EDUARDO AOUN TANNURI

SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DINÂMICO: PROJETO, ANÁLISE E NOVOS DESENVOLVIMENTOS

Texto sistematizado sobre projeto de pesquisa apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para fins de Concurso de Livre Docência junto ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.

Especialidade:
Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2009

Ficha Catalográfica

Tannuri, Eduardo Aoun
Sistemas de Posicionamento Dinâmico: Projeto, Análise e Novos Desenvolvimentos. São Paulo, 2009.

Texto sistematizado de pesquisa (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.

1. Posicionamento Dinâmico. 2. Controle não-linear. I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos II.t

Dedico meu trabalho à minha família

Helwe, Uenis, Ana Cristina e Claudia

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski e ao Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato, pelo apoio e incentivo à realização das atividades de pesquisa e desenvolvimento junto ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.

Aos professores da EPUSP que participaram diretamente dos trabalhos relatados: Alexandre Nicolaos Simos, André L. Condino Fujarra, Celso Pupo Pesce, Gilberto Marta de Souza, Helio Mitio Morishita, José Augusto Penteado Aranha, José Jaime da Cruz e Kazuo Nishimoto.

Aos alunos e pesquisadores envolvidos: Carlos Hakio Fucatu, Denis Taniguchi, Mario Luis Carneiro, Pedro Cardozo de Mello, Adriana Cavalcante Agostinho, Asdrubal do Nascimento Queiroz, Cesar Illuminatti, Glenan Assis Lago, Fabiano Pinheiro Rampazzo, Fábio Tadao Matsumoto, Felipe Rateiro, Lázaro Moratelli Jr., Anderson Takehiro Oshiro, Bruno Devoraes Rossin, Paulo Cesar de Azevedo Jr. e Pedro Gomes da Costa.

À Petrobras pela motivação inicial do estudo, constante apoio e financiamentos às pesquisas dentro da Universidade, destacando: Álvaro Maia da Costa, Ana Paula dos Santos Costa, Arthur Curty Saad, Clarissa Ramos Regis, Fernando Gomas da Silva Torres, Isaías Quaresma Masetti, João Luis B. Silva, Luiz Augusto Petrus Levy, Marcos Ferreira Donato, Rodrigo Augusto Barreira, Sylvio H. Sá Correa da Silva e Vinicius Leal Ferreira Matos.

Aos integrantes das organizações que contribuíram com as pesquisas relatadas, por meio de financiamentos e de troca de experiências em projetos de desenvolvimento conjunto, destacando-se a Marinha do Brasil, Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo, Respol Y.P.F. e Chevron North America Exploration Co.

Aos integrantes do IPT: Carlos Daher Padovezi, Carlos H. Umeda, José Carlos Zanutto e Maria Aparecida P. Gandara Mendes.

Ao CNPq, FAPESP e FINEP, pelas bolsas e pelos diversos financiamentos concedidos.

Resumo

Apresenta-se neste texto o trabalho de pesquisa realizado pelo autor na área de Sistemas de Posicionamento Dinâmico de embarcações (Sistema DP), destacando-se seis tópicos dentro deste tema, relacionados a controle, estimação, simulação, análise experimental, novas estratégias de posicionamento e metodologias de projeto. Algoritmos de controle avançado (não linear e adaptativo) foram aplicados ao problema, em alternativa ao clássico controlador proporcional-derivativo. Constataram-se vantagens em relação à robustez, desempenho em diversas condições ambientais e facilidade no ajuste de parâmetros, através de análise numérica e experimental. A estimativa das condições ambientais em tempo real é importante para a segurança de operações *offshore* e para melhorar o desempenho dos Sistemas DP. Desenvolveu-se um método para estimar o espectro de ondas incidentes baseado exclusivamente nos movimentos de primeira ordem da embarcação. Ensaios experimentais e medições em escala real demonstraram a efetividade do mesmo. Simuladores numéricos de embarcações dotadas de Sistemas DP foram desenvolvidos a partir do completo entendimento dos algoritmos de controle, filtragem e alocação empregados nos Sistemas DP comerciais. Estes simuladores foram validados por meio de monitoração de uma operação real e são utilizados para projeto e análise de operações e embarcações. Novos efeitos físicos estão sendo incorporados nos simuladores, relacionados à interação hidro/aerodinâmica entre navios operando próximos. Apresenta-se também o desenvolvimento de aparatos e metodologia experimental para ensaios de modelos em escala reduzida de navios dotados de Sistemas DP, o que inclui a construção mecânica dos propulsores, eletrônica de controle embarcada e programas computacionais de supervisão e comando. Este trabalho inclui também a construção de novos sensores e equipamentos utilizados nos tanque de provas nacionais. Entre as particularidades do cenário de exploração *offshore* nacional destacam-se a forte componente bimodal do campo de ondas das bacias nacionais e a utilização de plataformas amarradas com pouca liberdade de aproamento. Isto levou à necessidade de desenvolvimento de estratégias de controle e posicionamento diferenciadas, levando-se em conta múltiplos objetivos, e não apenas o alinhamento com a resultante ambiental. O ultimo tópico abordado refere-se ao desenvolvimento de metodologias avançadas de projeto e análise de Sistemas DP, utilizando-se simulações dinâmicas ou cálculos estáticos intensivos. Destacam-se procedimentos para avaliação de disponibilidade operacional e cálculo de gráficos de capacidade levando-se em conta efeitos dinâmicos.

Abstract

This document presents the author's research work related to Dynamic Positioning Systems (DP Systems) of vessels, emphasizing six main topics concerning control design, estimation, numerical simulation, experimental facilities, positioning criteria and design methodology. The first topic is the application of advanced control theory (non linear and adaptive) to the design of DP System controller, instead of the classical proportional-derivative algorithm. Experimental and numerical analysis confirmed the simple tuning process and the good robustness and performance properties in several sea states. Real time estimation of environmental conditions is crucial for enhancing the safety of offshore operations and the performance of DP Systems. A method for wave spectrum estimation has been developed, based on the measurement of vessel first order motions. Experimental tests and real scale monitoring campaigns demonstrated the good accuracy of the method. Another important development is related to the implementation of numerical time-domain simulators of DP vessels, including the actual filtering, control and allocation algorithms used in the commercial DP Systems. The simulators were validated by means of a real offshore operation, and they have been extensively applied in the design and analysis of DP vessels and operations. Complex hydro/aerodynamical multi-vessel interaction effects are now being incorporated in the simulation codes. An experimental capability for DP experiments is also developed, what includes the mechanical manufacturing of the small scale propellers, implementation of embedded control and communication electronics and commanding software. This topic also comprehends the developments of new sensors and mechatronic equipments for national oceanic and towing basins. Two important particularities of Brazilian offshore exploration oil fields are the bimodality of sea state and the utilization of moored platforms with small weathervane ability. Those facts make the application of conventional positioning and control modes not adequate in the case of free heading operations. A novel methodology based on multi-objective criteria, other than the single minimum control thrust criterion, has been developed and successfully applied. The last research topic is related to the new methodologies for design and analysis of DP Systems, based on fully time domain simulations. Such methodologies include the evaluation of operational downtime and capability plots considering dynamic effects.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Abreviaturas

Glossário

1 Introdução 1
1.1 Sistema de Posicionamento Dinâmico 1
1.2 Breve Histórico 5
1.3 Tópicos abordados 5

2 Técnicas avançadas de controle 9
2.1 Histórico 9
2.2 Novos desenvolvimentos 12

3 Monitoração de ondas 17
3.1 Apresentação do problema 17
3.2 Contextualização e contribuições 18

4 Desenvolvimento de ferramentas de simulação 22
4.1 Sistemas *Offshore* 22
4.2 Manobras 25
4.3 Efeitos de interação entre corpos 27
4.3.1 Efeito de interação de ondas 28
4.3.2 Efeito de interação de correnteza e vento 30

5 Desenvolvimento de aparatos experimentais 33
5.1 Sistemas DP 33
5.2 Aplicação de engenharia mecatrônica nos tanques de provas 34
5.2.1 Desenvolvimento de sensor de espectro direcional de ondas 35
5.2.2 Construção de *Planar Motion Mechanism* (PMM) 35
5.2.3 Desenvolvimento de controle para geração e absorção ativa de ondas 36

6 Estratégias de controle e posicionamento 38
6.1 Aproamento Ótimo 38
6.2 Operações de alívio em plataformas SMS 41

7 Desenvolvimento de metodologias de projeto 45
7.1 Cálculo Dinâmico versus Estático 46
7.2 Avaliação de *Downtime* 47

8 Novas propostas de pesquisa 50
8.1 Técnicas Avançadas de Controle 50
8.2 Monitoração de ondas 51
8.3 Desenvolvimento de Ferramentas de Simulação 52
8.4 Desenvolvimento de Aparatos Experimentais 53
8.5 Estratégias de Controle e Posicionamento 54
8.6 Desenvolvimento de Metodologias de Projeto 55

9 Referências Bibliográficas 57

10 Anexos de 1 a 25 68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 (a) Definição dos movimentos; (b) Sistema DP; (c) Console de comando (adaptado de Agostinho, 2009 e Kongsberg, 2009) 2

Figura 1.2 Diagrama de Blocos de um Sistema de Posicionamento Dinâmico 2

Figura 1.3 Elementos de um Sistema DP (extraído de Tannuri, 2002) 3

Figura 1.4 (a) Propulsor azimutal (b) Propulsor em túnel (c) propulsor principal e leme (adaptado de Tannuri, 2002) 4

Figura 2.1: Diagrama de blocos do controle PID aplicado em SPDs 10

Figura 2.2: Exemplo de diagrama de blocos dos Sistemas DP comerciais (extraído de Kongsberg Simrad, 1999) 12

Figura 4.1 Aliviador Stavanger durante operação de alívio na plataforma (a) vista da ponte de comando do aliviador ; (b) vista da proa do aliviador (obtida em visita do autor a uma operação em 2007) 27

Figura 4.2 Barcaça BGL1 em operação de içamento em plataforma tipo jaqueta (modelo 3D TPN) 28

Figura 5.1 Modelo inicial de embarcação DP 33

Figura 5.2 Novo modelo de embarcação DP 34

Figura 5.3 (a) Ilustração do CH-TPN ; (b) detalhes dos flaps em fase final de instalação; (c) visão geral do tanque ainda sem água (Abril/2009) 37

Figura 6.1 (esq) Sistema SMS; (dir) Sistema *Turret* 41

Figura 6.2 Alívio de um FPSO *turret* 42

Figura 6.3 Operação de alívio na Bacia de Campos (extraída de Illuminatti et al., 2009) 42

Figura 8.1 (a) Exemplo de um mecanismo *hexapod*; (b) foto do mecanismo construído (c) dimensões 53

Figura 8.2 Método de lançamento de *manifold* (adaptado de Santos et al., 2009) 55

LISTA DE ABREVIATURAS

DP	Posicionamento Dinâmico
EKF	Filtro de Kalman Estendido
KF	Filtro de Kalman
SMS	Sistema de amarração espalhado (*Spread Mooring System*)
TAL	Lógica de alocação de empuxo (*Thruster Allocation Logic*)

GLOSSÁRIO

Movimento de *surge*	Translação longitudinal (avanço)
Movimento de *sway*	Translação lateral (deriva)
Movimento de *heave*	Translação vertical (arfagem)
Movimento de *pitch*	Rotação (no plano vertical) em torno do eixo transversal (caturro)
Movimento de *roll*	Rotação (no plano vertical) em torno do eixo longitudinal (balanço ou jogo)
Movimento de *yaw*	Rotação no plano horizontal (guinada)

1 Introdução

Este texto descreve as atividades de pesquisa realizadas pelo autor na área de Sistemas de Posicionamento Dinâmico (Sistema DP). Serão destacados os resultados alcançados, situando-os no contexto nacional e internacional. A apresentação é feita de forma resumida, sendo que detalhes podem ser encontrados nos artigos originais anexados ao texto.

No presente capítulo, expõem-se as definições gerais de um Sistema DP, seguida por um breve histórico. Os tópicos abordados na pesquisa são então destacados, delineando-se a estruturação básica do texto que se seguirá.

1.1 Sistema de Posicionamento Dinâmico

Define-se posicionamento dinâmico como um sistema que controla automaticamente a posição horizontal e aproamento de uma embarcação por meio de propulsão ativa (Bray, 1998; Fossen, 1994). Estes movimentos são indicados na Figura 1.1a e são conhecidos como *surge*, *sway* e *yaw*. Em linhas gerais, corresponde a um complexo sistema de controle, composto por sensores (DGPS, sonar, anemômetros, giroscópios, etc...), atuadores (propulsores e leme) e um processador central responsável pela execução do algoritmo de controle e pela interface com o operador (Figura 1.1b;c).

A Figura 1.2 ilustra o diagrama de blocos de um Sistema DP e todos os componentes envolvidos em sua malha de controle. A seguir, cada componente será detalhado.

As medidas da posição e aproamento provenientes de sensores são filtradas pelo Filtro de Ondas. Nos sistemas comercialmente disponíveis, utiliza-se um Filtro de Kalman Estendido (EKF) para realizar esta função. Em alto-mar, a embarcação sofre a ação de forças provocadas pela correnteza, onda e vento, que induzem movimentos de alta freqüência, da ordem da freqüência das ondas incidentes, e movimentos de baixa freqüência. O objetivo do Sistema DP é controlar exclusivamente os movimentos de baixa freqüência horizontais. O controle dos movimentos de alta freqüência exigiria uma potência muito elevada e poderia causar o desgaste dos propulsores. Além da função de filtragem, o EKF realiza a fusão de sensores, que corresponde em obter a estimativa ótima da posição e aproamento baseado em informações de múltiplos

sensores. Por ser um filtro baseado em modelo dinâmico da embarcação, permite também obter estimativas razoáveis de posição durante alguns instantes em que há perda de sinal do DGPS (função esta conhecida como *dead-reckoning*) e da força ambiental resultante sobre o navio.

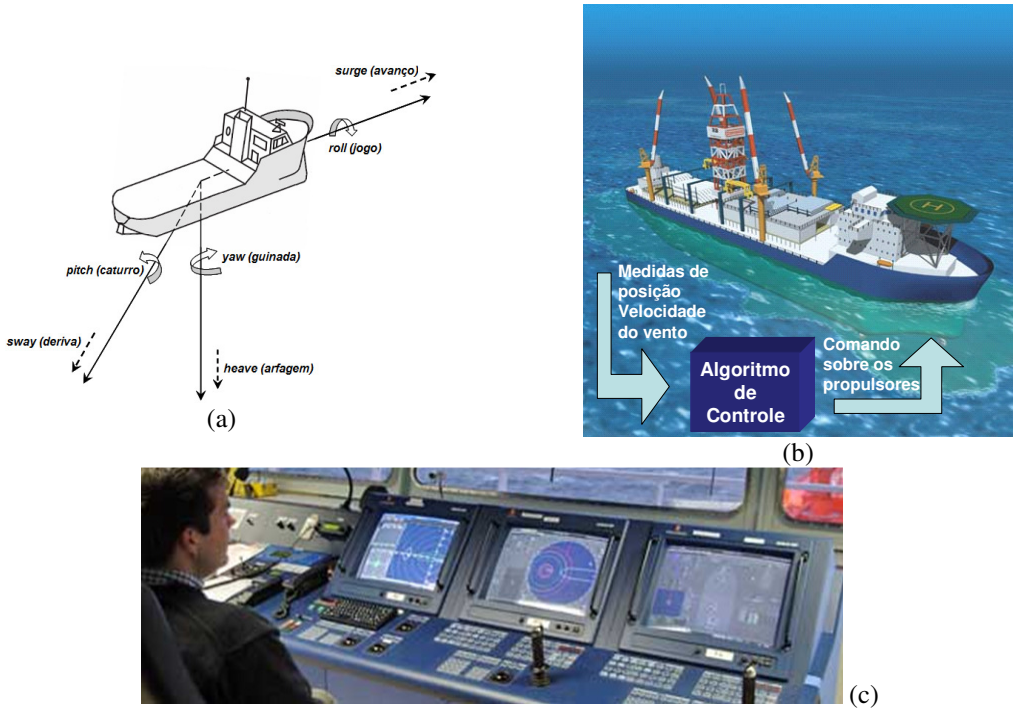


Figura 1.1 (a) Definição dos movimentos; (b) Sistema DP; (c) Console de comando (adaptado de Agostinho, 2009 e Kongsberg, 2009)

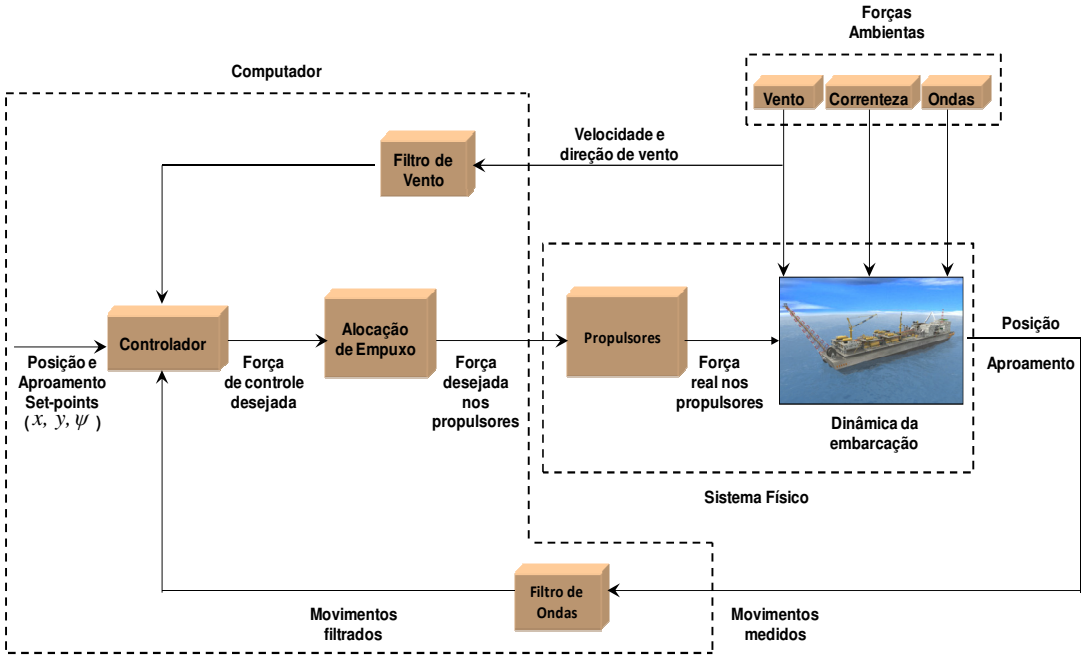


Figura 1.2 Diagrama de Blocos de um Sistema de Posicionamento Dinâmico

Um algoritmo de controle calcula as forças resultantes e momento de *yaw* necessários para o posicionamento da embarcação, baseado na posição atual calculada pelo Filtro de Ondas e na posição requerida (*set-point*). Utilizam-se, em sistemas comerciais, controladores do tipo Proporcional-Derivativo (PD) para cada um dos três movimentos. Estas forças são então distribuídas pelos propulsores (geralmente, embarcações com Sistema DP possuem de 3 a 9 propulsores) por meio de um algoritmo de alocação de empuxo (TAL – *Thruster Allocation Logic*). Este algoritmo corresponde a um método de otimização não-linear com restrições. O objetivo é obter um sistema de forças de atuação com resultante igual à calculada pelo controlador, com mínimo de consumo de potência e levando em conta as restrições de funcionamento e saturação de cada propulsor. O vento, medido pelos anemômetros, são em parte compensados por uma malha de pré-alimentação (*feedforward*).

Além dos complexos algoritmos de controle, filtragem e alocação descritos, o Sistema DP é composto por um grande conjunto de componentes que garantem o seu funcionamento. A Figura 1.3 apresenta o diagrama destes componentes, agrupados na forma de sub-sistemas. Além do sub-sistema de controle já descrito anteriormente, apresentam-se a seguir as funcionalidades dos demais sub-sistemas de forma resumida.

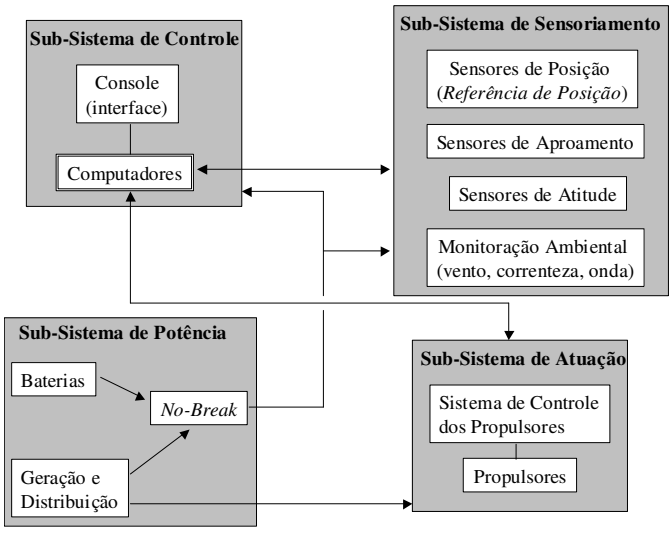
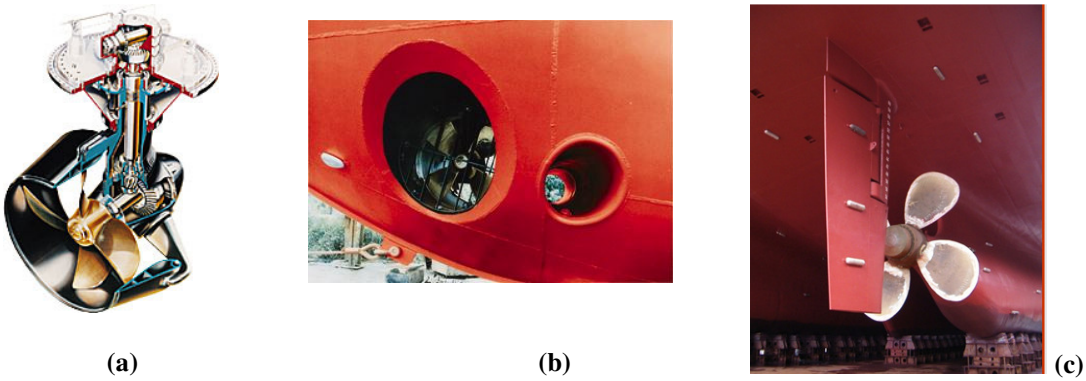


Figura 1.3 Elementos de um Sistema DP (extraído de Tannuri, 2002)

O sub-sistema de potência é responsável por fornecer energia ao Sistema DP, que consome uma grande parte da energia produzida na embarcação, com variações abruptas de carga devidas a súbitas mudanças das condições ambientais, como por exemplo a rajadas de vento. Uma das arquiteturas mais utilizadas é diesel-elétrica, com todos os consumidores alimentados eletricamente e a potência gerada por alternadores

diesel. Um *no-break* (conhecido como UPS – *Uninterruptible Power Supply*) associado a um banco de baterias é utilizado para estabilizar a energia fornecida aos componentes eletrônicos do SPD.

