



UNIVERSIDADE
PETROBRAS



UNIVERSIDADE DO ESTADO
DO RIO DE JANEIRO

Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações
Curso de Especialização em Automação Industrial

Controle de Lastro em Sistemas Marítimos de Produção de Óleo e Gás

Autores:

Charles Santos Ludovico
Gabriel da Silva Albuquerque
Gustavo Levin Lopes da Silva

Orientador:

Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha - UERJ

UNIVERSIDADE PETROBRAS

UNIVERSIDADE DO ESTADO
DO RIO DE JANEIRO

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO
EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Controle de Lastro em Sistemas Marítimos de Produção de Óleo e Gás

Charles Santos Ludovico
Gabriel da Silva Albuquerque
Gustavo Levin Lopes da Silva

*Monografia apresentada ao Departamento de Pós-Graduação
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro como parte dos requisitos
para obtenção do Diploma de Especialização em Automação Industrial*

BANCA EXAMINADORA:

Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha - UERJ

Prof. Manoel Antônio da Costa - UERJ

Prof. Karla Tereza Figueiredo Leite - UERJ

Rio de Janeiro - 2007

Agradecimentos

Agradecemos a Deus e a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho:

- Ao professor José Paulo, pela competência, entusiasmo e orientação;
- Ao professor Lula do Tecgraf PUC-RIO e à galera da UN-RIO, pela ajuda e por nos mostrar a realidade do controle de lastro;
- À Petrobras, em especial à UP, pela viabilização deste trabalho;
- Aos colegas da Turma 4 de Eletrônica, pela amizade, alegria e descontração, pelas competições de *Helicopter* e pelos babas na praia;
- Aos pais, pelo apoio incondicional;
- Às mulé Cris, Denise e Marina, por nos aguentarem por todo este tempo e ainda gostarem de nós (pelo menos é isso que a gente pensa)!
- Ao Levinzinho, por provocar grande empenho no Levinzão.

Resumo

Em sistemas marítimos de produção de petróleo e gás, movimentações diárias de equipamentos, alterações climáticas, alterações no modo de operação, e a própria produção causam alterações na distribuição de carga da embarcação, alterando sua estabilidade. Para garantir a segurança da operação, essa distribuição de cargas tem que ser rigorosamente controlada através dos níveis de tanques de lastro. No cenário brasileiro atual, o controle de sistemas de lastro em plataformas de produção de petróleo é feito de forma manual. No entanto, algumas ferramentas computacionais passaram a ser adotadas recentemente para dar suporte à gestão da estabilidade da embarcação. Neste trabalho, após a descrição do problema de estabilidade em embarcações, é apresentada a estrutura dos sistemas de lastro usualmente presentes em plataformas, bem como os procedimentos e as ferramentas utilizadas no controle desses sistemas. Por fim, é feita uma revisão bibliográfica levantando algumas iniciativas, presentes na literatura, no sentido de automatizar o sistema de lastro (KILMURRAY, 1987; HOCK; BALABAN, 1984; KLUG, 1979). Essas referências podem servir de base para futuros desenvolvimentos na indústria nacional de óleo e gás.

Abstract

In oil and gas offshore production platforms, daily movement of equipment, changes on weather, operation mode, as well as on production itself affect the load distribution on vessels, impacting on its stability. In order to ensure safety on offshore operations, load distribution must be rigorously controlled through ballast tank leveling systems. In Brazilian offshore oil rigs, nowadays, the control of the ballast system is performed manually. However, software-based tools have been recently adopted to support vessel stability management. In this work, after describing the problem of vessel stability, usual ballast system structures are presented. Operational procedures, as well as software tools intended for operational support are discussed. Finally, some relevant initiatives concerning the automation of ballast system available in the literature are presented (KILMURRAY, 1987; HOCK; BALABAN, 1984; KLUG, 1979). The contribution therein may surely be used for future developments in Brazilian oil and gas industry.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Termos e Definições	3
1.2	Organização do Trabalho	6
2	Estabilidade de Sistemas Flutuantes	7
2.1	Teoria Básica de Estabilidade de Embarcações	7
2.2	CrITÉRIOS de Estabilidade e Requisitos Normativos	11
2.3	Efeito de Superfície Livre	13
2.4	Deslocamento, Adição e Remoção de Carga	15
2.5	Estabilidade de Sistemas Flutuantes Avariados	15
2.6	Estabilidade em Plataformas Semi-SubmersÍveis	16
3	Sistema de Lastro	18
3.1	Sistemas de Controle	19
3.2	Tanques de Lastro	19
3.3	Tubulações em Semi-SubmersÍveis	21
3.4	Casas de Bombas	21
3.5	Válvulas e Acionamento Remoto	23
3.6	Medidores de NÍvel e Inclínômetros	25
3.7	Sistemas supervisÓrios	25
3.8	Papel do Operador	25
4	Ferramentas Computacionais para AuxÍlio no Controle de Lastro	28
4.1	<i>Softwares</i> de plataformas de produçÓo de petrÓleo	29

4.2	Sstab	30
4.2.1	Classificação de Volumes	30
4.2.2	Cálculo dos Volumes	32
4.2.3	Variações no Equilíbrio	33
4.2.4	Determinação do Equilíbrio	34
4.2.5	Relatórios	35
4.2.6	Curvas disponíveis para análise	35
5	Alternativas para a Automação do Controle de Lastro	40
5.1	Sistemas Especialistas	41
5.2	Controle Avançado	42
5.3	Controle Nebuloso	43
5.4	Controle de Lastro Dinâmico	45
6	Considerações Finais	46

Capítulo 1

Introdução

Com o aumento do preço do petróleo iniciado na década de 70, campos de produção marítimos mais profundos foram se tornando cada vez mais viáveis economicamente. Com lâminas de água cada vez maiores, as plataformas fixas ficaram inviáveis para a exploração de campos de produção em águas profundas. As plataformas flutuantes são mais adequadas para esse cenário e tem sido largamente usadas. Elas se posicionam acima dos poços e se ligam a eles por meio de dutos relativamente flexíveis, permitindo que a plataforma tenha pequenos movimentos mesmo em operação.

Essas plataformas podem ser classificadas em duas categorias: flutuante de produção e flutuante de produção e armazenamento; ou FPO (*Floating Production and Offloading*) e FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), respectivamente. As plataformas do tipo FPO são conhecidas como semi-submersíveis (SS) pois normalmente possuem cascos submersíveis. Geralmente as plataformas FPSO são construídas usando cascos semelhantes aos cascos de navios convencionais, muitas vezes usando o casco de navio petroleiro de transporte modificado. Esse tipo de plataforma se tornou bastante atraente para a indústria quando um lei internacional proibiu o transporte de petróleo em navios de casco simples, obrigando os navios a terem casco duplo para evitar vazamento de petróleo. Com isso, diversas opções de cascos simples a baixo custo apareceram no mercado e foram aproveitadas para a construção de plataformas FPSO. As Figuras 1.1 e 1.2 ilustram, respectivamente, uma típica plataforma do tipo SS; e uma típica plataforma do tipo FPSO. Também existem plataformas FPSO com cascos em outros formatos, como o circular, por exemplo, mas não são comuns. Os dois tipos de plataformas necessitam de um oleoduto, gasoduto ou navio, conhecido como navio aliviador, para escoar a produção, que é processada em terra. No caso das plataformas SS sem oleoduto nem gasoduto, é necessário que sempre haja um navio aliviador ligado à plataforma, contudo isso pode se dar por meio de uma monobóia¹.

Diferente das plataformas fixas, que são sustentadas por suas colunas, a posição das plataformas flutuantes depende da condição do mar, da distribuição do seu peso e do

¹Equipamento flutuante responsável pela ancoragem de uma embarcação, que pode servir também como ponto de descarga de produção.

Figura 1.1: *Plataforma do tipo SS*Figura 1.2: *Plataforma do tipo FPSO*

seu empuxo. Essas três variáveis geram forças que podem muitas vezes impossibilitar a produção de petróleo ou até mesmo causar graves acidentes e, portanto, devem ser controladas para possibilitar a operação segura. O sistema responsável pela manutenção da segurança nesse aspecto é o sistema de lastro, que manipula a distribuição de pesos na plataforma a fim de controlar a sua dinâmica.

Para se ter uma visão da relevância do sistema de lastro, é interessante citar que em vários acidentes ou incidentes da história da produção de petróleo marítima, em algum momento houve uma participação do controle de lastro que influenciou positivamente, como no caso do incidente da P-34 (ANP, 2003), em que a atuação no sistema de lastro ajudou a recuperar a plataforma, ou negativamente, como no acidente da P-36 (ANP, 2001), em que partir do momento em que o sistema de lastro foi avariado, os danos foram praticamente irreversíveis.

Por sua importância, o controle de lastro tem uma história conservadora, e mantém até hoje o operador como principal componente deste sistema, sendo o responsável pelas ações do controle de lastro.

Apesar do conservadorismo, existem estudos em algumas áreas de automação, principalmente envolvendo sistemas especialistas, que já foram implementados em controle de lastro com relativo sucesso (HOCK; BALABAN, 1984; KILMURRAY, 1987), mas nunca retirando o operador do papel central deste sistema.

Nas aplicações mais modernas, existem ferramentas computacionais para auxiliar o operador de lastro em seu trabalho na embarcação, realizando os cálculos sobre a estabilidade e gerando gráficos e relatórios que dão ao operador o papel de interpretar estes dados e agir com base nestas informações.

Neste trabalho, discutiremos o problema de lastro em sistemas marítimos de produção de petróleo, tendo em vista a avaliação da possibilidade de automação do sistema de controle de lastro.

