Modelo (mm)	Navio (tonf)	Modelo (gf)
Túnel de popa	14,98	120	2,75	22	18,5/-18,5	9,5/-9,5
Túnel de proa	258,27	2066	3,16	25	25/-25	12,8/-12,8
Principal	4,80	38	8,15	65	123/-55	63,0/-28,2

3.4.2. Propulsores (motores elétricos)

Os propulsores selecionados para ser utilizados no modelo são micromotores da marca Faulhaber os quais possuem um encoder acoplado ao eixo para a medida da sua rotação. Os que serão utilizados na configuração em túnel foram montados numa estrutura mecânica mostrada na Figura 3.21 que consiste no motor Faulhaber com encoder, um sistema de transmissão da rotação via correia e uma hélice instalada num tubo de alumínio.

Figura 3.21 - Desenho mecânico de um propulsor em túnel [4]

A Figura 3.22 mostra o conjunto montado e os locais de instalação na proa e na popa do modelo.

Figura 3.22 - Conjunto do propulsor em túnel montado

O modelo finalizado até então permitirá a realização de ensaios de posicionamento dinâmico com dois motores configurados em túnel e um motor principal. O objetivo final da sua construção é a instalação de um motor azimuthal, mas que não será objeto de ensaio deste trabalho.

4. Ensaaios

Neste capítulo será mostrado um ensaio realizado com o sistema de propulsão com a finalidade de implementar e testar o controle localizado para cada motor e também os resultados de ensaios de empuxo X rotação que foram feitos para o levantamento das características de cada propulsor. Serão mostrados também os ensaios com o sistema completo com o intuito de comprovar o funcionamento de todo o conjunto, principalmente da eletrônica embarcada projetada. A comprovação do correto funcionamento da eletrônica está associada com as respostas e o desempenho do modelo em operação no tanque de provas, ou seja, se os ensaios apresentarem bons resultados e coerência no comportamento, pode-se concluir que a eletrônica desenvolvida funcionou como projetado atendendo aos comandos do console central em terra.

4.1. Motores dos propulsores

O conjunto de atuadores projetados para funcionar num sistema de posicionamento dinâmico é geralmente diferente dos sistemas de propulsão comumente usados em embarcações sem este tipo de sistema. Eles devem possuir características, por exemplo, de rápida resposta aos comandos do computador central para garantir que o sistema consiga colocar os propulsores num estado desejado sem atrasos e, por conseguinte, sem instabilidades na malha de controle.

Outra característica desses atuadores (de embarcações reais ou dos utilizados no modelo em questão) é a presença local de um sistema de controle a fim de garantir o correto funcionamento desses atuadores. Se o computador central exige rotação de 100 RPM num motor, este deve responder rapidamente com a rotação desejada; e isso só é garantido com a presença de controle local. A Figura 4.1 ilustra esta arquitetura.

Figura 4.1 - Arquitetura de cada propulsor de um SPD (real ou experimental)

O sistema de controle, mostrado na figura acima, recebe qual a referência de rotação e lê a rotação real do motor. Através de um controle, por exemplo PI, ajusta a rotação para a desejada.

O sistema eletrônico que fará o acionamento dos atuadores do modelo também contará com um controle localizado para cada atuador (Figura 4.2). Para os motores de corrente contínua fora previsto um controlador PI, cujo projeto baseou-se no modelo teórico de primeira ordem deste tipo de motor.

Figura 4.2 - Controles superior e inferior (localizado)

Um motor de corrente contínua pode ser aproximado pelo seguinte modelo linear [16]:

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT_m}, \quad 4.1$$

onde K é um ganho relacionando a entrada (tensão) e a saída (rotação) do motor em regime permanente e T_m é a constante de tempo do motor.

O controlador PI pode ser representado por:

$$H(s) = K_{PI} \left(1 + \frac{1}{sT_I} \right) = K_{PI} \left(\frac{1 + sT_I}{sT_I} \right); \quad 4.2$$

O sistema de controle da rotação com a realimentação é mostrado no diagrama de blocos da Figura 4.3:

Figura 4.3 - Diagrama de malha fechada para o controle de motor DC

Os valores do controlador PI foram obtidos de forma a cancelar o pólo do modelo 4.1, ou seja, considerando $T_m = T_I$, e o ganho ajustado a partir de ensaios de resposta ao degrau do motor.