O sub-sistema de atuação é composto pelos diversos tipos de propulsores e pelos sistemas de controle associados a cada um deles. Os mais comuns são os propulsores principais e leme posicionados na popa da embarcação (Figura 1.4c); os propulsores em túnel (Figura 1.4b), montados em túneis instalados transversalmente ao casco e os azimutais (Figura 1.4a), que podem direcionar o empuxo gerado, através de um grau de liberdade adicional de rotação. A variação do empuxo nos propulsores pode ser obtida pela variação do ângulo das pás ou por variação da rotação.



(a) **(b)** **(c)**

Figura 1.4 (a) Propulsor azimutal (b) Propulsor em túnel (c) propulsor principal e leme (adaptado de Tannuri, 2002)

O sub-sistema de sensoriamento é composto pelos sensores de posição, conhecidos como sistemas de referência de posição, que medem a posição de um ponto da embarcação no plano horizontal. Existem diversas tecnologias empregadas para este fim, destacando-se os sistemas de localização por satélite diferencial (DGPS), sistemas hidroacústicos, radares por microondas, dentre outros. O aproamento da embarcação é medido por girocompassos. Em geral, os Sistemas DP possuem mais de um sensor de posição e aproamento, valendo-se desta redundância para obter medidas mais precisas e com maior confiabilidade. Existem também os sensores responsáveis pela medição de velocidade e direção de vento (anemômetros), que são encontrados em todos os Sistemas DP atuais e são utilizados na malha de pré-alimentação.

1.2 Breve Histórico

A motivação inicial para o desenvolvimento dos Sistemas DP foi relacionada à exploração de petróleo em águas profundas, em substituição às plataformas fixas e amarradas de perfuração, e iniciou-se por volta da década de 60. O primeiro navio a se manter posicionado dinamicamente foi o "Cuss-I", em 1961, nos Estados Unidos. O controle da posição e aproamento era feito manualmente, ou seja, o operador mantinha a posição da embarcação através de informações enviadas por um sistema de radar e de um sonar. No mesmo ano, desenvolveu-se o primeiro navio verdadeiramente equipado com Sistema DP, o "Eureka", que utilizava um controlador analógico que recebia as informações de um sensor de posição do tipo fio tensionado. Ao longo das décadas de 60 e 70, outros navios foram convertidos para atuarem com Sistema DP, como o norte americano "Cardrill" e o francês "Terébel". Comparados aos modernos sistemas, eram extremamente simples, com controladores analógicos, sem redundância e desprovidos de um sistema de compensação ativa dos esforços ambientais.

Após a década de 70, o posicionamento dinâmico tornou-se uma técnica difundida em virtude da expansão da indústria de prospecção e exploração de petróleo em alto-mar. Destaca-se a publicação de Balchen et al. (1976), que descreve a formulação matemática do Filtro de Kalman aplicado a Sistemas DP. Este trabalho deu origem à estrutura de controle utilizada até hoje nos sistemas comerciais, como mencionado na seção 1.1.

Embora a aplicação inicial dos Sistemas DP fosse voltada para plataformas de perfuração, diversas outras aplicações ligadas ou não à indústria do petróleo se desenvolveram, tais como posicionamento de navios de suporte e instalação, pesquisa geológica e oceanográfica, lançamento e manutenção de dutos e cabos submarinos, combate a incêndio, transferência de petróleo e gás e apoio a mergulhadores.

1.3 Tópicos abordados

Conforme mostrado na seção 1.1, sistema de posicionamento dinâmico compreende um assunto multidisciplinar e bastante amplo. O autor atua, desde sua graduação em 1998, em atividades científicas relacionadas aos subsistemas de controle e sensoriamento. Além disso, tem atuado em estreita cooperação com a indústria no desenvolvimento de ferramentas de suporte para análise e projeto de Sistemas DP,

englobando simuladores computacionais e aparatos experimentais. Destaca-se também o desenvolvimento de metodologias de projeto e operação, sobretudo voltadas para o alívio de petróleo com navios DP em águas nacionais, questão esta muito relevante para a indústria.

Cada um dos tópicos será resumido na presente seção, sendo que nos próximos capítulos os mesmos serão detalhados e as contribuições do autor serão apresentadas em uma contextualização internacional.

Com relação ao subsistema de controle, o autor realizou a aplicação de controladores avançados em substituição aos convencionais controladores Proporcionais-Derivativos, objetivando a solução de problemas operacionais que estes apresentam, tais como dificuldade em ajuste de ganhos e restrita janela ambiental de operação. Aplicou metodologia de controle não-linear por modos deslizantes e controle adaptativo baseado em modelo, ambos com bons resultados confirmados por testes em simulação e em tanque de provas.

A monitoração de ondas em tempo real é um problema ainda não solucionado, e que poderia melhorar o desempenho dos Sistemas DP, permitindo a utilização de um controle do tipo pré-alimentação. O autor desenvolveu a partir de sua tese de doutorado um método de estimação do espectro de ondas baseado nos movimentos da embarcação, utilizando-se estatística Bayesiana. Este método foi validado por meio de testes em simulação numérica, tanque de provas e monitoração em escala real.

Outra importante contribuição do autor refere-se ao desenvolvimento de simuladores computacionais de navios dotados de Sistemas DP. Este trabalho envolveu o completo entendimento dos algoritmos de controle, filtragem e alocação efetivamente empregados nos sistemas comerciais, nem sempre publicados abertamente. Estes algoritmos foram então implementados em um simulador em parceria com a Petrobras, chamado de Dynasim. Este é utilizado atualmente como ferramenta fundamental de projeto e análise de navios e plataformas pelo corpo técnico da empresa. Os algoritmos de posicionamento dinâmico implementados foram validados por meio de uma campanha de monitoração em escala real de uma operação DP. Em seguida, foram também incluídos no simulador TPN (Tanque de Provas Numérico), que permite a simulação de operações em tempo real. Como subproduto destes desenvolvimentos,

gerou-se também uma outra ferramenta de simulação de embarcações no plano horizontal, voltada para verificação de manobras em portos e canais.

Neste mesmo contexto, o autor atualmente está realizando pesquisas na área de controle de múltiplas embarcações próximas, incluindo efeitos de interações hidro-aerodinâmicas no simulador. Estes efeitos são de difícil modelagem, e requerem grande capacidade de processamento. Trabalhos importantes estão sendo desenvolvidos no sentido de se avaliar o impacto destes efeitos no desempenho e dimensionamento dos Sistemas DP.

Até meados da presente década, não havia no Brasil capacitação para a realização de ensaios experimentais em tanque de provas de navios dotados de Sistemas DP. Neste contexto, iniciou-se em 2007 um projeto para desenvolver tal capacitação, com grande participação do autor em diversas fases de tal projeto. Isto inclui a fabricação mecânica dos propulsores em escala reduzida, desenvolvimento de técnicas de calibração e implementação de um software para controle e supervisão dos testes, tal como um Sistema DP real. Atualmente, conforme será mostrado adiante em resultados já publicados, é possível realizar tais ensaios em tanques nacionais. Nesta linha de trabalho, o autor também tem atuado na aplicação de engenharia mecatrônica para a modernização dos tanques de provas nacionais, bem como na construção do primeiro tanque com geração e absorção ativa brasileiro.

Os campos de petróleo nas bacias nacionais possuem particularidades que não são levadas em conta no projeto dos Sistemas DP, na medida em que os mesmos são desenvolvidos na Noruega. Por esta razão, há diversos problemas operacionais oriundos desta inadequação, sobretudo durante as operações de alívio de óleo a partir de plataformas FPSO. Há no mar brasileiro forte componente bimodal de ondas e grande parte das plataformas possuem pouca liberdade de aproamento (amarração do tipo *spread mooring system*). Por estes fatos, como será explicado adiante, a estratégia de alinhamento com a resultante das condições ambientais (*weathervane*) pode não ser adequada. Neste contexto, em parceria e colaboração com setores da indústria de exploração, o autor desenvolveu propostas de novas estratégias de controle de posicionamento de navios aliviadores e plataformas, considerando múltiplos objetivos, e não apenas o alinhamento com a resultante ambiental.

Destaca-se também o desenvolvimento de metodologias avançadas de projeto e análise de Sistemas DP, utilizando-se simulações dinâmicas ou cálculos estáticos intensivos. Estas envolvem procedimentos para avaliação de *downtime* operacional (tempo médio ao longo de um ano em que um navio DP não poderá operar) e cálculo de gráficos de capacidade (*capability plots*) levando-se em conta efeitos dinâmicos.

Nos capítulos seguintes, cada um dos tópicos mencionados será detalhado, apresentando-se a contribuição do autor contextualizada internacionalmente. Os principais trabalhos publicados ou em fase de publicação serão mencionados e encaminhados em anexo. Ao final, o autor apresenta propostas de continuidade nesta linha de pesquisa, que envolvem atividades que serão realizadas nos próximos cinco anos.

2 Técnicas avançadas de controle

Conforme detalhado anteriormente, o Sistema DP compreende três algoritmos principais: controle, filtragem e alocação de empuxo. Embora já existam soluções comerciais para cada um destes, englobados nos Sistemas DP atuais, ainda verificam-se diversos problemas operacionais devido à inadequação dos algoritmos a determinadas condições. Neste sentido, ainda há grande esforço da comunidade científica e industrial no desenvolvimento de novas soluções. O autor participa deste processo, tendo atuado desde 1998 no desenvolvimento de novos algoritmos de controle e comparação com os atualmente utilizados.

Neste capítulo, será apresentado um breve histórico do desenvolvimento dos algoritmos aplicados a Sistemas DP, até a consolidação do Filtro de Kalman Estendido (EKF) associado a controle Proporcional-Derivativo (PD) que é o padrão utilizado atualmente. Em seguida, serão expostos os novos esforços da comunidade nacional e internacional para a proposição de novas técnicas de controle e filtragem, que, de acordo com o andamento das pesquisas, poderão vir a substituir os algoritmos utilizados hoje em dia.

Ao longo das duas seções, serão introduzidas as contribuições do autor, tanto no que se refere a artigos de análise dos algoritmos de controle e filtragem empregados atualmente, quanto a propostas de técnicas modernas de controle.

2.1 Histórico

Nos primeiros Sistemas DP operantes, a cada grau de liberdade horizontal do navio (*surge*, *sway* e *yaw*) empregava-se um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) em cascata a um filtro passa-baixa e/ ou filtro em cunha (*notch*). A Figura 2.1 ilustra o diagrama de blocos (Bray, 1998). O filtro possuía a função de atenuar as componentes de primeira ordem (freqüência da onda) e de eliminar ruídos de medição.

No projeto dos controladores PID assumiam-se duas hipóteses: o desacoplamento dos movimentos horizontais, ou seja, a não existência de interação entre a dinâmica e hidrodinâmica dos mesmos e a linearidade do sistema, à medida que o PID é um controlador linear. Devido à sua forma matemática simples, tais controladores eram facilmente implementados pelos circuitos analógicos disponíveis naquela época. Porém,

este tipo de abordagem apresentava desvantagens. Segundo Fossen (1994), o termo integral do controlador PID reduz as margens de estabilidade, o que, associado ao atraso de fase introduzido pelos filtros, pode levar a instabilidade. A ação integral deveria ser bastante reduzida para evitar este efeito. Além desta questão, o acoplamento entre os movimentos, desconsiderados na arquitetura do controle, tornava o ajuste dos ganhos um processo bastante complexo.

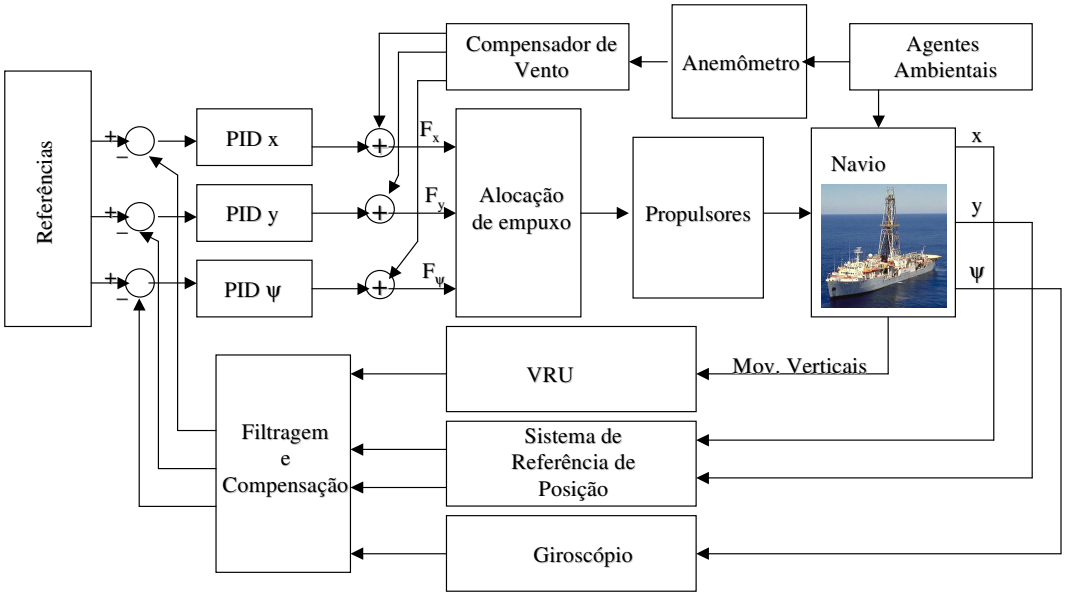


Figura 2.1: Diagrama de blocos do controle PID aplicado em SPDs

Um primeiro avanço no desenvolvimento dos algoritmos foi realizado no início da década de 70, com o Sistema DP da empresa *General Electric* (Ball; Blumberg, 1975). O sistema possuía um sistema de filtragem também baseado em filtros cunha, porém o controle foi projetado levando-se em conta a interação entre os movimentos de *sway* e *yaw*, utilizando-se para isso a descrição no espaço de estados e a aplicação de teoria de controle multi-variável.

A contribuição mais significativa para o desenvolvimento dos Sistemas DP ocorreu em meados da década de 70 com a aplicação do Filtro de Kalman (KF) e da teoria de controle ótimo. Este desenvolvimento foi resultado de uma parceria entre a empresa norueguesa Kongsberg Våpenfabrik A/S e o SINTEF - *Norwegian Institute of Technology in Trondheim* (Balchen et al., 1976). O KF incorpora o modelo do sistema (chamado de modelo interno), considerando-se a dinâmica de alta freqüência (freqüência da onda) e de baixa freqüência. Isto possibilita uma estimação ótima das componentes de movimento isoladamente, o que é desejável para o controle, já que este deve atuar apenas em função dos movimentos de baixa freqüência. Várias razões

justificam a aplicação do KF em Sistema DP, entre eles a redução do atraso de fase introduzido pelo processo de filtragem (comparado as filtros em cunha convencionais) permitindo a utilização de maiores ganhos de controle e levando a melhor desempenho. Adicionalmente, o KF permite a utilização de vários sensores redundantes, realizando a estimação ótima da posição e aproamento da embarcação com base nas informações dos mesmos. Além disso, a presença do modelo interno permite que o KF estime a posição do navio mesmo na ausência total de novas medidas durante alguns segundos (*dead-reckoning*). Estas características aumentam a confiabilidade e segurança, que são questões fundamentais para esses sistemas. Finalmente, com a utilização do KF é possível estimar as forças ambientais que atuam sobre a embarcação, o que é importante para os operadores e pode ser utilizado no controlador ao invés do termo integral (Bray, 1998). No artigo Balchen et al. (1980), apresentam-se resultados de campanhas de monitoração em escala real que comprovam a eficácia do sistema proposto.

O autor realizou uma comparação entre o desempenho dos filtros convencionais (cunha) e do KF aplicado a Sistemas DP (Tannuri et al., 2003a). Neste artigo, encaminhado no Anexo 1, destaca-se que um dos grandes problemas associados ao KF é o ajuste de parâmetros. Apresentam-se algumas regras para a sintonia dos parâmetros, que foram utilizadas posteriormente no desenvolvimento dos simuladores (ver capítulo 4). Esta observação foi feita por Saelid et al. (1983), que destacou que "a sintonia do KF é em geral difícil e deve ser combinada com análises extensivas...".

O modelo de alta frequência incluído no KF requer uma estimativa da frequência de pico do espectro da onda incidente. Balchen et al. (1976) propuseram um algoritmo de identificação recursiva baseado no método de RPEM (*recursive predictor error method*) e Grimble et al. (1979) propuseram a introdução da frequência de pico com um novo estado a ser estimado no KF. Neste último enfoque, o sistema torna-se não linear e deve-se então utilizar um Filtro Estendido de Kalman (EKF). O autor também realizou uma análise comparativa entre estes métodos (Tannuri et al., 2005), indicando vantagens ao método baseado em EKF. Este artigo é encaminhado no Anexo 2. Esta análise fora feita objetivando-se o entendimento dos algoritmos utilizados nos Sistemas DP atuais para posterior implementação nos simuladores desenvolvidos.

Destaca-se, portanto, que o trabalho seminal de Balchen et al. (1976) pode ser considerado a base teórica dos Sistemas DP atualmente empregados no mercado. A Figura 2.2 apresenta o diagrama de blocos extraído da especificação técnica de um

Sistema DP comercial. Nota-se o controlador PD (*Damping / Gain Control*), o Filtro de Kalman associado a um modelo do navio (*Vessel Model*) e a estimativa dos esforços ambientais sendo utilizada no controle como termo integral, da mesma forma que fora proposto por Balchen et al. (1976).

Alguns aprimoramentos sobre o algoritmo original foram ao longo do tempo sendo desenvolvidos, tais como apresentados em Grimble et al. (1980), Saelid et al. (1983), Fung; Grimble (1983), Di Masi et al (1986), Donha (1989) e Donha (2000).

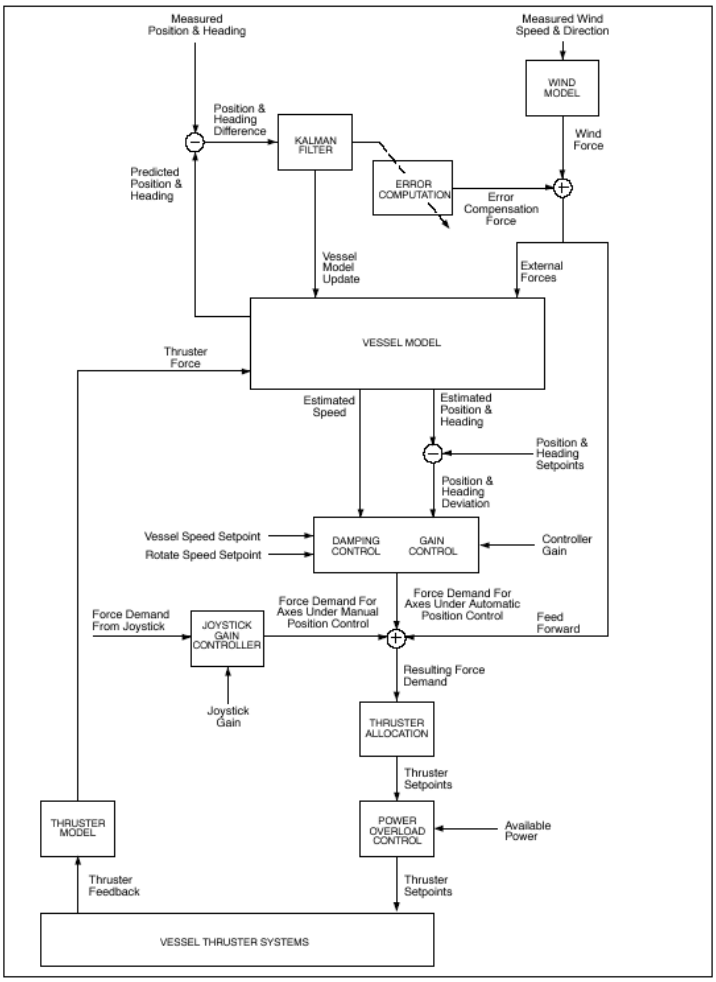


Figura 2.2: Exemplo de diagrama de blocos dos Sistemas DP comerciais (extraído de Kongsberg Simrad, 1999)

2.2 Novos desenvolvimentos

A operação dos Sistemas DP tem evidenciado que os controladores convencionais (PD + KF) apresentam problemas de desempenho e dificuldade de ajuste dos ganhos devido às não linearidades não consideradas durante o projeto e às variações das condições operacionais e ambientais. Neste sentido, desde a década de 90 novas

metodologias de controle têm sido aplicadas aos Sistemas DP. Dentre as linhas principais de trabalho, destacam-se controladores robustos lineares, controladores adaptativos e, mais atualmente, controladores não lineares.