1.1 Termos e Definições

Ao longo do texto, fizemos uso de muitos termos técnicos comumente empregados na literatura das áreas de engenharia naval e engenharia de automação. Para facilitar a leitura deste trabalho, relacionamos a seguir os termos que utilizamos e suas respectivas definições.

Adernamento	É a inclinação para um dos bordos da embarcação.
Altura Metacêntrica	Distância entre o centro de gravidade e o metacentro.
Ângulo de alagamento	Ângulo para o qual a água atinge aberturas no casco ou compartimentos não estanques à imersão.
Ângulo de banda	Ângulo entre o eixo transversal e o plano horizontal.
Ângulo de trim	Ângulo entre o eixo longitudinal e o plano horizontal.
Arfagem	É movimento rotacional da embarcação no sentido longitudinal da embarcação (proa-popa).
Bombordo	Denominação do bordo esquerdo da embarcação olhando-se para a proa.
Borda Livre	Distância entre a linha d'água e o convés.
Bordos	Nome dado às duas partes simétricas em que o casco é dividido pelo diametral (boreste e bombordo).
Boreste	Denominação do bordo direito da embarcação olhando-se para a proa.
Braço de adernamento	Alavanca que atua no sentido de adernar a embarcação. Geralmente é formada pela ação de forças externas, ventos por exemplo, conjugada à resistência que a água impõe ao movimento da embarcação.
Braço de endireitamento	Distância entre o centro de gravidade e a linha vertical que passa sobre o centro de carena.
Calado	É a distância vertical entre a linha d'água e a parte mais baixa da embarcação.

Centro de carena	O mesmo que centro de empuxo.
Centro de empuxo	É o ponto onde se pode considerar que toda a força de empuxo esteja aplicada.
CLP	Abreviatura de Controlador Lógico Programável.
Braço de endireitamento	Distância entre o centro de gravidade e a linha vertical que passa sobre o centro de carena.
Calado	É a distância vertical entre a linha d'água e a parte mais baixa da embarcação.
Centro de carena	O mesmo que centro de empuxo.
Centro de empuxo	É o ponto onde se pode considerar que toda a força de empuxo esteja aplicada.
CLP	Abreviatura de Controlador Lógico Programável.
Eductor	Equipamento que utiliza o efeito de Venturi para escoar um fluido. O efeito de Venturi é o efeito de aumento da velocidade do fluido e diminuição de sua pressão quando passa por uma redução na área transversal de uma tubulação.
Emborcar	Virar, entornar.
FPSO	Abreviatura de <i>Floating Production Storage and Off-loading</i> . São plataformas flutuantes de produção e armazenamento de petróleo.
Guinada	Movimento de rotação azimutal da embarcação (sem inclinação).
<i>Header</i>	O mesmo que tubulão: tubulação de grande capacidade que recebe ou distribui seu fluxo por tubulações de menor capacidade.
<i>Heel</i>	O mesmo que banda.
Jogo	Movimento de rotação transversal da embarcação, que resulta na variação do ângulo de banda.

Linha de base	É a linha formada pela interseção do plano diametral e o contorno inferior da embarcação.
<i>List</i>	O mesmo que banda.
Metacentro	Ponto em torno do qual o centro de carena se desloca quando a embarcação oscila com pequenos ângulos.
Momento de emborcamento	Momento provocado por forças externas que atuam no sentido de emborcar ou virar a embarcação.
Momento restaurador	Momento resultante da atuação do binário peso-empuxo que atua no sentido de levar a embarcação de volta à sua posição inicial.
Popa	Parte traseira da embarcação.
Proa	Parte dianteira da embarcação.
Quilha	Viga ou peça posicionada no plano diametral na parte inferior da embarcação.
SCADA	Abreviatura de <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> . Sistema formado pela integração do sistema supervísório, controladores e instrumentação de campo.
Sonda	Equipamento utilizado para a perfuração de poços. O termo pode ser utilizado também para denominar a embarcações utilizadas para esse fim.
SS	Abreviatura de <i>Semisubmersible</i> . São plataformas flutuantes sustentadas por flutuadores (cascos) submersíveis.

1.2 Organização do Trabalho

Esta monografia está organizada em seis capítulos. Este primeiro capítulo serve de introdução ao conteúdo do trabalho, seus objetivos e sua organização. Os demais capítulos estão estruturados da seguinte forma:

Capítulo 2: Nesse capítulo, é feita uma breve revisão sobre os fundamentos teóricos relacionados à estabilidade de embarcações.

Capítulo 3: Nesse capítulo, a estrutura do sistema de lastro comumente encontrado em plataformas de produção de petróleo é discutida. Os principais componentes que compõem esse sistema também são apresentados.

Capítulo 4: Nesse capítulo, são apresentadas algumas ferramentas computacionais adotadas no suporte à operação de lastro em plataformas.

Capítulo 5: Nesse capítulo, são apresentadas algumas abordagens usualmente aplicadas em problemas de controle e automação que poderiam ser aplicadas ao problema de lastro. Também é feita uma revisão bibliográfica levantando algumas iniciativas, presentes na literatura, no sentido de automatizar o sistema de lastro.

Capítulo 6: Por fim, nesse capítulo, é feita uma breve discussão das principais conclusões e contribuições desta monografia.

Capítulo 2

Estabilidade de Sistemas Flutuantes

O entendimento intuitivo e qualitativo do termo estabilidade é provavelmente tão antigo quanto o conceito de navegação. A preocupação com a segurança e a estabilidade de uma embarcação sempre esteve presente na concepção de qualquer projeto naval, mesmo nos primórdios da navegação, há milênios (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

Os fundamentos para uma abordagem mais científica do assunto surgiram na Grécia Antiga, com Arquimedes. No entanto, apesar de inúmeras contribuições importantes surgidas no início da era moderna, apenas nos meados do século XVIII a teoria de estabilidade hidrostática chegou à maturidade com o trabalho de Bouger em 1746, introduzindo o conceito de altura metacêntrica, e Euler que, em 1749, definiu o critério de momento restaurador (NOWACKI; FERREIRO, 2003).

Apesar de simples nos seus fundamentos, a implementação completa de métodos computacionais para a análise da estabilidade de embarcações e a adoção na prática desses sistemas computacionais são muito recentes. Atualmente, muitas embarcações são equipadas com ferramentas de suporte à análise de estabilidade, agregando mais segurança à operação naval e reduzindo a susceptibilidade a erros humanos.

Neste capítulo, discutiremos os conceitos teóricos básicos relacionados à estabilidade de embarcações.

2.1 Teoria Básica de Estabilidade de Embarcações

No contexto da engenharia naval, o termo estabilidade é usualmente definido como a capacidade que um corpo flutuante tem de retornar ao seu equilíbrio original após sofrer uma perturbação qualquer. Tal capacidade é definida basicamente pela localização de dois pontos: o centro de gravidade e o centro de carena.

O centro de gravidade (ponto G na Figura 2.1) é o ponto onde se pode considerar que todo o peso da embarcação esteja aplicado (HANCOX, 1998).

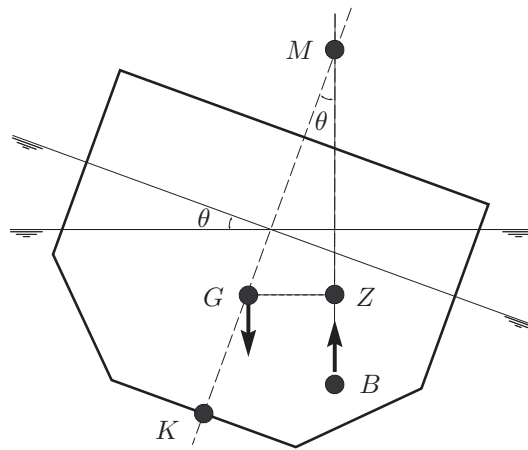


Figura 2.1: Formação do momento restaurador em uma embarcação inclinada, resultado da ação do peso sobre o centro de gravidade (G) e do empuxo sobre o centro de carena (B).

O centro de carena (centro de empuxo ou *buoyancy center*, B), por sua vez, é o ponto onde se pode considerar que toda a força de empuxo esteja aplicada. O centro de empuxo coincide com o centróide do volume de água deslocado pela parte do corpo flutuante que se encontra submersa (COELHO; NASCIMENTO, 2002).

Na posição de equilíbrio, o centro de gravidade e o centro de empuxo de uma embarcação se apresentam alinhados verticalmente. À medida que a embarcação se inclina, por conta da ação de ondas e ventos, por exemplo, o volume submerso se altera, provocando o desalinhamento de G e B . Note que a posição do centro de carena depende do volume submerso e, portanto, da inclinação.

Como a força da gravidade atua sempre verticalmente para baixo e o empuxo atua sempre verticalmente para cima, o desalinhamento de G e B faz com que peso e empuxo formem um binário de forças conhecido como momento restaurador, que tende a recuperar o equilíbrio inicial da embarcação conforme a Figura 2.1.

A intensidade do momento restaurador é função do comprimento do segmento GZ , conhecido como braço de endireitamento (*righting arm*). O braço de endireitamento pode ser definido como a distância entre o centro de gravidade da embarcação e o eixo vertical que passa sobre o centro de carena (B) (COELHO; NASCIMENTO, 2002).

No entanto, para o exemplo apresentado na Figura 2.1, podemos concluir que o torque resultante da ação conjugada de peso e empuxo só atuará no sentido de restaurar o equilíbrio inicial da embarcação se o centro gravidade estiver posicionado à esquerda da linha vertical que passa pelo centro de carena. Caso contrário, o momento resultante tenderia a virar a embarcação.

