

HUGO TAKIMOTO

TÁCIO F. V. DE MEDEIROS

**PROGRAMA PARA ESTIMATIVA DE VIABILIDADE DE
OPERAÇÃO DE ALÍVIO POR PETROLEIRO DOTADO DE
SISTEMA DE POSICIONAMENTO DINÂMICO**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri

São Paulo

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Takimoto, Hugo

Programa para estimativa de viabilidade de operação de alívio por petróleo dotado de sistema de posicionamento dinâmico / H. Takimoto, T.F.V. Medeiros -- São Paulo, 2009.

59 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Sistema de posicionamento dinâmico (Simulação) 2.Estabilidade das embarcações 3.Operações de transportes (Viabilidade, Otimização) 4.Petróleo 5.Estática (Modelo) I.Medeiros, Tácio Filipe Vasconcelos II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri, que durante todo o ano de 2009, nos dedicou sua atenção de forma admirável para nos orientar no presente Trabalho de Formatura. Agradecemos-lo por todos seus ensinamentos fundamentados em sua rica experiência em engenharia oceânica. Enfim, somos gratos a todas suas brilhantes sugestões nos momentos difíceis de nosso trabalho.

A todos os professores que nos lecionaram durante a faculdade, em particular aos professores do Departamento de Mecatrônica e Sistemas Mecânicos (PMR) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pois nos deram ao longo dos anos de formação uma sólida base de engenharia para entendermos novos conceitos de natureza diversa e desenvolvermos uma metodologia de trabalho.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como instituição, que nos proporcionou a oportunidade de desenvolver nossa capacidade intelectual e humana e guiou nossa evolução de alunos para profissionais aptos a enfrentar o mercado de trabalho.

Aos nossos amigos e amigas de faculdade que nos serviram de motivação mútua para sempre seguir em frente por mais insólitas que fossem as circunstâncias.

Aos nossos pais, que sempre foram nossa fonte de inspiração e modelo de conduta ética. Graças a seu carinho, apoio e conselhos, ganhamos forças para nos dedicar aos estudos, acreditando ser esse o melhor caminho para o sucesso pessoal e profissional.

Resumo

A exploração de petróleo em águas profundas (além de 500m) depende de métodos viáveis, eficientes e seguros no escoamento do petróleo para a costa. Atualmente, a operação de alívio das plataformas petroleiras brasileiras é realizada por navios petroleiros dotados de um Sistema de Posicionamento Dinâmico (Sistema DP) que permite a sua estabilização frente a condições ambientais adversas (ventos, ondas, correntes) enquanto o petróleo é passado ao navio por mangotes. Para estudar a operação, a Petrobras dispõe de um programa que simula o posicionamento dinâmico do navio em relação à plataforma. Porém, a análise dinâmica requer uma complexidade no cálculo que a torna lenta do ponto de vista computacional.

O objetivo desse trabalho é criar um programa que leve em conta uma análise estática das cargas ambientais e das forças de propulsão do navio. Tal análise seria uma simplificação daquela já existente, mas exigiria menor tempo de processamento para a simulação. Além do desenvolvimento da arquitetura computacional (banco de dados, algoritmos e interface), o trabalho requer um cálculo das forças ambientais estáticas de forma a definir a área segura de posicionamento do navio de alívio e as forças dos propulsores necessárias para obter otimizadamente o equilíbrio de forças. Assim, o programa deverá permitir o estudo estatístico da capacidade de estabilização do navio frente a diferentes condições ambientais que variam ao longo do ano. Por último, deve-se estimar a sensibilidade da resposta da embarcação em função das forças não constantes (rajada de vento, deriva lenta).

Abstract

The crude oil exploitation in deepwater (more than 500m) depends on viable, efficient and safe methods to drain the oil to the coast. Nowadays, the offloading of Brazilian FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading) offshore facilities is performed by shuttle tankers with a Dynamic Positioning System (DP system) for its stabilization against harsh environmental conditions (wind, waves, currents) while the oil is loaded through hoses. To study the operation, Petrobras uses a software that simulates the dynamic positioning of the vessel and the platform. However, dynamic analysis requires complex calculations, making it slow in computing terms.

The aim of this work is creating a software that takes into account a static analysis of environmental loads and vessel's propelling forces. Such analysis would be simpler than the current one, but it would entail less processing time for the simulation. Besides the development of computer architecture (database, algorithms and interface), the work requires a calculation of environmental forces in order to define the secure area for the tanker positioning and the forces needed in the thrusters to optimize the balance of forces. Thus, the program will allow the statistical study of the tanker's capacity of stabilization according to different environmental conditions varying throughout the year. Finally, the software must estimate the sensitivity of the vessel's response according to the non-constant forces (wind gust, slow drift).

Sumário

Lista de Figuras	VIII
Lista de Tabelas	X
Lista de Gráficos	X
Lista de Abreviaturas	XI
Lista de Símbolos	XII
Glossário.....	XVI
 1 Introdução.....	 1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Justificativa	4
 2 Revisão Bibliográfica	 6
2.1 Operação de alívio.....	6
2.2 Sistema de Posicionamento Dinâmico	10
2.3 Simuladores comerciais.....	13
 3 Modelos Matemáticos	 15
3.1 Convenções.....	15
3.1.1 Sistema de coordenadas	15
3.1.2 Movimentos do navio aliviador	17
3.2 Agentes ambientais	18
3.2.1 Correnteza.....	18
3.2.2 Vento	19
3.2.3 Onda	20
3.3 Alocação de empuxo	25
3.3.1 Formulação do problema de otimização.....	25
3.3.2 Solução do problema	28
3.4 Estimativa do impacto das forças externas não constantes	31
3.4.1 Metodologia desenvolvida.....	32
3.4.2 Verificação da metodologia desenvolvida.....	36
3.5 Cálculo de <i>downtime</i>	39
3.5.1 Condições extremas.....	39
3.5.2 Falha na alocação de empuxo	39
3.5.3 Curso em torno do <i>set-point</i> muito grande	40
 4 Implementação.....	 41
4.1 Funcionamento dos módulos	41
4.1.1 Manipulação de dados	41
4.1.2 Cálculo de forças ambientais	41
4.1.3 Alocação de empuxo	41
4.1.4 Análise de sensibilidade	42
4.1.5 Estimativa de downtime	42

4.2 Escolha da plataforma de desenvolvimento	42
4.3 Detalhes da implementação	43
4.3.1 Interface do usuário gráfica	43
4.3.2 Sistema.....	49
4.3.3 Banco de dados	50
5 Resultado.....	52
5.1 Teste de análise completa.....	52
5.2 Análise de navio traçando área segura de operação.....	54
6 Conclusões.....	55
7 Proposta de Pesquisas Futuras	56
8 Referências Bibliográficas	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema de uma operação de alívio	2
Figura 1-2 Operação de alívio na Bacia de Campos, Brasil.....	2
Figura 1-3 Simulação no software DYNASIM	3
Figura 2-1 Zonas de segurança para operação de alívio em FPSO do tipo Turret (Correia et al 2004)	9
Figura 2-2 Elementos de um Sistema DP.....	10
Figura 2-3 (a) Propulsor azimuthal (b) Propulsor em túnel	11
Figura 3-1 Direção do navio aliviador em relação ao referencial fixo OXYZ.....	15
Figura 3-2 Direção de agentes ambientais	16
Figura 3-3 Ângulos de incidência em relação ao casco	16
Figura 3-4 Representação dos graus de liberdade do movimento de um navio	17
Figura 3-5 Coeficientes adimensionais de correnteza para um navio da classe Suezmax	19
Figura 3-6 Coeficientes adimensionais de vento para um VLCC (OCIMF, 1977).....	20
Figura 3-7 Coeficiente de deriva em <i>sway</i> incidência de través (extraída de Tannuri, 2002).....	22
Figura 3-8 Forças de deriva média para VLCC 100% carregado ($T_p=11,4s$ e $H_s=5,5m$) (extraída de Tannuri, 2002)	23
Figura 3-9 Realizações temporais das forças de deriva lenta para VLCC 100% carregado ($T_p=11,4s$ e $H_s=5,5m$).....	24
Figura 3-10 Diagrama de blocos do controle PID aplicado em sistemas DPs	31
Figura 3-11 Diagrama de blocos simplificado para cada movimento (<i>surge</i> , <i>sway</i> e <i>yaw</i>)	33
Figura 4-1 Tela inicial.....	44
Figura 4-2 Tela Modelos	45

Figura 4-3 Tela Navio	47
Figura 4-4 Tela Caso.....	48
Figura 4-5 Tela Análise Completa.....	49
Figura 4-6 Diagrama Entidade Relação do Banco de Dados	50
Figura 4-7 Diagrama de Classes – Sistema.....	51
Figura 4-8 Diagrama de Classes - Navio e Cond. Ambiental	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Tipo de navios aliviadores.....	7
Tabela 3-1 Movimentos de navios em alto mar	17
Tabela 5-1 Dimensões do navio aliviador no teste.....	52
Tabela 5-2 Características dos propulsores no teste	52
Tabela 5-3 Downtime para diferentes direções de aproamento	53
Tabela 5-4 Condição ambiental para teste de análise de navio	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1 Resultados de desvio padrão dos movimentos em m ($T_p=7s$; $H_s=1m$)	37
Gráfico 3-2 Resultados de desvio padrão dos movimentos em m ($T_p=10s$; $H_s=1m$) ...	37
Gráfico 3-3 Resultados de desvio padrão dos movimentos em m ($T_p=5s$; $H_s=1m$)	38
Gráfico 5-1 Downtime em diferentes direções de aproamento	53
Gráfico 5-2 Área segura de operação.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS

CSP	<i>Constraints Satisfaction Problem</i>
DP	<i>Dynamic Positioning</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LQ	Linear Quadrático
MMI	<i>Man-machine Interface</i>
OCIMF	<i>Oil Companies International Maritime Forum</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
RAO	<i>Response Amplitude Operator</i>
SMS	<i>Spread Mooring System</i>
SPM	<i>Single-Point Mooring</i>
SPD	Sistema de Posicionamento Dinâmico
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i>
TAL	<i>Thruster Allocation Logic</i>
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
UEP	<i>Unidade de Exploração e Produção</i>
USP	Universidade de São Paulo
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VLCC	<i>Very Large Crude Carrier</i>
VRU	<i>Vertical Reference Unit</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Romano

$\underline{\underline{A}}$	Matriz de alocação de empuxo relativa à seção mestra
$A_{frontal}$	Área projetada frontal da parte emersa
$A_{lateral}$	Área projetada lateral da parte emersa
α_r	Ângulo de incidência da correnteza no casco do navio aliviador
C	Celeridade da onda
$C_{1C}(\cdot), C_{2C}(\cdot), C_{6C}(\cdot)$	Coefficientes estáticos de correnteza
$C_{1V}(\cdot), C_{2V}(\cdot), C_{6V}(\cdot)$	Coefficientes adimensionais de esforços de vento
$D_j(\omega, \cdot)$	Coefficiente de deriva ($j = 1, 2, 6$)
$f(\mathbf{T})$	Função que define o vínculo de igualdade utilizado no problema de alocação de empuxo
\underline{F}	Vetor de força resultante da atuação dos agentes ambientais
F_1, F_2, F_6	Forças de <i>surge</i> e <i>sway</i> e momento de <i>yaw</i> externos (sistema de forças aplicado no ponto <i>o</i>)
F_{1C}, F_{2C}, F_{6C}	Forças e momento devidos à correnteza
$F_{1DL}, F_{2DL}, F_{6DL}$	Forças e momento de deriva lenta
$F_{1DM}, F_{2DM}, F_{6DM}$	Forças e momento de deriva média
F_{1V}, F_{2V}, F_{6V}	Forças e momento devidos ao vento
G	Aceleração da gravidade
$\underline{\underline{H}}$	Matriz Hessiana de $L(\cdot)$
H_1, H_2, H_6	Função transferência para os movimentos de <i>surge</i> , <i>sway</i> e <i>yaw</i>
H_s	Altura significativa da onda;
K_{p1}, K_{p2}, K_{p6}	Coefficientes proporcionais do controlador PID

K_{D1}, K_{D2}, K_{D6}	Coeficientes derivativos do controlador PID
L	Comprimento da embarcação
$L(\cdot)$	Funcional que representa o consumo total de energia pelos propulsores
M	Massa da embarcação
M_1, M_2, M_6	Elementos da matriz de massa do navio
O	Ponto intersecção entre a linha de centro e a secção mestra
$OXYZ$	Referencial inercial fixo na Terra
P	Número de propulsores azimutais
Q	Número de propulsores fixos
$S(\omega)$	Densidade espectral de amplitude de onda
$S_{jDL}(\omega)$	Densidade espectral das forças e momento de deriva lenta ($j = 1, 2, 6$)
T	Tempo
T	Calado da embarcação
\underline{T}	Vetor com empuxos em cada propulsor
\underline{T}^*	Vetor solução ótimo para a alocação empuxo
T_{a1}, T_{a2}, T_{a6}	Coeficiente de atraso dos propulsores
T_A	Força a ser alocada em um propulsor azimutal
T_{AX}, T_{AY}	Componentes vetoriais da força de comando T_A
T_F	Força a ser alocada em um propulsor fixo (tipo túnel ou principal)
T_P	Período de pico do espectro de onda
V	Velocidade do vento
V_C	Velocidade da correnteza

XIV

X_1, X_2, X_6	Movimentos de <i>surge</i> , <i>sway</i> e <i>yaw</i> relativos ao <i>set-point</i>
X_A, Y_A	Posição de um propulsor azimuthal no referencial do navio aliviador
X_F, Y_F	Posição de um propulsor fixo no referencial do navio aliviador
X_G	Passeio do navio em relação ao <i>set-point</i>
X_{Proa}	Movimento da proa do navio

Alfabeto Grego

α_A	Direção de um propulsor azimuthal em relação ao casco do navio aliviador
α_F	Direção de um propulsor fixo em relação ao casco do navio aliviador
α_O	Fator multiplicativo dos espectros de potência de onda
α_{OXYZ}	Direção de incidência da correnteza em relação à OX
α_r	Direção de incidência da correnteza em relação ao casco do navio aliviador
$\beta_{O,XYZ}$	Direção de incidência de onda em relação à OX
β_{Or}	Direção de incidência de onda em relação ao casco do navio aliviador
$\beta_{V,XYZ}$	Direção de incidência do vento em relação à OX
β_{Vr}	Direção de incidência do vento em relação ao casco do navio aliviador
$\Delta\omega$	Diferença entre duas frequências consecutivas na definição do espectro
$\Phi(\underline{T})$	Função objetivo para o problema de alocação de empuxo

γ	Fator de forma do espectro de JONSWAP
$\underline{\lambda}$	Vetor com multiplicadores de Lagrange utilizados na solução do problema de alocação de empuxo
μ	Diferença entre frequências, utilizada no cálculo dos esforços de deriva lenta
ρ	Densidade da água
ρ_a	Densidade do ar
$\sigma (.)$	Desvio padrão
$\sigma^2 (.)$	Variância
σ_J	Fator do espectro de JONSWAP
ω	Frequência
ω_0	Frequência de pico do espectro de onda
ψ	Angulo absoluto do navio aliviador em relação ao sistema fixo OXYZ

Simbologia Especial

T	(Sobrescrito) Transposição
$+$	(Sobrescrito) Pseudo Inversa
max, min	(Subscritos) Valores máximos e mínimos

GLOSSÁRIO

<i>Downtime</i>	A porcentagem de tempo durante um ano em que a operação de alívio fica inviável para um determinado navio e uma determinada bacia
DYNASIM	Software desenvolvido pelo laboratório Tanque de Provas Numérico (TPN) para a Petrobras que simula o comportamento dinâmico do Sistema DP em plataformas e navios em <i>offshore</i>
Movimento de <i>surge</i>	Translação longitudinal (avanço); movimento indicado pelo índice 1
Movimento de <i>sway</i>	Translação lateral (deriva) ; movimento indicado pelo índice 2
Movimento de <i>heave</i>	Translação vertical (arfagem) ; movimento indicado pelo índice 3
Movimento de <i>pitch</i>	Rotação (no plano vertical) em torno do eixo transversal (caturro); movimento indicado pelo índice 4
Movimento de <i>roll</i>	Rotação (no plano vertical) em torno do eixo longitudinal (balanço ou jogo); movimento indicado pelo índice 5
Movimento de <i>yaw</i>	Rotação no plano horizontal (guinada); movimento indicado pelo índice 6

1 Introdução

1.1 Contextualização

O petróleo é atualmente a matéria-prima energética e industrial mais importante do planeta. Contudo, é uma riqueza distribuída de forma desigual entre os países e um recurso não-renovável. Por esta razão, a posse de reservas, o seu acesso e a sua exploração tornaram-se questões geopolíticas de suma importância para as nações desde o final do século XX. Com a relativa saturação da exploração em reservas continentais (*in land*) e o aumento do preço da *commodity*, a busca de novas fontes de petróleo, como as reservas em *offshore*, tem se tornado uma necessidade cada vez mais prioritária.

No Brasil, a maior parte das reservas petrolíferas encontra-se em ambiente marinho. O conhecimento deste fato e a vulnerabilidade do país aos primeiros choques petrolíferos levaram o governo brasileiro a se focar no desenvolvimento tecnológico para a exploração em *offshore*, desde o final dos anos 60. O resultado de quase 40 anos de esforços é constatado na liderança mundial da estatal Petrobras S.A na exploração em águas profundas (além de 500m). Além disso, o Brasil tornou-se o 13º maior produtor de petróleo no mundo segundo a *Energy Information Administration* (2007).

Um dos fatores principais que dificultam a exploração do petróleo em *offshore* é o seu escoamento para a costa, processo altamente custoso. A profundidade dos campos e as grandes distâncias em relação aos terminais *onshore* são obstáculos a serem superados. Existem, atualmente, duas soluções principais: a primeira é a construção de dutos que garantem o escoamento contínuo do líquido à costa; a segunda é o emprego de navios aliviadores que retiram grandes volumes das plataformas petrolíferas para transportá-los à costa em seguida.

A Petrobras tem utilizado as duas opções para o escoamento. No entanto, o emprego de navios aliviadores é altamente recomendado para áreas profundas e remotas, onde a implantação de dutos é complexa e cara. Por isso, mais de 80% do óleo produzido na Bacia de Campos – a principal região produtora no país - são transportados por meio da operação de alívio. A Figura 1-1 e a Figura 1-2 ilustram essa operação.