Como em todo sistema real, o controlador deve ser robusto a erros de modelagem, garantindo o desempenho e estabilidade para modelos próximos ao nominal, utilizado no projeto. Assim, questões de robustez a erros de modelagem passaram a ser consideradas em meados da década de 90, utilizando-se outras abordagens de controle linear. Dentro desse contexto destaca-se a metodologia de controle H_∞ aplicada por vários autores em projetos de Sistemas DP, tais como: Katebi et al. (1997), Nakamura; Kajiwara (1997), Donha; Tannuri (2001) e Tannuri; Donha (2000). Neste último artigo (encaminhado no Anexo 3), o controlador H_∞ apresentou propriedades de robustez satisfatórias, com um bom desempenho na presença de grandes variações das condições ambientais, erros de modelagem e incerteza nos parâmetros. Mostrou-se, portanto, que problemas associados a janela ambiental restrita, evidenciados nos controladores PD, podem ser sanados com a utilização de um controlador robusto. Verificou-se que o controlador manteve desempenho satisfatório com correntezas variando no amplo faixa de 0,5m/s a 1,5m/s. No entanto, a metodologia de controle H_∞ é linear e, portanto, tem por base um modelo linear do sistema. Para contornar o problema, utilizam-se modelos linearizados em torno do ponto de operação. Grandes variações do estado do sistema (tais como ocorrem em operações que envolvam controle de trajetória) requerem portanto a utilização de múltiplos modelos linearizados, com o chaveamento do controlador projetado. Questões de robustez especificamente relacionadas à modelagem das forças de correnteza foram abordadas em Tannuri et al. (2003b). Neste artigo discutiu-se a influência da escolha do modelo de correnteza adotado no projeto do controlador no desempenho global do mesmo. Mostrou-se que num projeto de controle robusto, dois diferentes tipos de modelos de correnteza levam a resultados adequados em termos de desempenho.

Outra questão de interesse é o desempenho do controlador em face a alterações nas condições operacionais, tais como a massa da embarcação. Em uma operação de alívio, por exemplo, o navio petroleiro possui sua massa total triplicada, durante aproximadamente 30 horas de transferência de óleo. Um controlador PD com ganhos fixos não garantirá desempenho adequado ao longo de toda a operação. Assim, os Sistemas DP comerciais possuem um banco de dados de ganhos de controle, que são

chaveados ao longo da operação. O Sistema DP deve, portanto, ser integrado ao sistema de controle de carga, para receber do mesmo a informação da massa ou do calado instantâneo da embarcação. Este procedimento claramente demanda um processo de ajuste de ganhos mais complexo, na medida em que os ganhos devem ser ajustados para cada condição de carregamento (em geral consideram-se apenas as situações cheio, intermediário e lastro).

No artigo Tannuri et al. (2006a), desenvolveu-se um controlador PD associado a um mecanismo de adaptação de ganhos, baseado em algoritmo de controle adaptativo robusto referenciado a modelo (*Robust Model-Reference Adaptive Control Algorithm* – R-MRAC). O controlador mantém a tradicional estrutura de um PD, porém os ganhos são automaticamente ajustados por meio de um algoritmo de adaptação que internamente estima a massa instantânea da embarcação. Neste artigo, os autores abordaram apenas um grau de liberdade do navio. No artigo Tannuri et al. (2006b), encaminhado no Anexo 4, o controlador foi generalizado para os 3 graus de liberdade horizontais do navio. Pôde-se verificar bom desempenho do sistema por meio de simulações numéricas exaustivas. O autor considera que um procedimento tal com este, que envolve a utilização de um controlador PD com algum mecanismo de ajuste automático de ganhos, é uma boa solução para a melhoria dos controladores aplicados a Sistemas DP. Com isso, mantém-se a estrutura simples do controle PD, já operante há 30 anos em Sistemas DP, e que possui a confiança e entendimento pelos operadores, porém o algoritmo de ajuste de ganhos garante melhor desempenho em diversas condições ambientais e operacionais.

O modelo matemático que descreve a dinâmica de uma embarcação possui um forte caráter não-linear e a utilização de técnicas de controle linear despreza todas as não-linearidades contidas em tais modelos. Por essa razão, outros trabalhos foram desenvolvidos aplicando-se a técnica de controle não-linear. Assim, controladores não-lineares passaram a ser estudados e implementados em Sistemas DP, destacando-se o controle *backstepping* e controle por modos deslizantes (*sliding control mode*).

No final da década de 80, divulgou-se a técnica de controle não linear denominada *backstepping*. Sua origem é um pouco incerta, pois a idéia central apareceu simultaneamente e de forma implícita em diversos trabalhos, porém sua formalização pode ser creditada a Krstic et al.(1995), que editaram o primeiro livro sobre o assunto. Fossen; Grovlen (1998) desenvolveram um sistema de controle aplicado a DP composto

por um observador não linear e um controlador *backstepping*. Este trabalho foi estendido por Fossen; Strand (1999), com o desenvolvimento de um observador passivo não linear capaz de efetuar a filtragem de onda e a estimação dos esforços ambientais. O emprego deste conceito reduziu significativamente o número de ganhos do observador em relação ao KF, tornando o seu processo de sintonização simples e intuitivo. Zakartchouk Jr; Morishita (2009) aplicaram com sucesso a metodologia de controle *backstepping* associada aos observadores passivos, com ensaios realizados nas instalações laboratoriais que serão descritas na seção 5.1.

A técnica de controle por modos deslizantes (SMC) surgiu no final da década de 1970, na antiga União Soviética, sendo desenvolvida por Utkin (1978) e posteriormente modificada e adaptada por Slotine (1984). Essa técnica considera em sua estrutura as incertezas do modelo e a lei de controle é determinada de forma que as trajetórias do sistema "deslizassem" sobre uma região desejada no espaço de estado, denominada superfície de deslizamento, ali permanecendo indefinidamente. Essa abordagem não-linear elimina os problemas de linearização encontrados nos controles lineares, assim como torna bastante intuitivo e simples o processo de ajuste dos parâmetros da malha de realimentação. Entretanto, da forma como fora proposta por Utkin, esta metodologia apresentou alguns problemas relacionados aos elevados ganhos de controle e principalmente a existência de oscilações de alta freqüência (chaveamento) na ação de controle, dificultando sua aplicação prática. Slotine; Sastry (1983) desenvolveram adaptações nessa metodologia para viabilizar sua implementação prática, através da "suavização" do termo chaveado de controle. O controlador por modos deslizantes, então adaptado, foi aplicado com sucesso a vários sistemas não lineares, tais como manipuladores robóticos (Slotine, 1985), sistema de posicionamento para robôs submarinos (Yoerger et al., 1986) e piloto automático de embarcações (Papoulias; Healey, 1992).

Uma das partes da tese de doutorado do autor (Tannuri, 2002) consistiu na aplicação desta metodologia a Sistemas DP. O trabalho Tannuri et al. (2001a), encaminhado no Anexo 5, descreve o controlador e os resultados alcançados. Inicialmente, o modelo matemático do sistema foi re-adequado quanto à forma, para a identificação das não-linearidades e implementação do termo de linearização por realimentação (*feedback linearization*). Em seguida, é feita uma estimativa das forças externas por meio de medições dos agentes ambientais. Os máximos erros também são

calulcados, baseados diretamente na incerteza da medição dos agentes ambientais. Ao final, implementa-se o termo chaveado que garante a robustez do controle em face aos erros de modelagem e estimação.

O controlador por modos deslizantes demonstrou-se robusto e eliminou (ou minimizou) os problemas relacionados ao ajuste dos parâmetros do modelo contido no controlador. O processo de ajuste de ganhos foi bastante simples, baseado em regras práticas sugeridas na literatura. Além disso, o desempenho do controlador foi satisfatório em uma ampla faixa de condições ambientais (larga janela ambiental) e de condições de carregamento. No artigo, as validações foram feitas por meio de simulações numéricas.

Em seguida, o autor realizou a validação experimental do controlador por modos deslizantes. Este trabalho foi tópico de um projeto de pesquisa Universal junto ao CNPq ("Controle por modos deslizantes: aplicação a sistemas mecânicos"), finalizado em 2009 e também foi assunto de uma dissertação de mestrado orientada pelo autor (Agostinho, 2009). Resultados obtidos em tanque de provas confirmaram as simulações numéricas previamente realizadas, conforme pode ser evidenciado em Agostinho et al. (2008;2009). Este último artigo é encaminhado no Anexo 6. Uma versão ampla deste trabalho de validação experimental foi submetida à revista *Control Engineering Practice*, ainda em processo de revisão.

3 Monitoração de ondas

3.1 Apresentação do problema

A estimação do espectro de ondas incidente sobre a embarcação é um tópico de pesquisa atual e bastante explorado. A utilização dos movimentos da própria embarcação tem se mostrado uma solução viável em termos técnicos e econômicos, pois requer instrumentação e sistema computacional muito simples, quando comparada à utilização de radares ou bóias oceanográficas.

Como já mencionado, uma aplicação direta desta estimativa é a utilização em Sistemas DP. Para operações em condições extremas, quando os distúrbios ambientais são muito intensos, o controle por pré-alimentação pode levar a um ganho expressivo em termos de desempenho e consumo de combustível. Este fato já é comprovado com a utilização da malha de pré-alimentação dos esforços de vento. Diversos pesquisadores já abordaram as vantagens de uma possível malha de pré-alimentação dos esforços de onda, tais como Pinkster (1978) e Aalbers; Nienhuis (1987). Estes trabalhos consideram a monitoração das ondas por meio de aproximadamente 10 sensores de onda (*wave-probes*) instalados ao longo do costado da embarcação. Ensaios experimentais demonstraram que a efetividade deste método (Aalbers et al., 2001 e Aalbers et al., 2004).

A informação do espectro de ondas também leva à redução dos riscos associados às operações *offshore*. Numa operação de alívio, por exemplo, cabe ao comandante no momento inicial decidir se as condições ambientais são ou não seguras para a realização da conexão do aliviador à plataforma. Atualmente, esta decisão é feita com certa parcela de subjetividade, na medida em que as informações sobre as condições ambientais locais nem sempre estão disponíveis. Aalbers et al. (2004) realizaram simulações de operação utilizando-se a técnica de Monte Carlo, e obtiveram o expressivo resultado de que uma tomada de decisão mais embasada (com a informação precisa das condições de ondas locais) permitiria um aumento de 17 dias de produção ao longo de um ano (para um campo no Mar do Norte). Outra aplicação relaciona-se à redução de movimentos verticais através da realocação de uma embarcação ou FPSO para um aproamento mais seguro, utilizando-se rebocadores ou Sistema DP.

A monitoração das ondas no oceano era feita principalmente por meio de bóias oceanográficas amarradas. Este dispositivo provê boas estimativas do espectro do mar, pois as bóias possuem dinâmica desprezível e respondem à excitação de ondas incidentes numa ampla faixa de freqüências. Entretanto, elas são facilmente sujeitas a danos e vandalismo, apresentando também alto custo de instalação em águas profundas. Recentemente, sistemas baseados em radar foram desenvolvidos, utilizando análise da evolução temporal e espacial da imagem obtida. Este sistema tem a grande vantagem de poder ser instalado a bordo. Entretanto, requerem uma extensiva campanha de calibração (Sparano, 2008) e, de acordo com relatos da tripulação, as estimativas são muito influenciadas pelas condições meteorológicas locais.

Uma alternativa é a instalação de sensores de onda ao longo do costado da embarcação, conforme mencionado anteriormente. Há algumas desvantagens nesta solução, embora a mesma forneça bons resultados em termos de estimativa de espectro. A instalação de equipamentos no costado de navios e plataformas impede a realização de operações de instalação de equipamentos ou manutenção por meio de barcaças ou navios de suporte, que deveriam se manter posicionados próximos (ou até encostados) nos mesmos. Além disso, há a necessidade de um complexo sistema de sensoriamento e cabeamento ao longo de todo o convés. A estimativa do espectro de ondas baseado na monitoração dos movimentos do navio é uma solução que elimina todos os problemas mencionados, pois requer instrumentação simples, instalada a bordo em qualquer ponto da embarcação. Diversas abordagens têm sido propostas, destacando-se os modelos com estimativa paramétrica e Bayesiana.

3.2 Contextualização e contribuições

O método paramétrico de estimativa consiste em escrever o espectro de ondas de forma analítica, por exemplo utilizando-se o modelo de 10 parâmetros proposto por Hogben; Cobb (1986). Em seguida, conhecendo-se as funções de transferência do navio (relação entre onda incidente e movimento excitado, considerada linear), utilizam-se os movimentos medidos e um método de otimização não-linear para calcular estes parâmetros. O objetivo da minimização é obter um conjunto de parâmetros cujo espectro resultante forneça movimentos previstos próximos aos medidos.

Exemplos de aplicação deste método foi dado em Hua; Palmquist (1994) e posteriormente pelo autor em sua tese de doutorado (Tannuri, 2002). Naquela ocasião,

utilizaram-se dados provenientes de ensaios no tanque de provas do IPT com um navio do tipo VLCC (*Very Large Crude Carrier*). Esta parte de sua tese foi publicada posteriormente no artigo (Tannuri et al., 2003c), apresentada no Anexo 7.

O modelo adotado, como mencionado, possuía 10 parâmetros e requeria um extensivo processamento computacional durante o método de otimização. Verificou-se que, devido às grandes dimensões do navio, o mesmo "filtra" componentes de alta frequência de ondas (para as quais não há resposta significativa em termos de movimento) e estimou-se então um período de corte associado ao método de estimação espectral para aquele tipo de navio. Obviamente, tal limitação não é exclusiva do método paramétrico, e será verificada em todos os métodos de estimação baseados em movimentos da embarcação. Este problema foi posteriormente re-examinado por Nielsen (2007), embora neste trabalho seja abordado o método Bayesiano.

Outro problema verificado por Tannuri et al. (2003c) foi a sensibilidade do método a erros na função de transferência do navio (conhecidas como RAOs – Operadores de Amplitude de Resposta). Novamente, este problema é comum a todos os métodos, e em geral não é abordado em publicações. Como mencionado, os métodos de estimação de espectro pressupõem relação linear entre onda incidente e movimento excitado. O movimento de jogo (*roll*), entretanto, apresenta forte comportamento não linear, pois é pouco amortecido, ressonante e o amortecimento é de origem não linear (viscosa). Assim, deve-se linearizar o comportamento próximo a uma amplitude de movimento pré-estabelecida, o que irá levar a erros de estimação. Além disso, devido ao comportamento ressonante, há uma grande sensibilidade do RAO de *roll* às condições de carregamento. Assim, conforme verificado por Tannuri et al. (2003c), os trabalhos anteriores de estimação de espectro baseado em movimentos do navio utilizavam o conjunto de movimentos *heave-roll-pitch*, em função da analogia com bóias oceanográficas. Sugeriu-se então substituir o movimento de *roll* pelo movimento de *sway*, que traz a mesma informação a respeito do sentido de propagação da onda. Nielsen (2006) confrontou os resultados baseados na estimativa com *heave-roll-pitch* e com *heave-sway-pitch*, comparando-as com a medição por radar, para um navio porta-container em escala real. Embora Nielsen concluísse que "a análise não sugeriu para usar a resposta em *roll* em favor da resposta em *sway*, ou vice-versa", uma análise detalhada de seus resultados apontam a confirmação da proposta originalmente feita em Tannuri et al. (2003c). Para o caso apresentado de maior altura e período de onda (7,2m

de altura significativa, e período de pico de 10,1s), a estimativa obtida com a utilização de *heave-sway-pitch* é bem mais próxima à estimativa do radar, em comparação com o caso de *heave-roll-pitch*. Isto não parece coincidência, já que para este caso os efeitos não-lineares no movimento de *roll* devem ser mais pronunciados (sabe-se que estes aumentam com altura de onda e quando período da onda é próximo ao período natural, geralmente acima de 10s). Para os demais casos, com ondas de menores períodos e alturas, não há de fato uma diferenciação clara entre as duas opções.

O método Bayesiano de estimativa espectral consiste em se obter uma função de verossimilhança, representando a probabilidade de ocorrência do conjunto de medidas de movimentos dado um espectro de ondas incidente. Além disso, inclui-se a distribuição de probabilidade de informações conhecidas "a priori" acerca do espectro, tais como suavidade, limites de energia e valores para freqüências baixas e altas. Constrói-se então a função de distribuição "a posteriori", que deve ser maximizada em função do espectro direcional estimado. A formulação matemática leva a um problema de otimização quadrática, com solução computacionalmente não custosa.

Iseki; Ohtsu (2000) originalmente propuseram o método Bayesiano ao problema de estimação espectral baseado em movimentos do navio. Discutiram-se também questões relacionadas à aplicação em navios em curso, o que leva a problemas de indeterminação devido à freqüência de encontro. Tannuri et al. (2001b) aplicaram o método Bayesiano para uma plataforma ancorada na Bacia de Campos, e analisaram os erros associados a estimação de ondas extremas nesta localidade, por meio de simulações numéricas. Verificou-se neste trabalho que incertezas a respeito do conhecimento das funções de transferência no navio podem levar a erros expressivos de estimação, sobretudo do espalhamento. Os parâmetros mais relevantes do espectro (altura significativa, período médio e direção) foram estimados com precisão aceitável para ondas extremas.

Uma primeira comparação entre os métodos paramétrico e Bayesiano foi apresentada por Pascoal et al.(2005), utilizando os movimentos de *heave-sway-pitch* como proposto em Tannuri et al. (2003c). Verificou-se que embora o método paramétrico fornecesse, de forma intrínseca, espectros estimados com melhores propriedades de suavidade, o mesmo apresentava problemas de convergência e tempo computacional. Nielsen (2006) também apresenta conclusão semelhante em relação à comparação entre os métodos.

Em um projeto de pesquisa conduzido em parceria a Petrobras a partir do ano de 2006, deu-se prosseguimento ao desenvolvimento dos métodos, incluindo-se validações por meio de ensaios em escala reduzida e monitoração em escala real. Um conjunto preliminar de testes dos métodos Bayesiano e paramétrico foi realizado utilizando-se dados de uma campanha de monitoração de um FPSO instalado na Bacia de Campos (Simos et al., 2007; 2009a). No Anexo 8 apresenta-se o trabalho Simos et al. (2009a). Neste, mostra-se que os espectros estimados foram comparados com dados provenientes de uma bóia oceanográfica instalada nas proximidades do FPSO monitorado. As comparações feitas indicaram que o método paramétrico gerou resultados menos acurados em relação ao Bayesiano na maioria dos casos. Além disso, este apresentou maior facilidade de convergência e menos tempo computacional, conforme esperado. Devido a estes resultados, as análises subseqüentes utilizaram o método Bayesiano.

Adicionalmente, realizaram-se uma série de ensaios no tanque de provas oceânico da UFRJ (Laboceano), com o modelo em escala reduzida de um FPSO-VLCC e de uma barcaça (BGL1). No trabalho de Sparano et al. (2008), encaminhado no Anexo 9, apresentam-se os resultados obtidos com a barcaça. Esta, por ser um navio de porte menor em relação ao VLCC, permitiu a estimação do espectro incidente com erros inferiores a 12%, bastante aceitável para este tipo de medição.

Um conjunto análogo de ensaios foi realizado com um VLCC em três condições de carregamento (cheio, intermediário e lastro), conforme apresentado em no trabalho submetido para publicação (Simos et al., 2009b), encaminhado no Anexo 10. Deve-se destacar que na versão inicial do método Bayesiano, a suavidade do espectro com relação à freqüência e direção era garantida por um único parâmetro, que controla o compromisso entre precisão da estimação e suavidade do espectro resultante. A partir deste trabalho, conforme mostrado por Nielsen (2008), utilizaram-se parâmetros independentes para suavização em frequência e direção. Mostrou-se que a aplicação de um critério para o cálculo destes parâmetros tal como ABIC (*Akaike Bayesian Information Criterion* – Akaike, 1980) leva a estimativa mais acuradas, às custas de um tempo computacional muito elevado. Estudos estão sendo realizados atualmente acerca da aplicação mais eficiente deste método.

4 Desenvolvimento de ferramentas de simulação

4.1 Sistemas *Offshore*

A utilização de simuladores numéricos no domínio do tempo é ferramenta fundamental em projeto e análise de sistemas *offshore*. A complexidade e grande variedade de fenômenos físicos impedem que sejam feitas simplificações, e cálculos expeditos podem levar a resultados errôneos.

Assim, desde 1993, a Escola Politécnica da USP, em parceria com a Petrobras, atuou no desenvolvimento de uma ferramenta de simulação totalmente nacional, que fosse de pleno domínio para possibilitar novas implementações, contínua melhoria e total entendimento dos modelos implementados. Esta ferramenta foi chamada de Dynasim (Nishimoto et al., 2002), e foi lançada oficialmente em 1995. O programa possuía modelos de forças de correnteza, onda e vento, dinâmica de até duas embarcações em 6 graus de liberdade, linhas de amarração e *risers*.

Desde 1998, em sua tese de doutorado (Tannuri, 2002), o autor desenvolveu modelos matemáticos para todos os componentes dos Sistemas DP, incluindo os próprios algoritmos de controle, filtragem e alocação bem como da dinâmica e hidrodinâmica dos propulsores. Em 2001 atuou junto a Petrobras no dimensionamento do Sistema DP para uma barcaça de lançamento (Tannuri et al., 2002). Para tanto, implementou os modelos numéricos até então desenvolvidos em um simulador computacional simplificado (BGL1-DP). Em 2002, foi solicitado para incluir tais modelos no simulador Dynasim, que a partir de 2003 passou a permitir também a simulação e análise de embarcações dotadas de Sistemas DP.