Podemos observar que se deslocarmos parte da carga da embarcação para compartimentos superiores, elevando assim a distância entre o centro de gravidade e a linha quilha (ponto K , do inglês *keel*), reduziremos a distância GM e, conseqüentemente, o braço de endireitamento. Podemos dizer que tal movimentação de carga reduziria a estabilidade da embarcação, já que haveria uma diminuição da intensidade do momento

restaurador.

Se a movimentação de carga elevar o centro de gravidade até o ponto M ($GM = 0$), teremos um braço de endireitamento nulo. Neste caso, o equilíbrio se tornaria indiferente e a embarcação, na ausência de forças externas, tenderia, por inércia, a manter sua velocidade angular ou permanecer na mesma inclinação, se estiver parada. O ponto M é conhecido como *metacentro* e é determinado pela intersecção da linha central da embarcação, considerando a embarcação inclinada, com o eixo vertical que passa sobre o centro de carena. A distância GM é denominada de altura metacêntrica. O metacentro pode ainda ser interpretado como o ponto em torno do qual o centro de carena se desloca quando a embarcação oscila com pequenos ângulos (ASTM INTERNATIONAL, 2004).

Elevando ainda mais a posição vertical de G , chegaríamos a uma situação em que o comprimento do segmento KG supera o comprimento KM , resultando em GM negativo. Nesse caso, a ação conjugada do binário peso-empuxo atuaria no sentido de virar a embarcação, em vez de restaurar o ponto de equilíbrio inicial.

Naturalmente, o tamanho do braço de endireitamento está relacionado com a altura metacêntrica pela equação

$$GZ = GM\text{sen}(\theta), \quad (2.1)$$

onde θ é o ângulo de banda da embarcação (inclinação transversal). Portanto, a intensidade do momento restaurador pode ser calculado pela expressão

$$M(\theta) = \rho g \nabla GM\text{sen}(\theta), \quad (2.2)$$

onde ρ é a massa específica da água, g é a aceleração da gravidade e ∇ é o volume de água deslocado pela parte submersa da embarcação.

Vale à pena ressaltar que o movimento de um corpo flutuante apresenta três graus de liberdade referentes a movimentos rotacionais, dos quais apenas dois são relevantes à análise de estabilidade. O movimento de guinada (ou cabeceio) não altera a posição de G , B ou M e, portanto, não interfere na presente análise. Os movimentos relevantes, no que se refere à estabilidade do corpo flutuante, são a rotação transversal (ângulo de banda) e a rotação longitudinal (ângulo de trim). Por conta disso, torna-se necessária a definição de um metacentro transversal e um metacentro longitudinal.

É prática usual a separação do problema de estabilidade em longitudinal e transversal. No caso de navios (como as FPSOs), os aspectos construtivos tornam o problema de estabilidade longitudinal pouco relevante e algumas aproximações permitem abordá-lo de forma simplificada. Em se tratando de plataformas semi-submersíveis, o mesmo não ocorre. A oposição à rotação no sentido longitudinal é bastante semelhante àquela observada no sentido transversal, o que torna indispensável a separação do problema em dois eixos de rotação (NISHIMOTO; PINTO, 1995).

A posição do metacentro pode ser assumida constante para pequenas inclinações. Assim o termo GM , quando usado, refere-se geralmente à altura metacêntrica sob ângulo de banda nulo ou suficientemente pequeno. Esta distância faz o papel do coeficiente do momento restaurador. Quanto maior for, mais estável será a embarcação e, portanto,

mais difícil será deslocá-la de sua posição de equilíbrio sem banda. Por conta disso, a altura metacêntrica GM é uma importante característica na análise da estabilidade inicial de uma embarcação (NISHIMOTO; PINTO, 1995).

A altura metacêntrica (GM) é uma característica definida basicamente pela geometria da embarcação e pela posição do centro de gravidade. Para calculá-la, utilizam-se as seguintes equações (NISHIMOTO; PINTO, 1995):

$$BM_T = \frac{I_T}{\nabla} \quad e \quad BM_L = \frac{I_L}{\nabla}, \quad (2.3)$$

onde I é o momento de inércia da área de linha d'água (ou plano de flutuação) e ∇ é o volume de água deslocado pela embarcação. O índice T se refere ao movimento transversal e o índice L se refere ao movimento longitudinal. Uma vez calculado o valor de BM , a altura metacêntrica inicial (ângulo de inclinação aproximadamente nulo) pode ser obtido pela relação:

$$GM = KB + BM - KG. \quad (2.4)$$

Os valores de GM são usualmente tabelados em função do calado. Desta forma se tem uma medida da estabilidade inicial para cada condição de carregamento da embarcação.

Grosso modo, podemos afirmar que a posição do centro de gravidade de uma embarcação depende apenas de sua massa e da distribuição de sua carga, enquanto que a posição do centro de carena e, conseqüentemente, a posição do metacentro são funções do formato do casco e do calado. Por sua vez, o calado é função da quantidade de carga e lastro e do ângulo de inclinação da embarcação.

Para embarcações de formato convencional, como as FPSOs, ângulos de adernamento (banda) de até 12° praticamente não alteram a posição do metacentro.

Em plataformas semi-submersíveis trabalhando dentro dos limites operacionais, o metacentro é praticamente estático. No entanto, há diferença entre a posição vertical de M no modo de trânsito (flutuadores parcialmente submersos) e no modo de operação (flutuadores totalmente submersos). A distância BM se reduz consideravelmente quando os flutuadores são afundados (HANCOX, 1998).

A altura metacêntrica é utilizada para a avaliação da estabilidade inicial da embarcação, ou seja, para pequenos ângulos de inclinação. Por conta disso, o valor de GM não deve ser usado como parâmetro decisivo para a análise completa da estabilidade. A forma mais confiável de se avaliar a estabilidade e, portanto, a segurança de uma unidade flutuante é através da curva de estabilidade. A curva de estabilidade estática trás o valor do braço de endireitamento em função do ângulo de inclinação e é a partir dela que se definem os principais requisitos normativos de estabilidade, como veremos a seguir.

2.2 Critérios de Estabilidade e Requisitos Normativos

O diagrama de estabilidade estática apresenta o valor do braço de endireitamento em função do ângulo de inclinação, para uma determinada condição de carregamento da unidade flutuante, conforme a Figura 2.2. Neste gráfico, podemos observar algumas características de estabilidade da unidade (COELHO; NASCIMENTO, 2002):

- Gama de Estabilidade: é o domínio de ângulos em que a estabilidade é positiva.
- Ângulo de perda de estabilidade: é o ângulo a partir do qual a unidade deixa de ter estabilidade e se vira irremediavelmente.
- Braço de estabilidade máximo: é o valor máximo da curva de estabilidade.
- Altura metacêntrica: o diagrama de estabilidade na origem é tangente à linha que se obtém unindo a origem com o extremo da vertical entrada ao ângulo de 1 radiano ($57,3^\circ$) e de comprimento igual à altura metacêntrica (linha tracejada na Figura 2.2).

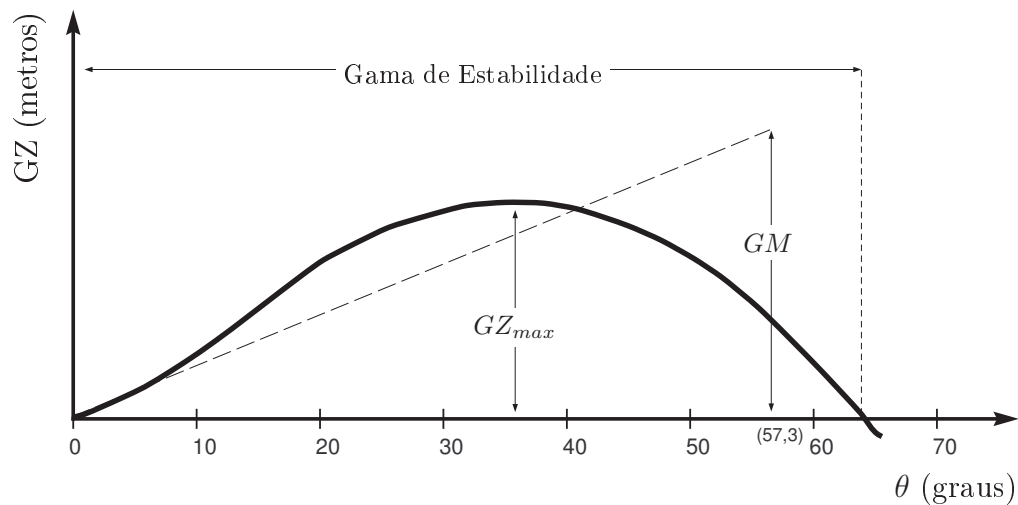


Figura 2.2: Diagrama de estabilidade estática.

A curva de estabilidade estática informa, para vários ângulos de banda, o braço de endireitamento, dado o deslocamento ou o calado da embarcação. A curva se refere, no entanto, a uma posição de referência do centro de gravidade. Algumas correções devem ser efetuadas para se considerar outras posições do centro de gravidade, o que certamente ocorre durante a operação de uma embarcação. Mais informações a respeito das correções indicadas podem ser encontradas na referência (NISHIMOTO; PINTO, 1995).