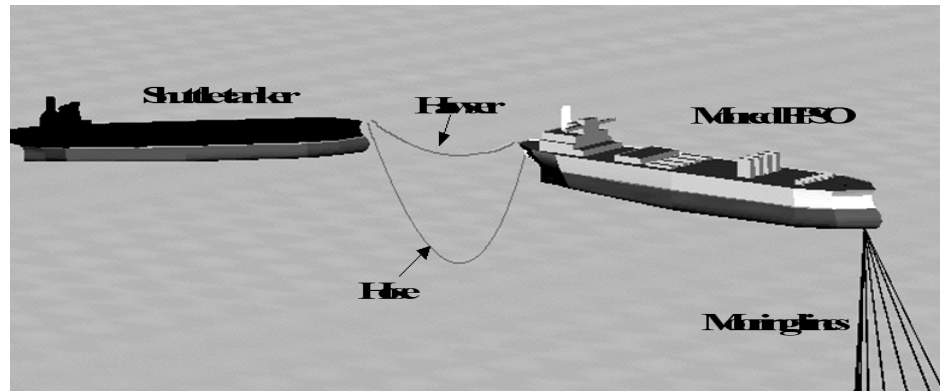


Figura 1-1 Esquema de uma operação de alívio

Evidentemente, o escoamento do óleo bruto para a costa deve ser feito de forma regular e segura. Caso contrário, ele poderia colocar em risco a cadeia de distribuição do ramo petroquímico e, no pior dos casos, poderia provocar um grande desastre ambiental. Todavia, o meio marítimo apresenta condições ambientais hostis que dificultam a operação de alívio. Assim, com o



Figura 1-2 Operação de alívio na Bacia de Campos, Brasil

objetivo de aumentar os níveis de segurança e melhorar o desempenho operacional, os navios utilizados pela Petrobras devem ser dotados de um Sistema de Posicionamento Dinâmico (“Sistema DP”). Trata-se de um dispositivo de controle do posicionamento que é corrigido através de propulsores instalados no casco do navio. Assim, o Sistema DP aumenta consideravelmente a manobrabilidade dos navios, permitindo que estes sejam estabilizados e compensem as forças externas originadas por agentes ambientais (correnteza, onda e vento). Uma vez que o aliviador encontra-se em condições estáveis e seguras, o óleo da plataforma pode ser escoado através de mangueiras instaladas na proa durante aproximadamente 30 horas.

O grau de segurança da operação está diretamente ligado à capacidade dos propulsores responderem aos distúrbios causados pelos agentes ambientais. Em condições muito adversas, eles podem não ser suficientemente potentes para permitir o posicionamento. Além disso, a força dos agentes ambientais depende do ângulo de incidência destes com o casco do navio. Conseqüentemente, o nível de segurança aumenta conforme o posicionamento do navio (direção do eixo popa-proa) em relação ao campo dos agentes externos. Portanto, antes da execução do alívio, é fundamental a realização de um estudo preliminar que simule a resposta do Sistema DP em relação aos agentes ambientais (estimados pela meteorologia), definindo a viabilidade da operação e os riscos envolvidos.

Para estudar a operação, a Petrobras dispõe de um software que simula o posicionamento dinâmico do navio em relação à plataforma, denominado DYNASIM – Tannuri; Morishita (2006). Porém, a análise dinâmica requer cálculos diferenciais complexos que tornam a execução do programa lenta do ponto de vista computacional.

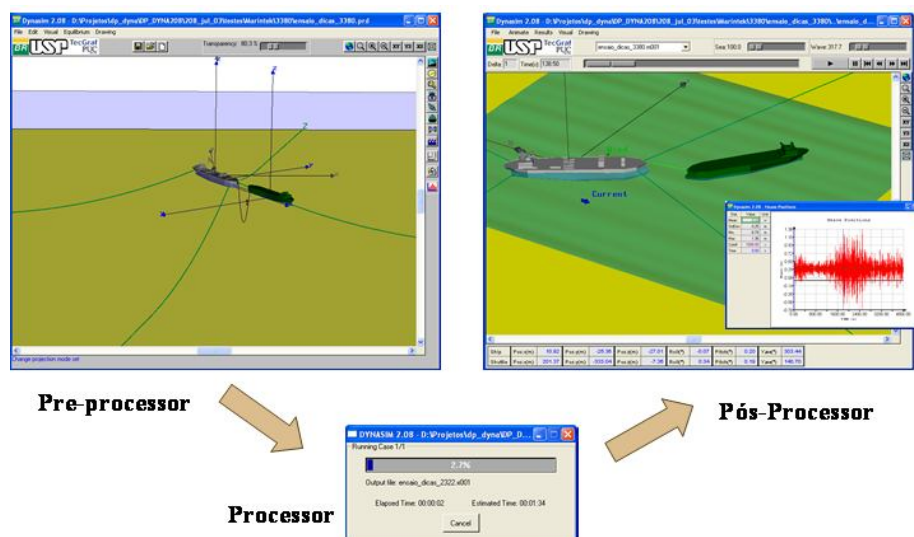


Figura 1-3 Simulação no software DYNASIM

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a criação de um programa prático e de baixo custo computacional que auxilie os operadores a avaliarem a viabilidade e os riscos da operação de alívio em determinadas circunstâncias ambientais.

Diferentemente do software atualmente utilizado pela Petrobras, a análise dos esforços resultantes das cargas ambientais deve ser feita do ponto de vista estático, isto

é, desprezaremos os termos temporais nos cálculos, além das oscilações existentes na posição do navio aliviador. Tal análise será assim uma simplificação daquela já existente, mas exigirá menor tempo de processamento para a simulação.

A partir dos dados físicos e geométricos da embarcação a ser analisada e dos dados ambientais fornecidos pelo usuário, o programa deve calcular os esforços externos sofridos pelo navio posicionado em diversas direções. Em seguida, serão calculadas as forças que cada propulsor geraria de forma otimizada para garantir o equilíbrio estático. A potência máxima de cada propulsor deve ser informada também, o que permitirá definir no espaço a área segura de posicionamento do navio.

O software também deve ser capaz de permitir o estudo estatístico da capacidade de estabilização do navio ao longo do ano, em dada região, graças a registros anuais das condições ambientais.

Por último, o software deve estimar a sensibilidade da resposta da embarcação em função das forças não constantes (rajada de vento, deriva lenta). Para tanto, será desenvolvido um modelo dinâmico simplificado dos três graus de liberdade horizontais da embarcação em torno do estado de equilíbrio previamente calculado, levando-se em consideração a malha de controle do Sistema DP. Este sistema dinâmico será excitado pelas forças não constantes e será feita uma análise no domínio da frequência para estimar os movimentos máximos da embarcação.

1.3 Justificativa

Como visto na seção 1.1, as operações de alívio realizadas por petroleiros dotados de Sistema DP têm ganhado importância na indústria petrolífera nacional. No entanto, a grande variação das condições ambientais ao longo do ano restringe a execução de operações de forma regular, eficaz e segura. Nesse contexto, a utilização de um software para analisar o comportamento do navio perante as condições ambientais é uma providência fundamental para servir como uma ferramenta de auxílio à decisão durante o momento de aproamento e conexão do navio aliviador.

Vale ressaltar também que o programa possibilitará a análise de um conjunto representativo de condições ambientais, fornecendo informações tais como o tempo

médio de operação ao longo de um ano (chamado de *uptime*). Este valor é de grande importância na fase de projeto e análise de navios aliviadores.

Os métodos utilizados atualmente para a avaliação baseiam-se em cálculos diferenciais que tornam o programa lento e, portanto, menos eficaz. Por exemplo, uma análise dinâmica de 26000 condições ambientais (que representam estatisticamente aproximadamente 7 anos), leva aproximadamente 160 horas em quatro processadores de 2.4GHz. Uma análise estática semelhante tende a levar no mínimo 100 vezes menos. Esta estimativa é baseada em simulações apresentadas em Tannuri et al (2008).

Logo, a idéia de se criar um programa prático e de baixo custo computacional, mas que forneça os elementos chaves para tomadas de decisão, revela-se uma solução pertinente.

2 Revisão Bibliográfica

No nosso Trabalho de Formatura, serão abordados certos conceitos fundamentais para o trabalho baseando-se em fontes bibliográficas.

Os conceitos que serão apresentados detalhadamente são:

- 1) **Operação de alívio:** serão detalhadas as especificações técnicas estabelecidas pela Petrobras para a execução da operação. Para isso utilizaremos fontes como Correia et al (2004) e Silva (2005).
- 2) **Sistema de Posicionamento Dinâmico:** comentaremos a estrutura de malha do Sistema DP utilizado no alívio. Faremos referência especialmente à Kongsberg (1999), Tannuri (2002) e Tannuri et al. (2001).
- 3) **Simuladores comerciais:** serão apresentados brevemente simuladores de operações oceânicas existentes, com base em dados pesquisados por Queiroz Filho (2009). Além disso, será apresentado em maiores detalhes o programa DYNASIM.

2.1 Operação de alívio

Como abordado anteriormente na seção 1.1, embora o escoamento do óleo para a costa seja de suma importância para a exploração do petróleo *offshore*, trata-se de um processo altamente custoso.

Atualmente, a Petrobras emprega dois sistemas de escoamento de petróleo das plataformas até as refinarias. No primeiro, utiliza-se uma malha de dutos submarinos, com as linhas posicionadas de modo a atender várias plataformas existentes na região, até o litoral. O segundo sistema baseia-se no uso de “navios aliviadores”, também conhecidos como *shuttles* ou *shuttle tankers*. Estes se encontram em circulação, recolhendo óleo nas plataformas e descarregando nos terminais localizados na costa, voltando em seguida às plataformas para outro carregamento.

Os dois sistemas têm suas vantagens e desvantagens, e não são necessariamente excludentes. Porém, no caso de operações em campos de alta profundidade e muito distantes dos terminais *onshore*, recomenda-se o uso de navios aliviadores, solução de implantação inicial menos custosa e mais flexível nesses casos. Como ultimamente a

tendência da Petrobras tem sido a exploração de petróleo em poços mais profundos e distantes através de plataformas FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), observa-se atualmente a adoção dessa alternativa na maioria dos casos: cerca de 80% das plataformas *offshore*.

Os navios aliviadores têm características semelhantes a um petroleiro, porém são concebidas algumas particularidades para garantir segurança no alívio da carga do FPSO. Há basicamente três tipos de embarcações quanto ao porte ou capacidade de seus tanques de carga, conforme mostrado na Tabela 2-1:

Tabela 2-1 - Tipo de navios aliviadores

Tipos / Portes de Navios Aliviadores	<i>Deadweight</i>	Carga - toneladas
Panamax	(50.000 – 80.000)	48.500 – 77.600
Aframax	(80.000 – 120.000)	77.600 – 116.400
Suezmax	(120.000 – 200.000)	116.400 - 194.000

Os nomes atribuídos aos portes das embarcações têm uma relação com as dimensões que possibilitam a passagem pelo Canal do Panamá (PANAMAX) e pelo Canal de Suez (SUEZMAX), sendo o AFRAMAX decorrente da abreviatura de *American Freight Rate Association*.

No aspecto segurança e eficiência operacional, há basicamente dois tipos de navios aliviadores: os modernos navios DP, que possuem o sistema de posicionamento dinâmico – DP -*Dynamic Positioning*, e os navios que não dispõem dessa tecnologia, denominados “navios convencionais”. O Sistema DP traz mais segurança e rapidez na manobra de aproximação e amarração, além de reduzir custos nos serviços de apoio, estes freqüentes nas operações com navios convencionais. Dado o risco elevado inerente à operação de *offloading* junto às plataformas em alto mar, a Petrobras exige que todos os navios aliviadores em atividade sejam do tipo DP.

A operação de escoamento pode ser sumarizada de acordo com as seguintes etapas operacionais:

1. Com base numa programação, em função do volume de petróleo produzido por cada UEP – Unidade de Exploração e Produção -, cujas produções são escoadas por navios aliviadores, uma frota de navios é dimensionada e

contratada para atender a operação de escoamento. No caso da Petrobras os navios aliviadores são contratados por afretamento através da Divisão de Abastecimento, voltada especificamente para administração de transportes.

2. Conforme a programação, o navio aliviador se aproxima da plataforma a uma baixa velocidade e é amarrado a ela através de cabos guias. Em seguida, o mangote de carregamento é conectado à plataforma.
3. Após a realização de testes hidrostáticos do mangote, é iniciada a transferência do óleo. Este processo é comandado a partir da plataforma, através dos recursos dos equipamentos de bombeio, do sistema de exportação de óleo, e do sistema de geração de energia para atender o alto consumo demandado. Assim que o navio aliviador estiver cheio, o mangote é desconectado e vedado.
4. Depois da retirada do mangote e do cabo, o navio está pronto para a partida, rumo ao terminal marítimo determinado para descarga.
5. Assim que recebe a autorização para atracação no terminal, o aliviador aproxima-se até o cais de atracação com apoio de rebocadores. No cais o óleo é transferido para os tanques do terminal. Neste caso, a operação de comando é do navio, que possui um sistema de bombeio específico para essa finalidade.
6. Terminado o descarregamento, o navio é retirado do porto pelos rebocadores e assim retorna a Baía de Campos para outro carregamento.

Outra particularidade da operação a ser destacada, é o ângulo de posicionamento do aliviador em relação aos agentes ambientais (corrente, vento e onda) e em relação à plataforma FPSO.

De forma simplificada, pode-se dizer que a magnitude das forças externas ambientais é diretamente determinada pelo ângulo de incidência dos agentes com a embarcação. Portanto, o aliviador deve ser aprofundado de forma a minimizar a resultante dessas forças, exigindo uma menor atuação dos propulsores para o controle da posição. Em casos extremos, se a potência exigida for maior que a capacidade máxima dos propulsores, haverá um deslocamento do navio no meio da operação de *offloading* podendo resultar em acidentes.

Em relação às plataformas, existem dois sistemas de amarração aos campos de exploração: o tradicional tipo *Turret*, no qual um eixo vertical é instalado com rolamentos axiais e a linha de amarração dando total liberdade de aproamento à plataforma, e o tipo SMS em que linhas de amarração são conectadas na popa e na proa da embarcação, restringindo muito a variação do aproamento. No primeiro sistema, o ângulo de equilíbrio da FPSO não é exatamente o mesmo a ser atingido pelo aliviador devido às diferenças na geometria dos cascos e na condição de carregamento. Já no sistema SMS, cuja utilização é cada vez mais freqüente, o desalinhamento pode ser ainda maior, na medida em que o aproamento da plataforma não segue a resultante ambiental.

Caso o desalinhamento entre navio e plataforma seja muito grande, súbitas variações ambientais ou falhas do Sistema DP podem levar a colisão dos navios. Por esta razão, a Petrobras definiu zonas de segurança para a realização do alívio. Na Zona Verde, ou Zona de Operação, o aliviador pode operar com segurança. Ao passar para a Zona Amarela (Zona de Alerta) o prosseguimento do alívio é permitido, mas o capitão do navio deve trazer o navio de volta à Zona Verde. Porém, ao atingir a Zona Vermelha (ou Zona de Desconexão), o capitão é avisado para iniciar o processo de interrupção da operação pode continua. Se o navio passar do limite dessa última zona, a interrupção deve ser imediata junto com a desconexão do mangote e dos cabos guias.

A Figura 2-1 ilustra as zonas de segurança para uma o alívio de uma FPSO com sistema *Turret*. O limite da Zona Verde é 45° , o da Zona Amarela é 60° e o limite máximo da Zona Vermelha é 70° .

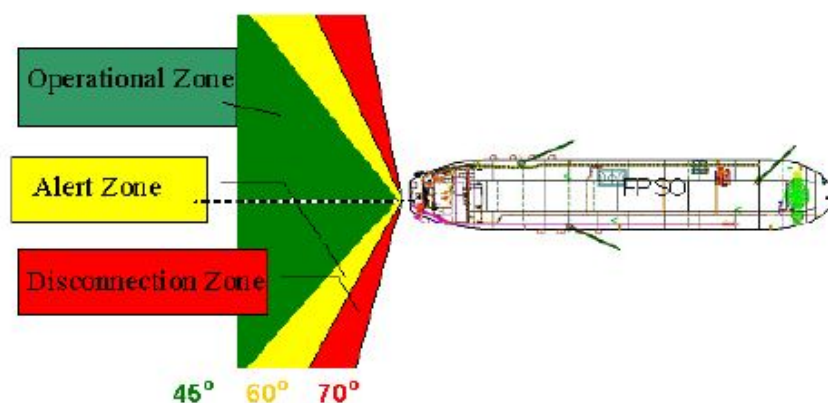


Figura 2-1 Zonas de segurança para operação de alívio em FPSO do tipo Turret (Correia et al 2004)

2.2 Sistema de Posicionamento Dinâmico

Para proporcionar segurança e eficiência durante as operações de alívio *offshore*, um sistema de posicionamento dinâmico (ou Sistema DP) é requerido.

Define-se posicionamento dinâmico como um sistema que controla automaticamente a posição e aproamento de uma embarcação por meio de propulsão ativa (Bray, 1998 e Fossen, 1994). Em linhas gerais, corresponde a um complexo sistema de controle, composto por sensores (GPS, 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.

Para uma melhor análise do funcionamento do Sistema DP, pode-se agrupar seus inúmeros componentes em quatro sub-sistemas principais: controle, potência, sensoriamento e atuação. Estes sub-sistemas operam conjuntamente, sendo que, na ocorrência de falha em qualquer um deles, o sistema todo é comprometido, o que implica a perda de posição e aproamento por parte da embarcação.

A Figura 2-2 apresenta um diagrama com os sub-sistemas principais de um Sistema DP, com a inter-relação entre eles.

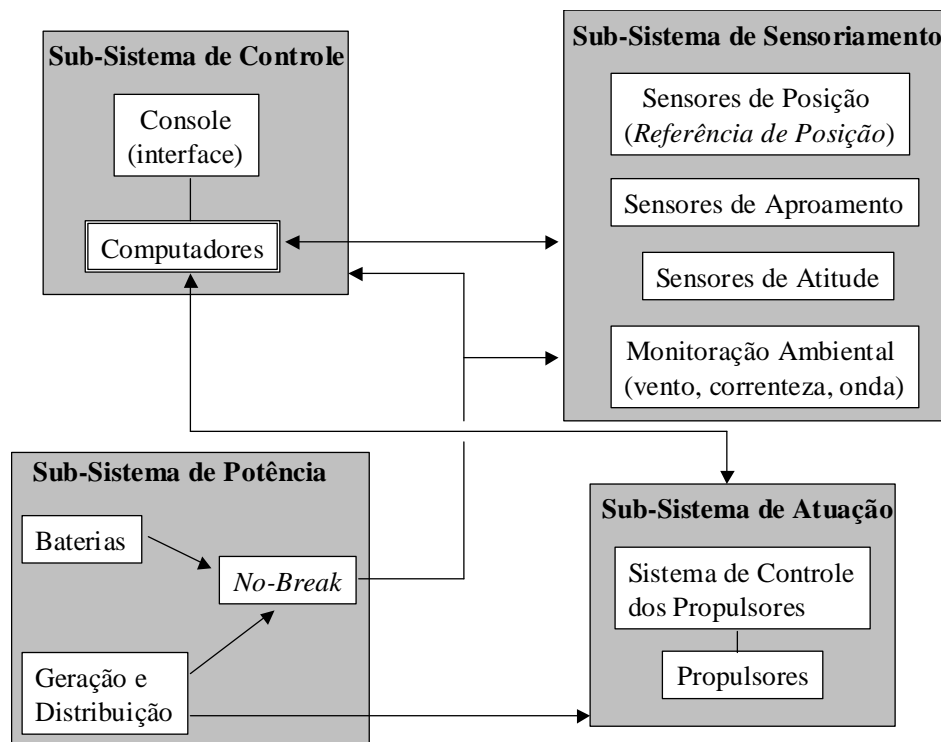


Figura 2-2 Elementos de um Sistema DP

O sub-sistema de potência é responsável pelo fornecimento de energia aos propulsores, a alguns sensores e aos elementos de controle. Devem ser sistemas flexíveis para evitar consumo desnecessário de combustível e permitir resposta rápida a variações abruptas de carga devidas a mudanças súbitas das condições ambientais. Usualmente, os consumidores são alimentados eletricamente e a potência gerada por alternadores diesel, configuração conhecida como diesel-elétrica. 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 Sistema DP, eliminando flutuações e interrupções momentâneas e garantindo o funcionamento durante 30 minutos quando da ocorrência de interrupção prolongada (*black-out*).