Os cálculos necessários para o controle PI serão realizados por um microcontrolador (sistema digital) que necessita, portanto, de equações de diferenças para que o sistema possa funcionar. Dessa forma, o controlador PI no domínio “s” precisa ser convertido para o domínio discreto “z” considerando-se um período de amostragem adequado.

Uma transformação bastante conhecida é a de Tustin [17] e é dada por:

$$s = \frac{2}{T} \frac{(z - 1)}{(z + 1)}, \quad 4.3$$

onde T é o período de amostragem.

A função de transferência do controlador pode então ser transformada em:

$$H(z) = \frac{C(z)}{E(z)} = K_{PI} \left(1 + \frac{1}{T_I} \frac{T(z+1)}{2(z-1)} \right). \quad 4.4$$

Resolvendo esta equação, obtém-se:

$$2T_I C(z) - 2T_I C(z)z^{-1} = [2K_{PI}T_I(1 - z^{-1}) + K_{PI}T(1 + z^{-1})]E(z) \quad 4.5$$

A notação z^{-1} representa um atraso no tempo de uma amostra. Assim, a equação de diferenças que o microcontrolador irá executar fica:

$$c_k = \left(\frac{2K_{PI}T_I + K_{PI}T}{2T_I} \right) e_k + \left(\frac{K_{PI}T - 2K_{PI}T_I}{2T_I} \right) e_{k-1} + c_{k-1} \quad 4.6$$

A Figura 4.4 mostra um ensaio do controle de rotação real onde a curva azul marinho é a referência (700 pulsos do encoder) e a curva rosa é a rotação adquirida através dos protótipos montados. Nota-se que o controlador busca rapidamente a referência e mantém a rotação bastante próxima do valor desejado em regime permanente. Verifica-se, portanto, que o controle PI projetado atende às necessidades do projeto.

Figura 4.4 - Ensaio de implementação do controlador de rotação de um motor DC

4.2. Ensaio de empuxos

Uma importante etapa do processo de ajuste dos parâmetros do controlador é a consideração, na alocação de empuxos, dos parâmetros de empuxo de cada propulsor instalado. Para isso, foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica ensaios para a correta determinação da relação empuxo X rotação para cada propulsor.

Com base nesses ensaios os parâmetros da Tabela 4.1 foram obtidos e introduzidos na etapa de alocação de empuxos do modelo.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios com propulsores. Variável u é o empuxo em gf.

	Movimento preferencial	Movimento contrário
Propulsor principal (RPM)	$60\sqrt{\frac{u}{11505}}$	$60\sqrt{\frac{u}{17257}}$
Prop. túnel proa (RPM)	$60\sqrt{\frac{u}{147764}}$	$60\sqrt{\frac{u}{183707}}$
Prop. túnel popa (RPM)	$60\sqrt{\frac{u}{147764}}$	$60\sqrt{\frac{u}{183707}}$

A variável u é o empuxo em gf e a constante de valor 60 é a conversão da rotação para RPM.

A Figura 4.5 abaixo destaca o diagrama do bloco de alocação de empuxos. A força global do controlador é devidamente alocada para cada propulsor através das funções de alocação resultantes da resolução da equação (equação 2.22 da seção 2.4):

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & -1 \\ 0 & 0,5 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad 4.7$$

onde F_x , F_y são respectivamente as forças de surge e sway e F_z é igual ao momento de yaw. F_1 é a força do propulsor principal, F_2 e F_3 dos propulsores configurados em túnel.

Figura 4.5 - Bloco de alocação de empuxos com destaque para os movimentos do propulsor principal

4.3. Ensaios com o modelo

Neste trabalho alguns ensaios foram realizados com a finalidade de testar o sistema desenvolvido e implementado e comprovar o correto funcionamento de toda a eletrônica embarcada. Para isso, diversas situações são propostas:

- Modelo vazio, águas paradas e posicionamento fixo. O objetivo é comprovar que o modelo é capaz de manter a posição desejada sem mudança de referência.
- Modelo vazio, águas paradas e posições variáveis. O objetivo é comprovar que o modelo atende às mudanças de referência corretamente.
- Modelo lastreado, águas paradas e posicionamento fixo. O objetivo é comprovar que o modelo, com lastro máximo e massa e momento de

inércia diferentes é capaz de manter a posição desejada sem mudança de referência.