Para a avaliação da estabilidade de um sistema flutuante é sempre necessário observar se suas características hidrostáticas, representadas na curva de estabilidade estática, são adequadas a sua operação, de forma a garantir a segurança. Somado a isso, deve-se

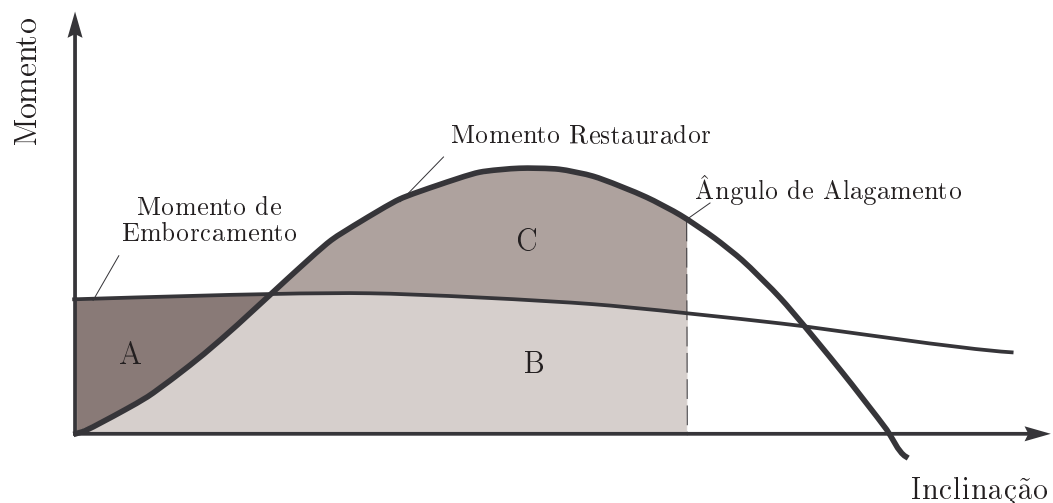


Figura 2.3: Diagrama para avaliação da estabilidade dinâmica.

também prever a capacidade que tal sistema terá de se manter em condição segura ao sofrer perturbações prolongadas advindas de ondas e ventos. Para isso, faz-se necessária a avaliação da estabilidade dinâmica da unidade.

O conceito de estabilidade dinâmica surge quando se tenta avaliar a capacidade que uma embarcação tem de resistir a uma determinada intensidade de vento sem emborcar. Num contexto quase-estático, no qual o momento gerado pelo vento é aumentado até um valor final de forma lenta o suficiente para não injetar energia cinética na embarcação, a análise é simples. Basta comparar o momento final induzido pelo vento com o momento restaurador máximo da embarcação. Se o momento restaurador superar o momento induzido, a embarcação resistirá.

Num contexto dinâmico, no qual a embarcação ganha energia cinética ao sofrer a ação do vento, o fato de o momento restaurador superar o momento induzido pelo vento (momento de emborcamento) não garante que a embarcação conseguirá resistir. Mesmo que o momento restaurador máximo supere o torque induzido, a velocidade angular adquirida pela embarcação até atingir o ângulo de inclinação de máximo braço de endireitamento pode levá-la a emborcar.

Neste caso, é necessária uma análise energética com base no trabalho do momento de emborcamento e no trabalho do momento restaurador. O máximo ângulo de banda dinâmico acontece quando estes trabalhos se igualam, anulando a energia cinética.

Os trabalhos dos momentos de emborcamento e restaurador são dados pela expressão

$$\tau = \int M(\theta) d\theta, \quad (2.5)$$

e estão associados a área sob a curva no gráfico $M(\theta) \times \theta$, ilustrado na Figura 2.3.

Para que a segurança da embarcação seja garantida, o ângulo máximo de banda deve ocorrer antes que o ângulo de alagamento¹ seja atingido. Analisando graficamente, isso significa dizer que a área $C+B$ da Figura 2.3 deve ser maior que a área $A+B$. Na prática, deve-se sempre garantir que $C+B$ supere $A+B$ com boa margem de segurança, uma vez que os dados hidrostáticos da embarcação estão sujeitos a imprecisões e as características dos agentes externos, ventos e ondas, não podem ser determinados com exatidão.

Atualmente, a maioria dos critérios de estabilidade de navios e de plataformas flutuantes estão baseados no GM inicial e na relação entre áreas do diagrama momento versus inclinação. Critérios adicionais podem ser adotados, a depender do tipo de embarcação e de sua utilização.

Para garantir a qualidade e a segurança de navios e sistemas flutuantes, foram formadas diversas Sociedades Classificadoras, como a norueguesa DNV (*Det Norske Veritas*) e a americana ABS (*American Bureau of Shipping*). Tais organizações têm como função inspecionar e classificar as embarcações para emitir registros e certificados de cumprimento de exigências normativas das Convenções e Regulamentos Internacionais.

Em 1948 foi criada a IMO (*International Maritime Organization*), com o objetivo de tratar problemas técnicos e políticos relacionados à navegação e à construção naval. Desde então, esse órgão centraliza discussões relacionadas à segurança de sistemas flutuante e regulamenta, através de normas, critérios para a avaliação da estabilidade de sistemas flutuantes. Várias convenções regulamentadas pela IMO servem hoje de padrão às sociedades classificadoras.

Para obter mais informações sobre as origens da IMO e das sociedades classificadoras e, também, para mais detalhes sobre algumas das principais normas de estabilidade definidas pela IMO (MODU Code 1989², IMO A167, entre outras), consultar (NISHIMOTO; PINTO, 1995). Outras informações sobre testes de estabilidade e outros requisitos exigidos pelas Sociedades Classificadoras para certificação de embarcações e sistemas navais podem ser encontradas em (HANCOX, 1998).

2.3 Efeito de Superfície Livre

Quando um tanque de uma unidade flutuante está completamente cheio, não há movimento significativo do líquido contido em seu interior. O efeito produzido por esse tanque na estabilidade do navio é exatamente igual ao produzido por um tanque contendo material sólido. No entanto, assim que uma quantidade de líquido é retirada desse tanque, a estabilidade do navio passa a ser afetada pelo efeito de superfície livre.

O efeito de superfície livre é conseqüência da tendência que um líquido (ou sólido

¹Ângulo de alagamento é o ângulo para o qual a água atinge aberturas no casco ou compartimentos não estanques à imersão. Em algumas embarcações, o ângulo de alagamento é a inclinação na qual a água invade o convés.

²A sigla MODU é abreviação de *Mobile Offshore Drilling Units* ou Unidade de Perfuração Marítima Móvel. A aplicação do MODU Code 1989, no entanto, é extensível às plataformas semi-submersíveis em geral, não estando restrita a plataformas de perfuração.

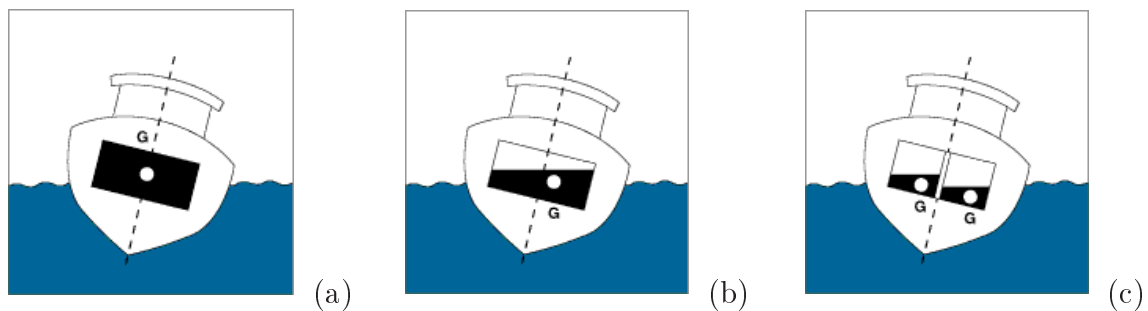


Figura 2.4: *Efeito de Superfície Livre: (a) Com o tanque totalmente preenchido, não há deslocamento de G . (b) Com o tanque parcialmente preenchido, a embarcação fica sujeita ao Efeito de Superfície Livre. (c) O efeito pode ser reduzido através da compartimentação do tanque¹.*

fluidizado) tem de se deslocar na direção da inclinação da unidade e poderá ocorrer sempre que a superfície desse líquido estiver livre para se movimentar.

As conseqüências do efeito de superfície livre na estabilidade de uma embarcação devem sempre ser previstas e observadas, uma vez que o deslocamento da superfície líquida em uma unidade inclinada atua a favor do adernamento, deslocando o centro de gravidade no sentido de reduzir o braço de endireitamento, podendo eventualmente levar a embarcação à instabilidade.

Esse efeito adverso na estabilidade é equivalente, para a análise de estabilidade inicial, a uma elevação do centro de gravidade (KG aumenta) e, conseqüentemente, a uma redução de GM . Basicamente, a intensidade deste deslocamento de centro de gravidade depende da inclinação da embarcação, do formato dos tanques, das densidades dos fluidos contidos nos tanques e do nível dos tanques.

Para pequenos ângulos de inclinação (estabilidade inicial), o deslocamento do centro de gravidade de um tanque parcialmente preenchido com líquido é igual ao momento de inércia da área da superfície líquida dividido pelo volume de líquido no tanque (HANCOX, 1998). Vale a pena ressaltar que a área da superfície líquida varia com a inclinação do tanque e seu momento de inércia depende da densidade do líquido. Através da correção do centro de gravidade dos tanques da embarcação, calcula-se o efeito da superfície livre sobre o centro de gravidade da embarcação como um todo.