O artigo Tannuri et al. (2003d), apresentado no Anexo 11, detalha os modelos matemáticos utilizados bem como as estratégias de operação existentes nos Sistemas DP comerciais, também implementadas no simulador. Adicionalmente, apresenta dois estudos de caso. O primeiro é relacionado ao controle de posicionamento da barcaça BGL1, que demanda o modo de operação de controle de trajetória (*Track-Following*). Este modo é utilizado durante o lançamento de dutos, no qual se deve garantir velocidade de avanço, aceleração e desaceleração controlados para evitar que o duto em lançamento seja danificado. Em seguida, apresenta-se um caso de operação de alívio,

que utiliza o modo de operação *Tandem Mode*, no qual a posição do navio aliviador é controlada em relação a uma referência fixa na plataforma (FPSO). O artigo desenvolvido em seguida (Bravin; Tannuri, 2005) inclui a metodologia de ajuste de ganhos que fora posteriormente implementada no simulador (por alocação de pólos, baseada em modelo simplificado de cada grau de liberdade) e um outro estudo de caso, correspondente à manobra de aproximação do aliviador até a plataforma.

O núcleo de simulação do Dynasim foi utilizado para a construção do Tanque de Provas Numérico (TPN), que se constitui de um simulador dinâmico executado em um *cluster*, que permite a análise de múltiplos corpos, além de possuir modelo em elementos finitos para *risers* e linhas de amarração. O TPN possui também um sistema de visualização estéreo (realidade virtual). Em 2005, os algoritmos relacionados a Sistemas DP foram também implementados no TPN, conforme apresentado em Tannuri; Morishita (2006). Este trabalho, incluído no Anexo 12, descreve os algoritmos de controle, filtragem e alocação implementados. Adicionalmente, a simulação de uma manobra é realizada e comparada com resultados experimentais, obtidos em tanque de provas. A coerência entre os resultados é bastante satisfatória, indicando a boa modelagem realizada. Detalhes sobre a parte experimental serão dados no Capítulo 5. Estes desenvolvimentos foram também amplamente divulgados em conferências técnicas (Morishita et al. 2006a; 2006b).

Em Tannuri et al. (2009a), apresenta-se uma pré-validação dos simuladores e dos algoritmos de Sistemas DP implementados, utilizando dados reais. Neste trabalho, encaminhado no Anexo 13, a Petrobrás monitorou as condições ambientais, os movimentos e as forças nos propulsores de um aliviador DP (classe Aframax) durante o alívio de uma plataforma do tipo monocoluna. Simulações utilizando o Dynasim, em condições análogas, foram executadas, e os resultados foram então comparados aos monitorados. Para os valores médios da componente lateral e momento de *yaw* da força resultante, a diferença verificada foi menor que 18%. Um erro maior foi verificado na componente de *surge*, o que pode ser explicado pela maior dificuldade em modelar tal componente (mais influenciada por efeitos viscosos e pela sombra provocada pela plataforma). A variação dos empuxos nos propulsores (medida pelo desvio padrão) também foi bem recuperada pela simulação, com diferença de 4% para um propulsor azimutal avaliado. Este fato indica que o filtro de ondas está bem representado no simulador.

Devem-se destacar alguns pontos que indicam a relevância dos desenvolvimentos supracitados. Em termos nacionais, existem 3 simuladores dinâmicos voltados para apoio, análise e projeto de operações *offshore*: o TPN, Dynasim e o Situa/Prosim. Este último é bastante adequado para a simulação de operações de instalação *offshore*, sendo referência na área de instalação e lançamento (Jacob et al. 2004). Entretanto, não possui capacidade de simulação de navios com Sistema DP. Este fato limita sua aplicação, na medida em que grande parte das operações tem sido realizadas hoje em dia com embarcações DP, e não mais amarradas como antigamente. Mesmo no cenário internacional, não há muitos programas voltados para a simulação de sistemas *offshore* que incluem Sistemas DP. Destacam-se o SIMO (Marintek, 2009), Anysim e DPSim (Marin, 2009a), que foram desenvolvidos por importantes centros de pesquisas na área.

A capacitação dos simuladores TPN e Dynasim para o estudo de Sistemas DP foi, neste contexto muito importante, por diversas razões. Em sendo a Escola Politécnica a pioneira no desenvolvimento de simuladores dinâmicos de Sistemas DP, reforçou-se a capacitação dos docentes e pesquisadores envolvidos, o que tem permitido a contínua demanda por projetos de pesquisa e desenvolvimento nesta área, pela Petrobrás e demais empresas do setor. Para a Petrobras, é importante que possua pleno domínio do programa utilizado nas fases de projeto e análise de navios e operações, com fácil acesso ao código e possibilitando implementações de novas funcionalidades. Como exemplo, serão discutidos na seção 4.3 os efeitos de interação entre corpos, que estão atualmente sendo implementados no simulador. Para as demais empresas do setor, o TPN passa a se constituir em um centro de apoio à pesquisa e desenvolvimento na área de Sistemas DP. Este fato é comprovado pelos em inúmeros projetos já realizados, que utilizaram as funcionalidades de simulação de Sistemas DP. Para a Universidade, permitiu a formação de recursos humanos, durante a implementação do código, manutenção do mesmo e aplicação do simulador em projetos de pesquisa.

A seguir, elencam-se alguns dos projetos que utilizaram os simuladores desenvolvidos:

- *Navio Ecológico - Análise de Sistema DP, Manobrabilidade e Amarração de Navio Tanque CNG - Ciclos 1, 2 e 3*, realizado para a Transpetro, de 2006 até 2008. Neste trabalho o simulador Dynasim foi utilizado para a definição do arranjo de propulsores mais adequado para este navio, bem como avaliar as condições extremas de operação (Tannuri, 2008a; Tannuri, 2009c).

- *Dynamic Analysis of Floating Unities in the Gulf of Mexico Phase 1 and 2*, realizado para a Chevron North America Exploration Co, em 2006. Uma descrição deste trabalho é apresentado em Tannuri et al. (2008a), apresentado no Anexo 14. Em linhas gerais, utilizou-se o TPN para realização de simulações de um FPSO-DP operando no Golfo do México, considerando-se a operação de alívio, condições de falha e manobras de desconexão em caso de furacões.

- *Estudo de Operação de Transbordo (Offloading) na Bacia de Campos através de Simulações Dinâmicas*, realizado para a Repsol YPF, de 2007 a 2009. Este trabalho consistiu, dentre outras atividades, na realização de simulações dinâmicas no TPN para avaliação comparativa do *downtime* de operações de alívio com navios convencionais e navios DP (Pesce et al., 2009).

- *Estudo da ação de rebocadores em operações offshore*, realizado para a Petrobrás CENPES, em 2008. Este trabalho consistiu a análise por meio de simulações e experimentos de operações envolvendo rebocadores oceânicos. Destaca-se a análise da operação de instalação de um equipamento submerso (*sub-sea*) por meio de dois rebocadores DP (Fujarra et al., 2008).

- *Estudo de capacidade e condições operacionais limites da barcaça equipada com Sistema DP*, realizado para a Petrobras/Engenharia, em 2008. Neste trabalho realizaram-se simulações exaustivas no Dynasim da barcaça BGL1 convertida para DP, considerando-se condições ambientais limites e condições típicas da Bacia de Campos. Este trabalho está sendo utilizado como base para a elaboração da especificação técnica de operação da barcaça quando em modo DP. Apresenta-se no artigo Tannuri et al. (2009c) um resumo deste trabalho, encaminhado no Anexo 15.

- *Dimensionamento do Sistema DP para FPSO-Suezmax*, realizado para a Petrobrás E&P em 2008. Neste trabalho utilizou-se o Dynasim para dimensionamento da potência dos propulsores para um FPSO-DP em fase de estudo de viabilidade, que será instalado possivelmente em campos de rápida exploração (Tannuri, 2009a).

4.2 Manobras

Como subproduto dos desenvolvimentos relacionados aos simuladores de operação *offshore* com Sistema DP, o autor também implementou uma ferramenta de

simulação de manobras em canais, portos e hidrovias (Tannuri et al., 2006c). Esta ferramenta utilizou parte dos modelos matemáticos incluídos nos outros simuladores, como por exemplo propulsores fixos e azimutais, leme e o controle de trajetória (*track-following*). Toda a parte dinâmica e hidrodinâmica foi adaptada, pois este simulador considera apenas os movimentos horizontais da embarcação. Incluíram-se efeitos de águas rasas e estreitas, a partir da compilação de diversos modelos publicados na literatura. O simulador permite a realização de simulações rápidas (*fast simulation*), utilizando-se o algoritmo de controle de trajetória ou controle manual dos rebocadores, leme e propulsores.

Diversos projetos de desenvolvimento foram realizados utilizando-se este simulador. Nestes projetos, dados de manobrabilidade dos navios considerados (tais como manobras de giro, *zig-zag*, parada brusca) foram utilizados para uma calibração inicial do simulador. Em seguida, diversas simulações foram realizadas nas condições especificadas. Dentre os trabalhos destacam-se:

- *Estudo de Manobrabilidade do Porto de Antonina - PR*, realizado para Terminais Portuários da Ponta do Felix S/A, em 2007, no qual utilizou-se o simulador para verificar a efetividade da dragagem do canal e da bacia de evolução do referido porto quando ao aumento da manobrabilidade para navios tipos.

- *Impacto da Presença da P-53 Sobre as Manobras de Entrada e Saída no Porto Novo de Rio Grande*, realizado para a QUIP S/A em 2007, no qual utilizou-se o simulador para avaliar se a plataforma P-53, docada no porto, poderia atrapalhar a passagem de navios na entrada do mesmo.

  Estes dois trabalhos foram resumidos nos artigos Souza Jr. et al. (2008 e 2009). O último é apresentado no Anexo 16

- *Simulação e Análise para Dimensionamento de Comboios na Hidrovia Tietê-Paraná*, realizado para o Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo, em conjunto com o IPT-SP, em 2009. Neste trabalho dados medidos em escala real e semi-escala de comboios obtidos pelo IPT-SP foram utilizados para a calibração do simulador. Em seguida, diversos trechos da Hidrovia Tietê-Paraná foram simulados para algumas configurações de comboios, avaliando-se a manobrabilidade e necessidade de equipamentos auxiliares de manobra (Tannuri; Oshiro, 2009).

4.3 Efeitos de interação entre corpos

Nesta seção, apresenta-se um tópico de pesquisa atual conduzido pelo autor, relativo à melhoria dos simuladores no que se refere à inclusão de efeitos de interação entre corpos, bem como à avaliação destes efeitos no dimensionamento e desempenho de Sistemas DP.

Operações *offshore* envolvendo múltiplos corpos flutuantes são frequentes, tanto para o escoamento do petróleo ou gás produzido em alto-mar, quanto para a realização de instalações ou reparos em plataformas ou instalações de estruturas submersas (*sub-sea*). Um exemplo é o alívio (*offloading*) de petróleo, no qual o navio aliviador é conectado em *tandem* com o FPSO a uma distância não maior que 150m (Figura 4.1), sendo que durante a conexão esta distância é de apenas 80m. Devido às grandes dimensões do FPSO, e a proximidade entre os corpos, é de se esperar uma influência significativa da interação hidro/aerodinâmica no comportamento do sistema.

(a) (b)

Figura 4.1 Aliviador Stavanger durante operação de alívio na plataforma (a) vista da ponte de comando do aliviador ; (b) vista da proa do aliviador (obtida em visita do autor a uma operação em 2007)

Existem também outras situações ainda mais críticas. Uma delas é o içamento de cargas no convés de plataformas fixas ou amarradas, que exige que a barcaça de apoio fique ainda mais próxima da plataforma. Na Figura 4.2 apresenta-se o modelo TPN de uma operação de instalação de módulo gerador em uma plataforma fixa do tipo jaqueta, realizada pela barcaça BGL1. Pode-se notar que a interferência aerodinâmica entre os corpos deverá ser significativa. Por outro lado, devido à estrutura composta por treliças da plataforma, a interferência hidrodinâmica deve ser reduzida neste caso.

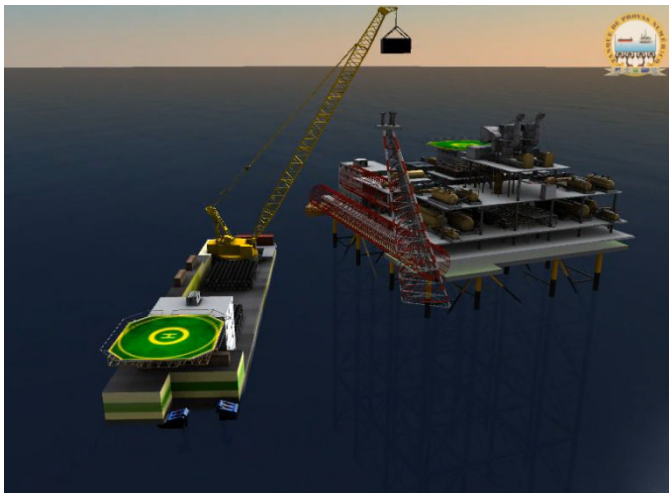


Figura 4.2 Barcaça BGL1 em operação de içamento em plataforma tipo jaqueta (modelo 3D TPN)

Além do estudo das operações acima, o autor, conforme será apresentado no Capítulo 8, pretende atuar na área de controle cooperativo. Este é um tema recente de pesquisa na área de Sistemas DP devido ao aumento do número de operações envolvendo múltiplos navios para fins de instalação de equipamentos submersos.

Neste sentido, o passo inicial é a modelagem numérica de efeitos de interação entre corpos, que objetivam o desenvolvimento de modelos confiáveis, validados e menos custosos em termos computacionais. Adicionalmente, o autor já está realizando pesquisas aplicando-se tais modelos e avaliando a influência efetiva destes efeitos no desempenho e dimensionamento de Sistemas DP. A seguir, será apresentada a contextualização destes desenvolvimentos para cada um dos agentes (onda, vento e correnteza).

4.3.1 Efeito de interação de ondas

O problema de interação hidrodinâmica entre corpos próximos decorrente da ação de ondas é abordado através da solução do problema potencial de difração-radiação utilizando programas tais como o Wamit, considerando a malha dos dois ou mais corpos simultaneamente.

Entretanto, a implementação computacional desta abordagem nos simuladores apresenta dois tipos de problemas. O primeiro é relativo ao tempo de processamento de uma simulação no domínio do tempo, na medida em que a solução do problema potencial de ondas consome muito tempo computacional e pode tornar a simulação de

uma operação *offshore* muito lenta. O segundo problema é relacionado a dificuldades numéricas encontradas na solução do problema potencial quando os corpos estão muito próximos.

Tannuri et al. (2004) avaliaram o efeito sombra da onda do FPSO no comportamento dinâmico do navio aliviador, mostrando que o FPSO atua como se fosse um quebra ondas. Neste caso realizou-se a adaptação do simulador TPN para a execução do programa Wamit ao longo da simulação para os instantes de tempo nos quais a posição relativa dos dois navios desviava-se acima de um limite pré-definido. Verificou-se forte influência do efeito de sombra no comportamento dinâmico do aliviador. No caso da ausência da interação, previa-se a ocorrência de ciclo-limite (*fish-tailing*), o que não ocorre quando se considera a interação. O artigo também discute quesões de implementação e de tempo computacional.

Orozco e Chen (2003) realizaram estudo análogo, e avaliaram duas formas de considerar o efeito de interação devido a ondas (*wave shielding effect*). No método denominado exato, utilizou-se uma abordagem análoga à apresentada por Tannuri et al. (2004), com a diferença de que os coeficientes de deriva eram pré-calculados e armazenados em um banco de dados, em função da posição relativa entre os corpos. Com isso, o tempo de simulação é reduzido, comparado à solução adotada por Tannuri et al. (2004). No método denominado "campo de ondas perturbado", avalia-se apenas o campo de ondas na presença do FPSO, e estima-se a altura e direção do espectro direcional médio incidente sobre o aliviador em cada posição que o mesmo se encontrar dentro daquele campo de ondas. De posse desde espectro, avaliam-se as forças de deriva utilizando-se os coeficientes de deriva do aliviador isolado. A vantagem clara deste método é a de que não se requer a solução do problema potencial multi-corpos. Entretanto, não considera o possível efeito de interação do aliviador sobre o campo de ondas e sobre o FPSO. Assim, em problemas onde os dois flutuantes possuem dimensões semelhantes tal abordagem não é indicada. Os autores concluíram que o método exato é de fato mais preciso, na medida em que a presença do aliviador altera o campo de ondas e o método do campo de ondas perturbado não considera isto. Concluiu que o método de campo de ondas perturbado fornece resultados muito simulares a não se considerar o efeito de interação. Os autores não apresentaram resultados de simulação, e apenas realizaram comparações nas forças de deriva.

A solução do problema potencial de corpos muito próximos também apresenta desafios, e serão abordados pelo autor futuramente no andamento das pesquisas. Diversos autores relatam dificuldades associadas ao método numérico de solução, podendo levar, sobretudo nos casos de corpos paralelos (*side-by-side*), à estimativa imprecisa devido a fenômenos de ressonância mal modelados. Huijsmans et al. (2001), propuseram a utilização de uma técnica que considera uma "tampa" sobre a superfície da água para eliminar estas ressonâncias espúrias. Hong et al. (2005) utilizaram um método de solução avançado (*higher-order boundary element method* - HOBEM) e, através de comparações com experimentos, mostraram a eficiência do mesmo. Um trabalho semelhante foi apresentado por Kashiwagi et al. (2005), que chegaram a conclusões análogas quanto à eficiência do método de ordem elevada.

A influência do efeito de sombra de onda no dimensionamento de Sistemas DP está sendo estudado em um trabalho de mestrado orientado pelo autor com previsão de conclusão em setembro do presente ano. Resultados relevantes são apresentados no artigo (Queiroz Filho; Tannuri, 2009), aprovado para publicação e encaminhado no Anexo 17. Mostrou-se, por meio de simulações no TPN de operações de alívio típicas, que o efeito de sombra de ondas em geral tende a reduzir a potência requerida do Sistema DP. Assim, simulações que não consideram tal efeito podem levar a um super-dimensionamento do Sistema DP. Para ondas de 3,0m de altura significativa, esta diferença chega a 30% da potência total instalada em um aliviador DP típico. Entretanto, há algumas regiões em torno do FPSO nas quais efeitos de difração e irradiação de ondas aumentam o campo de ondas que incide sobre o aliviador. Nestes casos, a potência requerida do Sistema DP para posicionar o navio é maior do que a obtida por uma simulação sem efeito de sombra. Em casos analisados de manobra de aproximação e conexão, esta amplificação do campo de ondas pode requerer até 8,6% da potência total do Sistema DP.

4.3.2 Efeito de interação de correnteza e vento

A interferência que um navio exerce sobre outro devido à ação da correnteza e vento é também foco de pesquisa e desenvolvimento, na medida em que diversos resultados experimentais demonstram a importância deste efeito no comportamento dinâmico dos corpos flutuantes.

Fucatu (2003), em sua tese de doutorado, mostrou resultados de experimentos realizados em tanque de provas confirmando a influência do efeito de sombra da corrente do FPSO no comportamento dinâmico do navio aliviador, conectado em *tandem* através de um *hawser*. Concluiu que a não consideração do efeito sombra nas simulações de sistemas *tandem* pode levar a resultados não conservativos, pois há a possibilidade de o efeito de sombra produzir picos de tensão ainda maiores no *hawser,* devido à instabilidade dinâmica induzida pela velocidade de correnteza menor na esteira (*fishtailing*). Em seguida, desenvolveu um modelo para se avaliar as forças de correnteza sobre o navio aliviador baseado no mapa de velocidades à jusante do FPSO e posterior integração seccional das forças de correnteza sobre o casco do aliviador. Este foi implementado numa versão de estudo do simulador Dynasim, apresentando bons resultados. O campo de velocidades era obtido por meio de um programa CFD, e diversos problemas e dificuldades associadas a este procedimento numérico foram relatados. Entretanto, devido à limitada base de dados experimentais, naquele estudo o não foi possível validar o modelo de forças de correnteza proposto.

Em continuidade a este trabalho, num projeto de pesquisa conduzido na EPUSP em parceria à Petrobras, refinou-se o modelo semi-empírico para a estimação das forças de correnteza no campo de velocidades perturbado pelo FPSO, apresentando bons resultados. Foram feitas validações experimentais considerando-se o movimento de *fishtailing* de um aliviador (Simos et al., 2008). Neste trabalho, a obtenção do campo de velocidades por CFD mostrou-se eficiente, com algumas considerações quanto às condições de contorno na superfície livre para diferentes ângulos de incidência. O modelo de forças de correnteza sobre o aliviador foi validado experimentalmente. Ensaios dinâmicos de um aliviador preso por uma barra rígida ao FPSO foram também executados e utilizados para avaliar o comportamento do modelo proposto. Os resultados mostraram o bom comportamento do modelo no que diz respeito à previsão da estabilidade (ocorrência ou não de ciclo-limite) e da amplitude do movimento resultante.

A influência do efeito de sombra de correnteza no dimensionamento de Sistemas DP foi também realizada pelo autor, e discutida no artigo (Illuminatti et al., 2009) encaminhado no Anexo 18. Numa análise de operação de alívio com um navio DP, em condições ambientais típicas da Bacia de Campos, verificou-se que a potência exigida do Sistema DP chega a ser até 5,3% superior quando o efeito sombra da corrente é

considerado. Concluiu-se, portanto, que se pode realizar um sub-dimensionamento da potência do Sistema DP caso este efeito não seja levado em conta em fase de projeto.

Com relação a efeitos de sombra de vento, está-se iniciando atualmente um trabalho de capacitação na modelagem via CFD da esteira de vento e posteriormente será avaliado um modelo semelhante ao de correnteza. Estes trabalhos serão foco de um estudo de pós-doutorado a ser supervisionado pelo autor, e descrito mais detalhadamente na seção 8.3.