- Modelo lastreado, águas paradas e posições variáveis. O objetivo é comprovar que o modelo, com lastro máximo e massa e momento de inércia diferentes é capaz de atender às mudanças de referência corretamente.
- Modelo lastreado, vento incidente. O objetivo é comprovar que o modelo, com lastro máximo e massa e momento de inércia diferentes é capaz de manter a posição desejada em alguns valores de referência mesmo com a incidência de vento.
- Modelo lastreado, onda incidente. O objetivo é comprovar que o modelo, com lastro máximo e massa e momento de inércia diferentes é capaz de manter a posição desejada em alguns valores de referência mesmo com a incidência de onda.

4.3.1. Estabilização do Filtro de Kalman

No início de cada operação de posicionamento dinâmico deve-se aguardar a convergência dos valores do filtro de Kalman para só então iniciar a operação de controle (Figura 4.6). Neste período inicial a estimativa de estados varia bruscamente por alguns segundos até que finalmente convirja.

Figura 4.6 - Inicialização do posicionamento dinâmico

A Figura 4.7 ilustra um momento de estabilização do filtro de Kalman na inicialização da operação de posicionamento dinâmico. Nota-se que a estimativa da posição X da embarcação leva aproximadamente 9 segundos para estabilizar.

Figura 4.7 - Estabilização do filtro de Kalman

4.3.2. Ensaios com modelo vazio

Os primeiros ensaios foram realizados com o modelo com o mínimo de lastro para que fosse possível submergir todos os propulsores e permitir a correta atuação dos mesmos.

As variáveis envolvidas na inicialização dos parâmetros de acordo com as características do ensaio em questão são dadas abaixo.

Para o ensaio em vazio, os parâmetros de interesse são:

Massa do modelo (m): 35 Kg

Momento de inércia (I) em relação ao centro de massa: 6,52 Kg.m²

Comprimento do modelo (L): 2,054 m

Para as matrizes a seguir, foi utilizado um fator nos cálculos dos valores baseado na escala do modelo para a embarcação real. Este fator tem valor: $L/282$.

Os dados utilizados para o modelo são:

Matriz de massas incluindo massas adicionais:

$$M = \begin{pmatrix} 36,9730 & 0 & 0 \\ 0 & 67,9226 & 0 \\ 0 & 0 & 19,8041 \end{pmatrix}$$

Matriz de amortecimentos:

$$D = \begin{pmatrix} 0,1811 & 0 & 0 \\ 0 & 9,9610 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0025 \end{pmatrix}$$

Para o filtro de Kalman, os dados são:

Matriz de covariância para os erros de medida do sistema de localização:

$$R = 1,0E^{-4} \begin{pmatrix} 0,5305 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5305 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1500 \end{pmatrix}$$

Matriz de covariância para os erros de modelagem:

$$Q = \begin{pmatrix} 0,2986 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0020 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0528 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0233 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0041 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0205 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0013 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Dados para o controle:

Ganhos da parte proporcional:

$$G_C = \begin{pmatrix} 2,0722 & 0 & 0 \\ 0 & 2,8489 & 0 \\ 0 & 0 & 36,8560 \end{pmatrix}$$

Ganhos da parte derivativa:

$$G_D = \begin{pmatrix} 13,7461 & 0 & 0 \\ 0 & 18,9077 & 0 \\ 0 & 0 & 15,2106 \end{pmatrix}$$

4.3.2.1. Ensaio 1: águas paradas, posição fixa

Neste ensaio o modelo foi posicionado parado no tanque e o sistema ligado de forma a mantê-lo na posição inicial. Nenhuma mudança de referência e nenhum distúrbio foram aplicados.

A Figura 4.8 mostra as posições X, Y e o ângulo de aproamento Ψ do modelo em comparação com a referência. As estimativas realizadas pelo filtro de Kalman, após o período inicial de estabilização, apresentaram excelente comportamento em comparação com as medidas realizadas o que pode ser observado na mesma figura; a linha azul representa a medida real enquanto que a verde é a referência e a vermelha é a estimativa do filtro de Kalman.

Figura 4.8 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)

O posicionamento dinâmico apresentou boa acuraciedade e os erros ficaram muito baixos como pode ser observado na Figura 4.9. Os erros em X e Y ficaram menores que 2 cm, e menor que 1° para o movimento em Yaw. Estas mesmas grandezas puderam ser observadas nos demais ensaios de posicionamento.