Em plataformas semi-submersíveis é usual a consideração do efeito de cargas móveis apenas no valor da altura metacêntrica. No entanto, para navios (como as FPSOs), onde os ângulos de banda podem ser substancialmente maiores, deve ser considerado seu efeito na curva de estabilidade estática, uma vez que, para ângulos de inclinação grandes (acima de 8°), a movimentação do centro de gravidade não é mais dada como função do momento de inércia de área de superfície. Mais informações sobre as correções das curvas de estabilidade usualmente adotadas podem ser encontradas na referência (NISHIMOTO; PINTO, 1995).

Durante a operação de uma unidade flutuante, deve-se sempre buscar a redução da

¹Essa figura foi extraída da referência (DEPARTMENT OF TRANSPORTS, CANADA, 2003).

superfície livre, evitando tanques parcialmente cheios, sempre que for possível. Para a segurança da operação, os valores de GM ou KG devem sempre ser corrigidos no sentido de contemplar tal efeito.

É grande o número de navios que emborcaram como consequência do efeito de superfície livre. Uma forma de reduzir esse fenômeno é a separação dos tanques da embarcação em vários compartimentos de menor volume. Desta forma, se impõe um limite ao escoamento dos fluidos. Nos projetos modernos de unidades flutuantes de produção de petróleo, tal prática construtiva é largamente utilizada.

2.4 Deslocamento, Adição e Remoção de Carga

Quando uma carga a bordo é movimentada, o centro de gravidade do sistema flutuante se desloca numa direção paralela à linha que une a posição inicial e final do centro de gravidade da carga movida. Nesse contexto, como não há alteração no deslocamento vertical da embarcação, as características hidrostáticas da mesma permanecem praticamente inalteradas. A exceção ocorre quando a movimentação de carga se dá de forma a gerar uma distribuição assimétrica de pesos embarcados, fazendo com que a embarcação se equilibre com ângulos de trim e banda não nulos.

A adição ou remoção de um valor significativo de carga, por sua vez, provoca alteração no calado da embarcação, alterando assim as curvas hidrostáticas, a altura metacêntrica e também a intensidade do efeito de superfície livre. Por conta disso, quando uma carga é embarcada torna-se necessário o cálculo das novas condições de estabilidade e flutuação da embarcação. A descrição detalhada de procedimentos clássicos aplicáveis neste caso pode ser encontrada em (NISHIMOTO; PINTO, 1995)

De maneira geral, pesos adicionados acima do centro de gravidade reduzem a altura metacêntrica e pesos adicionados abaixo do centro de gravidade aumentam a altura metacêntrica. No entanto, dependendo da forma como as características hidrostáticas da embarcação se alteram devido à mudança no valor do deslocamento, tais relações podem não ser verificadas.

2.5 Estabilidade de Sistemas Flutuantes Avariados

Ao sofrer uma avaria no casco, o sistema flutuante fica quase sempre sujeito ao embarque de água ou, de forma equivalente, a uma perda de empuxo, que pode ter as seguintes consequências:

- Aumento de calado;
- Variação de caimento, se o compartimento alagado estiver a vante ou a ré do centro de flutuação;

- Inclinação transversal, se o compartimento alagado for assimétrico em relação ao plano de mediana ou se a perda de estabilidade for tal que o faça cair numa situação de estabilidade negativa;
- Variação na estabilidade, devido tanto à possível variação da posição do centro de gravidade como às variações nos parâmetros hidrostáticos, centro de carena e posição do metacentro.

O efeito combinado desses fatores leva o sistema flutuante a uma nova posição de equilíbrio, que pode eventualmente não ser estável se corresponder a uma condição em que o alagamento possa prosseguir através de volumes não estanques da unidade. Há efetivamente um limite para a condição final de estabilidade, além do qual o sistema flutuante pode estar seriamente comprometido (COELHO; NASCIMENTO, 2002).

Existem dois métodos largamente usados para avaliar a estabilidade de sistemas flutuantes avariados: o método da adição de pesos e o método da perda de flutuabilidade. No primeiro método, considera-se o líquido admitido por conta da avaria como uma carga adicional. No segundo método, considera-se a flutuabilidade resultante como a diferença entre a flutuabilidade inicial e a reserva de flutuabilidade existente no compartimento antes da avaria.

A escolha do método a ser utilizado se baseia apenas na conveniência do cálculo. De forma geral, o método da perda de flutuabilidade implica em cálculos mais simples e é menos suscetível a erros (NISHIMOTO; PINTO, 1995).

Podemos observar que o efeito do alagamento será mais acentuado quanto maior for o volume alagado. Portanto, podemos concluir intuitivamente que, quanto maior o número de subdivisões estanques de uma embarcação, menor será o efeito de uma avaria, já que menor será a perda de flutuabilidade. No entanto, o aumento da compartimentação aumenta o custo do sistema flutuante, estabelecendo assim um compromisso entre segurança e viabilidade econômica.

2.6 Estabilidade em Plataformas Semi-Submersíveis

Nas embarcações com formato de um navio tradicional, a variação da posição do centro de gravidade, do calado e da altura metacêntrica em função das cargas e consumíveis a bordo podem ser determinadas durante o projeto, dispensando grande controle durante a vida operacional. É o caso da grande maioria das plataformas do tipo FPSO, que são geralmente construídas a partir da conversão de antigos navios petroleiros.

No projeto desse tipo de embarcação, considera-se uma situação de pior caso (menor altura metacêntrica) como determinante de sua estabilidade. O projetista deve garantir a estabilidade para todas as configurações de carregamento admissíveis, o que é certo quando os critérios de estabilidade exigidos são satisfeitos para o pior caso. Isso é resultado da concepção usual dos navios, onde a carga é sempre colocada de baixo para cima e descarregada de cima para baixo. Assim, KG nunca terá valor superior

àquele determinado pela condição de pior caso, ou seja, quando a carga for máxima (NISHIMOTO; PINTO, 1995).

Vale ressaltar que as plataformas FPSOs geralmente possuem grande capacidade de armazenamento, o que faz com que a maior parte de seu peso esteja concentrada abaixo do convés, aproximando o centro de gravidade da linha de quilha.

Em se tratando de plataformas semi-submersíveis isso não é verdade. O embarque e desembarque de equipamentos no convés pode ocorrer a qualquer momento e a organização da carga a bordo é freqüentemente alterada, através da operação de guindastes, por conta do espaço extremamente limitado. A variação de consumíveis produz mudanças muitas vezes consideráveis na posição vertical do centro de gravidade.

O fundamento por trás das plataformas semi-submersíveis é que imergindo o casco da embarcação, reduzimos a área de superfície exposta às forças marítimas, o que reduz o efeito das ondas e, conseqüentemente, os movimentos de balanço, arfagem e afundamento (HANCOX, 1998). Isto ocorre porque a energia cinética das partículas da água decai exponencialmente com a profundidade.

No entanto, ao mesmo tempo em que reduzimos a superfície exposta às forças marítimas, diminuimos também a área de linha d'água e, conseqüentemente, a resistência que a água impõe à rotação da embarcação, como vimos anteriormente nas equações (2.3) e (2.4). Dessa forma, podemos concluir que as plataformas semi-submersíveis, apesar de oscilarem menos, apresentam menor altura metacêntrica.

Considerando que as semi-submersíveis operam usualmente com baixos valores de GM , uma pequena variação de KG pode levar à perda da estabilidade. Por isso o controle de KG deve ser contínuo e rigoroso.

Esse controle é efetuado na sala de controle de lastro. Nesta sala, o operador de lastro recebe informações das variações de carga a bordo e recalcula KG , geralmente a cada 24 horas. Se o valor de KG estiver fora das especificações, o que se conclui através da consulta às curvas de KG máximo permitido, o operador pode corrigi-lo através do controle dos tanques de lastro.

No capítulo seguinte, discutiremos a estrutura do sistema de lastro e seus componentes em plataformas de produção de óleo e gás em geral. Apresentaremos também as principais atribuições da equipe de operadores responsáveis pela estabilidade da embarcação.

Capítulo 3

Sistema de Lastro

O sistema de lastro é responsável por manter a estabilidade do navio, definir o calado da embarcação e equilibrar a distribuição do peso a bordo, mesmo diante de perturbações causadas por transferência de carga, condições climáticas adversas ou até mesmo durante a produção de petróleo.

Na grande maioria das plataformas semi-submersíveis e nas FPSOs, o sistema de lastro consiste de um sistema de tanques, tubulações, válvulas e bombas, além da instrumentação necessária para supervisão do sistema, como sensores de nível, sensores de fim de curso de válvulas, medidores de pressão e de vazão.

O sistema de lastro faz parte dos chamados sistemas navais, que são os sistemas existentes em semi-submersíveis ou FPSOs que não estão ligados ao processo de produção de petróleo. Além do sistema de lastro, os sistemas navais incluem o sistema de esgoto e drenagem, sistemas de tubos de suspiros e sondagens, sistema de medição de calado e níveis de tanques e sistema hidráulico de comando de válvulas, portas estanques, *dampers* estanques ¹, escotilhas, bombas de lastro de acionamento hidráulico (PETROBRAS, 2005b).

Apesar do lastro fazer parte dos sistemas navais, ele deve ser totalmente independente dos sistemas de captação de água de resfriamento, injeção e incêndio. Essa independência se faz necessária por motivo de segurança.

O comando do sistema de lastro, geralmente é centralizado na sala de controle de lastro ou juntamente na sala de controle geral da embarcação, mas sempre com uma estação de supervisão e controle único, além de operadores dedicados a este sistema, ou, operadores dedicados aos sistemas navais. Neste caso, existem três supervisórios dedicados aos sistemas navais, mas que têm telas fixas com as informações necessárias. Em semi-submersíveis, existem ainda salas de controle locais em cada um dos quadrantes, que comandam os sistemas navais respectivos em caso de emergência. Dessa forma se tem uma atuação descentralizada, tornando o sistema menos dependente da sala de controle geral e, portanto menos vulnerável (PETROBRAS, 2005b).