O sub-sistema de atuação fornece as forças necessárias para o posicionamento da embarcação. É composto por diversos tipos de propulsores e pelos sistemas de controle associados a cada um deles. Tipicamente, são utilizados de 4 a 8 propulsores, mas o número pode variar mais dependendo da aplicação. Entre os tipos principais se destacam: os propulsores principais, posicionados na popa da embarcação; os propulsores em túnel (Figura 2-3b), montados em túneis instalados transversalmente ao casco e, os azimutais (Figura 2-3a), que apresentam um grau de liberdade adicional de rotação. A variação do empuxo nos propulsores pode ser obtida pela variação do ângulo das pás (passo controlável) ou por variação da rotação (passo fixo).



Figura 2-3 (a) Propulsor azimutal (b) Propulsor em túnel

O sub-sistema de sensoriamento apresenta duas funções principais: medir a posição de um ponto da embarcação no plano horizontal e medir as condições ambientais (vento, onda e correnteza). O sistema de referência de posição pode ser projetado empregando diferentes tecnologias como sistemas de localização por satélite

(GPS), sistemas hidroacústicos, radares por microondas, dentre outros. Em geral, os sistemas DP possuem mais de um sensor de posição para obter medidas mais precisas e com maior confiabilidade. Já a tecnologia dos sensores de condições ambientais tem tido um desenvolvimento recente mais acentuado nos últimos anos. A inclusão das informações dos sensores diretamente na malha de pré-alimentação contribui para a eficiência do sistema.

O sub-sistema de controle processa a lógica de controle responsável pelo posicionamento da embarcação. É composto pelos computadores e pelo console de interface, conhecido como *man-machine interface* (MMI). O computador é dotado de placas de entrada e saída (analógicas e digitais) e placas de comunicação, responsáveis pela leitura das informações dos diversos sensores e pelo comando sobre os sistemas de controle dos propulsores.

Nesse sub-sistema, um algoritmo de controle é responsável pelo cálculo das forças e momento necessários para que o aliviador mantenha-se próximo à posição e ao aproamento desejados (“*set-points*”). Exemplos de algoritmos utilizados são o clássico Proporcional Integrativo Derivativo (PID), os controladores ótimos (LQG) e, mais recentemente, os controladores baseados em modelos com mecanismos adaptativos. Em seguida, calcula-se a distribuição dessas forças de comando nos propulsores visando minimizar o consumo de potência. Essa etapa é conhecida como “alocação de empuxo” (TAL – *thruster allocation logic*).

O modelo matemático deve considerar apenas os movimentos e velocidades de baixa frequência, excitados pela correnteza e por parcelas dos esforços de onda e vento. Os componentes de alta frequência dos sinais medidos devem ser eliminados através de filtros (passa-baixos ou estimadores de Kalman), pois movimentos rápidos exigiriam uma potência muito elevada que poderia danificar os elementos mecânicos.

Os programas do sub-sistema de controle também devem ser flexíveis, permitindo a execução de diversos modos de operação. No modo manual, o operador controla, por meio de um *joystick*, a posição e aproamento da embarcação. No modo automático, a posição e o aproamento são mantidos próximos aos valores desejados, sem a interferência do operador. No modo de trajetória (*Track-follow*), a embarcação é mantida seguindo uma trajetória pré-determinada. No modo de alinhamento com o ambiente (*Wheater Vaning*) o aproamento da embarcação é mantido próximo do valor

de menor solicitação do sistema de propulsores, que equivale ao aproamento alinhado com a “resultante” das forças ambientais. Diversos outros modos de controle são disponíveis nos sistemas DP atuais, cada um mais adequado à determinada operação. No presente trabalho, o modo de operação é denominado controlador de modo superior, pois é responsável por prover, ao controlador de nível inferior, os valores desejados (*set-points*) de posição e aproamento.

2.3 Simuladores comerciais

Por serem operações delicadas e de risco, operações de alívio têm sido freqüentemente estudadas e simuladas numericamente. Comercialmente existem vários simuladores de operações oceânicas, alguns mais genéricos que não simulam apenas operações de alívio, enquanto outros se atêm a aspectos mais específicos dessa operação.

Em Queiroz Filho (2009), cita-se como exemplo de simuladores:

- o SIMO do “Norwegian Marine Technology Research Institute” (Marintek);
- o LIFSIM/LIFMOT e o ANYSIM do Instituto Holandês de Pesquisa Marítima (Marin);
- o Deepc do DNV;
- o AQWA da ANSYS;
- o Ariane-3Dynamic do MCS;
- o DYNASIM do Tanque de Provas Numérico (TPN).

Para fins do presente trabalho, apenas o DYNASIM foi estudado e utilizado com maior profundidade e por isso apenas a este simulador será atribuído um maior detalhamento.

O simulador DYNASIM foi desenvolvido e vem sendo aperfeiçoado desde 1998 pelo TPN na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em parceria com a Petrobras e outras importantes instituições de pesquisa do país. Vem sendo freqüentemente utilizado pela Petrobras para simular operações *offshore*, incluindo operações de alívio.

O DYNASIM pode ser definido como um simulador não-linear, dinâmico que executa a integração no tempo das equações diferenciais que representam a dinâmica de

corpos flutuantes sob a ação ambiental. Para os cálculos, considera também a ação de linhas de amarração e *risers* (dutos que transportam petróleo), bem como a atuação do Sistema DP.

Os principais parâmetros de entrada do simulador são: as características principais das embarcações (dimensões, matriz de massas, etc.); os coeficientes aerodinâmicos da parte emersa (padrão OCIMF); os coeficientes de correnteza (padrão OCIMF) ou derivadas hidrodinâmicas; os coeficientes hidrodinâmicos (amortecimento potencial, massas adicionais, funções de transferência de ondas de 1ª e 2ª ordem); as condições ambientais que devem ser simuladas; as características das linhas de amarração e *risers*; as características e posições dos propulsores; os modos de operação DP e seus parâmetros. Para auxiliar o cálculo de algumas grandezas como as massas adicionais, o amortecimento potencial e as funções de transferência de onda o DYNASIM utiliza um segundo *software* denominado WAMIT.

Como saída, o DYNASIM calcula os seguintes resultados: as séries temporais do movimento do corpo (nos seus seis graus de liberdade); a tensão nas linhas de amarração; a potência e empuxo nos propulsores. Permite também um resumo estatístico para todas as séries referentes a essas grandezas físicas.

Para representar mais fielmente a dinâmica dos navios da Petrobrás dotados deste sistema, o simulador possui algoritmos utilizados nos sistemas DP comerciais. Como filtro de onda o DYNASIM utiliza um *Extended Kalman Filter* (EKF) e o controlador implementado é do tipo PID (proporcional integral derivativo), desacoplado para cada um dos 3 movimentos principais (*surge*, *sway* e *yaw*) a serem explicados na seção 3.1.2. Uma descrição detalhada dos algoritmos de DP implementados no DYNASIM pode ser encontrada em Tannuri e Morishita (2006).

O DYNASIM é, portanto, um *software* robusto capaz de gerar inúmeras informações importantes ao simular uma operação de alívio. Contudo, essa sua sofisticação para o tratamento de dados em análises dinâmicas compromete a agilidade do processamento, comportamento indesejável quando existe um volume expressivo de configurações (dados de entrada) a serem avaliadas.

3 Modelos Matemáticos

Neste capítulo, são apresentados os modelos matemáticos que descrevem as forças originárias de agentes ambientais e que afetam a operação de alívio.

Na seção 3.1, define-se as convenções adotadas ao longo do trabalho quanto aos sistemas de coordenadas, aos ângulos relativos à posição do navio, à direção dos agentes ambientais e aos movimentos do navio em alto mar. Em seguida, serão apresentados na seção 3.2 os modelos para as forças originárias da atuação dos campos de correnteza, vento e onda respectivamente. Por fim, explicaremos em 3.3 o modelo matemático usado para calcular a alocação de empuxo e em 3.4 a metodologia para se estimar o impacto das componentes não constantes das forças no posicionamento do navio.

3.1 Convenções

3.1.1 Sistema de coordenadas

O sistema de coordenadas fixo à Terra OXYZ, será definido de forma que o eixo OX seja orientado para o ponto cardinal leste, enquanto o eixo OY será orientado para o norte.

A direção do navio aliviador em relação ao sistema fixo OXYZ será dada pelo ângulo ψ .

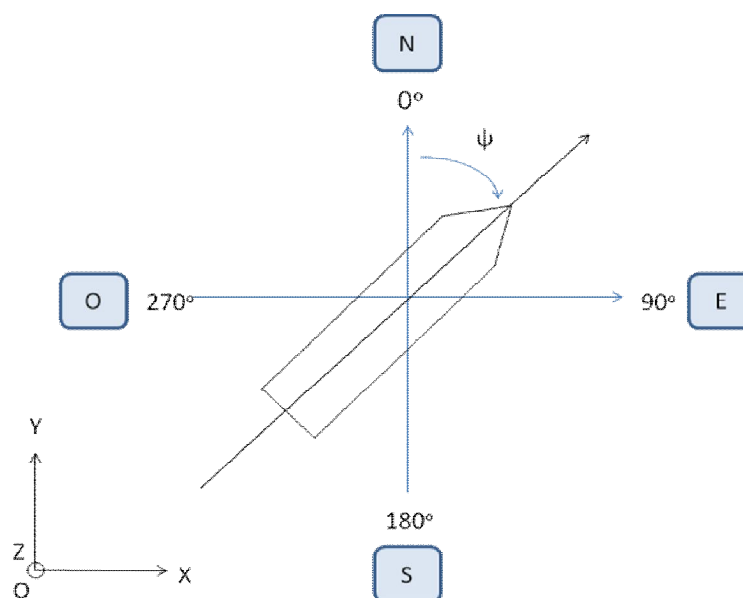


Figura 3-1 Direção do navio aliviador em relação ao referencial fixo OXYZ

Como ilustrado na Figura 3-1, o ângulo ψ indica a diferença angular entre o eixo popa-proa do navio e o eixo OY, seguindo o sentido horário.

Os agentes ambientais, tais como a correnteza, o vento e a onda, serão definidos como campos unidirecionais. A direção desses campos é definida por um ângulo representado na Figura 3-2.

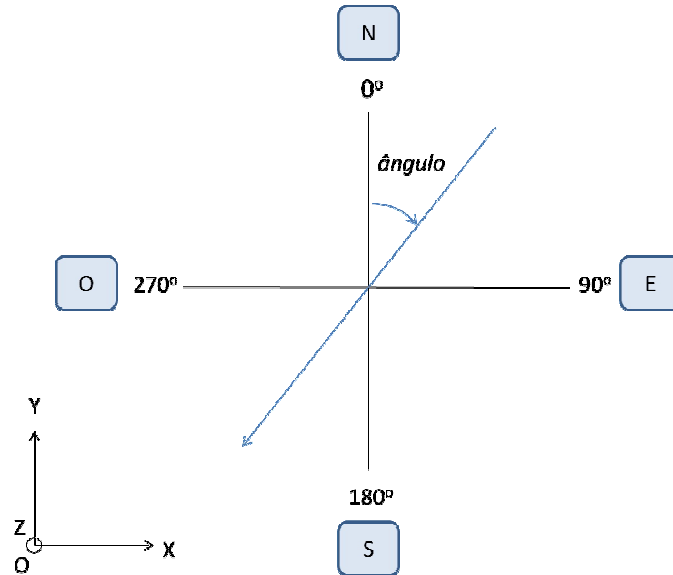


Figura 3-2 Direção de agentes ambientais

Por exemplo, um agente ambiental proveniente do norte (direcionado para o sul) terá um ângulo de 0° . Caso ele tenha origem no oeste com orientação para o leste seu ângulo será de 270° .

As convenções quanto aos ângulos de incidência de agentes ambientais em relação ao casco do navio estão apresentadas na Figura 3-3:

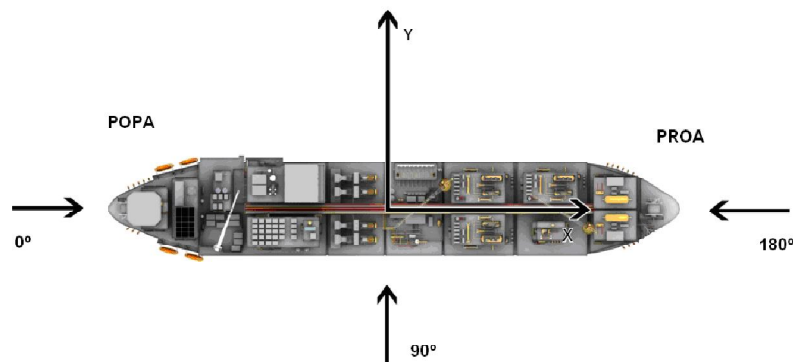


Figura 3-3 Ângulos de incidência em relação ao casco

Assim, podemos calcular esse ângulo de incidência por:

$$\hat{\text{ângulo}}_r = 180 + \Psi - \hat{\text{ângulo}}_{OXYZ} \quad (3.1)$$

3.1.2 Movimentos do navio aliviador

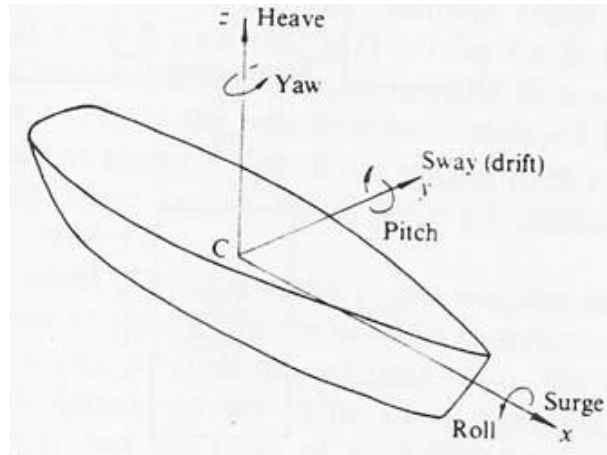


Figura 3-4 Representação dos graus de liberdade do movimento de um navio

O movimento de um navio em alto mar é composto por seis graus de liberdade, ou seja, ele pode se mover nos 3 eixos de translação e 3 eixos de rotação.

Convencionalmente, os 6 movimentos são referenciados com os nomes indicados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Movimentos de navios em alto mar

Movimento de <i>surge</i>	Translação longitudinal (avanço); movimento indicado pelo índice 1
Movimento de <i>sway</i>	Translação lateral (deriva) ; movimento indicado pelo índice 2
Movimento de <i>heave</i>	Translação vertical (arfagem) ; movimento indicado pelo índice 3
Movimento de <i>pitch</i>	Rotação (no plano vertical) em torno do eixo transversal (caturro); movimento indicado pelo índice 4
Movimento de <i>roll</i>	Rotação (no plano vertical) em torno do eixo longitudinal (balanço ou jogo); movimento indicado pelo índice 5
Movimento de <i>yaw</i>	Rotação no plano horizontal (guinada); movimento indicado pelo índice 6

Para o estudo de sistemas DP, os movimentos mais importantes são aqueles associados ao plano horizontal OXY, isto é, as translações *surge* e *sway* e a rotação *yaw*.

3.2 Agentes ambientais

3.2.1 Correnteza

Para os sistemas de posicionamento dinâmico, nos quais usualmente o navio petroleiro mantém baixas rotações e velocidades, a parcela mais importante das forças de correnteza é a estática. Esta pressupõe baixas velocidades relativas e trata apenas da interação entre movimento longitudinal (*surge*) e transversal (*sway*), não incorporando efeitos devidos à rotação do casco (*yaw*). Dessa forma, o modelo se presta à análise de navios estacionários sob uma correnteza constante ou em movimentos de translação com pequenas velocidades. Para estudar as forças estáticas resultantes da atuação da correnteza sobre o navio utilizaremos a convenção usual definida em OCIMF (1994).

Seja V_{cr} a intensidade da velocidade da correnteza em relação ao navio e α_r o ângulo de incidência da correnteza em relação ao casco (seguindo a convenção da Figura 3-3), as forças de correnteza podem ser calculadas por:

$$\begin{aligned} F_{1C} &= \frac{1}{2} \rho V_{cr}^2 L T C_{1C}(\alpha_r) \\ F_{2C} &= \frac{1}{2} \rho V_{cr}^2 L T C_{2C}(\alpha_r) \\ F_{6C} &= \frac{1}{2} \rho V_{cr}^2 L^2 T C_{6C}(\alpha_r) \end{aligned} \quad (3.2)$$

nas quais ρ é a densidade da água, L é o comprimento do navio, T o calado. F_{1C} e F_{2C} são as forças nas direções longitudinais e transversais respectivamente e F_{6C} é o momento de yaw. C_{1C} , C_{2C} e C_{6C} são os coeficientes estáticos adimensionais de correnteza.

Os coeficientes C_{1C} , C_{2C} e C_{6C} dependem do formato do casco do navio e podem ser determinados experimentalmente ou através de modelos matemáticos tais como o de Asa Curta proposto por Leite et al. (1998). A Figura 3-5 ilustra os coeficientes determinados para um navio aliviador carregado e com lastro.

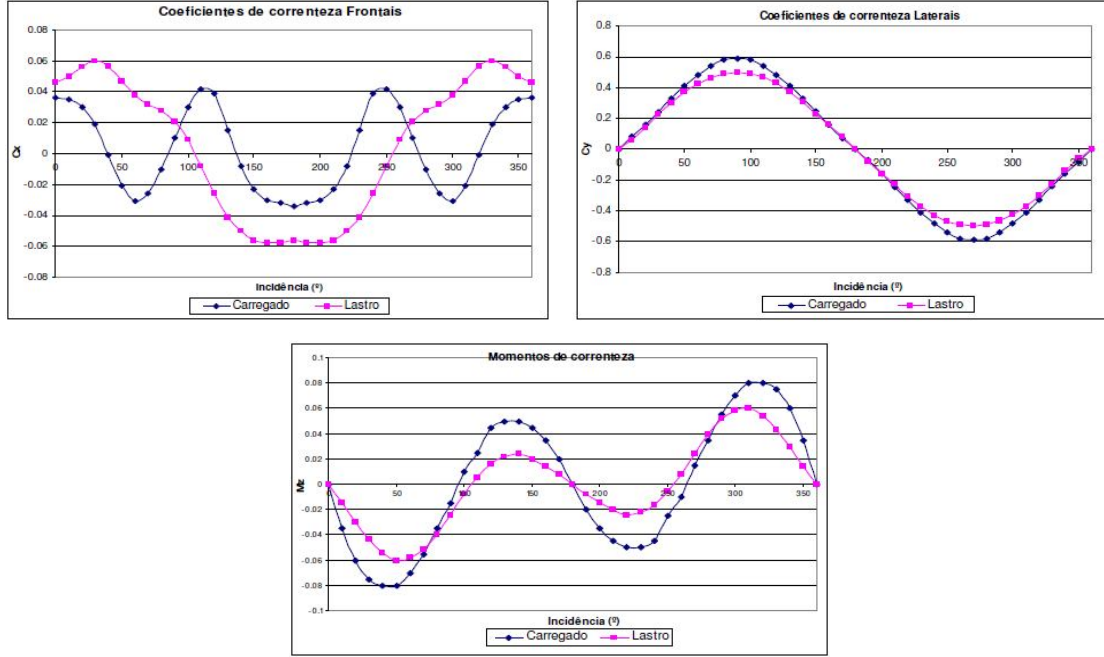


Figura 3-5 Coeficientes adimensionais de correnteza para um navio da classe Suezmax

3.2.2 Vento

As forças resultantes da incidência do vento sobre a parte emersa da embarcação são determinadas de forma semelhante ao modelo aplicado às correntezas através de coeficientes adimensionais. Admitindo-se que não haja variação espacial na velocidade e direção do vento incidente sobre a embarcação, são válidas as relações:

$$\begin{aligned}
 F_{1V} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{1V}(\beta_{Vr}) A_{Frontal} V^2 \\
 F_{2V} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{2V}(\beta_{Vr}) A_{Lateral} V^2 \\
 F_{6V} &= \frac{1}{2} \rho_a C_{6V}(\beta_{Vr}) L A_{Lateral} V^2
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

nas quais ρ_a é a densidade do ar, F_{1V} e F_{2V} são as forças nas direções longitudinais e transversais respectivamente, F_{6V} é o momento de yaw, C_{1V} , C_{2V} e C_{6V} são os coeficientes adimensionais, $A_{frontal}$ e $A_{Lateral}$ são as áreas vélicas projetadas frontal e lateral (respectivamente) da parte emersa da embarcação e V é a velocidade do vento. O ângulo de incidência em relação ao eixo fixo OX é dado por $\beta_{V, OXYZ}$ e o ângulo relativo à embarcação é dado por β_{Vr} .