Pode-se afirmar que os erros ficaram baixos já que estão dentro da faixa de erro do sistema de aquisição da posição via visão artificial como mostrado anteriormente. O erro de localização da embarcação no tanque de provas está entre 0,5 cm e 2,1 cm e é de se esperar que os erros do sistema de posicionamento diminuam com a diminuição do erro de localização do modelo.

Figura 4.9 - Erros (X,Y, Ψ) obtidos num ensaio de posicionamento

A Figura 4.10 mostra os esforços solicitados pelo controlador (após a alocação de empuxos). Apesar de em alguns momentos haver bastante oscilação em torno do valor zero, as amplitudes são baixas o que não causa bruscas alterações de sentido e rotação nos atuadores. Para minimizar ainda mais esse efeito de pequenas oscilações, foi implementado em cada controlador local de cada propulsor um filtro de forma a suavizar a resposta do atuador quando a embarcação se encontra na referência desejada (Figura 4.11). Pela figura nota-se que enquanto o controlador exige bruscas mudanças de rotação (derivadas elevadas), o atuador tende a suavizar a resposta (derivadas mais baixas).

Figura 4.10 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos

Figura 4.11 - Comparativo entre a solicitação de rotação do controlador e a curva filtrada.

4.3.2.2. Ensaio 2: águas paradas, posição variável

Neste ensaio o modelo foi inicialmente posicionado parado no tanque e o sistema ligado de forma a mantê-lo na posição inicial. Ao longo do ensaio várias mudanças de referência foram impostas.

A Figura 4.12 mostra as posições X , Y e Ψ do modelo em comparação com a referência. As estimativas realizadas pelo filtro de Kalman (linha vermelha), após o período inicial de estabilização, também apresentou excelente comportamento em comparação com as medidas realizadas pelo sistema de visão (linha azul). Nota-se que a estimativa do filtro de Kalman é mais suave que as ruidosas medidas reais já que todo esse ruído sobre a medida real é descrita e de certa forma prevista no estimador.

Os tempos de resposta e acomodação para cada mudança de referência são relativamente baixos e a oscilação em torno da posição final é amortecida (quase criticamente amortecida) como pode ser observado na Figura 4.13 que representa um trecho em detalhes do movimento em X .

Figura 4.12 - Valores (X, Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)

Figura 4.13 - Trecho em detalhe do movimento em X. A oscilação observada é amortecida

A Figura 4.14 mostra os empuxos resultantes do controlador antes de passar pela alocação de empuxos do sistema, isto é, empuxos dados em X, Y e momento em Yaw. Nota-se que em cada alteração de referência ocorre a solicitação pertinente a cada movimento.

Figura 4.14 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw

A Figura 4.15 mostra a rotação exigida em cada propulsor, após a aplicação da lógica de alocação de empuxos. Mesmo com a presença de uma forte oscilação em torno do valor zero, os picos de rotação em cada movimento, os quais são valores importantes para o controle da embarcação, podem ser observados na figura e, como anteriormente mencionado, há um tratamento das mudanças bruscas de rotação diminuindo assim esta oscilação em torno do zero.

Neste sistema, a rotação aplicada em cada propulsor deve ser exata como calculado após o algoritmo de alocação de empuxos (Figura 4.15) para que se possa garantir a resposta final esperada em cada atuador. Como cada propulsor possui uma eletrônica dedicada com a capacidade de garantir tais rotações, a dinâmica do sistema controlado passa a apresentar bons resultados.

Figura 4.15 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos

4.3.3. Ensaios com modelo cheio

Os ensaios a seguir foram realizados com o modelo cheio. Para esses casos, os parâmetros utilizados no controle e no filtro de Kalman foram:

Massa do modelo (m): 80 Kg

Momento de inércia (I) em relação ao centro de massa: 28,2 Kg.m²

Os dados utilizados para o modelo são:

Matriz de massas incluindo massas adicionais:

$$M = \begin{pmatrix} 81,9730 & 0 & 0 \\ 0 & 112,9226 & 0 \\ 0 & 0 & 41,4841 \end{pmatrix}$$

Matriz de amortecimentos:

$$D = \begin{pmatrix} 0,1811 & 0 & 0 \\ 0 & 9,9610 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0025 \end{pmatrix}$$

Dados do filtro de Kalman:

As matrizes de covariância para os erros de medida do sistema de localização e para os erros de modelagem não sofreram alterações.