¹*Dampers* são aletas de inclinação regulável utilizadas para restringir vazão de forma controlada

Além do sistema de lastro, existem outros sistemas de utilidades não-elétricas que podem influenciar na estabilidade, como sistemas de água salgada para resfriamento e injeção, sistema de incêndio e sistema de óleo diesel.

É importante salientar que, em FPSOs, os tanques de produção influenciam na estabilidade e devem ser utilizados de maneira pré-estabelecida pelo comando da embarcação para reduzir seu impacto na estabilidade da embarcação.

O comando automático de válvulas não é permitido normalmente em operações de lastro por questões de segurança (PETROBRAS, 2005b), excetuando-se alguns casos específicos encontrados na literatura. O comando das válvulas é feito pelos operadores, via supervisão ou localmente. As válvulas ficam somente nas posições aberta ou fechada (controle *on-off*).

3.1 Sistemas de Controle

A configuração básica do sistema de controle de uma semi-submersível leva em consideração duas formas de operação, a normal e a contingencial.

Na operação normal, o controle é feito via CLPs (sistema SCADA), a partir das estações de trabalho na sala de controle principal. Os CLPs responsáveis pelos sistemas navais são totalmente separados dos responsáveis pelos sistemas de produção.

Na operação contingencial, o controle é feito a partir das estações localizadas em cada quadrante, por meio de painéis hidráulicos e elétricos. A partir de cada painel é possível monitorar e atuar os componentes (válvulas, bombas, portas estanques, *dampers*, escotilhões, nível de tanques, etc) existentes no quadrante da respectiva coluna. Os painéis locais possuem representação mnemônica/sinótica dos componentes dos sistemas do quadrante a serem operados e monitorados (PETROBRAS, 2005b).

A partir de qualquer um dos sistemas é possível o acionamento dos elementos finais de controle.

Nas FPSOs, não existem as estações locais de operação contingencial, uma vez que existe somente uma casa de bombas. O lastro é comandado pela sala de controle principal e há, ainda, a possibilidade de acionamento manual (PETROBRAS, 2005a).

3.2 Tanques de Lastro

Nas embarcações para produção de petróleo, os tanques são projetados para que não haja operações de lastro por gravidade (PETROBRAS, 2005b).

Em semi-submersíveis, os tanques de lastro são simétricos em cada casco para se evitar grandes esforços na estrutura. Estes tanques são conectados pelo sistema de tubulação para que seja possível transportar lastro de um tanque a outro, em ajustes de trim e banda. Também é possível a captação de água do mar para o enchimento destes

tanques ou o descarte desta água para o mar, tendo-se em vista o ajuste do calado (HANCOX, 1998).

Um exemplo de localização dos tanques de lastro está mostrado na Figura 3.1, sendo I, II, III e IV os grupos de tanques de lastro e 1, 2, 3 e 4 as salas de bombas.

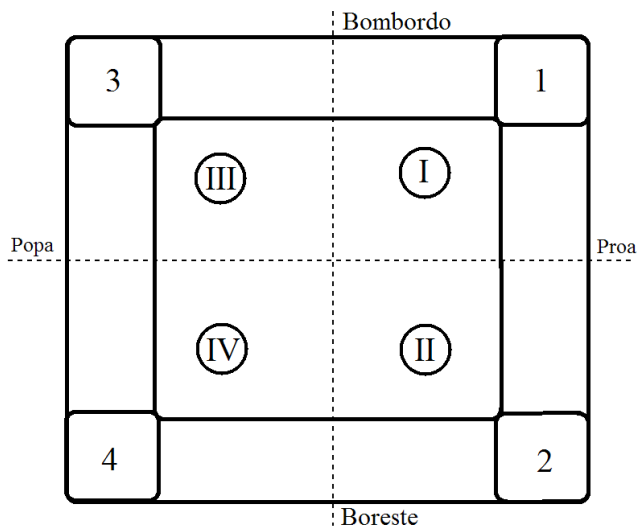


Figura 3.1: Vista superior dos grupos de tanques de lastro em uma plataforma semi-submersível.

Para reduzir o efeito de superfície livre prefere-se utilizar uma quantidade maior de tanques pequenos do que poucos tanques grandes (HANCOX, 1998). Geralmente, os grupos de tanques de lastro são interligados por válvulas normalmente fechadas, e possui um sistema de bombeamento por grupo.

Uma técnica utilizada também, em semi-submersíveis, é o sistema de lastro *load on top*, que é um sistema de lastro que impede o alagamento acidental evitando a interconexão direta dos tanques de lastro com o mar. Neste caso, os tanques são preenchidos e succionadas por meio das bombas de lastro. Para evitar sobre-pressões, esses tanques são providos de um sistema de descarte de líquido, que fica acima do calado de operação da unidade. Existe um *header* vertical da água de lastro para a transferência entre os tanques (PETROBRAS, 2005b).

Para a captação de água do mar para o sistema de lastro e, também em alguns casos para incêndio, resfriamento e injeção, existem as caixas de mar. Estas caixas ficam próximas ao fundo do flutuador, para evitar sua imersão em caso de inclinação severa, e contém sistemas de grade para filtro de impurezas marinhas, sistema de duas válvulas de conexão com o mar em série, uma acionada localmente e uma comandada remotamente, sistema de limpeza com hipoclorito e purga de ar (PETROBRAS, 2005b).

É recomendado que haja tancagem exclusiva de lastro de emergência, com volume mínimo de 50% do volume de ingresso de água salgada definido pela pior condição de alagamento. Estes tanques devem sempre permanecer cheios durante operação normal (PETROBRAS, 2005b).

Em FPSOs, os tanques de lastro se situam em torno da embarcação na área mais

externa. O lastreamento é feito por um *header* e o deslastreamento feito por um sistema em anel no fundo dos tanques (PETROBRAS, 2005a). Um exemplo de disposição dos tanques em um FPSO pode ser visto na Figura 3.2.

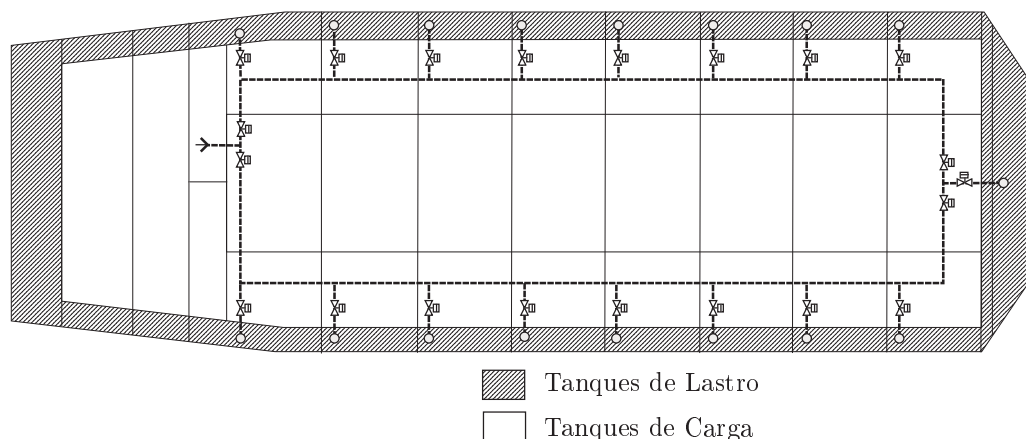


Figura 3.2: *Disposição dos tanques de lastro em uma FPSO.*

3.3 Tubulações em Semi-Submersíveis

Em semi-submersíveis é comum a utilização de tubulação em anel, e devem ser arrançadas de tal modo que os grupos de tanques (I, II, III e IV) estejam interconectados. A tubulação que conecta dois grupos possuirá duas válvulas de bloqueio acionadas remotamente pela sala de controle. Em operação de contingência, a sala de comando local deve comandar somente as válvulas referentes ao seu quadrante (PETROBRAS, 2005b). Um diagrama esquemático do sistema de tubos de uma semi-submersível pode ser visto na Figura 3.3.

3.4 Casas de Bombas

As bombas que se utilizam nos sistemas de lastro são usualmente centrífugas, pois a necessidade maior destes sistemas é uma capacidade alta de vazão de lastro e não de aumento de pressão (HANCOX, 1998).

As bombas de lastro são instaladas juntamente com outras bombas, como de esgoto, por exemplo, em uma ou mais casas de bombas para facilitar a manutenção dos equipamentos.

As bombas e equipamentos elétricos devem ter índice de proteção IP 58/Nema 3, a prova de respingos, ou IP 68/Nema 4, estanque à água (operação submersa), além de serem a prova de explosão (Ex d) ou segurança aumentada (Ex a). Por estar em alto mar, com uma atmosfera altamente corrosiva, a utilização de equipamentos de segurança intrínseca (Ex i) não é recomendada (HANCOX, 1998).