Num contexto internacional, os efeitos de interferência de vento e correnteza também tem sido ativamente abordados. Asanuma (2005), em sua tese, realizou uma série de experimentos comprovando o efeito sombra de onda vento e corrente. Neste trabalho o efeito sombra não foi modelado, apenas constatado através de experimentos.

Destaca-se o programa de cooperação com a indústria (*Joint Industry Project*) denominado JIP *Offloading Operability I* (Marin, 2009b). Este levou ao desenvolvimento de um modelo de força de correnteza e vento sobre o aliviador além de um grande número de publicações. Buchner; Bunnik (2002) apresentaram um estudo preliminar para avaliar o efeito sombra do vento, baseado em ensaios de túnel de vento, e mostraram que este é bastante significativo. Bruin (2003) desenvolveu um modelo para avaliação das forças e momento de correnteza e vento sobre o aliviador, segmentando-o em três partes, conhecido o campo de velocidades (de vento ou correnteza) sobre o navio. As forças e momentos sobre a proa, popa e corpo médio do navio são calculadas e então somadas. Este método requer a realização de ensaios de forças de correnteza e vento sobre cada segmento do navio. O modelo do navio deve possuir complexa instrumentação para se avaliar, de forma independente, a força em cada porção do modelo. Adicionalmente, o modelo requer o campo completo de velocidades de correnteza e vento incidente no navio. Segundo o próprio autor, os resultados para forças de vento foram razoáveis, porém requerem mais validações. Ele menciona que um método potencialmente melhor é chamado de *distributed forces method*, no qual há uma segmentação maior do modelo para a realização do cálculo de forças. Deve-se notar que o enfoque utilizado em Simos et al. (2008) para o cálculo da força de correnteza é semelhante. Entretanto, ao invés de se medirem o coeficiente em cada parte do navio utilizou-se a curva de arrasto seccional estimada do navio.

5 Desenvolvimento de aparatos experimentais

5.1 Sistemas DP

O autor atua, desde seu pós-doutoramento nos anos de 2002 e 2003, no desenvolvimento de uma infra-estrutura experimental diretamente relacionada à realização de ensaios em escala reduzida de navios dotados de Sistemas DP. Como resultado imediato daquele trabalho, construiu-se um modelo em escala reduzida de um aliviador, dotado de um propulsor principal e dois propulsores em túnel (Figura 5.1). Todo o aparato eletrônico foi projetado e construído, bem como o desenvolvimento do software de controle. Este trabalho envolveu diversos alunos de graduação e um aluno de mestrado.

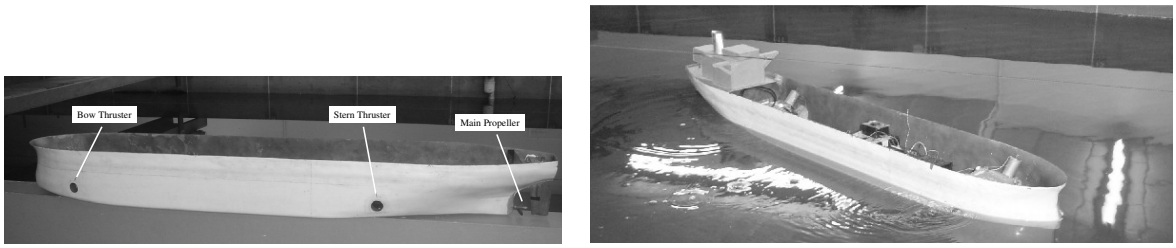


Figura 5.1 Modelo inicial de embarcação DP

Uma descrição do aparato construído, bem como resultados de ensaios, foram apresentados em Morishita et al. (2006c) e Tannuri; Morishita (2006). Este último trabalho está incluído no Anexo 12. O autor desenvolveu, para o controle dos ensaios, um programa utilizando linguagem Matlab, com os mesmos algoritmos utilizados nos Sistemas DP comerciais, descritos também nestes artigos. Embora a construção mecânica dos propulsores ainda fosse bastante preliminar, os resultados dos ensaios em comparação às simulações dinâmicas mostraram-se muito coerentes, considerando a dinâmica da embarcação e as forças nos propulsores.

Destaca-se que até meados da presente década, não havia ainda no Brasil capacitação para a realização de experimentos profissionais em tanque de provas de navios dotados de Sistemas DP. Neste contexto, e após a demonstração dos resultados obtidos com o modelo inicial, iniciou-se em 2007 um projeto financiado pela Petrobras para gerar tal capacitação. Isto inclui a fabricação mecânica dos propulsores em escala

reduzida, desenvolvimento de técnicas de calibração e implementação de um software para controle e supervisão dos testes, tal como um Sistema DP real.

O programa de controle foi reestruturado, desenvolvendo-se uma arquitetura computacional que garantisse a modularidade, robustez e desempenho. A interface com o usuário também foi feita de forma a permitir o total controle sobre os ensaios, bem como emular as telas de um Sistema DP real. Um sistema de banco de dados foi utilizado para gerenciar os resultados e a troca de informações entre os diversos processos (interface, controle e comando). Este trabalho foi apresentado em Tannuri et al. (2008c).

Morishita et al., (2009) apresentam uma descrição geral do aparato experimental, incluindo-se o projeto mecânicos dos propulsores e leme, técnica de calibração, eletrônica embarcada e resultados de ensaios preliminares. Este trabalho é incluído no Anexo 19. Uma foto do novo modelo do aliviador que está sendo utilizado nestes trabalhos é apresentado na Figura 5.2.

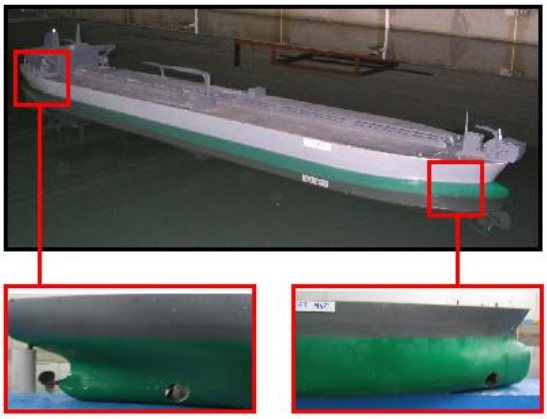


Figura 5.2 Novo modelo de embarcação DP

5.2 Aplicação de engenharia mecatrônica nos tanques de provas

Além da infra-estrutura laboratorial diretamente relacionada à execução de ensaios de Sistemas DP (apresentadas na seção anterior), o autor também tem atuado na aplicação de engenharia mecatrônica para a modernização dos tanques de provas nacionais. Estes desenvolvimentos estão, de forma indireta, também relacionados à capacitação para ensaios de Sistemas DP. Serão destacados três trabalhos realizados ou

em andamento nesta área, enfocando-se a aplicação de cada um deles na área de Sistemas DP.

5.2.1 Desenvolvimento de sensor de espectro direcional de ondas

A medição do espectro de ondas direcional gerado por meio dos batedores em um tanque de provas multi-direcional (tais como o Laboceano, na UFRJ, ou o CH-TPN, na USP) é fundamental para a realização de ensaios. Cita-se, por exemplo, num processo de validação ou avaliação de um novo filtro de ondas de um Sistema DP, realizado num tanque de provas. O ensaio consistirá, basicamente, na imposição de diversos espectros de ondas sobre o navio com posterior avaliação das forças geradas nos propulsores. Caso não seja possível medir com acurácia o espectro incidente, o teste não poderá ser executado.

Em 2007, o autor participou dos ensaios descritos na seção 3.2, realizados no Laboceano para validar o método de monitoração de espectros baseado nos movimentos do navio. Entretanto, verificou-se a inexistência, naquele laboratório, de um sensor para a calibração e verificação do espectro efetivamente gerado pelos batedores, que deveria ser comparado aos espectros estimados pelo método em desenvolvimento.

Por esta razão, desenvolveu-se um sensor que utiliza um conjunto de 8 *wave-probes* convenientemente dispostos, cujos dados são processados por meio de um algoritmo de estimação baseado em máxima entropia (Stansberg, 1988). Este desenvolvimento bem como a validação do sensor construído, é apresentado no artigo (Tannuri et al., 2007) encaminhado no Anexo 20 .

5.2.2 Construção de *Planar Motion Mechanism* (PMM)

O autor participou da construção do mecanismo de geração de movimentos planos em modelos de embarcações (*Planar Motion Mechanism* – PMM), instalado no tanque de provas do IPT-SP. Este é o primeiro e único mecanismo deste tipo em funcionamento no Brasil. Através de servo-motores, impõem-se trajetórias controladas aos modelos de embarcação e, com a medição dos esforços de reação da água gerados no casco, podem-se obter os coeficientes hidrodinâmicos do navio. O projeto, construção, instalação e testes do mecanismo foi apresentado em Tanasovici et al. (2008), incluído no Anexo 21.

Atualmente, o autor participa da definição dos procedimentos experimentais para utilização do PMM, bem como no desenvolvimento dos algoritmos de tratamento de dados e filtragem (Tannuri, 2009b).

A obtenção de coeficientes hidrodinâmicos é tarefa inicial básica de qualquer projeto ligado a manobrabilidade e posicionamento de embarcações. De posse destes coeficientes pode-se obter os esforços de correnteza sobre o casco, o que é utilizado, por exemplo, no dimensionamento dos propulsores de um Sistema DP e nas análises dinâmicas por meio de simulação.

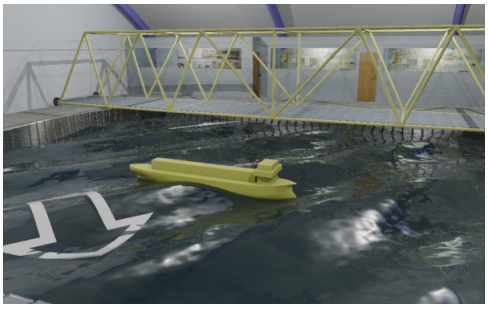
5.2.3 Desenvolvimento de controle para geração e absorção ativa de ondas

Desde 2008, o autor está trabalhando no desenvolvimento de algoritmos de controle para geração e absorção ativa de ondas. Um aluno de doutorado, orientado do autor, está desenvolvendo algoritmos para a absorção ativa, e outro aluno de doutorado (co-orientado pelo autor) está atuando na geração. Além disso, a equipe conta com um aluno de iniciação científica.

O objetivo final desta pesquisa será a implementação do primeiro tanque de provas nacional com geração e absorção ativa de ondas, o CH-TPN, instalado na Escola Politécnica da USP. Este é um tanque de seção quadrada (14mx14m), dotado de 140 batedores de onda (*flaps*) independentes capazes de gerar onda multidirecional com frequências de até 2Hz. A Figura 5.3 apresenta uma ilustração do tanque quando em operação, bem como fotos do estado final de sua construção (obtidas em 24 de abril de 2009).

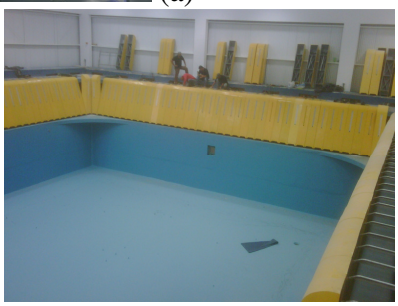
Os trabalhos iniciais estão sendo feitos em um canal unidirecional do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, no qual foram instalados 4 batedores (*flaps*) em escala reduzida em relação aos que estão sendo instalados no CH-TPN. Foi testado e calibrado um algoritmo de controle baseado em Maeda et al. (2004), com adaptações devido a problemas práticos encontrados nos ensaios (como por exemplo a deriva da posição do batedor ao longo do tempo e oscilações em alta freqüência). Os resultados alcançados foram bons, com coeficiente de absorção de 90% para todas as frequências analisadas (ver o artigo Carneiro et al., 2009, encaminhado no Anexo 22). Entretanto, o processo de ajuste de ganhos demandou muito tempo, requerendo ajuste

específico para cada freqüência e amplitude de onda. Atualmente, está-se analisando o algoritmo proposto por Schäffer; Skourup (1996), baseado diretamente na função de transferência entre o movimento do batedor e a onda gerada. O controle é implementado por meio de um filtro digital recursivo.



(a)

(b)



(c)

Figura 5.3 (a) Ilustração do CH-TPN ; (b) detalhes dos flaps em fase final de instalação; (c) visão geral do tanque ainda sem água (Abril/2009)

6 Estratégias de controle e posicionamento

Os campos de petróleo nas bacias nacionais possuem particularidades que não são levadas em conta nos Sistemas DP comerciais, na medida em que os mesmos são desenvolvidos na Noruega. Esta inadequação leva a problemas em operações que permitem liberdade total ou parcial no aproamento da embarcação DP (tais como operações de perfuração, alívio ou posicionamento de FPSO-DP). Neste contexto, o autor desenvolve pesquisas na área, com a proposta de adequações às estratégias de controle para o cenário nacional.

6.1 Aproamento Ótimo

Os sistemas DP possuem um modo de controle adaptado para operações que possuem liberdade total de aproamento, ou seja, aquelas operações nas quais o navio deve ser mantido numa posição fixa, porém não há restrição quanto ao aproamento do mesmo. Como exemplo, cita-se a operação de perfuração, na qual há um requisito bastante severo quanto ao posicionamento do navio (que não pode se desviar muito da cabeça do poço em perfuração, o que poderia causar danos ao *riser* de perfuração). Entretanto, o navio pode girar em torno do seu ponto central, buscando um aproamento mais adequado para a operação. Outro exemplo são as plataformas FPSO-DP, que são utilizadas em campos de exploração de curta duração ou testes preliminares de produção em campos novos.

Os Sistemas DP comerciais possuem um modo de operação desenvolvido para tais operações, com a seleção automática do aproamento, baseando-se na minimização do consumo de energia. O sistema busca o aproamento alinhado com a resultante das condições ambientais (*weathervane control*), que é a condição de menor empuxo de controle necessário pois anulam-se a força de *sway* e o momento de *yaw* ambientais médios atuantes sobre a embarcação. A obtenção deste aproamento é feita de forma automática, e há diversos métodos para tal. Pinkster; Nienhuis (1986) verificaram que o controle desacoplado dos movimentos do ponto de referência em *surge* e *sway*, utilizando-se algoritmos PID, sem o controle direto do movimento de *yaw*, leva a embarcação a se alinhar naturalmente com a resultante das condições ambientais. Entretanto, este efeito apenas ocorre caso o ponto de referência esteja localizado a uma certa distância avante da meia nau, além de ser também necessário impor certas

restrições na disposição dos propulsores. Seguindo a mesma linha, Fossen; Strand (2001) desenvolveram um controlador adaptativo que realiza a busca automática do aproamento de menor consumo de energia, não impondo, neste caso, restrição alguma quanto ao ponto de referência ou quanto à configuração dos propulsores.

Entretanto, em condições ambientais típicas da Bacia de Campos, a minimização da energia de controle não é o único critério a ser levado em conta. Conforme pode ser verificado nos levantamentos meta-oceanográficos (Petrobras, 2005a), 56% das condições ambientais da Bacia de Campos caracterizam-se por bimodalidade do espectro de ondas. Isto significa que há duas componentes distintas de onda, com amplitude, direção e período diferenciados. Em geral, há uma componente de maior freqüência de pico, chamada de "mar local", que é excitada por tempestades próximas ou pelo vento local. Há uma componente com freqüência de pico bem menor (períodos típicos de 12s), denominada *swell*, que é originada de tempestades no Atlântico Sul e que chegam à costa brasileira predominantemente de sul ou sudeste.

A aplicação da estratégia de controle *weathervane* resultará, para estes casos de ondas bimodais, ao alinhamento da embarcação em relação a uma direção média entre a correnteza e o mar local. Isto é causado pelo fato de que o mar local em geral possui direção colinear ao vento, e é responsável pela força de deriva média mais pronunciada sobre a embarcação. O *swell*, por sua vez, ocasiona uma força de deriva média muito pequena (devido ao período muito longo da onda), e interfere muito pouco na definição do ângulo de *weathervane.* Por isso, com a utilização do controle *weathervane*, o navio poderá ser aproado numa direção tal que o *swell* incida de través ao casco, que ficará então sujeito a ondas de través com aproximadamente 4,0m de altura significativa. Esta situação pode ser inaceitável em termos operacionais, pois estas ondas de grande período, embora gerem forças de deriva média muito reduzidas, excitam os movimentos de primeira ordem de forma bastante intensas. Isto pode levar a movimentos de *roll* com grande amplitude e mesmo à compressão dinâmica nos *risers*, sendo algumas vezes necessária a interrupção completa da planta de produção no caso de um FPSO (Pinto et al., 1999) ou da operação de perfuração.

Para minimizar a oscilação de primeira ordem responsável pelos movimentos e pelo carregamento dinâmico nos *risers*, a embarcação deveria ser reposicionada de forma a se alinhar com a direção de incidência da onda. Entretanto, este também não é o único critério que deve ser considerado já que pela ação combinada da correnteza e do

vento, ao se alinhar com as ondas o sistema de amarração pode ser muito solicitado, possivelmente levando à ruptura de linhas. Além disso, a potência total dos propulsores para que a embarcação seja mantida naquele aproamento pode ser excessiva e ultrapassar a capacidade instalada. Logo, para se garantir o aproamento ótimo da embarcação, é necessária a minimização de um critério multi-objetivo que leve em conta todos estes fatores.

O autor desenvolveu esta metodologia em sua tese de doutorado (Tannuri, 2002), sendo que o artigo (Tannuri et al. 2001c), encaminhado no Anexo 23, resume este desenvolvimento. Deve-se destacar que este artigo foi agraciado com o prêmio *Best Student Paper*, na conferência IFAC-CAMS 2001 (*Control Applications in Marine Systems*), realizado em Glasgow, Escócia.

A metodologia consiste na utilização de modelos matemáticos para o cálculo, em função do aproamento do navio, da amplitude de oscilação em *roll*, tração dinâmica nos *risers*, deslocamento do sistema de amarração (quando existente) e potência média do Sistema DP. Em seguida, define-se um funcional com a ponderação adequada deste quatro parâmetros de projeto, e o aproamento que leva ao menor valor deste funcional é então escolhido. O método requer estimativas das condições ambientais. Sugeriu-se a utilização das informações do anemômetro (para vento), do método de estimativa de ondas baseando no movimento do navio (para onda) e da correnteza calculada pelo Filtro de Kalman existente no Sistema DP. Adicionalmente, em Tannuri (2002), realizou-se uma análise de sensibilidade para avaliar quanto os erros nas condições ambientais influenciam a escolha do aproamento ótimo. Verificou-se que, para as condições mais "fracas", o aproamento ótimo é mais sensível a erros nas estimativas ambientais. Ao contrário, condições críticas, que efetivamente podem levar a valores não admissíveis para os critérios operacionais, são mais "robustas". Ou seja, o aproamento ótimo calculado com condições ambientais ligeiramente diferentes das reais leva a um desempenho próximo ao obtido caso as condições ambientais reais fossem conhecidas com exatidão.

Uma metodologia análoga será aplicada em um projeto de pesquisa em fase inicial, realizado em parceria a Petrobras. Este projeto, intitulado "Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto para a Definição do Aproamento Ótimo de um FPSO Ancorado em SMS" (Simos; Tannuri, 2008) irá aplicar um critério multi-objetivo para a

seleção mais adequada do aproamento de plataformas do tipo SMS (*Spread Mooring System*).

6.2 Operações de alívio em plataformas SMS

Outra particularidade dos campos de exploração de petróleo nacionais é a utilização cada vez mais frequente de plataformas do tipo FPSO amarradas com o sistema do tipo SMS. Neste, acoplam-se linhas de amarração na popa e na proa da embarcação, conferindo-lhe uma complacência muito pequena em termos de variação de aproamento. Este sistema é diferente do tradicional *Turret*, no qual se instala um eixo vertical na plataforma, com rolamentos axiais, no qual se conectam os *risers* e linhas de amarração, conferindo total liberdade de aproamento. Uma ilustração dos dois sistemas é apresentada na Figura 6.1.

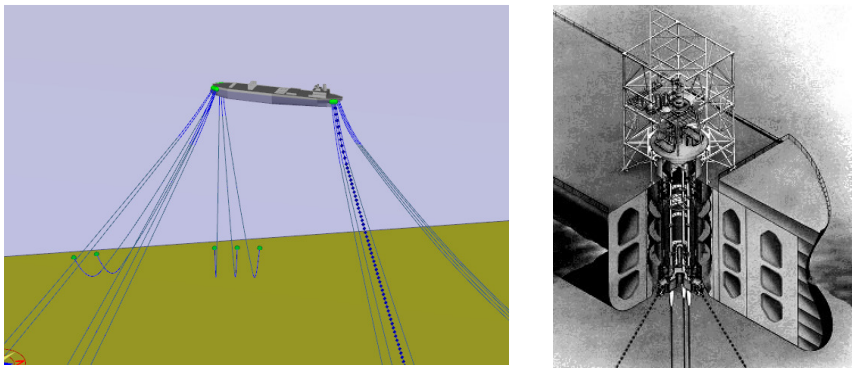


Figura 6.1 (esq) Sistema SMS; (dir) Sistema *Turret*

Numa operação de alívio com uma plataforma do tipo *Turret*, em geral há o alinhamento da plataforma e do aliviador em relação à resultante ambiental, na medida em que há liberdade total de aproamento (Ragazzo; Tannuri, 2003). O ângulo de equilíbrio não é exatamente o mesmo para a plataforma e para o aliviador, devido à diferente condição de carregamento e geometria dos cascos. Entretanto, esta diferença é pequena (menor que 30º) e a operação é considerada segura. Normas de operação da Petrobrás estabelecem que pode haver um desalinhamento máximo de 45º entre a plataforma *turret* e o aliviador (Correa da Silva; Correia 2004). Portanto, a utilização de aliviadores DP, no modo *weathervane*, é bastante adequada (Doorn; Buchner, 2001). A Figura 6.2 ilustra uma condição normal de alívio de uma plataforma *Turret*.