Na Figura 3-6 apresentam-se as curvas para o navio VLCC nas condições extremas de carregamento (100% e 40% do calado máximo) .

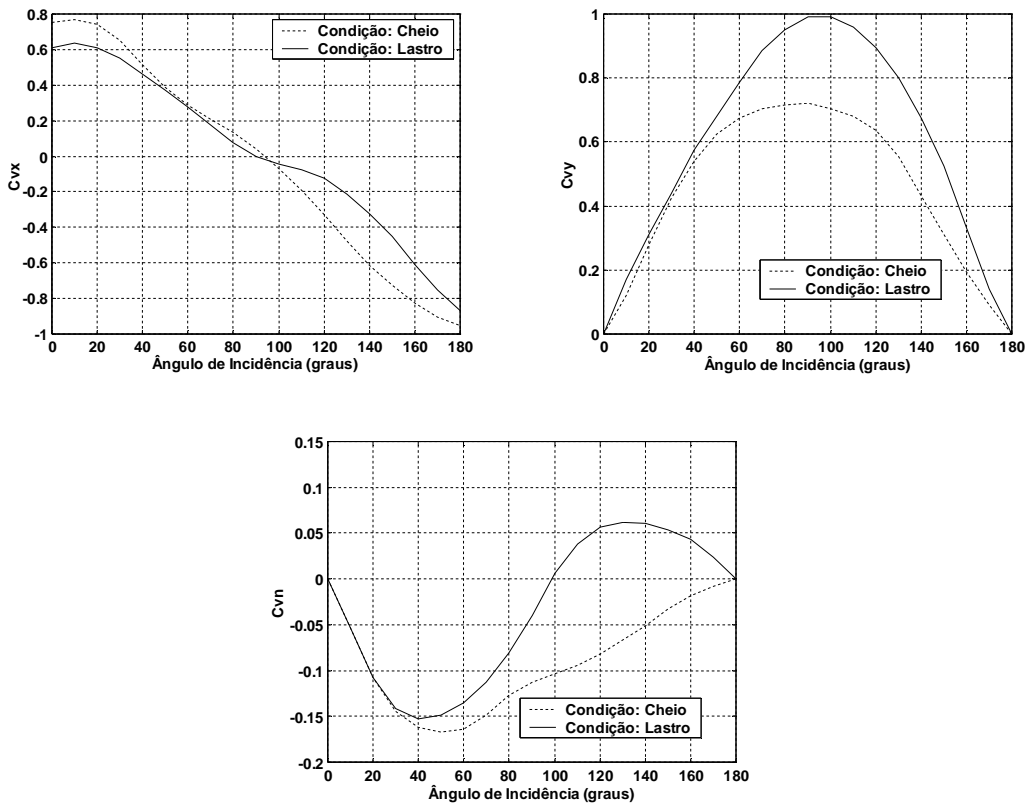


Figura 3-6 Coeficientes adimensionais de vento para um VLCC (OCIMF, 1977)

3.2.3 Onda

As ondas do mar são resultantes da interação do vento com a superfície da água. Elas são descritas por uma distribuição espectral da energia, que é proporcional ao quadrado da altura da onda em uma dada frequência.

A incidência de ondas de gravidade sobre corpos próximos à superfície induz sobre eles um campo de pressão variável ao longo do tempo e do espaço. Da integração desta pressão sobre a superfície imersa do corpo pode-se calcular a força provocada pela incidência da onda. Verifica-se que essa força de onda pode ser decomposta em parcelas proporcionais à amplitude da onda, chamadas de forças de primeira ordem, e parcelas proporcionais à amplitude elevada ao quadrado, chamadas de forças de segunda ordem.

As forças de primeira ordem possuem a mesma frequência da onda incidente. Essas componentes não podem ser compensadas pelo Sistema DP, dada a alta frequência, sendo ignoradas pelo uso de filtros. No entanto, isso não leva a um

problema pois elas não interferem na posição média da embarcação num período longo (*set-point* mantido).

As forças de segunda ordem são, por sua vez, menores que as de primeira ordem em amplitude. Porém, por apresentarem componentes de baixa frequência, exercem uma grande influência sobre os movimentos horizontais de sistemas de grande porte amarrados, cujas frequências naturais são baixas (em geral, menores que 0,06rad/s), excitando-os mais intensamente.

Os esforços de segunda ordem provocados pela onda são separados em deriva média - advindas de um esforço constante, isto é, frequência nula - e deriva lenta - advinda de esforços lentamente variáveis no tempo.

3.2.3.1 Força de deriva média

Para calcular a força estática média das ondas sobre a embarcação (deriva média), considerando apenas ondas unidirecionais e sem espalhamento, é preciso avaliar o espectro de onda e computar sua integral ponderada pelo coeficiente de deriva.

A formulação do espectro adotada será a de JONSWAP, conforme dado na equação:

$$S(\omega) = \frac{\alpha_0 \cdot g^2}{\omega^5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right) \cdot \gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2 \cdot \sigma_J^2 \omega_0^2}\right]} \quad (3.4)$$

Na qual: $S(\omega)$: Espectro de frequências da onda em $m^2/rad/s$

T_p : Período de pico do espectro de onda.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{T_p} : \text{Frequência de pico do espectro de onda}$$

$$\sigma_J = \begin{cases} 0,07 & \omega \leq \omega_0 \\ 0,09 & \omega > \omega_0 \end{cases}$$

H_s : Altura significativa da onda. Média da altura do terço das ondas mais altas

$$\alpha_0 = \frac{5}{16g^2} H_s^2 \omega_0^4 [1 - 0,287 \cdot \ln(\gamma)] : \text{para a Baía de Campos}$$

$$\gamma = 6,4 \cdot T_p^{-0,491} \quad : \text{Parâmetro de forma}$$

Com essa modelagem, basta definir a direção de incidência, o período de pico e a altura significativa da onda para especificar completamente as condições de deriva.

Como o espectro é contínuo, a força média de deriva é dada por uma integral que pode ser aproximada por qualquer método numérico de integração, tal como:

$$F_{jDM} = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) D_j(\omega, \beta_{Or}) d\omega \quad (\text{contínuo}) \quad (3.5)$$

$$F_{jDM} \cong 2 \sum_{i=0}^n S(\omega_i) D_j(\omega_i, \beta_{Or}) \Delta\omega \quad (\text{aproximação discreta})$$

Sendo β_{Or} a direção de incidência de onda em relação ao casco do navio e D_j o coeficiente de deriva.

Diferentemente do vento e da correnteza, as ondas nem sempre podem ser consideradas unidirecionais. Para contornar esse problema, a força de deriva é calculada com base em duas componentes de onda unidirecional, cada uma com seu período, altura e ângulo de incidência.

Na Figura 3-7, ilustra-se o coeficiente de deriva para movimento de *sway* do VLCC e do BGL1 em função da frequência das ondas incidentes.

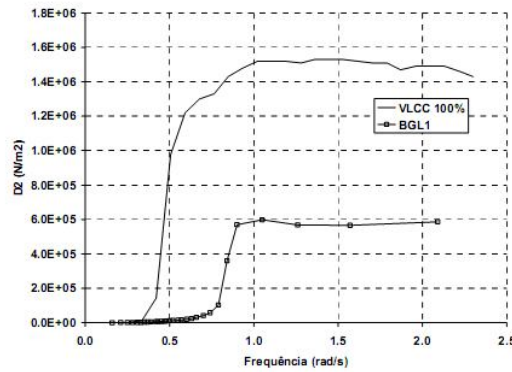


Figura 3-7 Coeficiente de deriva em *sway* incidência de través (extraída de Tannuri, 2002)

Na Figura 3-8, observam-se as forças (e momento) de deriva média em função da direção relativa entre a onda e o navio para o VLCC 100% carregado, sob incidência de

uma onda com altura significativa de 5,5m e período de pico 11,4s, com espectro de Pierson-Moskowitz para ondas.

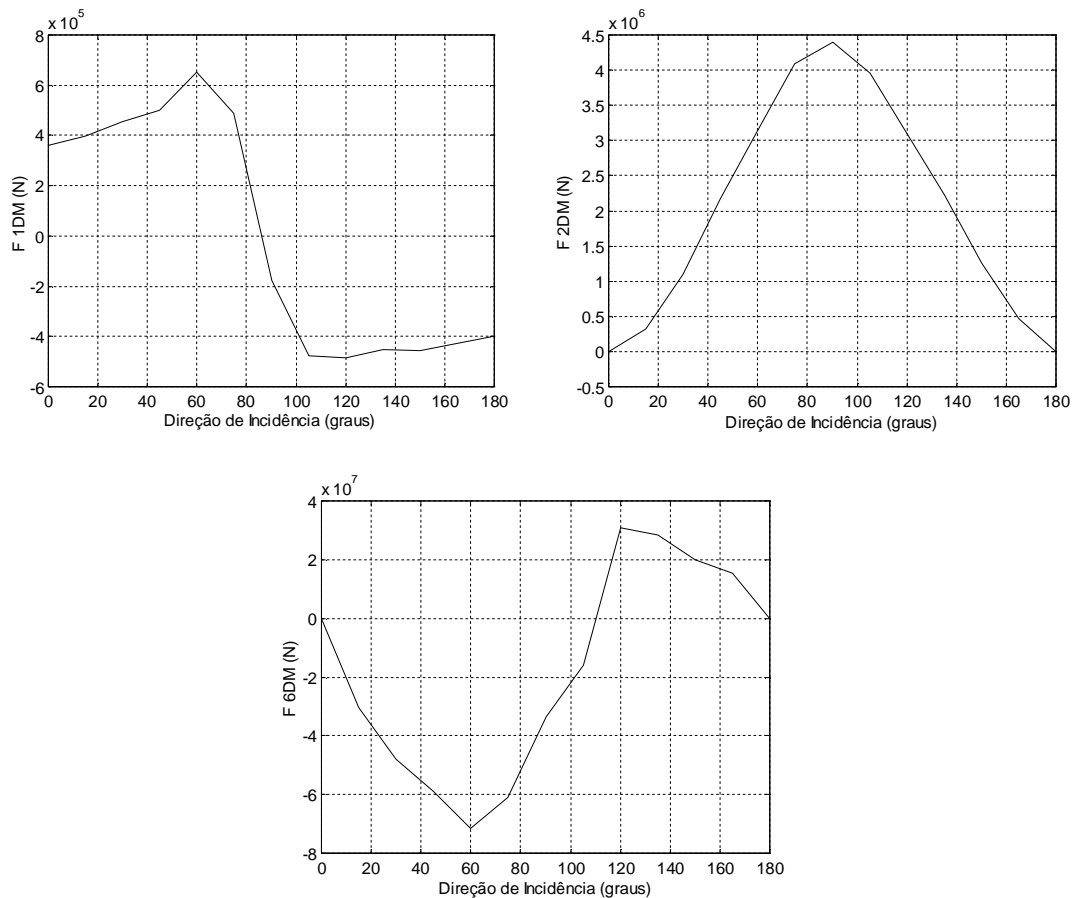


Figura 3-8 Forças de deriva média para VLCC 100% carregado ($T_p=11,4s$ e $H_s=5,5m$) (extraída de Tannuri, 2002)

3.2.3.2 Força de deriva lenta

As forças de deriva lenta são geradas a partir da combinação de duas ondas em mar aleatório. Suas frequências equivalem à diferença das frequências das ondas originárias. Embora possuam amplitude pequena comparada às forças de primeira ordem, podem excitar frequências naturais dos sistemas oceânicos amarrados, induzindo elevados movimentos no plano horizontal.

Aranha; Fernandes (1995) desenvolveram uma aproximação bastante apropriada para sistemas oceânicos de grande porte, que possuem frequências naturais bem abaixo das frequências típicas das ondas. Sejam S_{jDL} os espectros de potência das forças de deriva lenta em *surge* e *sway* e do momento de *yaw*, ω_0 a frequência de pico do

espectro de onda e μ a frequência da deriva lenta (frequência diferença), seus estudos mostraram que para baixas frequências, nas quais $\mu/\omega_0 \ll 1$:

$$S_{jDL}(\mu) = 8 \int_0^\infty S^2(\omega) D_j(\omega, \beta_0)^2 d\omega + O[(\mu/\omega_0)^2], \quad j=1,2 \text{ ou } 6 \quad (3.6)$$

Assim, o espectro da força de deriva lenta pode ser considerado constante para baixas frequências, com erro proporcional a $(\mu/\omega_0)^2$, dependendo apenas dos coeficientes de deriva D_j . Em geral a frequência natural dos movimentos horizontais é aproximadamente 10 vezes menor que a frequência de pico do espectro incidente e portanto, o erro implícito na aproximação é da ordem de 1% na faixa de interesse do espectro.

Para $\mu > 0,2\omega_0$, o valor de $S_{jDL}(\mu)$ decai rapidamente e a aproximação deixa de ser válida. Assim, o espectro da força de deriva lenta pode ser comparado ao espectro de potência de um ruído branco (amplitude constante), aplicado a uma janela retangular de frequências entre 0 e $0,2\omega_0$.

As forças de deriva lenta são calculadas, então, aplicando-se a transformada inversa de Fourier na forma discreta, dada por:

$$F_{jDL}(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_{jDL}\Delta\mu} \cos(\mu_i t + \phi_i), \quad j=1,2 \text{ ou } 6 \quad (3.7)$$

sendo ϕ_i uma fase aleatória dependente da frequência.

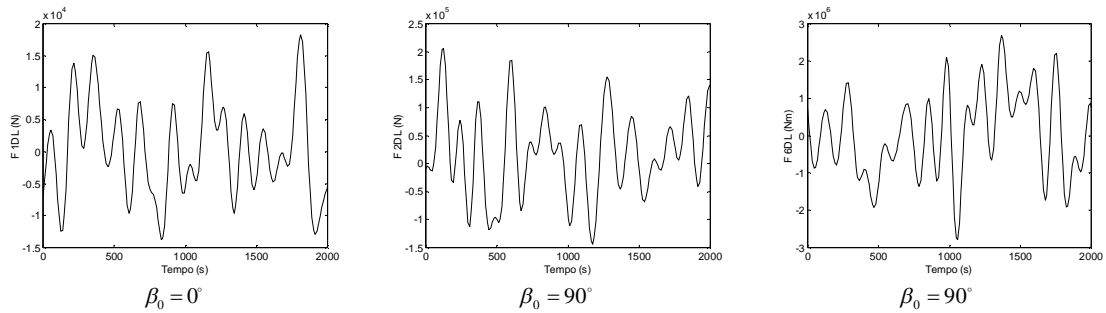


Figura 3-9 Realizações temporais das forças de deriva lenta para VLCC 100% carregado ($T_p=11,4s$ e $H_s=5,5m$)

3.2.3.3 Wave Drift Damping

Quando há presença significativa de ondas e de correnteza existe um efeito de interação entre elas, similar ao efeito *Doppler* mais conhecido em ondas sonoras, que resulta num amortecimento de onda, pois pode ser expresso como uma força proporcional à velocidade da correnteza adicionado (ou subtraído) das forças de deriva.

Esse efeito é incluído no modelo através de uma correção do coeficiente de arrasto de deriva usando a seguinte formulação:

$$D_{j,U}(\omega, \beta_0) = D_j(\omega, \beta_0) + \frac{V_{cr}}{c} [\cos \alpha_r (b_{wj} \cos \beta_0 + b_{rj} \sin \beta_0) + \sin \alpha_r (b_{wj} \sin \beta_0 + b_{rj} \cos \beta_0)]$$

$j=1,2 \text{ ou } 6$

(3.8)

$$c = \frac{g}{\omega}$$
(3.9)

$$b_{wj} = 4D_j(\omega, \beta_0) + \omega \frac{\partial D_j(\omega, \beta_0)}{\partial \omega}$$
(3.10)

$$b_{rj} = -2 \frac{\partial D_j(\omega, \beta_0)}{\partial \beta_0}$$
(3.11)

Dependendo do ângulo de incidência, essa correção pode chegar a corresponder a uma variação de 100% do valor de força de deriva média em relação à força sem essa correção do amortecimento de onda.

3.3 Alocação de empuxo

O algoritmo de alocação de empuxo instalado no sub-sistema de controle do DP deve permitir que o conjunto de propulsores mantenha a embarcação o maior tempo possível na posição desejada, com um baixo consumo de energia. Para tanto, é necessário que ele considere as restrições funcionais de cada propulsor. Quando o empuxo total disponível for maior do que a força comandada, existirão várias configurações para o problema de alocação e algum novo critério deve ser incorporado ao problema para superar esta indeterminação.

3.3.1 Formulação do problema de otimização

Para modelar a alocação de empuxo, consideremos as seguintes variáveis:

- Os tipos de propulsores túnel e principal são fixos (não há rotação) e serão parametrizados pela força T_F e pelo ângulo constante α_F que define a direção em

relação ao casco. As posições desses propulsores no referencial do navio serão X_F e Y_F .

- Já as forças de comando nos propulsores azimutais podem ser modeladas por duas componentes vetoriais T_{AX} e T_{AY} . Através da soma vetorial das componentes, obtemos a resultante $T_A = \sqrt{T_{AX}^2 + T_{AY}^2}$ e a direção em relação ao casco do navio será dada por $\alpha_A = \text{atan2}(F_{AY}, F_{AX})$, onde:

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan(\frac{y}{x}) & x > 0 \\ \pi + \arctan(\frac{y}{x}) & y \geq 0, x < 0 \\ -\pi + \arctan(\frac{y}{x}) & y < 0, x < 0 \\ \frac{\pi}{2} & y > 0, x = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & y < 0, x = 0 \\ \text{undefined} & y = 0, x = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

As posições desses propulsores no referencial do navio serão X_A e Y_A .