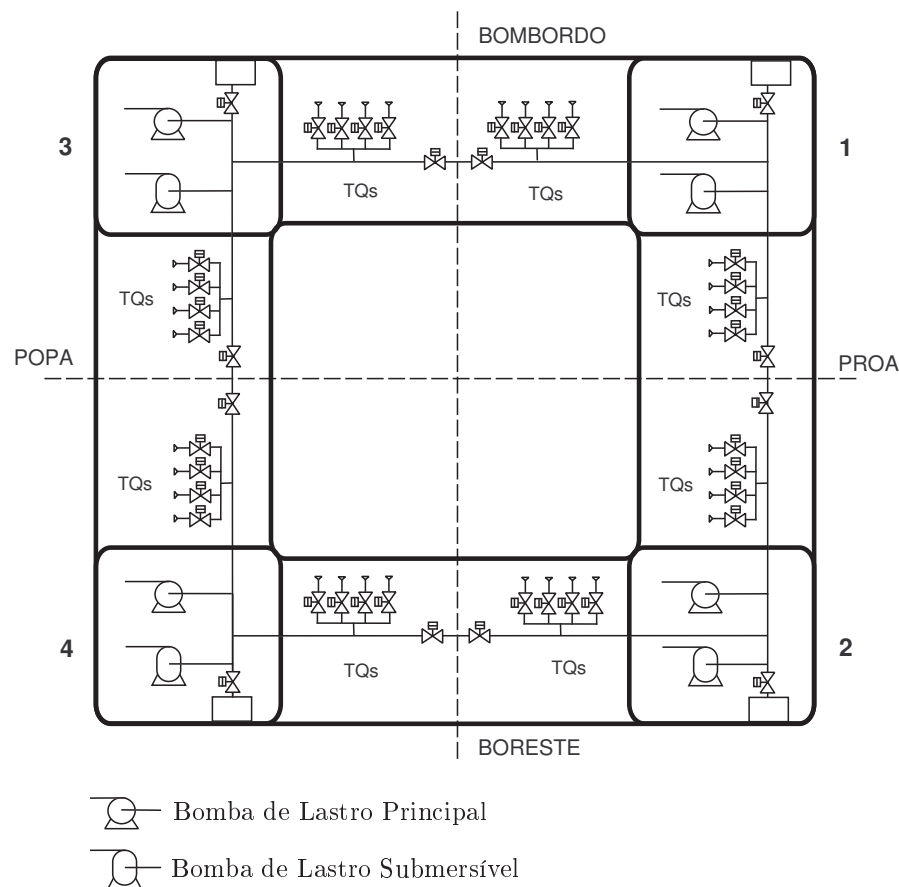


Figura 3.3: Tubulação do sistema de lastro em uma plataforma semi-submersível.

É uma prática comum a utilização de duas bombas de lastro dedicadas, por sala, uma delas com acionamento por motor elétrico e a segunda imersível, IP 68, podendo ser de acionamento elétrico ou hidráulico, ambas com a mesma capacidade. As bombas imersíveis também podem ser substituídas por edutores, com seu acionamento feito pelas bombas de lastro nas salas adjacentes (PETROBRAS, 2005b).

A localização das casas de bombas em semi-submersíveis varia em cada caso, mas em projetos mais modernos, existem quatro pequenas casas, uma em cada extremidade da embarcação, o que facilita a conexão cruzada entre os tanques de lastro (HANCOX, 1998). Estas casas de bombas são indicadas pelos números 1, 2, 3 e 4 na Figura 3.3.

As bombas de lastro possuem sistema de escorva ², que não impede a partida e que possibilita o esgotamento integral dos tanques. As bombas de um quadrante, em operação normal, são capazes de succionar os tanques de quadrantes adjacentes (PETROBRAS, 2005b).

As descargas das bombas de lastro possuem válvulas controladoras de vazão e, para melhorar seu desempenho, ficam preferencialmente no nível mais baixo possível.

²sistema que garante o preenchimento completo da bomba pelo líquido a ser bombeado, antes da partida

Em FPSOs, existe somente uma casa de bombas para o sistema de lastro, com duas bombas para operação e uma reserva. Este sistema é dimensionado para que seja possível o lastro ou deslastro completo em 36 horas (PETROBRAS, 2005a). Um diagrama esquemático desta casa de bombas é visto na Figura 3.4.

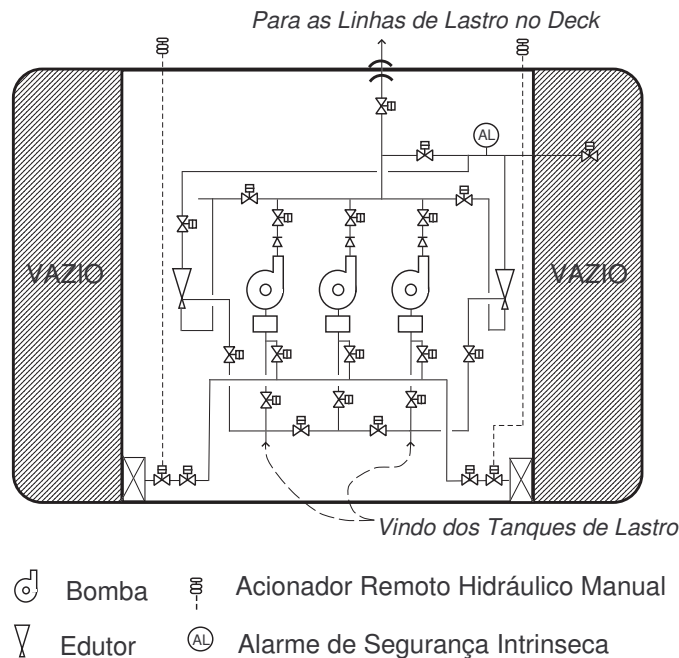


Figura 3.4: Casa de bombas em uma FPSO.

3.5 Válvulas e Acionamento Remoto

As válvulas utilizadas no sistema de lastro são escolhidas de acordo com sua função no sistema. As mais comumente utilizadas para o comando do sistema de lastro são as válvulas borboleta (Figura 3.5) e as válvulas gaveta (Figura 3.6), pois permitem uma grande vazão e uma alta vedação do sistema (HANCOX, 1998).



Figura 3.5: Válvula borboleta.

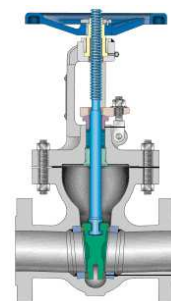


Figura 3.6: Válvula gaveta.

São utilizadas também válvulas de retenção (Figura 3.7), que permitem passagem do líquido em apenas uma direção, geralmente em tubulações de descarga das bombas. Um

tipo especial de válvula de retenção, denominada *válvula de pé*, é utilizada na tubulação de sucção das bombas, para manter a tubulação de entrada cheia de líquido e evitar problemas na partida das bombas (HANCOX, 1998).

As válvulas *shut-off*, ou válvulas de *trip*, (Figura 3.8) são utilizadas pelo sistema de segurança por sua capacidade de fechamento rápido, geralmente realizado por uma mola. Estas válvulas podem agir por acionamento manual, através de botões de emergência, ou acionamento automático, por exemplo, em casos de queda do sistema de energia principal. Seu comando geralmente acontece por energia armazenada em acumuladores hidráulicos ou pneumáticos, ou por uma linha de energia elétrica alternativa (HANCOX, 1998).

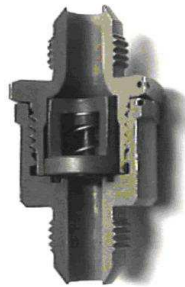


Figura 3.7: *Válvula de retenção.*



Figura 3.8: *Válvula shut-off.*

Existem várias opções para o acionamento remoto das válvulas de controle. O acionamento hidráulico é feito por tubulações de fluido hidráulico e uma unidade de alimentação hidráulica (*HPU - hydraulic power unit*), que gera a pressão necessária para o acionamento das válvulas de comando. O sistema é fechado, o óleo utilizado volta a um tanque para ser bombeado novamente pela HPU. Existem acumuladores na linha para que no caso da HPU falhar, existir pressão suficiente para levar a válvula a uma condição segura. Os acumuladores geralmente são projetados para 20 operações da maior válvula (HANCOX, 1998).

O acionamento pneumático é semelhante ao hidráulico, com a diferença de utilizar ar comprimido no lugar de fluido hidráulico. O ar comprimido é geralmente captado do sistema de ar comprimido da embarcação. É um circuito aberto, pois o ar é descartado após a utilização.

Os sistemas hidráulicos ou pneumáticos são mais antigos e seu acionamento é feito por válvulas de controle instaladas na sala de comando. Com a larga utilização de sistemas SCADA, estes sistemas foram substituídos por sistemas eletro-hidráulicos ou eletropneumáticos, que utilizam sinal elétrico para acionamento de uma válvula solenóide que permite ou inibe a passagem do fluido hidráulico ou ar comprimido. Por segurança, todas as válvulas solenóides possuem acionamento manual mecânico de emergência.

3.6 Medidores de Nível e Inclinômetros

As principais variáveis medidas no controle de lastro são o nível dos tanques e a inclinação da embarcação. O nível dos tanques estabelece a quantidade de líquido em cada um deles e possibilita o cálculo da estabilidade da embarcação.

Os medidores utilizados são de preferência não intrusivos, pois, a água do mar é bastante agressiva a instrumentação por causa de sua alta salinidade e substâncias orgânicas. Medidores de nível ultra-sônicos estão começando a ser utilizados, mas a medição já consolidada é feita por transmissores de pressão.

A inclinação é medida pelos chamados inclinômetros. Existem dois tipos básicos de inclinômetros, o eletrônico e o de bolha. O inclinômetro de bolha é encontrado em todas as embarcações, pois é independente de energia para seu funcionamento e age pelo simples princípio de gravidade. O inclinômetro eletrônico é um instrumento utilizado para enviar os dados de inclinação para o sistema supervisório, utilizando, como transdutores, giroscópios ou acelerômetros.