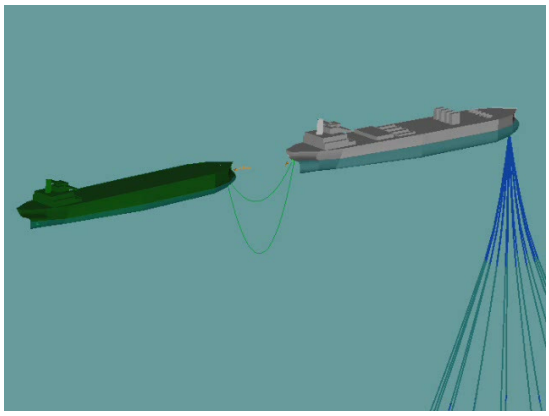


Figura 6.2 Alívio de um FPSO *turret*

No alívio de uma plataforma SMS, a situação é bastante distinta, na medida em que a plataforma não se alinha com a resultante ambiental. Situações de risco podem ocorrer, nas quais o navio aliviador mantém-se a quase 90º com a plataforma, por não possuir potência suficiente para se manter alinhado com a plataforma. A Figura 6.3 apresenta uma situação real, que foi considerada de grande risco. Súbitas variações ambientais ou falhas do Sistema DP do tipo *drive-off* podem levar a colisão quando os navios apresentam grandes diferenças de aproamento (Chen; Moan, 2004; Tannuri et al., 2008a).

Figura 6.3 Operação de alívio na Bacia de Campos (extraída de Illuminatti et al., 2009)

Num primeiro momento, a Petrobras definiu limites de desalinhamento ainda mais restritos do que para plataformas *Turret* (Correa da Silva; Correia 2004). Entretanto, ao longo das operações, foi-se verificando que em grande número de vezes não era possível a manutenção da posição relativa entre os navios dentro destes limites, e definiu-se, após análises de risco, que para plataformas do tipo SMS, o desalinhamento

máximo admitido era de -45º/60º. Esta assimetria é devido ao fato de que o "pente" de risers é instalado em um bordo da plataforma (Petrobras, 2005b). Dependendo das condições ambientais, estes limites permitem que o navio aliviador seja controlado no modo *weathervane*. Isto, logicamente, se o aproamento de equilíbrio for tal que sejam respeitados os limites de segurança. Morishita et al. (2004) mostraram alguns exemplos de operações de alívio DP tais que esta condição era satisfeita. Simulações e experimentos foram usados para ilustrar estas situações.

Entretanto, mesmo com estes novos limites, em grande número de condições ambientais não é possível manter o navio aliviador em sua condição de equilíbrio (*weathervane*), e o Sistema DP deve atuar de forma a levar o navio de volta para o limite angular permitido (Tannuri et al., 2009d). Em muitas situações, o Sistema DP não possui potência suficiente para esta realocação, e o alívio deve ser interrompido. Este cenário se constitui de um grande problema operacional, na medida em que a não execução do alívio leva a necessidade de interrupção da produção pela plataforma, caso seus tanques de armazenamento estejam próximos à saturação.

No artigo (Bravin; Tannuri, 2004), encaminhado no Anexo 24, apresenta-se uma comparação entre a estratégia de controle convencional para operações de alívio e uma nova estratégia proposta. Na abordagem convencional, o navio aliviador é controlado em relação à plataforma, procurando-se manter um ângulo de desalinhamento pré-definido pelo comandante. Adicionalmente, define-se uma zona de movimento livre para o FPSO. Os movimentos do FPSO dentro desta zona não são seguidos pelo aliviador, evitando-se assim que pequenas oscilações do FPSO induzam variações desnecessárias no *set-point* do aliviador. Finalmente, neste modo de controle há a opção de *weathervane*, que caso seja habilitada, faz com que o aliviador busque o seu aproamento de equilíbrio de forma automática, independentemente da posição relativa ao FPSO. Este modo de controle é o efetivamente utilizado nos navios aliviadores em operação.

Na nova estratégia de controle proposta, definem-se limites angulares de desalinhamento entre o FPSO e o aliviador, baseados nas normas de operação vigentes, tais como Petrobras (2005b). É feita uma redefinição das variáveis de controle (não se controla mais a posição do aliviador, e sim os ângulos de desalinhamento relativos), e utiliza-se o conceito de controle "forte" e "fraco". Quando o desalinhamento está dentro dos limites estabelecidos, utiliza-se um controle com ganhos menores (controle

“fraco”), objetivando-se reduzir o consumo de potência. Caso o desalinhamento ultrapasse os limites, há um aumento dos ganhos de controle e o navio é levado de volta à zona de segurança. Uma variação contínua dos ganhos garante a ação suave do controle (*bumpless*). Neste modo de controle, o aproamento de equilíbrio é automaticamente alcançado, caso o mesmo esteja dentro da zona de segurança.

Mostrou-se, por meio de simulações em plataforma *Turret* e SMS, que o consumo médio de potência é 12% inferior para o novo controle proposto, além de uma redução bem significativa dos picos de consumo de potência. Este fato decorre de que, para o controle convencional, ocorrem picos de consumo quando o FPSO ultrapassa a região de movimento livre induzindo súbita variação no *set-point* do aliviador.

Destaca-se que este novo modo de controle é uma adaptação do controle por *weathervane* tradicional, levando-se em conta os limites angulares impostos pela Petrobras quando em operação numa plataforma SMS. Estudos experimentais deste modo de controle serão realizados para comprovar sua efetividade.

7 Desenvolvimento de metodologias de projeto

O autor atua no desenvolvimento de metodologias avançadas de projeto e análise de Sistemas DP, utilizando-se simulações dinâmicas ou cálculos estáticos intensivos.

O projeto de um Sistema DP envolve a definição dos propulsores (arranjo, tipos e potências). Assim como qualquer sistema oceânico, é um projeto complexo, pois requer a definição de premissas e de condições ambientais limitantes. Com relação às premissas, o projetista define quais os requisitos de desempenho que o sistema deve atender, tais como excursão máxima permitida durante a operação, consumo tolerável, restrições no número, arranjo e potência dos propulsores, dentre outros. Estes requisitos são oriundos do tipo de operação que o navio irá executar (por exemplo, um navio de perfuração deve possuir requisitos de excursão bastante estritos, diferentemente de um navio aliviador, que pode se posicionar livremente dentro da zona de segurança). Adicionalmente, questões técnicas estruturais e de arranjo geral da embarcação também definem os requisitos.

A maior complexidade do projeto está, entretanto, na definição das condições ambientais. Na abordagem usual, definem-se as condições limitantes de onda local, vento, correnteza e *swell*. Esta definição é feita em geral considerando os limites de equipamentos ou a segurança de operações. Em seguida, assume-se um desalinhamento máximo entre os agentes ambientais (por exemplo, assume-se que onda e vento são colineares e desalinhados de até 30º em relação à correnteza) e o projeto é feito considerando as condições limitantes com as direções então estabelecidas. Muitas vezes, de forma mais simplista, assumem-se todos os agentes ambientais colineares.

Em seguida, utilizam-se cálculos estáticos de potência para se avaliar se o arranjo de propulsores proposto é capaz de compensar os esforços ambientais definidos. Sobre o cálculo estático, é imposta uma margem de segurança de 20% de potência para compensar os efeitos dinâmicos não modelados (IMCA, 2000). Em alguns projetos, fazem-se simulações dinâmicas completas de alguns casos selecionados (que levam em conta deriva lenta, rajadas de vento, oscilações na correnteza e transitórios) para verificar se a margem de segurança imposta é adequada e se a excursão máxima da embarcação está sendo respeitada.

Como avaliação final do projeto, avalia-se então o *downtime* operacional, equivalente à porcentagem média de tempo em que o navio DP não poderá operar. A estimativa do *downtime* é feita de forma simplista, e o autor propôs um método baseado em simulações exaustivas que fornece resultados mais acurados.

Portanto, dentro da metodologia de projeto tradicional, alguns pontos foram criticados pelo autor e novas abordagens foram propostas e discutidas, conforme será apresentado nos itens subseqüentes.

7.1 Cálculo Dinâmico versus Estático

Como mencionado, na abordagem de projeto de Sistemas DP utilizada atualmente, avalia-se o sistema de forma estática, verificando-se se os propulsores possuem potência para compensar os esforços médios causados pelos agentes ambientais. Em seguida, inclui-se uma margem de 20% para compensar efeitos dinâmicos, e simulações no domínio do tempo são realizadas para alguns casos a fim de se verificar a excursão máxima admitida para o projeto.

Nos artigos Tannuri et al. (2008b) e Tannuri et al. (2009b) (o último é encaminhado no Anexo 25), o autor faz uma análise crítica a respeito deste procedimento. Verificou que a realização de simulações dinâmicas desde a fase inicial do projeto possui vantagens em relação à abordagem estática, e o tempo de computacional é viável considerando a capacidade de processamento atualmente disponível. Mostrou-se que para navios que não possuem restrições severas de posicionamento (tais como navios aliviadores), a margem de 20% é elevada, e o projeto estático leva a um super-dimensionamento da potência instalada. Neste caso, mostrou-se que 10% seria um valor adequado. Ao contrário, para navios que executam operações que requerem posicionamento muito preciso (tais como navios de perfuração e barcaças de instalação), a margem de 20% é pequena. Para um caso analisado, o valor adequado seria 30%.

Deve-se destacar que o trabalho Tannuri et al. (2009b) apresentou revisão muito bem avaliada na conferência no qual foi apresentado, relativa a projeto e construção de embarcações navais. O comentário do revisor indica a relevância do assunto abordado, a saber: “Artigo excelente em um importante tópico de projeto. O artigo descreve bem as diferenças entre o enfoque tradicional de projeto estático de Sistemas DP bem como

resultados de um enfoque dinâmico, mostrando os benefícios de cada um. Os exemplos de aplicação possuem uma grande relevância prática, e os resultados mostram-se razoáveis."[1].

Esta abordagem foi aplicada em um projeto real desenvolvido em parceria a Petrobras (Tannuri, 2008b). Este projeto é resumido no artigo (Tannuri et al., 2009c), encaminhado no Anexo 15. Neste, utilizaram-se simulações dinâmicas para a obtenção dos gráficos de capacidade (*capability plots*) de uma barcaça de lançamento, levando-se em conta, desde a fase inicial do estudo, a excursão máxima tolerável. Os resultados deste projeto foram confrontados com a análise estática feita pelo fabricante (Kongsberg, 2007). Verificou-se que os efeitos dinâmicos limitam a operação da barcaça em águas rasas (onde os limites de movimento são bem mais restritos), o que não era indicado pela simples análise estática. Em função do estudo, está-se redefinindo o procedimento de operação da barcaça, lançando-se mão de utilização de linhas de amarração para auxiliar a operação em águas rasas (*DP-mooring*).

7.2 Avaliação de *Downtime*

Como mencionado, o *downtime* é uma informação muito relevante para avaliação de sistemas *offshore*. Este permite uma comparação entre diversas soluções de projeto, bem como uma avaliação em termos econômicos do retorno de um investimento.

O método tradicional de avaliação de *downtime* é bastante simplista, envolvendo a simples soma das porcentagens de tempo em que cada agente ambiental ultrapassa os valores limites definidos, considerando-os independentes (Ferreira; Howard, 2007). Exemplificando para um Sistema DP, faz-se o projeto e dimensionamento dos propulsores considerando-se condições de onda, vento e correnteza limites, conforme já mencionado. Em seguida, o analista avalia os dados metaoceanográficos da região em que o navio irá operar e obtém a porcentagem de tempo em que se registraram condições ambientais mais intensas que as de projeto. Esta avaliação é feita em geral de forma independente para onda, vento e correnteza. Em seguida, somam-se estas porcentagens e afirma-se, portanto, que o navio não irá operar sob estas condições.

---

[1] *Excellent paper on a hot design topic. The paper describes well the differences between conventional static design approach of such DP systems as well as the results of the dynamic analysis, showing that the design results benefit from such kinds of analyses. The application examples have a very good practical relevance, and the results obtained seem reasonable.*

As hipóteses simplificadoras fazem com que o resultado do *downtime* obtido não seja representativo. Inicialmente, destaca-se que há uma forte dependência entre onda e vento, o que não permite a simples soma algébrica da porcentagem de tempo em que o vento e a onda ultrapassam as condições de projeto. Adicionalmente, há a possibilidade de o Sistema DP ser capaz de manter posição mesmo em condições ambientais mais intensas que as de projeto, em face de um desalinhamento entre os agentes ambientais.

Portanto, o autor desenvolveu uma metodologia de análise de *downtime* baseada na execução de simulações dinâmicas exaustivas, considerando as condições ambientais da região em estudo. Para tanto, utilizam-se séries temporais de onda, vento e correnteza para um período de mais de 5 anos. Estas séries são obtidas por meio de campanhas de monitoração associadas a modelos hidrodinâmicos para preencher lacunas, ou a partir do tratamento estatístico dos dados metaoceanográficos.

A metodologia foi aplicada em diversos projetos junto a empresas de exploração. No artigo Tannuri et al. (2009b), apresenta-se uma discussão sobre a metodologia, e a aplicação ao caso da barcaça de lançamento. Mostra-se que a metodologia tradicional leva a resultados pouco realistas, tanto para operações que possuam requisitos muito estritos de posicionamento ou não. No artigo Tannuri et al. (2009c), apresenta-se a metodologia para a mesma barcaça, considerando-se também a operação de içamento.

No artigo Cueva et al. (2009), os autores apresentam a aplicação desta metodologia de avaliação de *downtime* para a comparação entre a efetividade da operação de alívio a ser realizada num FPSO-*Turret* instalado no Golfo do México, considerando-se aliviador dotado ou não de Sistema DP. Mostrou-se que, pelo fato do sistema *Turret* ter capacidade intrínseca de alinhamento com as condições ambientais, o *downtime* esperado para o alívio convencional ou alívio assistido por Sistema DP é muito semelhante, sendo da ordem de 10 dias por ano para ambos os casos. Este artigo originou-se de um projeto de pesquisa realizado em colaboração à Petrobrás América Inc.

Em projeto realizado junto à Repsol YPF, aplicou-se esta metodologia para avaliação comparativa do *downtime* de operações de alívio com navios convencionais e navios DP, em plataforma FPSO-SMS na Bacia de Campos. Considerou-se também a sazonalidade das condições ambientais. Resultados detalhados serão alvo de publicação. Em linhas gerais, verificou-se que devido a não liberdade de aproamento da plataforma,

o alívio assistido por Sistema DP apresenta *downtime* inferior em relação ao convencional. Para um navio da classe Suezmax, por exemplo, verifica-se um downtime anual estimado de 12% para a operação assistida por DP e de 26% para a convencional.

Para enfatizar a importância desta linha de pesquisa, outro estudo que está sendo conduzido com a metodologia proposta é a definição do aproamento ótimo das plataformas FPSO-SMS a serem instaladas na Bacia de Santos (Tannuri; Simos, 2009). Neste estudo, em condução junto à Petrobras, está-se avaliando o *downtime* pelo método proposto para diferentes aproamentos do FPSO, considerando as condições ambientais da Bacia de Santos e um navio aliviador dotado de Sistema DP. Resultado preliminares indicam que na Bacia de Santos, será requerido um desvio de aproximadamente 40º em relação ao aproamento utilizado na Bacia de Campos. Os resultados estão sendo, atualmente, avaliados por diversos setores da Petrobrás, considerando-se também outros critérios de definição de aproamento, tais como tração nos *risers*.

8 Novas propostas de pesquisa

Nesta seção, apresentam-se os trabalhos do autor, na área de Sistemas DP, em fase inicial ou em fase de planejamento, e que serão foco de seus esforços nos próximos 5 anos.

8.1 Técnicas Avançadas de Controle

O controle por modos deslizantes, amplamente abordado pelo autor em trabalhos anteriores, possui um problema inerente relacionado à presença de *chattering*, que equivale a uma variação em alta frequência da ação de controle. Para contorná-lo, conforme explicado na seção 2.2, realiza-se uma alteração da formulação original do controlador, introduzindo uma camada limite sobre a superfície de escorregamento definida. Entretanto, esta alteração induz erros de acompanhamento (*offset*). Uma nova técnica de controle tem sido então desenvolvida, denominada Controle por Modos Deslizantes de Ordem Superior (*Higher Order Sliding Mode Control – HOSM*). Foi originalmente proposta por Levant, (1987). Uma edição especial do *International Journal of Robust and Nonlinear Control* (Vol. 18, 2008) abordou exclusivamente esta técnica, apresentando novos algoritmos para implementação e aplicações práticas. A função sinal, aplicada na técnica original sobre a variável que define a superfície deslizante é agora aplicada sobre suas derivadas de ordem superior, o que elimina o problema de *chattering*. A estabilidade e convergência do algoritmo também são garantidas. Assim, objetiva-se desenvolver e avaliar experimentalmente um controlador baseado na técnica de *HOSM* aplicado ao posicionamento automático de embarcações *offshore*.

Outro objetivo dentro desta linha é o desenvolvimento de um observador de estados também baseado em modos deslizantes de ordem superior. Os EKF, utilizados nos Sistemas DP atuais, requerem um complexo processo de ajuste de parâmetros (matrizes de ponderação), e que também dependem do estado do sistema (condição de carregamento, condição do mar, etc...). Os observadores baseados em modos deslizantes (SM) são uma opção bastante adequada. Por exemplo, Chen; Dunnigan (2002) fizeram uma comparação entre o EKF e um observador por modos deslizantes aplicado a uma máquina de indução. Concluíram pela grande vantagem do segundo, por diversas razões:

(a) Devido a ruídos externos e incertezas paramétricas, o observador SM apresenta melhor estimativa dos estados do sistema em relação ao EKF;

(b) O ajuste dos parâmetros do SM é bastante simples, comparado ao EKF. Este requer uma estimativa muito acurada das matrizes de covariância (parâmetros de entrada do EKF), podendo comprometer bastante seu desempenho. Para o SM, nenhum conhecimento das estatísticas do ruído é exigido.

(c) A implementação do EKF em tempo real é mais custosa em termos computacionais que o SM

Técnicas de observação por modos deslizantes de ordem superior também já foram desenvolvidas, eliminando o problema de *chattering* presente nos observadores de primeira ordem. Em Davila et al. (2005), apresenta-se um observador de segunda ordem aplicado a sistemas mecânicos. Esta referência será usada como base na implementação do observador para o Sistema DP.

Estes trabalhos já estão em fase inicial, e contam atualmente com a participação de dois alunos de graduação, que conduzirão os experimentos preliminares como parte de seus trabalhos de graduação (orientados pelo autor) e uma tese de doutorado em fase inicial. Prevê-se adicionalmente a participação de um aluno de mestrado. Além disso, o autor possui um projeto de pesquisa Universal junto ao CNPq em andamento ("Posicionamento de Embarcações Oceânicas: Técnicas de Controle e Observação Baseadas em Modos Deslizantes de Ordem Superior"), que prevê a aquisição de equipamentos para a realização destes ensaios.

8.2 Monitoração de ondas

Na seção 3.2, apresentaram-se os bons resultados obtidos com o método de estimação do espectro de ondas baseado no movimento do navio, envolvendo validação experimental e por meio de monitorações em escala real. Em continuidade, está-se iniciando um projeto de pesquisa em conjunto a Petrobras para a efetiva implementação de um equipamento a ser embarcado nos navios e plataformas, compreendendo:

- Instrumentação, compreendendo base inercial com acelerômetros e *rate gyros* para a medição de acelerações e velocidades angulares do casco, bem como placas de aquisição A/D.

- Rotinas de cálculo de movimentos: Converte os sinais de aceleração e velocidade em sinais de movimento no ponto de monitoração, realizando filtragens necessárias e correções de deriva.
- Rotina de Estimação de Espectro de Ondas: baseada no método Bayesiano validado nos projetos de pesquisa anteriores. Ainda neste item, será avaliada uma metodologia de ajuste dos parâmetros, baseado no critério ABIC (*Akaike's Bayesian information criterion*), desenvolvido por Akaike (1980). No trabalho Simos et al. (2009b), verificaram-se problemas práticos na implementação deste critério, relacionados ao alto custo computacional. Serão estudadas alternativas para sua implementação, de forma a reduzir o tempo computacional, na medida em que resultados preliminares indicaram pelas vantagens deste critério no ajuste dos parâmetros.
- Interface com usuário e banco de dados de funções de transferência.

Dentro deste projeto de pesquisa, serão realizadas validações do equipamento em ambiente laboratorial (ver item 8.4 a seguir) e em campo, através de campanhas de monitoração em escala real.

8.3 Desenvolvimento de Ferramentas de Simulação

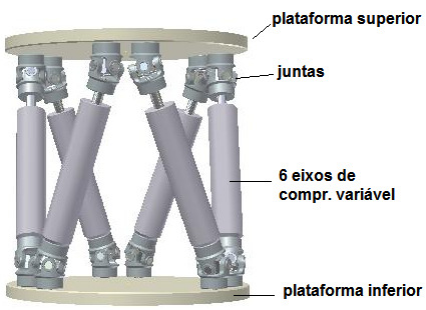
Conforme apresentado na seção 4.3, o autor está atuando na implementação de efeitos de interação hidrodinâmicos entre corpos nos simuladores numéricos. Resultados relativos a onda e correnteza já mostraram que estes efeitos possuem grande influência na dinâmica das embarcações e na potência consumida pelo Sistema DP.