- As forças dos propulsores podem ser reagrupadas em um vetor:

$$\underline{T} = [T_{AX1} \quad T_{AY1} \quad \dots \quad T_{AXp} \quad T_{AYp} \quad T_{F1} \quad \dots \quad T_{Fq}]^t \quad (3.13)$$

- A resultante das forças *surge*, *sway* e o momento de *yaw* provocados por agentes ambientais (vistas na seção 3.2) podem ser expressas como:

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_6 \end{bmatrix} = \underline{F}_V + \underline{F}_C + \underline{F}_{DM} \quad (3.14)$$

Seja p o número de propulsores azimutais e q o número de propulsores fixos (túnel ou principal), o problema da alocação do empuxo pode ser expresso como um problema de otimização cuja função objetivo é:

$$\Phi = \sum_i^p (T_{AXi}^2 + T_{AYi}^2) + \sum_i^q (T_{Fi}^2) = \underline{T}^t * \underline{T} \quad (3.15)$$

ou seja, a minimização da energia pode ser representada como a minimização do módulo de um vetor de forças de propulsão \underline{T} .

Quanto menor for a força nos propulsores, menor será a potência empregada e assim, haverá menos energia gasta.

Vale lembrar que o objetivo do presente trabalho é elaborar um programa simplificado e baseado na análise estática das forças. Conseqüentemente, a função objetivo deverá respeitar o princípio fundamental da estática, segundo o qual, na ausência de acelerações, $\sum \underline{F} = 0$. Assim, definimos a restrição de igualdade:

$$\underline{\underline{A}} * \underline{T} = \underline{F}, \text{ onde}$$

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cos \alpha_{F1} & \cdots & \cos \alpha_{Fq} \\ 0 & 1 & & 0 & 1 & \sin \alpha_{F1} & & \sin \alpha_{Fq} \\ Y_{A1} & X_{A1} & \cdots & Y_{Ap} & X_{Ap} & -X_{F1} \cos \alpha_{F1} + Y_{F1} \sin \alpha_{F1} & \cdots & -X_{Fq} \cos \alpha_{Fq} + Y_{Fq} \sin \alpha_{Fq} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Enfim, devem-se considerar as restrições de desigualdade funcionais dos propulsores. Cada propulsor é especificado com uma força nominal máxima e mínima. Além disso, pode-se especificar um ângulo máximo e mínimo de atuação dos propulsores azimutais. O propulsor estará “saturado” quando atingir um dos limites dessas restrições.

$$T_{Ai_{\min}} \leq \sqrt{T_{AXi}^2 + T_{AYi}^2} \leq T_{Ai_{\max}}, i=1...p \quad (3.17)$$

$$\alpha_{Ai_{\min}} \leq \text{atan2}(T_{AYi}, T_{AXi}) \leq \alpha_{Ai_{\max}}, i=1...p \quad (3.18)$$

$$T_{Fj_{\min}} \leq T_{Fj} \leq T_{Fj_{\max}}, j=1...q \quad (3.19)$$

Obtemos, portanto, um problema de otimização não-linear com restrições também não-lineares, sendo este um dos casos mais complexos.

Para a resolução desse problema, encontramos em Haftka (1993) alguns métodos numéricos tais como o Método de Penalização, o Método de Lagrange Aumentado e o Método de Programação Quadrática Sequencial (SQP). No entanto, o custo computacional para implementar esses algoritmos de otimização é excessivamente elevado (muitas iterações para obter a solução ótima), principalmente considerando que eles serão executados muitas vezes numa mesma análise.

Uma consideração a ser feita é que, para fins do presente trabalho, precisamos validar apenas se a alocação de empuxo é possível ou não, dadas certas condições ambientais. Em outras palavras, é preciso verificar apenas a existência de solução, não importando o valor \underline{T}^* do vetor \underline{T} na solução ótima. Ora, sabe-se que haverá sempre ao menos um valor mínimo se a função objetivo for côncava e o domínio for viável. Como a função objetivo Φ é quadrática de Hessiana definida positiva e, portanto, côncava, o

problema se resume em descobrir se o domínio é viável ou não. Esse problema simplificado é conhecido como Problema de Satisfação de Restrições (*CSP – Constraints Satisfaction Problem*). Porém, para um domínio contínuo com restrições de desigualdade não-lineares, o método de resolução também não é trivial.

Assim, a fim de se evitar o alto custo computacional decorrente do emprego dos métodos supramencionados, o procedimento escolhido no projeto para validar a alocação de empuxo é simplificado e não avalia a totalidade do domínio definido pelas restrições. Conseqüentemente, nem todas as configurações de alocação de empuxo nos propulsores serão consideradas e algumas soluções possíveis poderão ser ignoradas. No entanto, a falta de rigor desse procedimento deve ser admitida como uma margem de segurança usada para o cálculo do downtime, cobrindo imprecisões nos dados de condições ambientais e coeficientes do navio.

3.3.2 Solução do problema

O método utilizado é iterativo e pode ser dividido em 2 etapas, definidas a seguir.

Etapas 1 – Otimização do problema sem restrições de desigualdade

Primeiramente, resolve-se o problema de alocação de empuxo considerando apenas a restrição de igualdade $\underline{A} * \underline{T} = \underline{F}$. Ou seja, alocam-se as forças nos propulsores para equilibrar as forças ambientais de forma ótima sem levar em consideração os limites operacionais dos propulsores (desigualdades). Esse artifício facilita a resolução do problema.

A resolução da primeira parte do método pode ser encontrada em Tannuri (2002). Segundo essa fonte bibliográfica, o funcional $\Phi(\underline{T})$ e a condição de igualdade $f(\underline{T}) = 0$ podem ser escritos como:

$$\begin{aligned}\Phi(\underline{T}) &= \underline{T}' \underline{T} \\ f(\underline{T}) &= \underline{A} \underline{T} - \underline{F}\end{aligned}\tag{3.20}$$

Seja $\underline{\lambda}$ um vetor de 3 elementos lagrangeanos (um para cada vínculo de igualdade) e a função $L(\underline{T}, \underline{\lambda}) = \Phi(\underline{T}) + \underline{\lambda}' f(\underline{T})$. A condição necessária satisfeita pela solução do problema de minimização é dada pelas $(2.p + q + 3)$ equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial T_i} = 0 & i = 1 \dots (2p + q) \Rightarrow 2\underline{T} + \underline{A}^T \underline{\lambda} = 0 & (a) \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = 0 & j = 1 \dots 3 \Rightarrow \underline{AT} - \underline{F} = 0 & (b) \end{cases} \quad (3.21)$$

De onde se obtém:

$$\underline{T}^* = \underline{A}' (\underline{AA}')^{-1} \underline{F} \quad (3.22)$$

A matriz $\underline{A}' (\underline{AA}')^{-1}$ é chamada de pseudo-inversa, denotada por \underline{A}^+ .

A matriz Hessiana de $L(\underline{T}, \underline{\lambda})$ é semi-definida positiva, pois:

$$\underline{H} = \frac{\partial^2 L}{\partial \underline{T}^2} = 2 \cdot \underline{I} \quad (\underline{I} \text{ matriz identidade com } p+q \text{ colunas}) \quad (3.23)$$

Logo $\underline{T}^* = \underline{A}^+ \underline{F}$ é o ponto mínimo, solução do problema.

Etapla 2 – Análise das desigualdades e simplificação do problema inicial

Uma vez descoberta a solução ótima \underline{T}^* , ela deve ser comparada com cada uma das desigualdades, isto é, devem-se analisar as condições dos ângulos e forças máximos e mínimos dos propulsores. De acordo com a forma com que as desigualdades são desrespeitadas, modificamos a estrutura da matriz \underline{A} e vetores \underline{T} e \underline{F} , preparando-os para uma próxima iteração que começa pela otimização do problema com apenas restrição de igualdade.

Quando nenhuma das desigualdades é violada, tanto a condição de equilíbrio estático (restrição de igualdade) quanto o mínimo de energia gasto pelos propulsores (solução ótima) ocorrem em uma configuração do sistema de propulsão que respeita o limite operacional dos propulsores (domínio delimitado pelas desigualdades). Trata-se, portanto, do caso ideal que valida imediatamente a alocação de empuxo.

Por outro lado, quando alguma inequação é violada, a única afirmação possível de ser feita é que o mínimo de energia na propulsão, em termos absolutos, não pode acontecer dentro dos limites operacionais dos propulsores. Sobre a existência de uma condição de equilíbrio dentro de tais limites, nada se pode afirmar, já que uma outra configuração dos propulsores pode obedecer a essa condição, mesmo que haja um maior consumo de energia. O sistema precisa então ser reavaliado numa próxima iteração. Para tanto, a estratégia é fixar no limite máximo (ou mínimo) de saturação os parâmetros daqueles propulsores que tiveram seus limites violados pela solução \underline{T}^* .

Assim, se, de acordo com a solução ótima, a força alocada em um propulsor fixo F_j for superior a um máximo $T_{Fj_{\max}}$, estabeleceremos que seu valor de saturação T_{Fj} será igual a $T_{Fj_{\max}}$ para a próxima iteração. Do mesmo modo, se o ângulo determinado para um propulsor azimutal A_i for inferior a $\alpha_{Ai_{\min}}$, fixaremos o seu valor $\alpha_{A_i} = \alpha_{Ai_{\min}}$.

Teremos então os seguintes casos:

- i) Os propulsores azimutais que tiverem sua rotação bloqueada pela saturação de seu ângulo α_{A_i} , passarão a ser tratados como propulsores fixos nas próximas iterações, mantendo apenas um grau de liberdade - a intensidade da força a ser alocada. Logo, as configurações da matriz $\underline{\underline{A}}$ e vetor \underline{T} serão alteradas na nova resolução do problema (3.20).
- ii) O propulsor fixo que tiver a intensidade da força de empuxo saturada perderá todos seus graus de liberdade (incógnitas). Neste caso, além das mudanças em $\underline{\underline{A}}$ e \underline{T} (supressão de linhas, colunas e elementos referentes a essa força) obteremos também um novo vetor de força estática \underline{F} resultante das forças de agentes ambientais descontada da força alocada no propulsor fixo saturado.
- iii) Seguindo a mesma lógica, o propulsor azimutal que tiver apenas a força de empuxo saturada deveria ser tratado na próxima iteração como um propulsor azimutal com força alocada fixa, sendo a rotação seu único grau de liberdade. No entanto, como o problema (3.20) foi todo definido em coordenadas cartesianas, seria necessário adicionar uma nova condição não linear $T_{AXi}^2 + T_{AYi}^2 = T_{Ai_{\text{saturação}}}^2$, que complicaria a resolução. Assim, nesse caso, além da força na condição de saturação fixaremos também seu ângulo de atuação na posição determinada na última iteração. Assim como no caso ii), as linhas, colunas e elementos de $\underline{\underline{A}}$ e \underline{T} referentes à esse propulsor serão eliminados, enquanto o vetor \underline{F} terá seu valor corrigido pela força de saturação no ângulo fixado.

A rotina termina se em uma das iterações, todas as desigualdades forem respeitadas – alocação de empuxo possível – ou se o número de graus de liberdade for reduzido a menos de três – alocação não possível.

O sub-sistema de controle consegue neutralizar bem os distúrbios das forças ambientais constantes no sistema - descritas na seção 3.2. - desde que a alocação do empuxo nos propulsores seja possível. Ou seja, a resultante das forças estáticas não deve superar as limitações funcionais dos propulsores. As componentes de alta frequência das forças de deriva (primeira ordem), apesar de não serem contidas pelo controlador - sendo elas filtradas - e terem maior amplitude, também não afetam a manutenção do *set-point* do navio pois geram movimentos com média nula. Entretanto, as componentes de baixa frequência das forças da onda - as forças de deriva lenta - podem excitar frequências naturais dos sistemas oceânicos amarrados, induzindo elevados movimentos no plano horizontal. Este efeito, por sua vez, não consegue ser bem neutralizado pelo Sistema DP.

Como no método de avaliação da alocação de empuxo explicado na seção 3.3 apenas forças estáticas foram consideradas, uma metodologia auxiliar deve ser formulada para se estimar o impacto das forças não constantes no sistema de controle. No entanto, essa metodologia deve ser simples e facilmente implementável, lembrando que um dos objetivos do presente trabalho é criar um programa de baixo tempo de processamento, menor que aquele do DYNASIM.

3.4.1 Metodologia desenvolvida

A solução encontrada baseia-se na observação, em domínio frequencial, do impacto da força de deriva lenta na resposta do sistema massa do navio, no âmbito da malha de controle do Sistema DP. A partir dessa observação, almeja-se obter o desvio padrão da resposta temporal do sistema. Quanto maior for o desvio padrão obtido, maior será a chance da embarcação se distanciar do *set-point*, aumentando o risco de ela entrar em uma zona de risco para a operação de alívio.

As seguintes hipóteses serão consideradas:

- i) O sinal de entrada da malha será nulo para os três movimentos *surge*, *sway* e *yaw*, representando a posição de referência do navio (*set-point*);
- ii) A força de deriva lenta será isolada como a única perturbação existente no sistema em malha fechada, pois sabemos que os esforços constantes (correnteza, vento e deriva média) são compensados pelo termo integral do controlador, e as forças de primeira ordem devidas à onda não são controladas pelo Sistema DP;

- iii) O controlador será simplificado para o tipo PD ao invés de PID, pois o corretor integrativo não altera o desvio padrão do movimento, apenas o *offset*;
- iv) Uma função de atraso de primeira ordem será usado para representar o atraso da resposta dos propulsores;
- v) Os filtros serão desconsiderados para simplificar a análise

Assumindo essas hipóteses, para cada componente do movimento do navio, a malha ilustrada na Figura 3-10 pode ser simplificada pela malha da Figura 3-11.

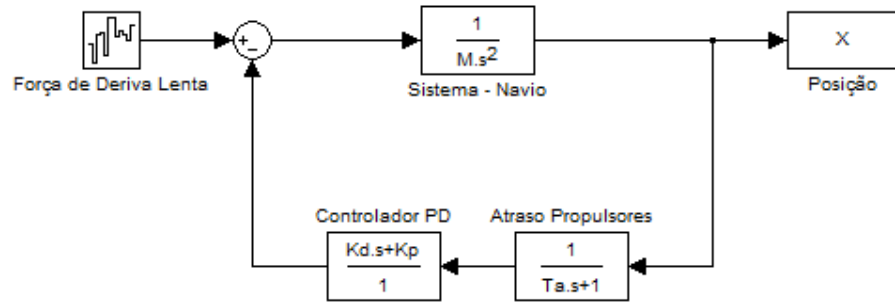


Figura 3-11 Diagrama de blocos simplificado para cada movimento (*surge*, *sway* e *yaw*)

Nota-se que embora a deriva lenta interfira no sistema na forma de perturbação, ela pode ser entendida no modelo simplificado como o único sinal de entrada na malha (*input*), já que a posição relativa comandada (*set-point*) deverá ser nula durante a operação de alívio.

Para cada um dos movimentos de *surge*, *sway* e *yaw* (índices 1, 2 e 6), seja M_j o elemento da matriz de massa do navio (ou matriz de inércia para o *yaw*), K_{p_j} o coeficiente proporcional, K_{d_j} o coeficiente derivativo de um controlador PD e T_{a_j} o coeficiente de atraso dos propulsores, obtemos a seguinte função de transferência $H_j(\omega)$ do sistema simplificado no domínio freqüencial.

$$H_j(\omega) = \frac{1 + j\omega T_{a_j}}{(K_{p_j} - \omega^2 M_j) + j(\omega K_{d_j} - \omega^3 M_j T_{a_j})} \quad j=1,2 \text{ ou } 6 \quad (3.24)$$

Adicionalmente, discutiu-se na seção 3.2.3 que o espectro de potência da força de deriva lenta $S_{jDL}(\omega)$ pode ser aproximado ao espectro de um ruído branco (amplitude constante), aplicado a uma janela retangular de frequências entre 0 e $0,2\omega_0$ (ω_0 a frequência de pico do espectro de onda). A amplitude S_{jDL} desse espectro é conhecida pela equação (3.6).

Assim, uma vez definido o espectro de potência do ruído branco, pode-se determinar a resposta do sistema pela relação:

$$S_{jX}(\omega) = |H_j(\omega)|^2 \cdot S_{jDL}(\omega) \quad j=1,2 \text{ ou } 6 \quad (3.25)$$

onde $S_{jX}(\omega)$ é o espectro de potência da resposta do sistema.

Assumindo-se que a resposta temporal do sistema seja uma série i) estocástica, ii) gaussiana e iii) de esperança nula, teremos as hipóteses necessárias para satisfazer a relação (3.26, segundo estudos de Perez (2005).

$$\sigma^2(X_j(t)) = E(X_j^2(t)) = \int_0^\infty S_{jX}(\omega) d\omega \quad j=1,2 \text{ ou } 6 \quad (3.26)$$

onde X_1 , X_2 e X_6 são respectivamente os movimentos de *surge*, *sway* e *yaw* relativos ao *set-point*, $\sigma^2(f(t))$ é a variância de uma função genérica f no tempo e $E(f(t))$ é a esperança de uma função genérica f no tempo.

A equação (3.27 discretiza a relação (3.26).

$$\sigma^2(X_j(t)) = \sum_{\omega=0}^{0,2\omega_0} |H_j(\omega)|^2 S_{jDL} \Delta\omega \quad j=1,2 \text{ ou } 6 \quad (3.27)$$

Logo, poderemos obter a variância da resposta do sistema frente à atuação da força de deriva por métodos numéricos algébricos e de fácil implementação. O desvio padrão da resposta será a raiz quadrada da variância.

Uma vez obtida a variância σ^2 , poderemos admitir que a resposta temporal seguirá uma distribuição normal $N(0, \sigma^2)$. Assim, podemos estimar um intervalo limite $[-3\sigma; +3\sigma]$, correspondente a uma probabilidade de 99,87% dos casos, fora do qual dificilmente o movimento da embarcação com sistema DP ultrapassaria. Se esse

intervalo for muito grande, deveremos assumir que as forças de deriva lenta tornam inviável a operação de alívio.

Outro parâmetro possível de ser estimado para avaliar o impacto das forças não constantes é o desvio padrão do passeio do navio X_G . Este, por sua vez, pode ser definido como a composição de seus movimentos de *surge* X_1 e *sway* X_2 no centro geométrico do navio, conforme a equação (3.28). Despreza-se portanto a rotação em *yaw* X_6 .

$$X_G = \sqrt{X_1^2 + X_2^2} \quad (3.28)$$

Assumindo-se que a tanto a esperança dos movimentos *surge* e *sway* quanto a esperança do passeio $E(X_G)$ seja nula ou muito próxima de zero, obtemos a variância e o desvio padrão do passeio a partir das variâncias de cada componente do movimento:

$$\sigma^2(X_G) = \sigma^2(X_1) + \sigma^2(X_2) \quad (3.29)$$

$$\sigma(X_G) = \sqrt{\sigma^2(X_1) + \sigma^2(X_2)} \quad (3.30)$$

Enfim, analogamente aos cálculos de desvio padrão do passeio do navio, podemos estimar também o desvio padrão do movimento da proa do navio X_{Proa} , o qual varia também conforme a rotação *yaw*. Esta pode ser definido pela equação (3.31).

$$X_{Proa} = \sqrt{X_1^2 + (X_2 + \frac{L}{2} \cdot X_6)^2} \quad (3.31)$$

onde L é o comprimento do navio.

Já a variância e o desvio padrão poderão ser calculados por:

$$\sigma^2(X_{Proa}) = \sigma^2(X_1) + \sigma^2(X_2) + \frac{L^2}{4} \sigma^2(X_6) \quad (3.32)$$

$$\sigma(X_{Proa}) = \sqrt{\sigma^2(X_1) + \sigma^2(X_2) + \frac{L^2}{4} \sigma^2(X_6)} \quad (3.33)$$

assumindo-se também que a esperança do movimento da proa $E(X_{Proa})$ será nula.