Dados para o controle:

Os dados utilizados para o controle (ganhos proporcional e derivativo) não sofreram alterações.

4.3.3.1. Ensaio 3: águas paradas, posição fixa

Os ensaios com modelo lastreado sem distúrbios ambientais apresentaram resultados semelhantes aos ensaios com modelo vazio com estimativas do filtro de Kalman acompanhando muito bem as medidas reais do sistema de visão artificial e erros em X e Y da mesma ordem: 2 cm. Para o ângulo Ψ , o erro em geral ficou ligeiramente maior, 2° o que não deixa de ser um bom resultado.

A Figura 4.16 mostra um ensaio somente de posição fixa.

Figura 4.16 - Valores (X, Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)

4.3.3.2. Ensaio 4: águas paradas, posição variável

Neste ensaio, o modelo lastreado foi submetido a algumas mudanças de referência e apresentou comportamento também semelhante ao modelo vazio, com ligeiro aumento nas oscilações nos pontos próximos às acomodações de sinal (Figura 4.17). Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que os ganhos do controlador não foram ajustados quando aplicados ao modelo cheio.

Figura 4.17 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)

A Figura 4.18 mostra as saídas do controlador para cada movimento. Notam-se as solicitações pelo controle em cada alteração de referência ou distúrbio aplicados.

Figura 4.18 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw

A Figura 4.19 mostra as rotações em cada propulsor como resultado da alocação de empuxos.

Figura 4.19 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos

4.3.3.3. Ensaio 5: incidência de vento

O ensaio com incidência de vento foi conduzido de forma a manter uma posição fixa na maior parte do ensaio e aplicando um distúrbio ambiental sobre o casco do modelo.

O ensaio representado na Figura 4.22 pode ser dividido em quatro momentos:

1. De 100 s a 350 s: incidência de vento (a 45°) como mostrado na Figura 4.20;

Figura 4.20 - Incidência de vento a 45°

2. De 350 s a 500 s: desligamento do gerador de ventos na posição da Figura 4.20;
3. De 500 s a 800 s: nova incidência de vento (a 90°) como mostrado na Figura 4.21;

Figura 4.21 - Incidência de vento a 90°

4. De 800s a 1000 s: desligamento do gerador de ventos e mudança de referência em Y.

Figura 4.22 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)

No primeiro caso o modelo apresentou um bom comportamento para as posições em X e Y mantendo a posição inicial com mínimo erro. No entanto, o ângulo Ψ apresentou um desvio de aproximadamente 17° em direção à fonte de perturbação (Figura 4.23) o que pode ser explicado pela imprecisão nos modelos de forças ambientais inseridos no sistema. Outro fator que explica esse desvio é a forma como o vento foi aplicado no modelo: em casos reais o vento ocorre em rajadas sobre uma embarcação, mas neste ensaio o mesmo foi aplicado de forma contínua.

Apesar de não constar nesse ensaio, o gerador de vento foi deslocado para a posição oposta à inicial e o mesmo efeito ocorreu na outra direção. Novamente a posição X e Y não se distanciou da referência, mas o movimento de Yaw apresentou o mesmo desvio de aproximadamente 17° .

Figura 4.23 - Desvios em Ψ para os dois casos de incidência de vento

No segundo caso o gerador de vento foi desligado e o modelo pôde voltar para a referência minimizando os erros em X , Y e Ψ .

No terceiro caso o gerador de vento foi novamente ligado, no entanto, perpendicularmente ao modelo para comprovar o comportamento do primeiro caso. Como esperado, entre 500 s e 800 s, o modelo se distanciou da referência do movimento de Yaw também em aproximadamente 17° (Figura 4.23).

No quarto caso o gerador foi desligado e uma mudança em Y foi imposta. O modelo pôde ser controlado, no entanto, apresentou uma maior oscilação na acomodação pelo fato da mudança de referência ter ocorrido quando o controle ainda estava corrigindo a posição angular.

A Figura 4.24 mostra os empuxos resultantes do controlador. Nota-se que a maior parte do esforço se concentra no movimento de Yaw, no sentido de manter o desvio observado contra o fluxo de vento. O torque em Yaw, após a alocação de empuxos, se divide basicamente em esforços nos propulsores da proa e popa como mostra a Figura 4.25.