O autor está atualmente iniciando os estudos para avaliação do efeito de interação aerodinâmica, e sua influência no Sistema DP (Tannuri et al., 2009e). Uma ampla revisão bibliográfica já fora feita, e ensaios experimentais demonstram que os efeitos de interação aerodinâmica possuem bastante influência das forças sobre a embarcação numa configuração típica de alívio. Nenhuma referência quando às conseqüências sobre o Sistema DP foi publicada.

Assim, o grupo de pesquisa liderado pelo autor está iniciando modelagens em CFD para avaliação do campo de velocidades de vento a jusante do FPSO, e posteriormente será aplicada a metodologia de cálculo de forças publicada na literatura e explicada na seção 4.3. Em seguida, esta metodologia será incorporada ao simulador dinâmico para avaliação dos efeitos na potência do Sistema DP de um aliviador típico.

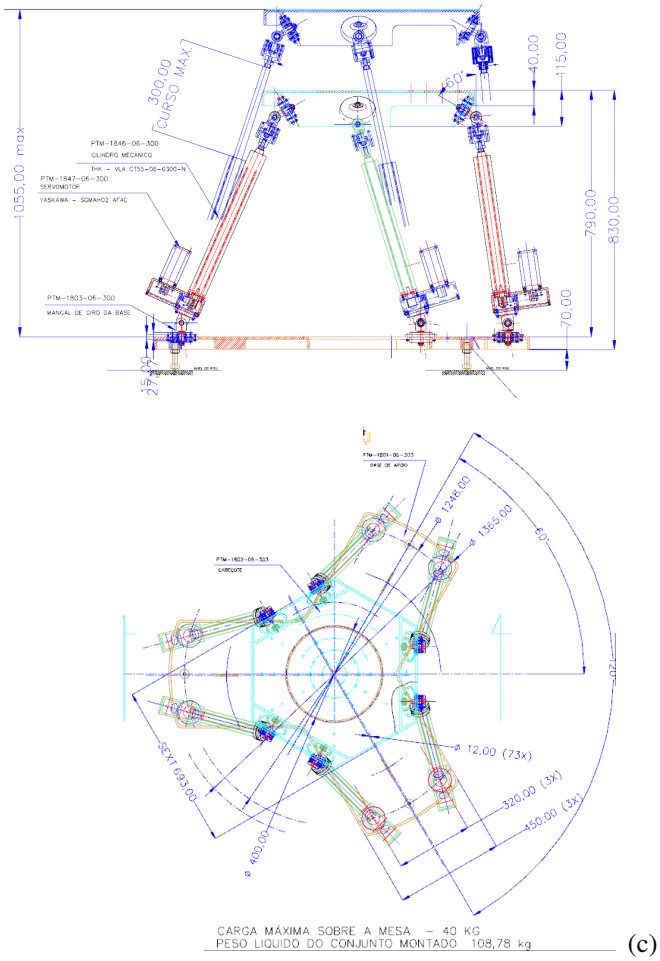
8.4 Desenvolvimento de Aparatos Experimentais

O *Hexapod* ou *Stewart Paralell Mechanism* é um mecanismo composto por seis atuadores lineares dispostos convenientemente, capaz de gerar movimentos com 6 graus de liberdade. Em continuidade ao desenvolvimento de aparatos experimentais voltados para ensaios de sistemas oceânicos, destaca-se a instalação de um *Hexapod* no CH-TPN. Este mecanismo será então utilizado para aplicações variadas no laboratório (Figura 8.1). O desenvolvimento do programa de controle e interfaceamento com os *servo-drivers* é foco de um trabalho de iniciação científica em fase inicial, financiado pela FAPESP, orientado pelo autor.



(a)

(b)



(c)

Figura 8.1 (a) Exemplo de um mecanismo *hexapod*; (b) foto do mecanismo construído (c) dimensões

O objetivo inicial será utilizar o *Hexapod* como excitador de movimentos na cabeça *risers* a serem ensaiadas no CH-TPN. Para tanto, o *Hexapod* será instalado de forma invertida sobre um pórtico que atravessa o tanque. Com isso será possível estudar o efeito do movimento dos navios petroleiros sobre os *risers*. Adicionalmente, poderá

ser utilizado para a excitação dos modelos de navios e plataformas, com movimentos genéricos.

Outra aplicação será a realização de testes com o equipamento de monitoração de ondas exposto na seção anterior (8.2). Para tanto, os movimentos que o navio realiza sob excitação de determinado espectro de ondas serão calculados e impostos ao *Hexapod*, sobre o qual se instalará o equipamento. Em seguida, utiliza-se o algoritmo de estimação de ondas para se verificar se o espectro estimado é coerente com o que fora utilizado para gerar os movimentos.

8.5 Estratégias de Controle e Posicionamento

Uma das áreas de pesquisa em foco ultimamente, relacionada a Sistemas DP, é relativa a controle cooperativo. Este compreende técnicas de controle num nível superior, coordenando a troca de informações e os *set-points* dos Sistemas DP durante uma operação que envolva múltiplas embarcações DP.

Grupos de pesquisa internacional têm abordado este problema focando, por exemplo, controle de trajetória de múltiplas embarcações autônomas durante percurso coordenado (Aguiar et al., 2008; Hou; Allen, 2008; Ghabcheloo et al. 2009). Nestes trabalhos, por exemplo, propõe-se arquiteturas de troca de informações entre as embarcações para manter a formação, levando em conta que o compartilhamento das informações é um fator limitante pois há grande risco de falhas de comunicação. Desta maneira, quanto menos informações forem necessárias, menor a chance de falha do sistema.

Entretanto, operações com múltiplas embarcações DP tem se mostrado cada vez mais frequentes também na área de exploração *offshore*, para a realização de lançamentos e instalação de estruturas e equipamentos submarinos (*sub-sea*). Um exemplo inicial que envolvia a operação de dois rebocadores DP foi o projeto realizado em conjunto a Petrobras, descrito em Fujarra et al., (2008). A partir daí, diversos casos reais de estudo têm levado a necessidade de um estudo mais aprofundado das técnicas de controle cooperativo. Adicionalmente, demanda-se capacitar os simuladores numéricos e aparatos experimentais para permitir a análise dos benefícios da utilização de controle cooperativo em operações *offshrore*.

Assim, o objetivo da pesquisa do autor nesta área será a aplicação dos conceitos de controle cooperativo a operações *offshore*. Um exemplo inicial será a avaliação do lançamento de uma *manifold* em águas profundas, por meio de dois rebocadores DP operando de forma integrada (Santos et al., 2009). A Figura 8.2 ilustra o método, no qual os rebocadores liberam cabo e ao mesmo tempo se aproximam para promover a descida do *manifold* até o leito submarino. Será feita uma avaliação por meio de simulações numéricas do controle convencional (cada rebocador operando com seu Sistema DP independente), em comparação com o sistema cooperativo, no qual há troca de informação de movimentação relativa entre os rebocadores, objetivando-se reduzir as tensões no cabo de lançamento e o movimento no *manifold* submerso.

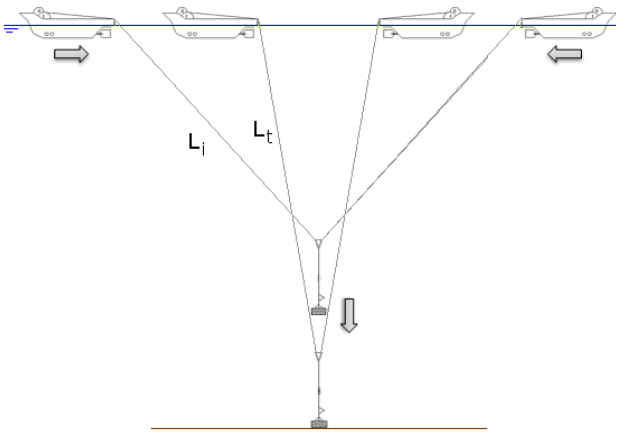


Figura 8.2 Método de lançamento de *manifold* (adaptado de Santos et al., 2009)

8.6 Desenvolvimento de Metodologias de Projeto

Conforme mencionado na seção 7.2, a metodologia de avaliação de *downtime* operacional tem se mostrado bastante adequada para a realização de projeto e análise de embarcações DP. Naquela seção foram apresentados diversos casos reais de aplicações da metodologia. Esta linha de trabalho será continuada, portanto, abordando as ações descritas a seguir.

A avaliação de um grande número de condições ambientais e configurações de arranjo ou condição de calado torna impeditiva a utilização de análise dinâmica. Entretanto, a análise estática é muito simplista, conforme foi discutido na seção 7.1. Assim, o autor está iniciando o desenvolvimento de um modelo dinâmico simplificado de embarcações DP, que envolve o cálculo estático da configuração de potência dos propulsores em face à determinada condição ambiental e posterior cálculo do passeio

dinâmico utilizando-se a avaliação da resposta dinâmica no domínio da freqüência. Esta resposta englobará os movimentos de primeira e segunda ordem de ondas e se possível a resposta a rajadas de vento. Será considerada a malha de controle DP na avaliação desta resposta. Um aluno de iniciação científica está iniciando trabalhos nesta área.

Adicionalmente, um trabalho de formatura está sendo orientado pelo autor no presente ano, objetivando-se desenvolver um sistema computacional com interface amigável para a realização desta metodologia, utilizando-se cálculo estático e posteriormente o modelo dinâmico simplificado.

9 Referências Bibliográficas

AALBERS, A.B.; NIENHUIS, U. Wave Direction Feed-Forward on Basis of Relative Motion Measurements to Improve Synamic Positioning Performance, In: **Proceedings of Offshore Technology Conference (OTC1987)**, Houston, Estados, Unidos, OTC 5445, pp.225-232, 1987.

AALBERS, A.B.; TAP, R.F.; PINKSTER, J.A. An application of dynamic positioning control using wave feed forward, **Int J of Robust and Nonlinear Control**, Vol.11, pp.1207-1237, Maio, 2001.

AALBERS, A.B.; WAALS, O.J.; TAP, R.F.; DAVISON. N.J. Wave Feed Forward DP and the Effect on Shuttle Tanker Operation, In: **Dynamic Positioning Conference**, Houston, Estados Unidos, 2004.

AGOSTINHO, A.C. **Controle por modos deslizantes aplicado a sistema de posicionamento dinâmico,** São Paulo, 2009. 1v. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

AGOSTINHO, A.C.; MORATELLI JR., L.; TANNURI, E.A.; MORISHITA, H.M. Sistema de posicionamento dinâmico para embarcações offshore: análise experimental de metodologias avançadas de controle. In**: 12º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação (ISA-SHOW 2008)**, São Paulo, Brasil, 2008.

AGOSTINHO, A.C. ; MORATELLI JR., L. ; TANNURI, E. A. ; MORISHITA, H.M. sliding mode control applied to offshore dynamic positioning systems, In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação)

AKAIKE, H. **Likelihood and Bayes Procedure.** In: Bernardo, J.M., de Groot, MH, Lindley D.U., Smith A.F.M., editors, Bayesian Statistics, Valencia, University Press, p. 143-66, 1980.

ASANUMA, T. **Estudo das Forças Ambientais Atuantes no FPSO e no Navio Shuttle,** Toquio, 2005. 1v. Tese (doutorado) – Departamento de Engenharia de Arquitetura Naval da Nihon Daigaku (em japonês).

BALCHEN, J.G.; JENSSEN, N.A.; SAELID, S. Dynamic Positioning Using Kalman Filtering and Optimal Control Theory, In: **IFAC/IFIP Symposium on Automation in Offshore Oil Field Operation**, Holanda, Amsterdã, pp.183-186, 1976.

BALCHEN, J.G.; JENSSEN, N.A.; SAELID, S. Dynamic Positioning of Floating Vessels Based on Kalman Filtering and Optimal Control., **In: Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control**, Nova Iorque, Estados Unidos, pp.852-864, 1980.

BALL, A.E.; BLUMBERG, J.M. Development of a dynamics ship-positioning. GEC **Journal of Science & Technology**, Vol. 42, No. 1, pp.29-36, 1975.

BRAVIN, T.T.; TANNURI, E.A. Dynamic Positioning Systems Applied to Offloading Operations. **International Journal of Maritime Engineering,** Inglaterra, v. 146, n. A2, p. 1, 2004.

BRAVIN, T.T.; TANNURI, E.A. Simulador de sistemas de posicionamento automático de petroleiros e plataformas. In**: 5º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação (ISA-SHOW 2005)**, São Paulo, Brasil, 2005.

BRAY, D. **Dynamic Positioning**, The Oilfield Seamanship Series, Volume 9, Oilfield Publications Ltd. (OPL), 1998.

BRUIN, A.C. Initial development of a method to account for wind shielding effects on a shuttle tanker during FPSO offloading, **Technical Report NLR-CR-2003-018**, National Aerospace Laboratory NLR, Alemanha, 2003.

BUCHNER, B.; BUNNIK, T. Wind Shield Investigations for FPSO Tandem Offloading. In: **International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2002)**, Kita-Kyushu, Japão, 2002.

CARNEIRO, M.L.; MELLO, P. C.; TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N. Experimental Validation of an Absorbing Wavemaker Controller. In: **28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009)**, Honolulu, Estados Unidos, 2009.

CHEN, F.; DUNNIGAN, M.W. Comparative Study of a Sliding-Mode Observer and Kalman Filters for Full State Estimation in an Induction Machine. **IEE Proc.-Electr. Power Appl**, Vol. 149, No. 1, Janeiro, 2002.

CHEN, H.; MOAN, T. Probabilistic modeling and evaluation of collision between shuttle tanker and FPSO in tandem offloading. **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 84, No. 2, Maio, p. 169-186, 2004.

CORREA DA SILVA, S.H.S., CORREIA, C.A.R., Shuttle Tankers Basic Requirements for Brazilian Waters. In: **Proceedings of the OMAE Specialty Symposium on FPSO Integrity (OMAE FPSO 04-0071)**, Houston, Estados Unidos, 2004.

CUEVA, M.; MATOS, V.L.F.; CORREA DA SILVA, S.H.S.; TANNURI, E.A.; MASTRÂNGELO, C. Downtime Analysis for Offloading Operation: DP x Non-DP Shuttle Tanker. In: **28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009)**, Honolulu, Estados Unidos, 2009.

DAVILA, J.; FRIDMAN, L.; LEVANT, A. Second-Order Sliding-Mode Observer For Mechanical Systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Vol. 50, No. 11, Novembro, 2005.

DI MASI, G.B.; FINESSO, L.; PICCI, G. Design of a LQG Controller for Single Point Moored Large Tankers. **Automática**, Vol.22, No. 2, pp.155, 1986.

DONHA, D.C. **Estudo, Implementação, Teste e Avaliação de um Sistema de Posicionamento Dinâmico**, São Paulo, 1989. 1v. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DONHA, D.C. **Sistemas de controle marítimos**, São Paulo, 2000. 1v. Dissertação (livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

DONHA, D.C.; TANNURI, E.A. Non-linear semi-submersible positioning system using an H-infinity controller. **In: Control Applications in Marine Systems (CAMS 2001),** Glasgow, Escócia, 2001.

DOORN, J.V.; BUCHNER, B. Design and operational evaluation of offloading operations for deep water FPSOs. In: **Deep Offshore Technology (DOT) Conference**, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

FERREIRA, P.R.; HOWARD, N. DP FPSO for GoM Considerations for the FPSO and Shuttle Tanker, In: **FPSO Research Forum**, Houston, Estados Unidos, 2007.

FOSSEN, T.I. **Guidance and Control of Ocean Vehicles**, John Wiley and Sons, Ltd., 1994.

FOSSEN, T. I, GROVLEN A. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping. **IEEE Transactions on Control Systems Technology***,* 6(1), 121-128, 1998.

FOSSEN, T.I.; STRAND, J.P., Passive Nonlinear Observer Design for Ships Using Lyapunov Methods: Full-Scale Experiments with a Supply Vessel. **Automatica**, Vol.35, No. 1, pp 3-16, 1999.

FOSSEN, T.I.; STRAND, J.P. Nonlinear Passive Weather Optimal Positioning Control (WOPC) System for Ships and Rigs: Experimental Results, **Automatica** , Vol.37, No. 5, pp701-715, 2001.

FUCATU, C.H. **Desenvolvimento de um Simulador Dinâmico para Análise de Dois Navios Amarrados em Tandem,** São Paulo, 2003. 1v. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FUJARRA, A.L.C.; TANNURI, E.A.; MASETTI, I.Q.; IGREJA, H. Experimental and Numerical Evaluation of the Installation of Sub-Sea Equipments for Risers Support. In: **27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008)**, Estoril, Portugal, 2008.

FUNG, P.T.K.; GRIMBLE, M.J. Dynamic Ship Positioning Using a Self-Tuning Kalman Filter, **IEEE Transactions on Automatic Control**. Vol.AC-28, No.3, pp339-350, 1983.

GHABCHELOO R.; AGUIAR, A.;PASCOAL, A.M.; SILVESTRE, C.; KAMINER, I.; HESPANHA, J. Coordinated Path Following in the Presence of Communication Losses and Time Delays. **SIAM J. Control Optim**., 48(1), 234–265, 2009.

GRIMBLE, M.J.; PATTON, R.J.; WISE, D.A. The design of dynamic positioning control systems using extended Kalman filtering techniques, In: **Oceans'79 Conference**, San Diego, Estados Unidos, 1979.

GRIMBLE, M.J.; PATTON, R.J.; WISE, D.A. Use of Kalman Filtering Techniques in Dynamic Ship Positioning. **IEEE Proceedings**, Vol. 127, Pt.D, No. 3, pp. 93-102, 1980.

HOGBEN, N; COBB, F.C. Parametric modelling of directional wave spectra. In: **Proceedings of Offshore Technology Conference (OTC1986)**, Houston, Estados Unidos, OTC 5212, pp.489-498, 1986.

HONG, S.Y.; KIM, J.H.; CHO, S.K.; CHOI, Y.R.; SIM, Y.S. Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels, **Ocean Engineering**, 32, pp. 783-801, 2005.

HOU Y.; ALLEN R., Behaviour-based Circle Formation Control Simulation for Cooperative UUVs. In: **Second IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV'08),** Irlanda, 2008.

HUIJSMANS, R.H.M., PINKSTER, J.A., WILDE, J.J. DE. Diffraction and Radiation of Waves around Side-by-side Moored Vessels, In: **International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2001)**, Stavanger, Noruega, 2001.

ILLUMINATI, C.; TANNURI, E. A.; MATOS, V. L. F.; SIMOS, A.N. Current Wake Effects on DP System of a Shuttle Tanker. In: **28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009)**, Honolulu, Estados Unidos, 2009.

ISEKI, T.; OHTSU, K. Bayesian estimation of directional wave spectra based on ship motions, **Control Engineering Practice**, Vol. 8, pp.215-219, 2000.

JACOB, B.P.; MASETTI, I.Q.; BARROS, C.R.M.; ALBRECHT, C.H. ; LIMA, B. S.L.P.; SPARANO, J.V. Numerical Simulation of the Mooring Procedures of the BGL-1 Pipeline Launching Barge. In: **23th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2004)**, Vancouver, Canadá, 2004.

KASHIWAGI, M., ENDO, K., YAMAGUCHI, H.; Wave drift forces and moments on two ships arranged side by side in waves, **Ocean Engineering**, 32, pp. 529-555, 2005.

KATEBI, M.R.; GRIMBLE, M.J., ZHANG, Y. H_∞ robust control design for dynamic ship positioning. **IEE Proc. Control Theory Appl**, Vol.144, No.2, pp. 110-120, 1997.

KONGSBERG MARITIME, Noruega, Dynamic Positioning Systems. Disponível em: <http://www.km.kongsberg.com/>. Acesso em: 27 de abril de 2009.

KONGSBERG SIMRAD, **Operator Manual Kongsberg Simrad SDP (OS)**, Rel 2.5, Noruega, 412 p., 1999

KRSTIĆ, M.; KANELLAKOPOULOS, I; KOKOTOVIĆ, P. **Nonlinear and Adaptive Control Design**. New York, NY, John Wiley & Sons, 1995.

LEVANTOVSKY, L.V. (LEVANT, A.) **Higher order sliding modes and their application for controlling uncertain processes**. Tese de Doutorado, Institute for System Studies of the USSR Academy of Science, Moscou, 1987.

MAEDA, K.; HOSOTANI, N.; TAMURA, K.; ANDO, H. Wave making properties of circular basin, **In: International Symposium on Underwater Technology**, Taiwan, pp. 349-354, 2004.

MARIN, Holanda, Maritime Research Institute Netherlands, **Offshore Multi-body Software**, Disponível em <http://www.marin.nl/web/show/id=70090>. Acesso em 27 de abril 2009a.

MARIN, Holanda, Maritime Research Institute Netherlands, **JIP Offloading Operability I**, Disponível em <http://www.marin.nl/web/show/id=88948>. Acesso em 27 de abril 2009b.

MARINTEK, Norwegian Marine Technology Research Institute, Noruega **SIMO – Simulation of Marine Operations**. Disponível em <http://www.sintef.no/Home/Marine/MARINTEK/>. Acesso em 27 de abril 2009.

MORISHITA, H.M.; TANNURI, E.A.; BRAVIN, T.T. Methodology for dynamic analysis of offloading operations. In: **IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS 2004)**, Ancona, Itália, 2004.

MORISHITA, H.M. ; TANNURI, E.A. ; MORATELLI JR., L. Experimental And Numerical Facilities For Analysis And Design Of Dynamic Positioning Systems. In: **Rio Oil & Gas Conference**, Rio de Janeiro, Brasil, 2006a.

MORISHITA, H.M. ; TANNURI, E. A. ; MORATELLI JR., L. Computational Tools and Experimental Facilities for Analysis and Design of Dynamic Positioning Systems. In: **21º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore (SOBENA 2006)**, Rio de Janeiro, Brasil, 2006b.

MORISHITA, H.M.; TANNURI, E.A.; LAGO, G.A. Experimental Set-Up for Experiments With Dynamic Positioning System. In: **Proceedings of 7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2006)**, Lisboa, Portugal, 2006c.