3.4.2 Verificação da metodologia desenvolvida

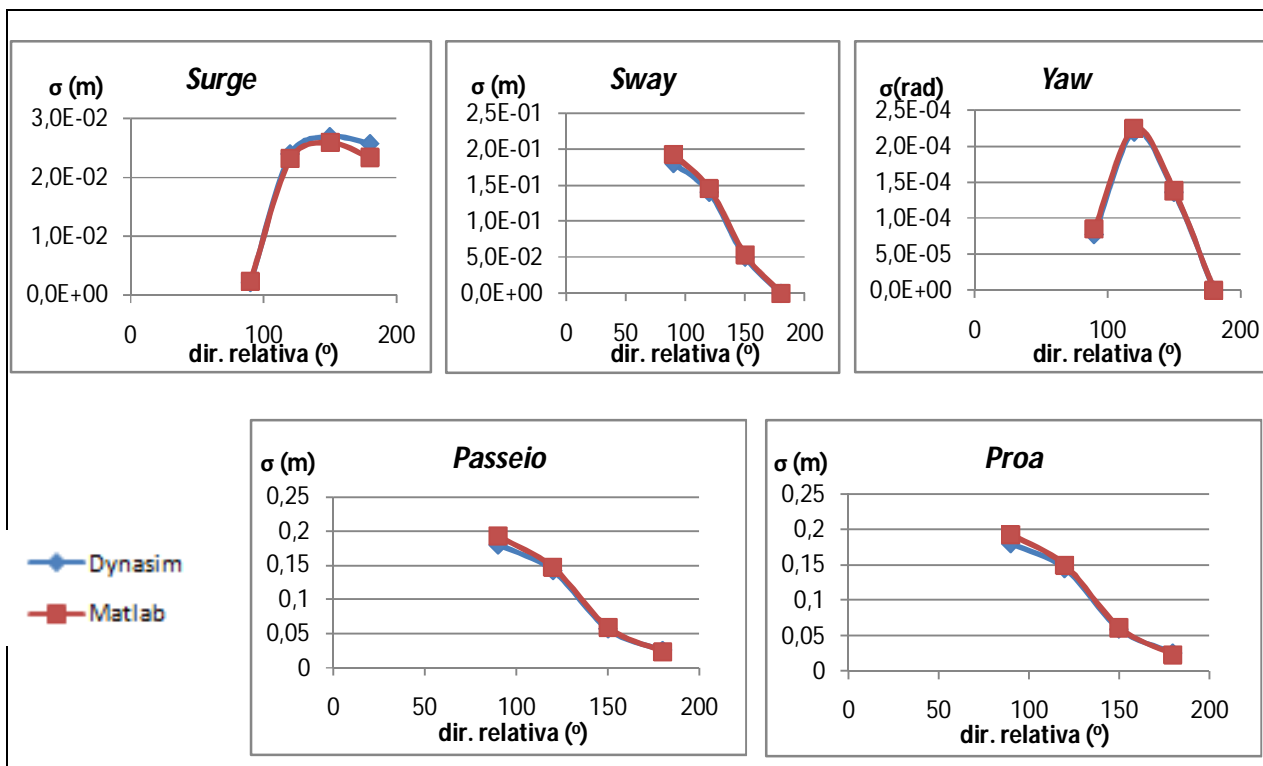
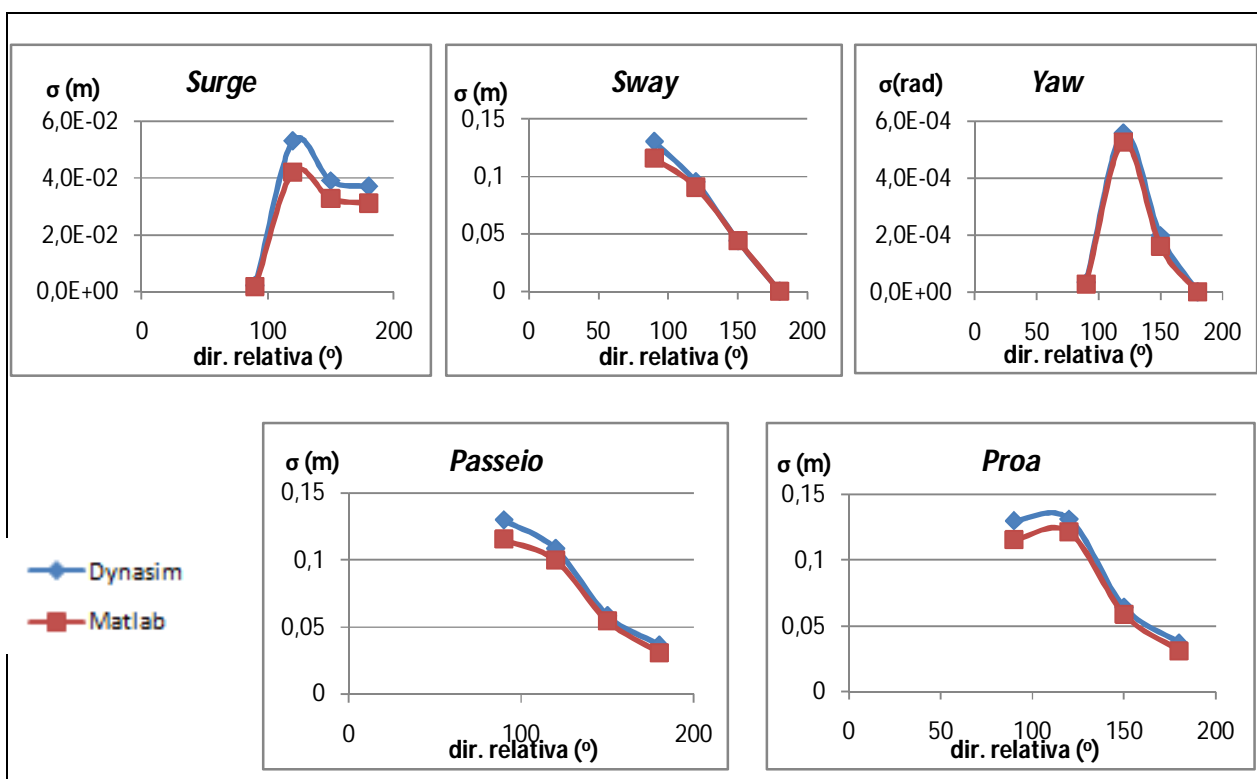
A metodologia explicada em 3.4.1 foi testada usando o programa Matlab antes da implementação final no programa. Para os testes foram fixados os seguintes parâmetros:

- navio simulado: Stavanger Vazio ($L = 262$ m)
- elementos da matriz de massa utilizados (em *surge*, *sway* e *yaw*) :
 $M_1 = 83.000t$, $M_2 = 114.000t$, $M_6 = 713.000.000t \cdot m^2$;
- coeficientes proporcionais do controlador utilizados (em *surge*, *sway* e *yaw*) :
 $K_{p1} = 1,50 \cdot e5 \text{ N/m}$, $K_{p2} = 2,10 \cdot e5 \text{ N/m}$, $K_{p6} = 1,22 \cdot e8 \text{ N/m}$;
- coeficientes derivativos do controlador utilizados (em *surge*, *sway* e *yaw*) :
 $K_{D1} = 9,18 \cdot e6 \text{ Ns/m}$, $K_{D2} = 1,26 \cdot e7 \text{ Ns/m}$, $K_{D6} = 6,70 \cdot e10 \text{ Ns/m}$;
- atraso dos propulsores: $T_{a1} = 12s$ e $T_{a2} = T_{a6} = 2s$

O atraso para os movimentos de surge é maior que os outros, devido a um maior tempo de resposta do propulsor principal para ajustar sua rotação e conseqüentemente, o empuxo calculado leva mais tempo para ser nele alocado.

Para a verificação dos resultados obtidos no teste, comparamo-lo com uma simulação dinâmica realizada no programa DYNASIM. A fim de se obter uma comparação mais fidedigna com o teste, eliminamos no DYNASIM os filtros e as componentes de primeira ordem da onda.

Tanto na simulação quanto no teste no Matlab foi suposta uma condição ambiental em que a única força externa é uma onda de períodos de pico do espectro e alturas significativas variáveis, incidindo no navio em ângulos relativos diferentes.

Gráfico 3-1 Resultados de desvio padrão dos movimentos em m ($T_p=7s$; $H_s=1m$)Gráfico 3-2 Resultados de desvio padrão dos movimentos em m ($T_p=10s$; $H_s=1m$)

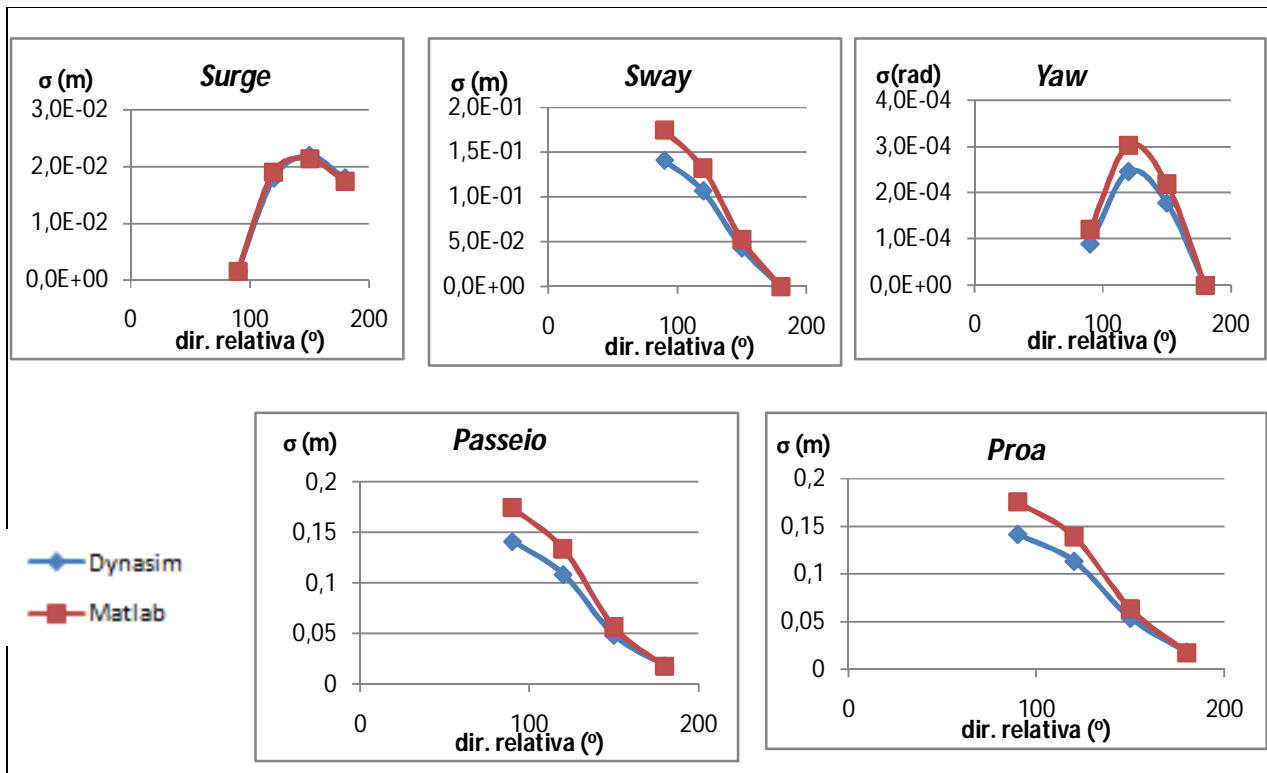


Gráfico 3-3 Resultados de desvio padrão dos movimentos em m ($T_p=5s$; $H_s=1m$)

A partir dos gráficos Gráfico 3-1, Gráfico 3-2 e Gráfico 3-3, pode-se perceber que os desvios-padrões obtidos com a metodologia desenvolvida nesse trabalho com o Matlab se aproximam bastante daqueles simulados no DYNASIM em uma análise dinâmica e temporal. Portanto, os resultados validaram a metodologia elaborada para estudar os efeitos das componentes de segunda ordem da força de onda no movimento do navio.

Todavia, para que seja feita uma avaliação mais completa do efeito das forças não constantes de modo geral, deve-se considerar os seguintes aspectos adicionais:

- atraso decorrente do uso de filtros;
- efeito das forças de primeira ordem;
- saturação dos propulsores;
- efeito das rajadas de vento.

Tais aspectos não foram estudados no presente Trabalho de Formatura, ficando aberta a proposta para continuação do estudo. (*questão abordada na seção 7*)

3.5 Cálculo de *downtime*

Para cada condição ambiental, definimos se o navio é capaz de se manter estável. Cada condição ambiental tem uma probabilidade de ocorrência (proveniente da forma como são adquiridos os dados de condição de onda).

A partir da informação da viabilidade de operação e da probabilidade de ocorrência da condição ambiental calculamos o *downtime*, a frequência com que o navio não irá conseguir realizar ou terá que interromper a operação de alívio num período de tempo (alguns anos, por exemplo), numa determinada bacia.

Dados um navio, sua condição de carga (cheio ou vazio), e uma condição ambiental com informações do vento, correnteza e onda, usamos três critérios sucessivos para decidir se a operação é viável ou não.

3.5.1 Condições extremas

Caso um ou mais agentes ambientais ultrapassem um limite previamente estipulado, a condição ambiental será descartada, ou seja, será contada como um caso inviável.

Esse critério se justifica pelo surgimento de forças fora do plano (força no eixo Z e momento nos eixos X e Y) com amplitude suficiente para tornar imprecisas as hipóteses dos modelos de forças no plano adotadas neste trabalho.

Os limites máximos adotados são:

- a) Vento: velocidade de 40 nós ou aproximadamente 20,58 m/s
- b) Onda: altura significativa de 3,5 m

Como pode haver duas componentes de onda independentes, para a avaliação deste critério é utilizada a altura total calculada pela raiz da soma dos quadrados.

3.5.2 Falha na alocação de empuxo

Se no final do processo iterativo seguindo a estratégia descrita no item 3.3, as equações de equilíbrio não são satisfeitas com uma margem de erro estipulada, considera-se que os propulsores não são capazes manter o equilíbrio estático do navio naquela condição ambiental.

O erro admissível adotado em cada eixo, diferença entre a resultante das forças ambientais e a resultante das forças dos propulsores projetadas no respectivo eixo, é de 10 N.

3.5.3 Curso em torno do *set-point* muito grande

Usando a formulação do item 3.4, obtemos o desvio padrão do movimento do aliviador em torno da posição de equilíbrio.

Este parâmetro estatístico é comparado com um máximo tolerável, constituindo o último critério para decretar uma condição ambiental como inviável para a operação.

4 Implementação

Todos os modelos e algoritmos descritos neste trabalho foram implementados em um programa de computador feito na linguagem C++. Esse programa compreende os módulos de manipulação de dados; cálculo de forças ambientais; alocação de empuxo; análise de sensibilidade, estimativa de *downtime*.

Cada um desses módulos pode ser usado independentemente ou de forma conjunta num estudo de simulação completo da operação de alívio de um navio em uma bacia ao longo de alguns anos.

A descrição de cada um desses módulos é feita no item 4.1, a explicação da plataforma de desenvolvimento do programa no 4.2 e finalmente no 4.3 são dados detalhes de como ficou a arquitetura do *software* e do banco de dados.

4.1 Funcionamento dos módulos

4.1.1 Manipulação de dados

Este módulo é responsável pela interação entre o usuário e o banco de dados para criação ou edição de dados de navio e propulsores, importação e exportação de condições ambientais.

4.1.2 Cálculo de forças ambientais

A partir da escolha de um navio, um estado (condição de operação vazio ou cheio), um ângulo de aproamento e uma condição ambiental, calcula as forças médias de vento, correnteza e onda agindo sobre o navio. Também compõe essas forças nas resultantes no eixo X e eixo Y e momento no eixo Z.

4.1.3 Alocação de empuxo

A partir das solicitações dos agentes ambientais calculadas no módulo de cálculo de forças, tenta alocar o empuxo nos propulsores do navio de modo a manter o equilíbrio estático sem desrespeitar as restrições de operação de cada propulsor como explicado em 3.3.2.

Ao final, se a alocação foi bem sucedida, temos a força, e ângulo de atuação no caso de propulsores azimutais, para cada propulsor. Caso a alocação de empuxo não

seja possível, é guardada apenas a informação de que o navio não suporta a solicitação daquela condição ambiental.

4.1.4 Análise de sensibilidade

Usa algumas funções emprestadas do módulo de cálculo de forças (como o espectro da onda) para obter o valor da deriva lenta agindo sobre um navio escolhido. Esse valor é usado como parâmetro de entrada (potência do ruído branco) para o cálculo analítico da resposta do sistema no espaço das frequências conforme descrito em 3.2.3.2.

A saída deste módulo pode ser o curso máximo do movimento do navio em cada eixo ou o curso máximo do movimento composto a partir do centro do navio ou da proa.

4.1.5 Estimativa de downtime

A partir da escolha de um navio e seu estado, e de uma tabela de condições ambientais com a probabilidade de ocorrência de cada uma, este módulo chama o cálculo de força e a alocação de empuxo (e opcionalmente também a análise de sensibilidade) para cada registro da tabela de condições ambientais gravando o resultado da alocação, se foi bem sucedida ou não. Com isso é possível calcular facilmente o downtime.

4.2 Escolha da plataforma de desenvolvimento

A plataforma escolhida para desenvolvimento do programa deste projeto foi:

- C++ como linguagem de programação;
- Microsoft Visual Studio 2008 para o projeto da arquitetura orientada a objetos e projeto do banco de dados;
- Nokia Qt SDK 2009 para interface do usuário gráfica;
- SQLite3 para o banco de dados;
- Subversion (SVN) para o controle de versões dos arquivos de código ao longo do projeto.

Tal escolha se deve ao legado de *softwares* científicos baseados em C++ e pelo desempenho em aplicações que exigem alto processamento como em *softwares* de simulação.

Foi também avaliada a possibilidade de adotar o Matlab como plataforma de desenvolvimento mas foi descartada porque isso exigiria que um computador tivesse o Matlab instalado para rodar a aplicação desenvolvida neste projeto.

Uma terceira alternativa cogitada, por estar crescentemente sendo aplicada no meio acadêmico é a linguagem Python. Contudo, para evitar os riscos do projeto em adotar uma plataforma que não se sabe se atende bem os requisitos e para antecipar o início da implementação, esta alternativa também foi abandonada.

A escolha do SQLite3 como banco de dados para armazenar o repositório do programa foi feita porque ele dispensa um servidor e é facilmente embarcável numa aplicação desenvolvida em C.

A escolha do Qt para criação da interface do usuário foi feita após descartar o uso da plataforma .NET, incluída no próprio Visual Studio, pois ela se mostrou incompatível com a classe que já havia sido criada para manipulação do banco de dados. Além disso, o Qt possui uma vasta documentação e exemplos práticos e simples de uso de seus vários recursos.

O servidor de controle de versões SVN foi usado para permitir um acesso fácil e seguro ao código fonte desenvolvido ao longo do projeto pelos integrantes do mesmo de qualquer computador com internet.

4.3 Detalhes da implementação

Esta seção, dividida em 3 partes, explica em maiores detalhes a estrutura do programa, suas classes e funções. Todos os termos destacados em negrito são nomes de classes.