Figura 4.24 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw

Figura 4.25 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos

4.3.3.4. Ensaio 7: incidência de onda

Neste ensaio uma frente de ondas a 1 Hz foi aplicada como um segundo distúrbio ambiental sobre o modelo como mostrado na Figura 4.26. A seta azul indica o

sentido das mudanças de referência de forma a deixar a embarcação cada vez mais paralela às ondas incidentes.

Figura 4.26 - Ensaio com ondas. Posição inicial do modelo e sentido do deslocamento da referência

Para melhor entendimento, pode-se dividir os dados (Figura 4.27) em três momentos:

1. De 1000 s a 1300 s: O modelo inicia o ensaio perpendicularmente às ondas e sofre alteração de referência em Yaw para -15° .
2. De 1300 s a 1700 s: em 1300 s a intensidade das ondas é elevada e antes de 1600 s a referência em Yaw é alterada para -30° .
3. De 1700 s a 1825 s: o gerador de ondas é desligado.

Figura 4.27 - Valores (X,Y, Ψ) medidos (azul), referência (verde) e estimados (vermelho)

No primeiro caso o gerador de ondas é ligado perpendicularmente ao modelo, no entanto, nenhuma perturbação é sentida já que o movimento de Pitch não causou deslocamento na embarcação. Para aumentar a influência das ondas no movimento do modelo, a referência em Yaw foi alterada para -15° , mas o modelo pôde ser controlado muito bem apresentando somente um aumento no tempo de acomodação da posição angular.

No segundo caso a frequência da onda foi mantida em 1 Hz, porém sua amplitude foi aumentada. Em -15° o modelo pôde ser controlado muito bem mesmo com o aumento do movimento de Pitch e Roll e da variação das medidas no sistema de visão artificial.

Após a alteração da referência para -30° a embarcação não pôde ser mantida neste valor entrando em deriva. Nota-se na Figura 4.29, da rotação nos propulsores, que os valores da proa e popa chegaram próximos da saturação de aproximadamente 1800 RPM não conseguindo, portanto, vencer os esforços da onda. Mesmo não mantendo a posição em Yaw, o modelo pôde ser mantido em X e Y com erro bastante baixo.

No terceiro momento o gerador de ondas é desligado para se observar o comportamento da embarcação. Como esperado, o modelo corrigiu a sua posição em Yaw para -30°

A Figura 4.28 mostra os empuxos antes da alocação e a Figura 4.29 mostra a rotação em cada propulsor após passar pelo algoritmo de alocação.

Figura 4.28 - Empuxos resultantes em X, Y e Yaw

Figura 4.29 - Rotações nos propulsores após alocação de empuxos

5. Conclusões e sugestões

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um aparato eletrônico para permitir a realização de ensaios experimentais de veículos oceânicos com sistema de posicionamento dinâmico em tanque de provas.

O projeto foi totalmente idealizado no Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP e pode-se afirmar que foi desenvolvida uma tecnologia brasileira para a construção da eletrônica embarcada para ensaios com sistema de posicionamento dinâmico em tanque de provas. Essa tecnologia pode ser entendida como sendo desde o conceito do projeto e utilização dos componentes eletrônicos bem como a implementação dos algoritmos computacionais utilizados nos módulos microprocessados.

A precisão nos ensaios pôde ser verificada através dos excelentes resultados obtidos com relação ao desempenho do modelo, os quais só puderam ser alcançados através do correto controle localizado de cada propulsor sob os comandos do controlador superior, ou seja, cada controle localizado foi responsável por garantir em seu propulsor a rotação obtida na alocação de empuxos.

Por ser complexo, um projeto de SPD precisa ser amplamente estudado, simulado e ensaiado em laboratório antes de ser implementado numa embarcação real reduzindo com isso o tempo de concepção e custos de implementação e ajustes. Este trabalho finalizou a etapa de preparação do aparato eletrônico embarcado necessário para garantir o funcionamento do modelo de acordo com os comandos do controlador superior e, como sugestão, os seguintes tópicos poderiam ser explorados na prática a partir deste trabalho:

- Ensaios em tanque de provas para estudo de novas abordagens de teoria de controle para sistemas de posicionamento dinâmico;
- Estudos práticos de novas técnicas de alocação de empuxos;

- Elaboração de sistemas de localização da embarcação em ambientes não estruturados. Neste trabalho o ambiente precisa ser estruturado, ou seja, um conjunto de equipamentos devem ser previamente instalado nas proximidades do tanque para que o sistema funcione, no entanto, um sistema que independa desse prévio preparo poderá ser investigado;
- Aprimoramento da eletrônica embarcada como a utilização de microcontroladores dotados de mais recursos periféricos ou implementação de novas topologias de acionamento de potência para os motores dos propulsores;
- Estudo de sistemas de sensoriamento embarcado para medida da influência de agentes ambientais, como o vento, ou para localização do modelo no tanque de provas.