MORISHITA, H.M.; TANNURI, E.A.; SAAD, A.C.; SPHAIER, S.H.; LAGO, G.A.; MORATELLI JR, L.M. Laboratory Facilities for Dynamic Positioning System. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação)

NAKAMURA, M.; KAJIWARA, H. Control system design and model experiments on thruster assisted mooring system. In: **Proc. Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)**, pp. 641-648, EUA, 1997.

NIELSEN, U. D. Estimations of on-site directional wave spectra from measured ship responses. **Marine Structures**, Vol. 19, pp. 33-69, 2006.

NIELSEN, U. D. Response-based estimation of sea state parameters – influence of filtering. **Ocean Engineering**, Vol. 34, pp. 1797-1810, 2007.

NIELSEN, U.D.. Introducing two hyperparameters in Bayesian estimation of wave spectra. **Probabilistic Engineering Mechanics**, Vol. 23, p. 84-94, 2008.

NISHIMOTO, K.; FUCATU, C.H.; MASETTI, I.Q. DYNASIM - A Time Domain Simulator of Anchored FPSO. **Journal of Offshore Mechanics Arctic Engineering** ASME, v. 124, n. 4, p. 203-211, 2002.

OROZCO, J.M., CHEN, X.B. Offloading Operability JIP – Wave shielding effect (phase 1), **Technical Note**, Bureau Veritas, 2003.

PAPOULIAS, F.A.; HEALEY, A.J. Path control of surface ships using sliding modes. **Journal of Ship Research**, Vol.36, No.2, pp141-153, 1992.

PASCOAL, R.; GUEDES SOARES, C.; SORENSEN, A.J. Ocean Wave Spectral Estimation Using Vessel Wave Frequency Motions. **In: Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2005)**, Haikidiki, Grécia, paper OMAE2005-67584, 2005.

PESCE, C.P.; SIMOS, A.N.; TANNURI, E.A.; MARTINS, M.M.; SOUZA, G.M.; FUCATU, C.H.; RODRIGUES, C.E.P.; OSHIRO, A.O.; AZEVEDO, P.C. Estudo de Operação de Transbordo (Offloading) na Bacia de Campos através de Simulações Dinâmicas, **Relatório Técnico EPUSP/Repsol YPF**, São Paulo, 2009. (Acesso restrito)

PETROBRAS, Campos Basin – Metocean Data, **Especificação Técnica I-ET-3000.00-1000-941-PPC-001_revB**, 2005a.

PETROBRAS, Offshore loading guideline for dinamically positioned shuttle tanker operations. **Especificação Técnica E&P-PP-2EP-00006-x rev.A**, 2005b.

PINKSTER, J.A. Wave Feed-Forward as a Means to Improve Dynamic Positioning, In: **Proceedings of Offshore Technology Conference (OTC1978)**, Houston, Estados, Unidos, OTC 3057, pp.105-112, 1978.

PINKSTER, J.A.; NIENHUIS,U. Dynamic positioning of large tankers at sea, In: **Proceedings of the Offshore Technology Conference (OTC'86)**, Houston, EUA, pp459-476, 1986.

PINTO, M.M.O.; ARANHA, J.A.P.; PESCE, C.P.; FUJARRA, A.L.C.; SIMOS, A.N. Turret positioning, DICAS heading and loading on catenary risers. In: **Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'99)**, St. Johns, Newfoundland, Canada, 1999.

QUEIROZ FILHO, A.N.; TANNURI, E.A. DP Offloading Operation: a Numerical Evaluation of Wave Shielding Effect. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação)

RAGAZZO, C.G.; TANNURI, E.A. On the dynamics of Turret systems in deep water. **Applied Ocean Research**, v. 25, p. 27-51, 2003.

SAELID, S.; JENSSEN, 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**, Vol.AC, No.3, pp331-339, 1983

SANTOS, M.; NEVES, C.; SANCHES, C. Y-Method for Subsea Equipment Installation. In: **22nd Deep Offshore Technology Exhibitions and Conference (DOT2009),** Estados Unidos, 2009.

SCHÄFFER, H.A.; SKOURUP, J. Active Absorption of Multidirectional Waves**, In: Conf. Proc. of Coastal Engineering (ASCE**), Nova York, Estados Unidos, pp. 55-66, 1996.

SIMOS, A.N.; SPARANO, J.V.; TANNURI, E.A.; MATOS, V.L.F. Directional Wave Spectrum Estimation Based on a Vessel 1st Order Motions: Field Results. In: **International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2007)**, Lisboa, Portugal, 2007.

SIMOS A.N., TANNURI, E.A., Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto para a Definição do Aproamento Ótimo de um FPSO Ancorado em SMS**. Proposta de Projeto USP-Petrobras**, 2008.

SIMOS, A.N.; TANNURI, E.A.; FUCATU, C.H.; ILLUMINATTI, C. Estudo de Modelagem de Efeitos de Esteira de Correnteza em Simulações Dinâmicas de Sistemas FPSO-Aliviador, **Relatório Técnico USP/Petrobrás**, São Paulo 2008.

SIMOS, A.N.; SPARANO, J.V.; TANNURI, E.A.; MATOS, V.L.F. Directional Wave Spectrum Estimation Based on a Vessel 1st Order Motions: Field Results. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, Vol. 19, No. 2, Junho, 2009a.

SIMOS, A.N.; TANNURI, E.A.; SPARANO, J.V.; MATOS, V.L.F. Estimating wave spectrum from moored vessels motions: experimental validation. **Applied Ocean Research**, 2009b (submetido).

SLOTINE, J.J.E., Sliding controller design for non-linear systems. **Int. J. Control**, Vol.40, No.2, pp421-434, 1984.

SLOTINE, J.J.E. The robust control of robot manipulators. **Int. J. Robotics Research**, Vol. 4, No. 2, pp49, 1985

SLOTINE, J.J.E.; SASTRY, S.S. Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators. **Int. J. Control**, Vol. 38, No.2, pp465-492, 1983.

SOUZA JR., J.A.R.; TANNURI, E.A.; OSHIRO, A.T. Simulador Digital de Manobras de Navios. In: **Rio Oil & Gas Conference**, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

SOUZA JR., J.A.R.; TANNURI, E.A.; OSHIRO, A.T. Development and Application of a Ship Manoeuvring Digital Simulator for Restricted Waters. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação)

SPARANO, J.V. **Método de estimação de espectro direcional de ondas baseando em movimentos de 1ª ordem de sistemas oceânicos: validação em escala reduzida e verificação em escala real**, São Paulo, 2008. 1v. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SPARANO, J.V. ; TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N.; MATOS, V.L.F. On the Estimation of Directional Wave Spectrum Based on Stationary Vessels 1st Order Motions: A New Set of Experimental Results. In: **27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008)**, Estoril, Portugal, 2008.

STANSBERG, C.T. On the Fourier Series Decomposition of Directional Wave Spectra, In: **International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE1998)**, Montral, Canadá, 1998.

TANASOVICI, G.; FUCATU, C.H.; TANNURI, E.A.; UMEDA, C.H. Design And Construction of a Planar Motion Mechanism. In: **Rio Oil & Gas Conference**, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

TANNURI, E.A.; DONHA, D.C. Hinfinity controller design for dynamic positioning of a turret moored FPSO. In: **Proceedings of 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2000)**, Aalborg, Dinamarca, 2000.

TANNURI, E.A.; DONHA, D.C.; PESCE, C.P. Dynamic positioning of a turret moored FPSO using sliding mode control. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, v. 11, n. 3, p. 1239-1256, 2001a.

TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N.; SPARANO, J.V.; CRUZ, J.J. Directional Wave Spectrum Estimation Based on Moored FPSO Motions. In: **20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2001)**, Rio de Janeiro, Brasil, 2001b.

TANNURI, E.A.; PESCE, C.P.; DONHA, D.C. Assisted dynamic positioning system for a FPSO based on minimization of a cost function**. In: Control Applications in Marine Systems (CAMS 2001),** Glasgow, Escócia, 2001c.

TANNURI, E.A. **Desenvolvimento de Metodologia de Projeto de Sistema de Posicionamento Dinâmico Aplicado a Operações em Alto-Mar**, São Paulo, 2002. 1v. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

TANNURI, E.A.; PESCE, C.P.; ALVES, G.S.; MASETTI, I.Q ; FERREIRA, P.P.R.; UMEDA, C.H. Dynamic Positioning of a Pipeline Launching Barge. In: **International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2002)**, Kita-Kyushu, Japão, 2002.

TANNURI, E. A.; SIMOS, A.N.; PESCE, C.P.; DONHA, D.C. Assisted Dynamic Positioning of A Moored FPSO: Robustness Aspects Regarding Current Forces Modeling. In: **22th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2003)**, Cancun, Mexico, 2003a.

TANNURI, E.A.; BRAVIN, T.T.; PESCE, C.P. Dynamic Positioning Systems: Comparison Between Wave Filtering Algorithms and Their Influence on Performance. In: **22th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2003)**, Cancun, Mexico, 2003b.

TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N.; SPARANO, J.V.; CRUZ, J.J. Estimating Directional Wave Spectrum Based On Stationary Ship Motion Measurements. **Applied Ocean Research**, v. 25, p. 243-261, 2003c.

TANNURI, E.A.; BRAVIN, T.T.; PESCE, C.P. Development of a Dynamic Positioning System Simulator for Offshore Operations. In**: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 2003)**, São Paulo, Brasil, 2003d.

TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N.; NISHIMOTO, K.; BRAVIN, T.T.; ALVES, K.H.; FERREIRA, M.D. Dynamic simulation of offloading operation considering wave interaction between vessels; In: **23th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2004)**, Vancouver, Canadá, 2004.

TANNURI, E.A.; MORISHITA, H.M.; VERAS, V.L.M.; LAGO, G.A. Critical analysis of control and filtering algorithms used in real dynamic positioning systems. **In: Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2005)**, Haikidiki, Grécia, 2005.

TANNURI, E.A.; MORISHITA, H.M. Experimental and Numerical Evaluation of a Typical Dynamic Positioning System**. Applied Ocean Research**, v. 28, p. 133-146, 2006.

TANNURI, E.A.; KUBOTA, L.K.; PESCE, C.P. Adaptive techniques applied to offshore dynamic positioning systems. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXVIII, p. 323-330, 2006a.

TANNURI, E.A.; KUBOTA, L.K.; PESCE, C.P. Adaptive Control Strategy for the Dynamic Positioning of a Shuttle Tanker during Offloading Operations. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 128, p. 203-210, 2006b.

TANNURI, E.A.; MORISHITA, H.M.; SOUZA JR., J.A.R. Desenvolvimento de simulador dinâmico de navegação em canais com águas rasas e estreitas. In: **21º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore (SOBENA 2006)**, Rio de Janeiro, Brasil, 2006c.

TANNURI, E.A.; DE MELLO, P.C.; SALES Jr., J.S.; SIMOS, A.N.; MATOS, V.L.F. Estimation of Directional Wave Spectrum Using a Wave-Probe Array. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 3, p. 123-129, 2007.

TANNURI, E.A., Navio CNG - Sistema de Posicionamento Dinâmico e Amarração – 2º Ciclo, **Relatório Técnico EPUSP/Transpetro RT-TPN-401-11-071**, São Paulo, 2008a. (Acesso restrito)

TANNURI, E.A. Estudo de capacidade e condições operacionais limites da barcaça equipada com Sistema DP, **Relatório Técnico EPUSP/Petrobrás**, São Paulo, 2008b. (Acesso restrito)

TANNURI, E.A.; PESCE, C.P.; SIMOS, A.N.; FUCATU, C.H.; FERREIRA, P.P.R.; HOWARD, N. Dynamic Analysis of a DP-FPSO: Offloading with DP and non-DP Shuttle Tankers in the Gulf of Mexico. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 4, p. 15-27, 2008a.

TANNURI, E.A.; OSHIRO, A.T.; AZEVEDO JR., P.C. Dynamic Positioning Systems: Comparison between Static and Dynamic Analysis. **Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore (SOBENA 2008)**, Rio de Janeiro, Brasil, 2008b.

TANNURI, E.A.; CAMPOS, T.S.; VILACA, R.M.; SAAD, A.C.; MORISHITA, H.M. Arquitetura Computacional para Ensaios em Tanque de Provas de Sistemas DP. In: **22º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore (SOBENA 2008)**, Rio de Janeiro, Brasil, 2008c.

TANNURI, E.A., Dimensionamento do Sistema DP para FPSO - Suezmax, **Relatório Técnico EPUSP/Petrobras**, São Paulo, 2009a. (Acesso restrito)

TANNURI, E.A., Ensaios para Aquisição de Coeficientes Hidrodinâmicos e Aerodinâmicos para Rebocadores Oceânicos de Operação Offshore, **Relatório Técnico EPUSP/Petrobras RT-2**, São Paulo, 2009b. (Acesso restrito)

TANNURI, E.A., Navio CNG - Sistema de Posicionamento Dinâmico e Amarração – 3º Ciclo, **Relatório Técnico EPUSP/Transpetro RT-TPN-402-11-11**, São Paulo, 2009c. (Acesso restrito)

TANNURI, E.A.; OSHIRO, A.T. Simulação e Análise para Dimensionamento de Comboios na Hidrovia Tietê-Paraná. **Relatório Técnico EPUSP/IPT/DH**, São Paulo, 2009. (Acesso restrito)

TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N. **Avaliação de downtime – alívio Bacia de Santos - Preliminar**, Relatório Técnico EPUSP/Petrobrás São Paulo, São Paulo, 2009. (Acesso restrito)

TANNURI, E.A.; SAAD, A.C.; MORISHITA, H.M. Offloading Operation with a DP Shuttle Tanker: Comparison Between Full Scale Measurenments and Numerical Simulation Results. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009a. (aprovado para publicação)

TANNURI, E.A.; SILVA, J.L.B.; OSHIRO, A.T.; AZEVEDO JR., P.C. Design and Analysis of Dynamic Positioning Systems: Comparison Between Static and Dynamic Approaches. **In: 10th International Marine Design Conference (IMDC 2009)**, Trondheim. Noruega, 2009b.

TANNURI, E.A.; SILVA, J.L.B.; OSHIRO, A.T.; SAAD, A. C. DP Pipe-Laying and Crane Barge: Procedure for Defining Operational Window and Capability Plots Using Dynamic Simulations. In: **28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009)**, Honolulu, Estados Unidos, 2009c.

TANNURI, E.A.; TORRES, F.G.S.; IGREJA, H.; MASETTI,I.Q. FPSO and monobuoy offloading operation with a conventional shuttle tanker: dimensioning of tugboat based on numerical simulation. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009d. (aprovado para publicação)

TANNURI, E.A.; FUCATU, C.H.; ILLUMINATTI, C.; ROSSIN, B. Problemas de dinâmica não-linear em sistemas oceânicos – Relatório 3, **Relatório Técnico EPUSP/Petrobrás**, São Paulo, 2009e. (Acesso restrito)

UTKIN, V.I. **Sliding Modes and their application to variable structure systems**. MIR Publishers, Moscow, 1978

YOERGER, D.R.; NEWMAN, J.B.; SLOTINE, J.J.E. Supervisory Control System for the JASON ROV. **IEEE Journal on Oceanic Engineering**, Vol. OE-11, No. 3, pp392-400, 1986.

ZAKARTCHOUK JR. A.; MORISHITA H.M., Backstepping Controller for Dynamic Positioning of Ships: Simulation and Experimental Results for a Shuttle Tanker Model. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvering and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009 (aprovado para publicação).

10 Anexos de 1 a 25

Anexo 1

TANNURI, E.A.; BRAVIN, T.T.; PESCE, C.P. Dynamic Positioning Systems: Comparison Between Wave Filtering Algorithms and Their Influence on Performance. In: **22th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2003)**, Cancun, Mexico, 2003a.

Anexo 2

TANNURI, E.A.; MORISHITA, H.M.; VERAS, V.L.M.; LAGO, G.A. Critical analysis of control and filtering algorithms used in real dynamic positioning systems. **In: Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2005)**, Haikidiki, Grécia, 2005.

Anexo 3

TANNURI, E.A.; DONHA, D.C. Hinfinity controller design for dynamic positioning of a turret moored FPSO. In: **Proceedings of 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2006)**, Aalborg, Dinamarca, 2000.

Anexo 4

TANNURI, E.A.; KUBOTA, L.K.; PESCE, C.P. Adaptive Control Strategy for the Dynamic Positioning of a Shuttle Tanker during Offloading Operations. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 128, p. 203-210, 2006b.

Anexo 5

TANNURI, E.A.; DONHA, D.C.; PESCE, C.P. Dynamic positioning of a turret moored FPSO using sliding mode control. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, v. 11, n. 3, p. 1239-1256, 2001a.

Anexo 6

AGOSTINHO, A.C. ; MORATELLI JR., L. ; TANNURI, E. A. ; MORISHITA, H.M. sliding mode control applied to offshore dynamic positioning systems, In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação)

Anexo 7

TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N.; SPARANO, J.V.; CRUZ, J.J. Estimating Directional Wave Spectrum Based On Stationary Ship Motion Measurements. **Applied Ocean Research**, v. 25, p. 243-261, 2003c.

Anexo 8

SIMOS, A.N.; SPARANO, J.V.; TANNURI, E.A.; MATOS, V.L.F. Directional Wave Spectrum Estimation Based on a Vessel 1st Order Motions: Field Results. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, Vol. 19, No. 2, Junho, 2009a.

Anexo 9

SPARANO, J.V. ; TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N.; MATOS, V.L.F. On the Estimation of Directional Wave Spectrum Based on Stationary Vessels 1st Order Motions: A New Set of Experimental Results. In: **27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008)**, Estoril, Portugal, 2008.

Anexo 10

SIMOS, A.N.; TANNURI, E.A.; SPARANO, J.V.; MATOS, V.L.F. Estimating wave spectrum from moored vessels motions: experimental validation. **Applied Ocean Research**, 2009b (submetido).

Anexo 11

TANNURI, E.A.; BRAVIN, T.T.; PESCE, C.P. Development of a Dynamic Positioning System Simulator for Offshore Operations. In**: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 2003)**, São Paulo, Brasil, 2003d.

Anexo 12

TANNURI, E.A.; MORISHITA, H.M. Experimental and Numerical Evaluation of a Typical Dynamic Positioning System**. Applied Ocean Research**, v. 28, p. 133-146, 2006.

Anexo 13

TANNURI, E.A.; SAAD, A.C.; MORISHITA, H.M. Offloading Operation with a DP Shuttle Tanker: Comparison Between Full Scale Measurenments and Numerical Simulation Results. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009a. (aprovado para publicação).

Anexo 14

TANNURI, E.A.; PESCE, C.P.; SIMOS, A.N.; FUCATU, C.H.; FERREIRA, P.P.R.; HOWARD, N. Dynamic Analysis of a DP-FPSO: Offloading with DP and non-DP Shuttle Tankers in the Gulf of Mexico. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 4, p. 15-27, 2008a.

Anexo 15

TANNURI, E.A.; SILVA, J.L.B.; OSHIRO, A.T.; SAAD, A.C. DP Pipe-Laying and Crane Barge: Procedure for Defining Operational Window and Capability Plots Using Dynamic Simulations. In: **28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009)**, Honolulu, Estados Unidos, 2009c.

Anexo 16

SOUZA JR., J.A.R.; TANNURI, E.A.; OSHIRO, A.T. Development and Application of a Ship Manoeuvring Digital Simulator for Restricted Waters. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação)

Anexo 17

QUEIROZ FILHO, A.N..; TANNURI, E.A. DP Offloading Operation: a Numerical Evaluation of Wave Shielding Effect. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação).

Anexo 18

ILLUMINATI, C.; TANNURI, E. A.; MATOS, V. L. F.; SIMOS, A.N. Current Wake Effects on DP System of a Shuttle Tanker. In: **28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009)**, Honolulu, Estados Unidos, 2009.

Anexo 19

MORISHITA, H.M.; TANNURI, E.A.; SAAD, A.C.; SPHAIER, S.H.; LAGO, G.A.; MORATELLI JR, L.M. Laboratory Facilities for Dynamic Positioning System. In: **Proceedings of 8th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts (MCMC2009)**, Guarujá, Brasil, 2009. (aprovado para publicação)

Anexo 20

TANNURI, E.A.; DE MELLO, P.C.; SALES Jr., J.S.; SIMOS, A.N.; MATOS, V.L.F. Estimation of Directional Wave Spectrum Using a Wave-Probe Array. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 3, p. 123-129, 2007.

Anexo 21

TANASOVICI, G.; FUCATU, C.H.; TANNURI, E.A.; UMEDA, C.H. Design And Construction of a Planar Motion Mechanism. In: **Rio Oil & Gas Conference**, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

Anexo 22

CARNEIRO, M.L.; MELLO, P. C.; TANNURI, E.A.; SIMOS, A.N. Experimental Validation of an Absorbing Wavemaker Controller. In: **28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009)**, Honolulu, Estados Unidos, 2009.

Anexo 23

TANNURI, E.A.; PESCE, C.P.; DONHA, D.C. Assisted dynamic positioning system for a FPSO based on minimization of a cost function**. In: Control Applications in Marine Systems (CAMS 2001),** Glasgow, Escócia, 2001c.

Anexo 24

BRAVIN, T.T.; TANNURI, E.A. Dynamic Positioning Systems Applied to Offloading Operations. **International Journal of Maritime Engineering,** Inglaterra, v. 146, n. A2, p. 1, 2004.

Anexo 25

TANNURI, E.A.; SILVA, J.L.B.; OSHIRO, A.T.; AZEVEDO JR., P.C. Design and Analysis of Dynamic Positioning Systems: Comparison Between Static and Dynamic Approaches. **In: 10th International Marine Design Conference (IMDC 2009)**, Trondheim, Noruega, 2009b.