4.3.1 Interface do usuário gráfica

Inicialmente todo o programa foi desenvolvido como um aplicativo de terminal de comandos, sem interface de usuário; alterações de parâmetros nos testes eram feitas diretamente nas linhas de código do programa ou no banco de dados.

A criação da interface do usuário provocou mudanças no código já existente, mas boa parte da arquitetura foi preservada, resultando no final em uma interface de usuário montada sobre a estrutura que faz todos os cálculos.

Nessa interface, o usuário escolhe entre três opções de análises e uma forma fácil de alterar os modelos de navio, tabela de coeficientes de arrasto, propulsores e controlador, como pode ser observado na Figura 4-1. Um menu superior está sempre visível e permite uma rápida navegação entre essas 4 opções e a tela inicial.

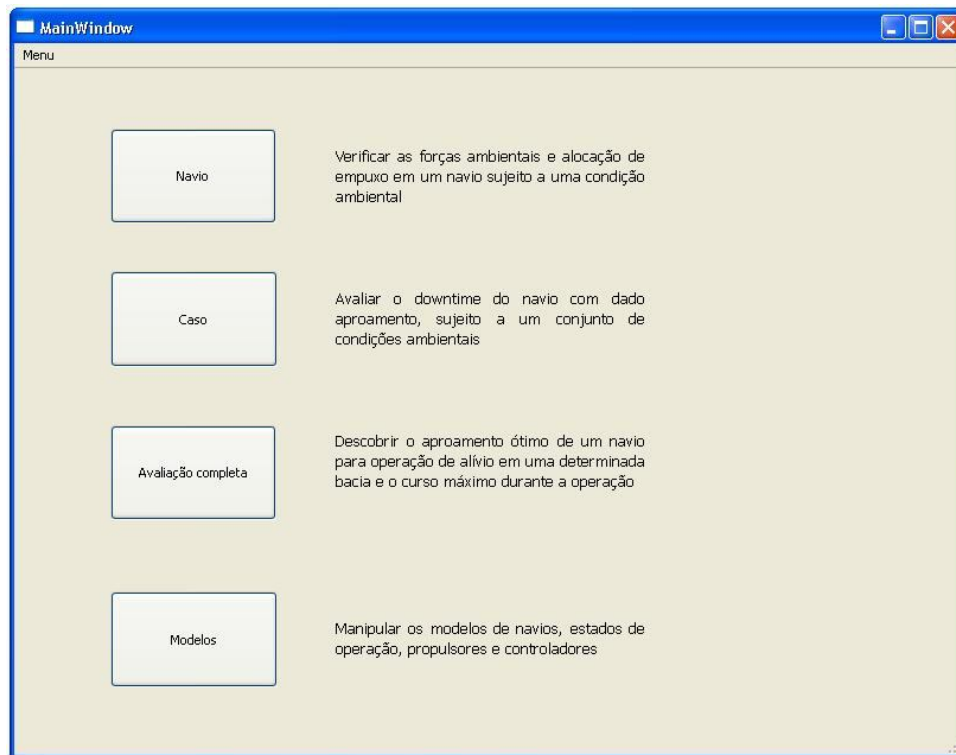


Figura 4-1 Tela inicial

No canto inferior, existe uma barra de status que exibe mensagens quando alguma operação é concluída ou fornece alguma informação sobre a próxima etapa de operação.

Todas as análises geram um arquivo texto com os resultados.

4.3.1.1 Modelos

Esta é a parte do programa por onde o usuário cria e edita os modelos de navios. Está subdividida em quatro abas: *Navio*, *Estado*, *Propulsores*, *Controlador*.

Quando uma linha é escolhida na aba *Navio*, a escolha é gravada internamente, e ao mudar de aba, a tabela correspondente é filtrada para só exibir os registros correspondentes ao navio escolhido.

Para alterar qualquer dado, basta dar um duplo clique em cima da célula que ela é aberta para edição. Feito isto, é necessário clicar no botão *Confirmar* para que essas alterações sejam passadas para o banco de dados. Se as alterações ainda não forem confirmadas, e se deseja voltar atrás isso é possível pelo botão *Restaurar*.

Os botões *Novo* e *Deletar* agem como esperado. O primeiro acrescenta uma nova linha à tabela, restando preencher os valores de cada campo; o segundo descarta a linha selecionada. Para ambas as operações, ainda é preciso confirmar para que essas modificações sejam aplicadas ao banco de dados.

Outra possibilidade nesta tela é a de importar arquivos texto contendo tabela de coeficientes de arrasto (para vento, correnteza e deriva), ou todos os propulsores de um navio, ou ainda os parâmetros do seu controlador.

As tabelas de coeficientes podem ser reaproveitadas, ou seja, é possível ter vários modelos de navios que compartilham a mesma tabela de coeficientes. Na aba *Estado*, ao dar duplo clique em qualquer dos campos começados por *Coefs*, ao invés de abrir o campo para edição livre, é mostrada a lista das tabelas de coeficientes que já foram carregadas no banco de dados.

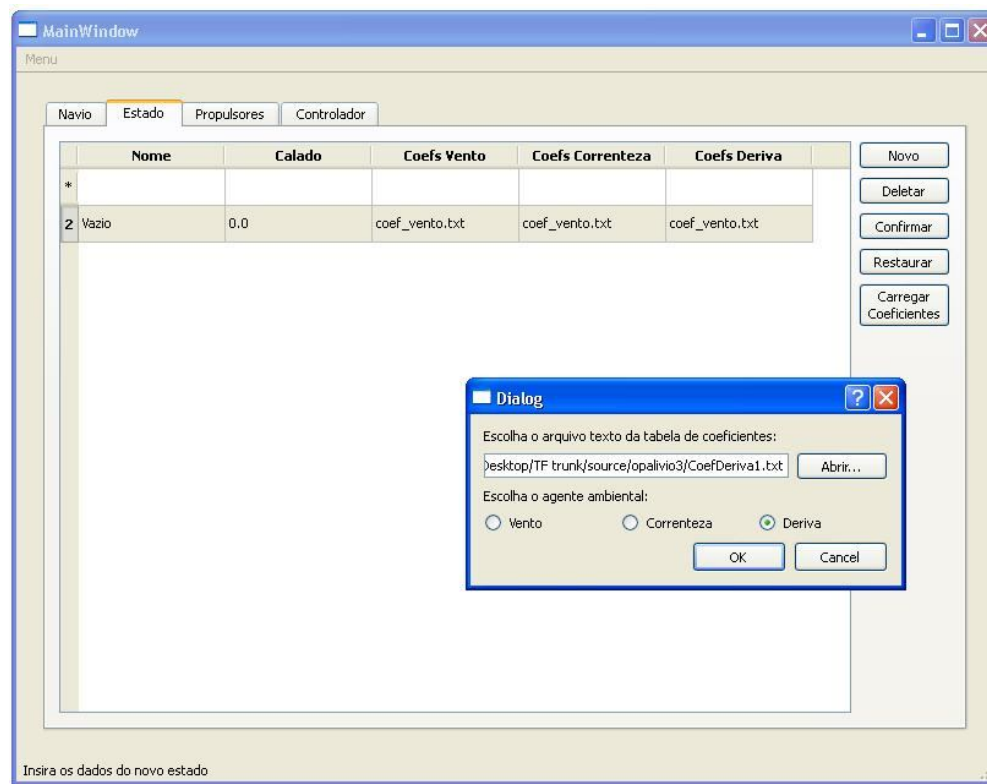


Figura 4-2 Tela Modelos

4.3.1.2 Navio

A análise mais simples consiste em estudar a resposta de um navio a uma condição ambiental. Isto é feito por esta tela.

O usuário escolhe o modelo do navio, que já deve ter sido preparado usando as funcionalidades descritas na seção 4.3.1.1, cria a condição ambiental e altera as opções segundo o que lhe interessa estudar.

Uma condição ambiental é composta por uma componente de vento, uma de correnteza, e duas componentes de onda. Para as componentes de vento e correnteza basta definir a velocidade do campo e a direção em relação ao navio (neste caso suposto a 0 graus, proa apontando pro Norte). Não necessariamente precisa haver todas as componentes de todos os agentes ambientais, pode-se ativar apenas os desejados.

As opções para as análises dizem respeito a quais informações são retornadas e o que levar em conta nos cálculos.

Especificamente para a análise de navio, as opções são (podem ser ativadas ou desativadas):

- Opções do módulo de cálculo de forças:
 - Considerar *wave drift damping*: aplicar a correção do coeficiente de deriva devido à interação onda-corrente no cálculo da força de onda.
- Opções do módulo de alocação de empuxo:
 - Adotar critério do curso máximo: realizar estimativa do curso máximo do navio e considerar que o equilíbrio não foi atingido a partir de determinado valor.
- Traçar área segura: refazer a análise para vários ângulos de aproamento a fim de descobrir os limites entre os quais é possível fazer a alocação de empuxo. Tomar cuidado que, nesse caso, os ângulos informados de direção dos agentes ambientais não serão mais relativos ao navio, e sim absolutos (0 graus implica numa componente de força atuando do Norte

pro Sul, conforme convenção explicada em 3.1.1). Um exemplo do traçado que essa opção da análise de navio gera é exibido em 5.2.

- Variáveis de saída:
 - Forças ambientais
 - Empuxo em cada propulsor
 - Curso máximo
 - Alocação possível ou não

Esta tela é mostrada na Figura 4-3.

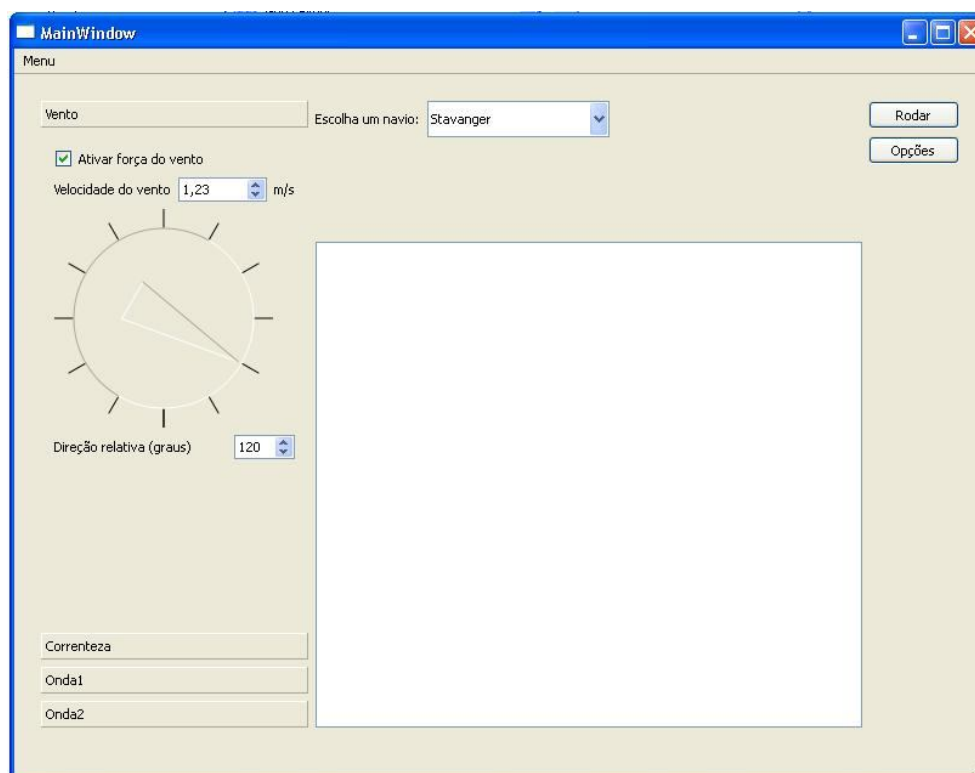


Figura 4-3 Tela Navio

4.3.1.3 Caso

O segundo tipo de análise é a análise de caso. O objetivo desta é saber como um navio se comporta ao longo do ano realizando operação de alívio numa determinada bacia.

Além da escolha do modelo de navio, o usuário fornece uma tabela de condições ambientais.

As opções disponíveis para esta análise são em parte iguais à da análise de navio (opções do módulo de cálculo de forças e de alocação de empuxo). Os parâmetros novos desta análise é:

- Exibir resultado de cada condição ambiental.

Esta tela pode ser vista na Figura 4-4.

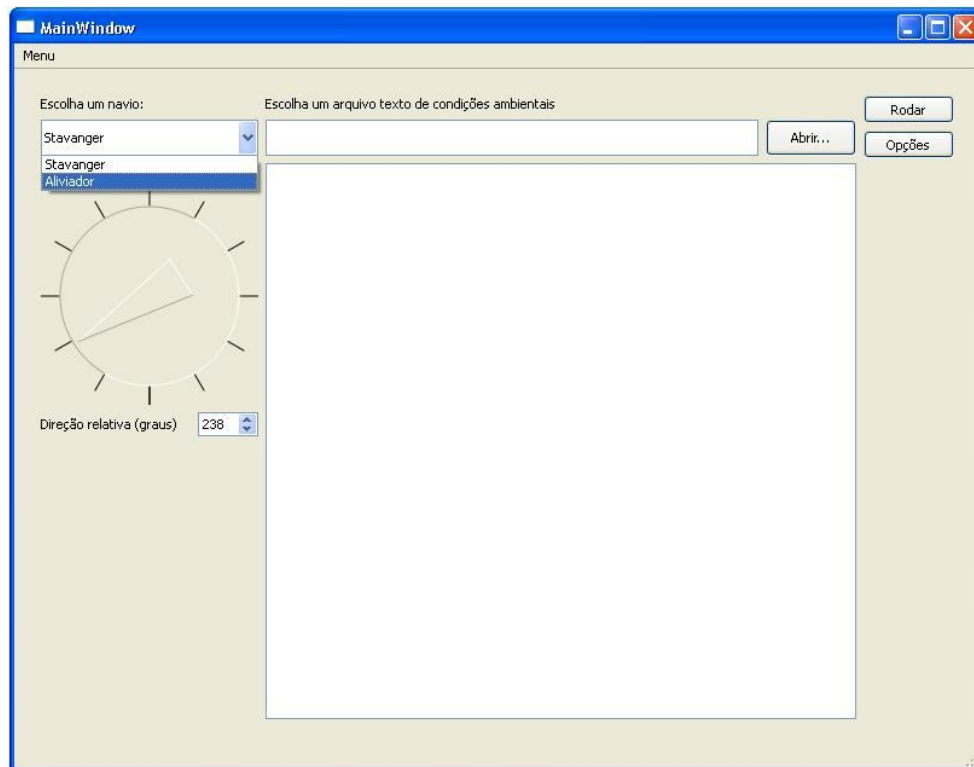


Figura 4-4 Tela Caso

4.3.1.4 Análise Completa

A diferença entre a análise completa e a análise de caso é que nesta não é escolhido o aproamento do navio, portanto é feita a análise de vários casos a fim de poder traçar a curva do *Downtime* do navio para todos os ângulos de aproamento fisicamente possíveis (existem as restrições de posição da plataforma de petróleo).

Nas opções é possível determinar os ângulos de aproamento extremos e a quantidade de pontos desejados para o estudo.

A Figura 4-5 mostra como é esta tela, com destaque para a caixa de diálogo por onde é escolhido o arquivo de condições ambientais.

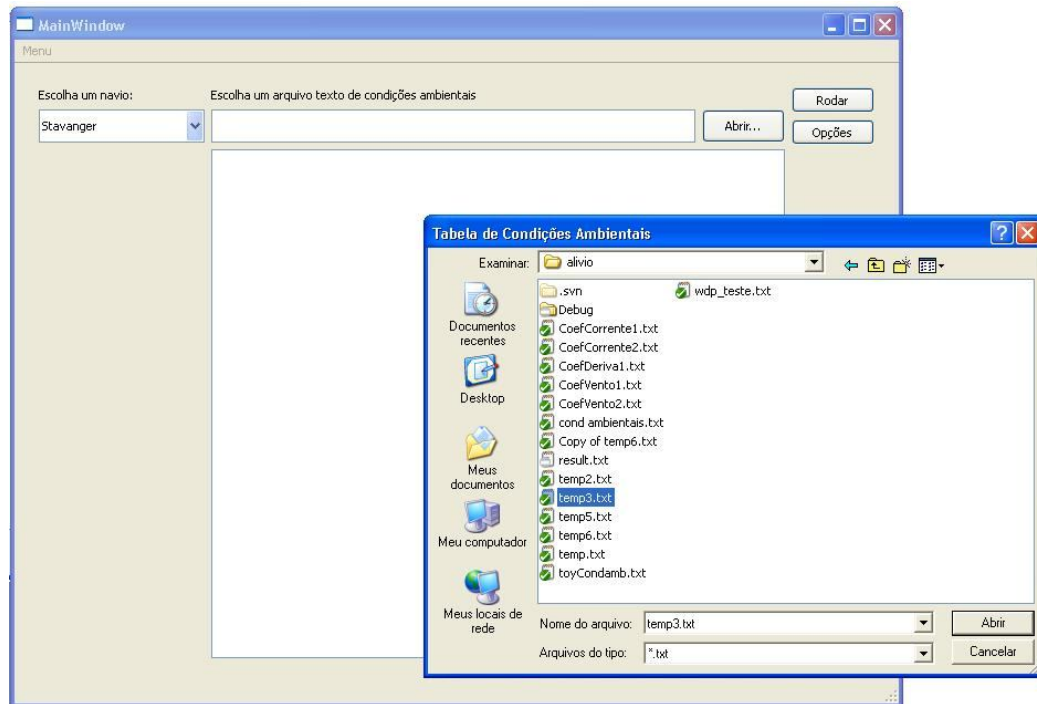


Figura 4-5 Tela Análise Completa

4.3.2 Sistema

A arquitetura dos módulos de cálculo é descrita a seguir. As classes estão destacadas em **negrito**.

Sistema é o conjunto de todas as entidades que interagem entre si e relevantes ao nosso interesse de estudo. No caso, ele é composto por situações e um **navio**. Uma **situação** é este navio em uma determinada condição de operação (estado vazio ou cheio e aproamento) sujeito a uma condição ambiental.

Uma **condição ambiental** é composta pela **configuração** da densidade do ar e da água e pelas condições de vento, correnteza e onda.

A condição de **vento** e de **correnteza** estão determinados pela sua direção de incidência e densidade de energia, a qual é calculada a partir da velocidade e densidade do fluido.

A condição de **onda** é definida por duas ondas unidirecionais, cada uma com uma direção de incidência e uma função do espectro pela frequência, esta é obtida a partir do período de pico e altura significativa da onda.

4.3.3 Banco de dados

O banco de dados consiste em 11 tabelas relacionadas segundo o diagrama Entidade Relação da Figura 4-6. O acesso a esse banco de dados é feito por intermédio de uma classe de interface (**interfaceBD**) que se procura encapsular o banco de dados com métodos para criar, deletar, atualizar e recuperar dados das tabelas ou diretamente pela interface gráfica usando as classes prontas do Qt. As demais classes que precisam interagir com o banco de dados o fazem por meio dos métodos especializados da **interfaceBD**.