6. Referências Bibliográficas

- [1] – Tannuri, E. A., “Desenvolvimento de metodologia de projeto de sistema de posicionamento dinâmico aplicado a operações em alto mar”. Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001.
- [2] – Aranda, J., Armada, M. A., Cruz, J. M., “Automation for the maritime industries” - AUTOMAR. Madrid, 2004.
- [3] – Hamamatsu, M., “Non linear DP controller”. Kawasaki Heavy Industries LTDA, Japan, 2002.
- [4] – Morishita, H., M., “Capacitação nacional para a realização de ensaios e simulação de sistemas DP”. Relatório de projeto, USP / Petrobrás, 2007.
- [5] – Morishita, H.M., Tannuri, E.A., Lago, G.A., “Experimental set-up for experiments with dynamic positioning system”. MCM, Lisboa, 2002.
- [6] - Morishita, H.M., Tannuri, E.A., Lago, G.A., Veras, V.L.M., “Critical analysis of control and filtering algorithms used in real dynamic positioning systems”. 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 12–17, 2005, Halkidiki, Greece.
- [7] – Lago, G.A., Veras, V.L.M., “Projeto e construção de SPD de embarcações em tanque de provas”. Trabalho de conclusão de curso, 2004.
- [8] – Shimizu, D.M., Morikawa, F.A., “Aplicação de um sistema de posicionamento dinâmico em um modelo de unidade flutuante”. Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica da USP, 2005.
- [9] – Kawamura, F.K., Lopes, N.F., “Projeto e implementação de sistema de posicionamento dinâmico para ensaios em veículos oceânicos”. Trabalho de conclusão de curso, 2006.
- [10] - Tannuri, E.A., Donha, D.C. ,Pesce, C.P., “Dynamic positioning of a turret moored FPSO using sliding mode control”
- [11] - - Tannuri, E.A., Donha, D.C., “ H^∞ Controller design for dynamic positioning of a turret moored FPSO”
- [12] – Morishita, H.M., Tannuri, E.A., “Experimental and numerical evaluation of a typical dynamic positioning system”. Applied ocean research, ELSEVIER, 2006.
- [13] – The International Marine Contractors Association. “Dynamic positioning”. IMCA, <http://www.imca-int.com/divisions/marine/reference/intro.html>.

- [14] – Santos, A.O., “Desenvolvimento de instrumentação laboratorial e controladores ativos pid para sistemas de posicionamento dinâmico em tanque de provas”. Dissertação de mestrado, 2004.
- [15] - Gibbon, K.T.; Johnson C.T.; Bailey D.G.; A Real-time FPGA Implementation of a Barrel Distortion Correction Algorithm with Bilinear Interpolation, Image and Vision Computing NZ, p. 408-413, November 2003.
- [16] – Ogata, K., “Engenharia de controle moderno”. 3ª edição, LTC, 2000.
- [17] – Aström, K.J., Wittenmark, B., “Computer controlled systems. Theory and design”. 3th edition, Prentice Hall, 1997.
- [18] – Transceptores de rádio Radiotronics. www.radiotronics.com.
- [19] - Balchen, J.G. et al. “A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control, Modeling, Identification and Control”. 1980.
- [20] - Fossen, T.I., Strand, J.P. “Passive nonlinear observer design using Lyapunov methods, experimental results with a supply vessel”. Automatica, 1999.
- [21] - Fossen, T.I., Grovlen, A., “Nonlinear Output Feedback Control of Dynamically Positioned Ships Using Vectorial Observer Backstepping”. IEEE Transactions on Control System Technology, 1998.
- [22] – Santos, E.M., “Um simulador de manobras em tempo real com sistema de posicionamento dinâmico para treinamento”. Tese de doutorado, 2005.
- [23] – Saelid, S., Jensen, N.A., Balchen, J.G. “Design and analysis of a dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control”. IEEE Transactions on Automatic Control, 1983.