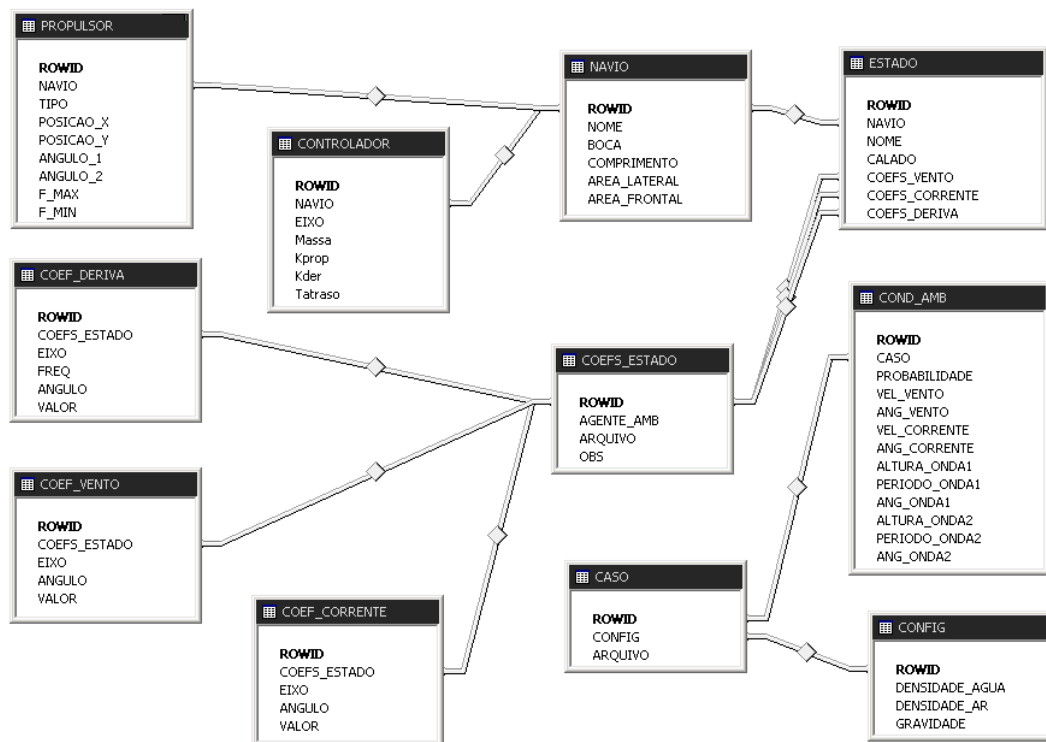


Figura 4-6 Diagrama Entidade Relação do Banco de Dados

O diagrama de classes ilustra todas as classes, seus atributos e métodos e as relações de herança. Ela está dividida em duas partes. A Figura 4-7 trata das classes que modelam o sistema em orientação a objeto. E a Figura 4-8 detalha a modelagem do navio e da condição ambiental.

A interação entre a interface gráfica e o sistema é feita por meio da classe **controller**, que chama os métodos da camada de sistema e gera os arquivos texto.

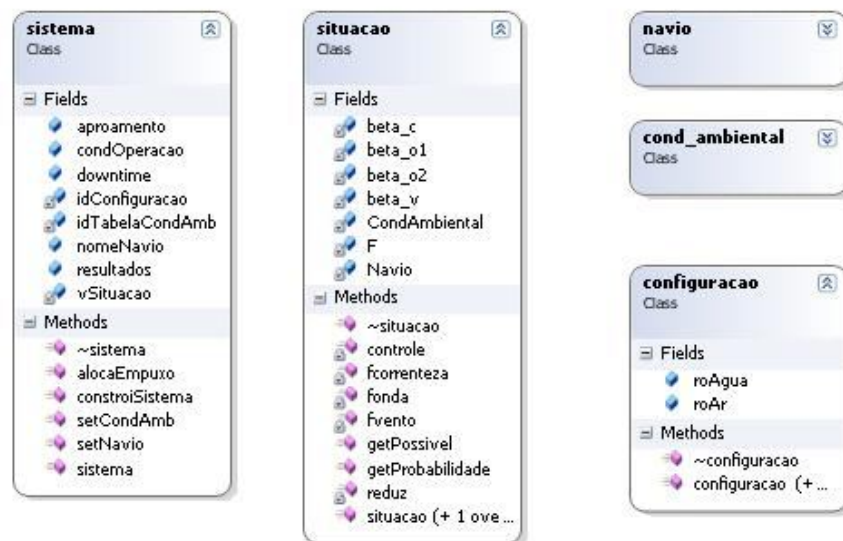


Figura 4-7 Diagrama de Classes – Sistema

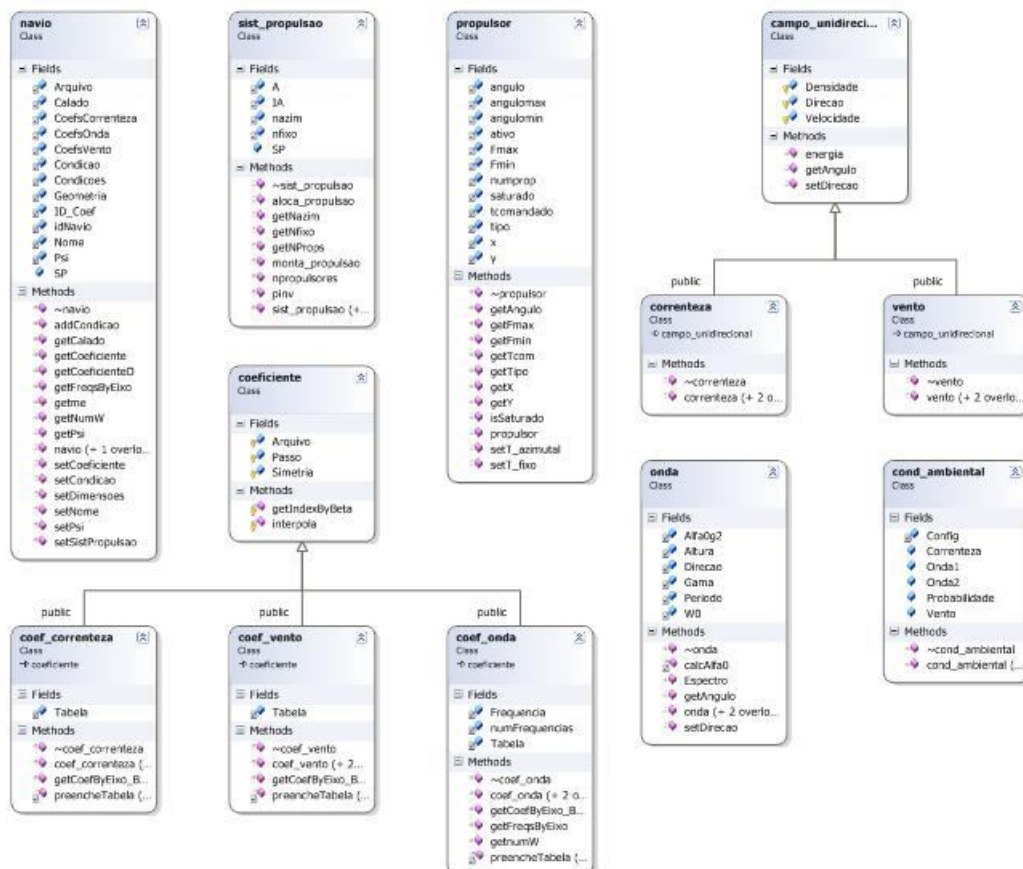


Figura 4-8 Diagrama de Classes - Navio e Cond. Ambiental

5 Resultado

Após o desenvolvimento da estrutura base do programa em C++ e das funções para acessar arquivos texto e banco de dados, fizemos alguns testes para avaliar o desempenho do programa e a confiabilidade dos números gerados pelos modelos matemáticos baseados na análise estática.

5.1 Teste de análise completa

O teste consistiu em rodar o programa com um navio aliviador vazio sujeito a 3650 condições ambientais da Bacia de Campos e avaliar o downtime nesse período. Tais condições foram medidas pela Petrobras entre 1 de junho de 1984 e 31 de maio de 1985 (365 dias corridos).

A simulação foi feita definindo 7 direções de aproamento (ângulo ψ) diferentes: 180°, 190°, 200°, 210°, 220°, 230°, 240°.

As dimensões do navio e as características dos propulsores modelados estão mostradas nas Tabela 5-1 e Tabela 5-2 .

Tabela 5-1 Dimensões do navio aliviador no teste

Comprimento (m)	Boca (m)	Calado (m)	Área frontal (m ²)	Área lateral (m ²)
262	46	8	1290	4842

Tabela 5-2 Características dos propulsores no teste

Tipo	Posição X (m)	Posição Y (m)	Força Máx.(N)	Força Mín.(N)	Ângulo Máx.(°)	Ângulo Mín.(°)
Azimutal	119	0	299600	0	-180	-180
Azimutal	-119	0	299600	0	-180	-180
Túnel	123	0	246400	-246400	-180	-180
Principal	-129	0	1812600	-1057000	-180	-180

Para verificar se os modelos foram corretamente implementados, o mesmo teste foi rodado em uma adaptação de um programa desenvolvido em Tannuri et al (2008) que usa uma modelagem estática de forma similar à adotada neste trabalho, porém implementada em Matlab e não visando especificamente análises da operação de alívio.

Esse programa em Matlab já havia sido validado com os resultados do DYNASIM e, por isso, representa uma boa base de comparação.

Os resultados obtidos na versão criada neste projeto (C++) e a outra, base de comparação (Matlab) são apresentados e comparados na Tabela 5-3 e o Gráfico 5-1.

Tabela 5-3 Downtime para diferentes direções de aproamento

Direção (°)	Downtime
180	14,05%
190	8,06%
200	5,37%
210	4,93%
220	10,59%
230	13,78%
240	19,91%

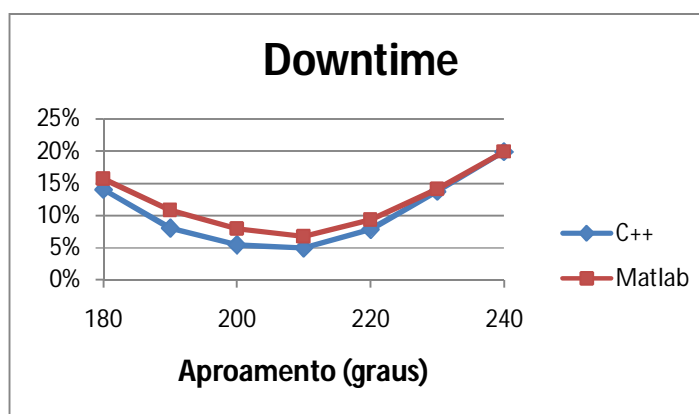


Gráfico 5-1 Downtime em diferentes direções de aproamento

Nota-se que o 5.1 resultado ficou muito próximo da referência no Matlab. A pequena diferença de valores se deve ao fato de que o cálculo das forças ambientais não é idêntico nos dois programas pois são empregadas técnicas numéricas de integração e derivação diferentes, além de haver diferenças no algoritmo de alocação de empuxo.

Outra observação é que o tempo de processamento para cada direção foi de aproximadamente 20 segundos em um processador de 2.6GHz, enquanto o programa em Matlab demorou aproximadamente 200 segundos. Já a simulação dinâmica do

DYNASIM para o mesmo volume de dados levaria cerca de 23 horas para ser concluída, ou seja, aproximadamente 3000 vezes a mais.

5.2 Análise de navio traçando área segura de operação

Para realizar este teste, escolhemos o mesmo modelo de navio e uma das 3650 condições ambientais do teste do item 5.1. Os parâmetros dessa condição ambiental se encontram na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 Condição ambiental para teste de análise de navio

Vel Vento (m/s)	Dir Vento (°)	Vel Corrente (m/s)	Dir Corrente (°)	Período Onda (s)	Altura Onda (m)	Dir Onda (°)
9,05	165,7	0,7	225	10,46	2,55	198,4

A região segura, ou seja, área em que o navio conseguirá se manter estável é ilustrada no Gráfico 5-2.

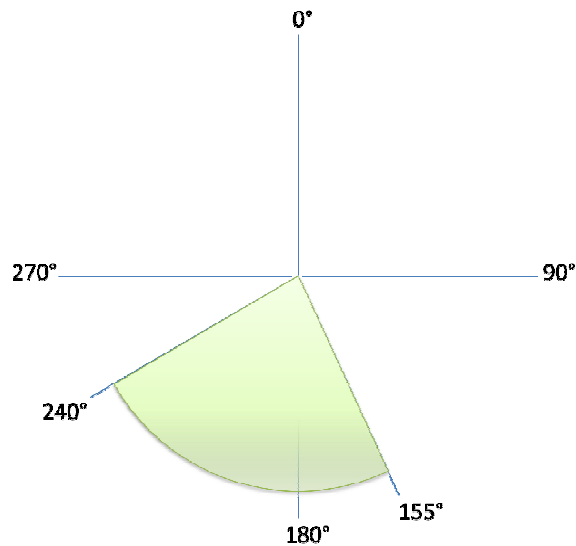


Gráfico 5-2 Área segura de operação

6 Conclusões

De acordo com o “teste de análise completa” apresentado na seção 5.1, o programa desenvolvido nesse trabalho gerou valores de *downtime* muito próximos àqueles obtidos com o programa em Matlab apresentado em Tannuri et al (2008). Como esse último programa já tinha sido validado com simulações no DYNASIM, conclui-se que, dependendo da aplicação, os modelos numéricos e algoritmos aqui desenvolvidos através de análises estáticas geram aproximações suficientemente confiáveis para substituir as análises dinâmicas.

Adicionalmente, de acordo com as explicações dadas na seção 3.4, uma metodologia complementar foi desenvolvida para avaliar os efeitos das forças não constantes de onda no movimento do navio aliviador. Os desvios padrões e amplitudes máximas estimados segundo essa técnica foram validados, comparando-os a simulações feitas no DYNASIM. Conseqüentemente, eles podem servir de parâmetro auxiliar para a avaliação dos resultados do programa em C++.

Enfim, verificou-se que o programa em C++ gerou os resultados sobre a operação de alívio com extrema rapidez em relação a uma estimativa do que seria a simulação no DYNASIM (tempo cerca de 3000 vezes maior). Mesmo em relação ao programa de Tannuri et al (2008), que também se propõe a realizar uma análise estática, o resultado foi calculado cerca de dez vezes mais rápido.

Dessa forma, conclui-se que o objetivo principal traçado para esse trabalho foi atingido: a criação de um instrumento de auxílio a tomada de decisão, prático e de baixo custo computacional que ajude os operadores a avaliarem a viabilidade e os riscos da operação de alívio em determinadas circunstâncias ambientais. Com grande agilidade, o programa pode ajudar a revisar operações em plataformas de petróleo existentes e a planejar mais rapidamente operações em novas plataformas, ao indicar os navios mais adequados e o ângulo de aproamento mais econômico. O programa poderá inclusive ajudar a projetar novos navios, suas dimensões e seus propulsores de modo que a eficiência da operação de alívio em determinada bacia seja a maior possível, isto é, com um *downtime* menor.

7 Proposta de Pesquisas Futuras

Na seção 3.4, apresentou-se uma metodologia para se avaliar de forma simples, mas com boa precisão, a sensibilidade do sistema DP às componentes de segunda ordem das forças de onda (deriva lenta). Porém, para que o objetivo de se avaliar o efeito das forças não constantes de modo geral seja efetivamente cumprido, alguns aspectos adicionais devem ser abordados e, para cada um deles, uma nova metodologia de avaliação deve ser elaborada.

- i) Forças de primeira ordem: seus efeitos não foram analisados pois, por um lado, elas não interferem na posição média da embarcação num período longo (*set-point* mantido) e, por outro, elas são filtradas na malha de controle já que suas altas frequências não podem ser compensadas pelos controladores. No entanto, devido às suas amplitudes elevadas, é importante estudar também o desvio padrão do navio provocada por essas forças para assegurar que o navio aproado não entrará em zona de risco à operação de alívio.
- ii) Atraso dos filtros: o único atraso considerado na metodologia desenvolvida foi o atraso dos propulsores, definidos por uma função de primeira ordem. Porém o uso de filtros (passa-baixas, passa-banda ou estimadores de Kalman), também geram atraso na resposta e podem ser incluídos na malha de controle simplificada.
- iii) Saturação dos propulsores: este é um ponto importante que não foi considerado no estudo. A ocorrência da saturação dos propulsores provoca alterações no comportamento dinâmico do sistema controle e um modelo adicional deve ser elaborado para avaliar esse impacto. A modelagem de saturação pode ser feita por Funções Descritivas para estimar analiticamente o passeio do sistema quando os propulsores saturam.
- iv) Rajadas de vento: assim como a onda, o vento também pode apresentar uma parcela oscilatória decorrente da variação da sua velocidade. Seu espectro deve ser estudado e um modelo prático deve ser proposto para avaliar a sensibilidade do movimento do navio provocada por esse efeito.

Uma vez elaborada uma metodologia de análise para esses aspectos, novos critérios poderão ser adicionados no programa desenvolvido para esse Trabalho de

Formatura enriquecendo assim a avaliação da viabilidade e dos riscos da operação de alívio em determinada condição ambiental.

8 Referências Bibliográficas

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Brasil, Disponível em <www.anp.gov.br>. Acesso em: 12 de abril de 2009.

ARANHA, J. A. P. . **A formula for ‘wave damping’ in the drift of a floating body.** Journal of Fluid Mechanics, v. 275, pp.147-155, 1994.

CORREIA, C. A. R; SILVA, H. S. C. **Proceedings of OMAE-FPSO 2004.** OMAE Specialty Symposium on FPSO Integrity, Houston, Estados Unidos, 2004

Energy Information Administration, Estados Unidos, disponível em www.eia.doe.gov. Acesso em: 14 de abril de 2009.

HAFTKA, R. T., **Elements of Structural Optimization - Solid Mechanics and its Applications**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1993.

LEITE, A.J.P. et al. **Current forces in tankers and bifurcation of equilibrium of turret systems: hydrodynamic model and experiments**, Applied Ocean Research, No.20, pp.145-56, 1998.

NETO, J. B. O; COSTA, A. J. D, **A Petrobrás e a exploração de petróleo offshore no Brasil: um approach evolucionário**, Rev. Bras. Econ. vol.61 no.1, Rio de Janeiro, Jan./Mar, 2007

KONGSBERG, Operator Manual, Kongsberg Simrad SDP, Dynamic Positioning System (Rel 2.5), 1999

PEREZ, T. ; **Ship motion control: course keeping and roll stabilization using rudder and fins**, Trondheim, 2005.

QUEIROZ FILHO, A. N. **Estudo da influência dos efeitos de interação hidrodinâmicos em operações de alívio auxiliadas por sistemas DP**, São Paulo, 2009. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

SILVA, J. L. **Modelo de cálculo do custo de escoamento de óleo da Bacia de Campos – RJ, usando a técnica de Custo Baseado na Atividade – ABC Costing**, Rio de Janeiro, 2005. Dissertação (doutorado) – PUC Rio de Janeiro.

TANNURI, E. A. **Desenvolvimento metodologia de projeto de sistema de posicionamento dinâmico aplicado a operações em alto-mar**, São Paulo, 2002. 1v. Dissertação (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

TANNURI, E. A.; DONHA, D.C.; PESCE, C.P. **Dynamic Positioning of a Turret Moored FPSO Using Sliding Mode Control**, Int J of Robust and Nonlinear Control, Vol.11, pp.1239-1256, Maio, 2001.

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. ; 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, 2008.

VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing**. 2.ed. Inglaterra: Cambridge University Press, 2002. 1002 p.