3.7 Sistemas supervisórios

O sistema de lastro tem uma estação de monitoração e supervisão separada do resto do comando da embarcação. Nessa o operador pode, através de um diagrama esquemático indicado na tela, verificar a posição real de cada válvula (aberto/fechado), o estado da unidade hidráulica (ligado/desligado), a pressão de óleo hidráulico (rede de pressão) e a indicação de alarme de nível baixo do tanque de óleo hidráulico, nos casos de válvulas com acionamento hidráulico ou eletro-hidráulico. Se as válvulas forem acionadas pneumaticamente existem indicadores para monitorar a linha de ar comprimido e compressores.

Para que o operador tenha as informações de maneira mais rápida, as informações geralmente estão disponíveis em uma tela única, como visto na Figura 3.9.

O supervisório tem sistema de alarmes que indica condições anormais ou até mesmo situações de falha ou erro, que podem ocasionar acidentes.

As telas do supervisório, por terem tantas informações, ficam pouco intuitivas para os operadores. Alguns estudos (MANZI et al., 2005) estão em curso para aperfeiçoar estas telas com as informações imprescindíveis para o operador, para tornar mais rápidas as ações do operador em caso de alguma anomalia no sistema.

3.8 Papel do Operador

O operador de lastro é o grande responsável pela estabilidade da embarcação. Seu papel é crucial, no que consta a observar todas as grandes mudanças de carga que

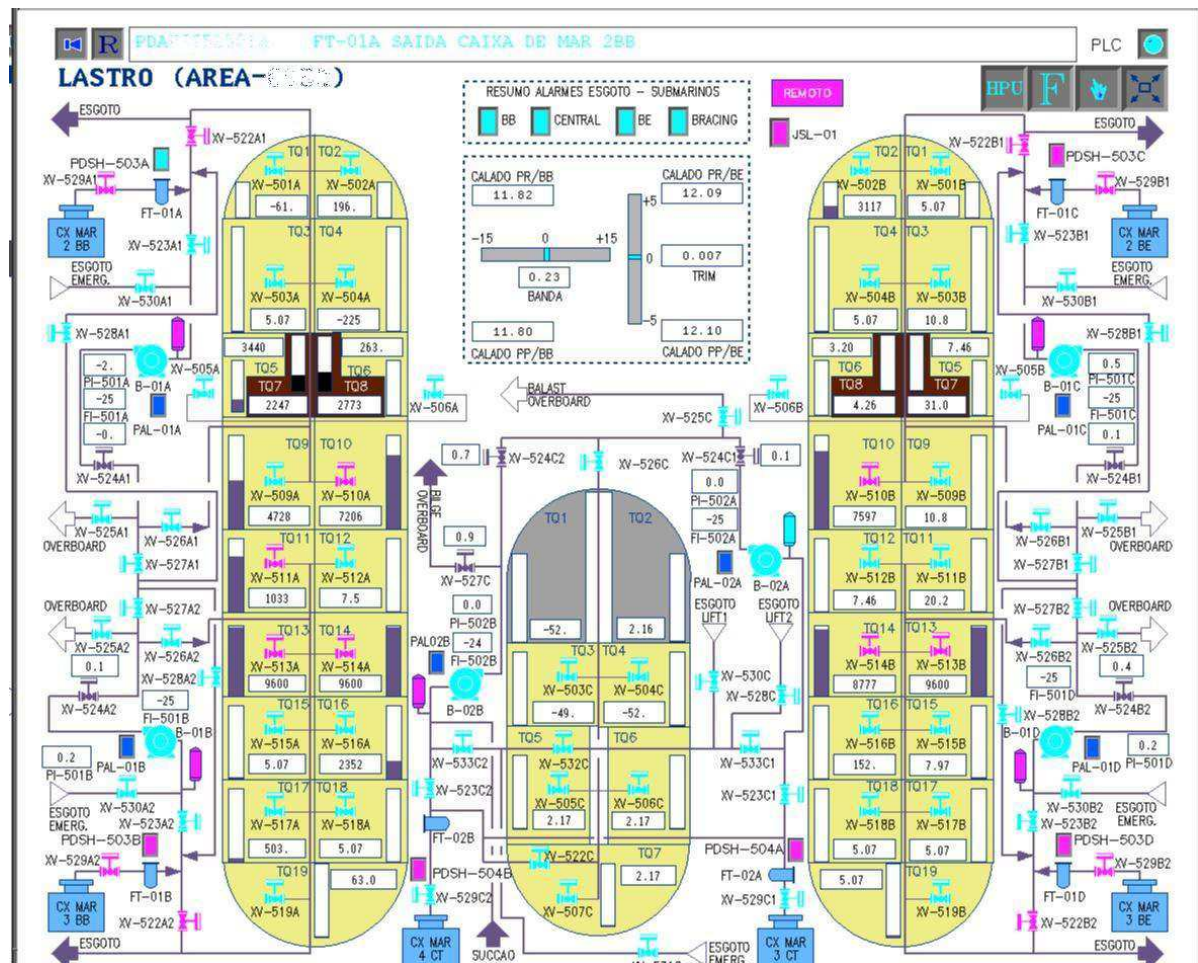


Figura 3.9: Tela do sistema supervisorio.

ocorrem na embarcação, assim como qualquer evento climático ou marítimo que possa influenciar na estabilidade. Quando é necessária uma grande variação do lastro ou até mesmo uma situação de emergência, o superior, que pode ser até mesmo o engenheiro naval a bordo deve autorizar a operação.

Por sua atribuição, o operador de lastro deve ser treinado em cálculos de estabilidade de embarcações e deve saber identificar problemas através dos resultados dos cálculos. Entre as principais atribuições da equipe de operadores de lastro estão (HANCOX, 1998):

- Manter a embarcação operando com parâmetros de estabilidade (calado, inclinação e etc) dentro das margens operacionais pré-determinadas.
- Distribuir o lastro da embarcação, bem como os consumíveis³, de forma adequada, mantendo-se dentro dos limites de estabilidade e calado.
- Monitorar a movimentação de cargas de forma a obter uma distribuição de pesos adequada, respeitando as margens disponíveis de estabilidade e as limitações estruturais da embarcação (esforços no casco).

³Consumíveis são produtos que são consumidos na operação normal da embarcação, como água potável e óleo diesel.

- Monitorar a estanqueidade dos compartimentos para antecipar situações de emergência ou de estabilidade avariada.
- Gerar e atualizar relatórios de estabilidade contendo todas as informações requeridas pelos seus superiores.
- Em conjunto com outras equipes da operação, utilizar o controle de lastro para levar a plataforma para um ponto operacional eficiente, bem como alertar as demais equipes caso haja alguma restrição que possa interferir na produção ou por em risco a estabilidade da embarcação e a segurança do pessoal a bordo.

Por sua importância, a supervisão do lastro é contínua e, em nenhum momento, pode ficar desassistida. Evita-se é atribuir aos operadores de lastro outras funções, como fornecimento de água para combate a incêndio, comando do posicionamento dinâmico ou monitoração da integridade da embarcação.

Diariamente é emitido um relatório sobre o lastro contendo (HANCOX, 1998):

- A condição da estabilidade, avaliada por meio da posição vertical do centro de gravidade atual e a máxima permitida, além da margem de estabilidade.
- A carga de bordo atual e a folga para a carga máxima.
- Os ângulos de trim e banda.
- A carga descartável⁴ para elevação da plataforma.
- A quantidade de combustível, água, outros líquidos disponíveis e consumíveis.
- Indicações sobre cargas de neve e gelo, no caso de plataformas situadas em regiões de clima frio, ou previsão de cargas futuras e qualquer indicação sobre o fato da embarcação estar trabalhando em algum critério mais alto ou mais baixo de estabilidade.

Nas novas plataformas, além dos sistemas supervisórios, são instalados *softwares* que auxiliam atividades usuais de operação como carga e descarga, cálculo de estabilidade, verificação de critérios normativos, elaboração dos relatórios diários, entre outros. No capítulo seguinte, discutiremos as principais aplicações e ferramentas computacionais utilizadas no suporte à operação de sistemas navais.

⁴Carga descartável é toda a carga que pode ser lançada ao mar em um momento de emergência, como água potável.

Capítulo 4

Ferramentas Computacionais para Auxílio no Controle de Lastro

Apesar de simples nos seus fundamentos, o tema estabilidade atinge grande complexidade quando se trata de monitorar a estabilidade de um navio ou plataforma de petróleo, com centenas de compartimentos e, virtualmente, infinitas possibilidades de carregamento e de flutuação (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

A implementação completa de métodos computacionais para a análise da estabilidade de embarcações e a adoção na prática desses sistemas computacionais são muito mais recentes. Atualmente, muitas embarcações são equipadas com ferramentas de suporte à análise de estabilidade, agregando mais segurança à operação naval e reduzindo a susceptibilidade a erros humanos.

Nas novas plataformas, além dos sistemas supervisórios, são instalados *softwares* que auxiliam a carga e a descarga nas embarcações. Essas ferramentas são capazes de, a partir dos dados de carregamento (peso e posição do centro de gravidade das cargas adicionadas, removidas ou deslocadas) introduzidos pelo operador, calcular a configuração dos tanques de lastro que deve ser adotada para equilibrar a plataforma com ângulos de trim e banda quase nulos. Isso provê ao operador mais segurança nas operações de lastro e mais rapidez nas ações de correção. Além de garantir simplesmente a estabilidade, deve-se enquadrar a situação do sistema dentro das regulamentações (WINJNGAARDEN; HEEMSKERK, 2000).

Essa necessidade se apresenta em outras embarcações não produtoras de petróleo, como as plataformas de perfuração, ou sondas de perfuração. Em (HAWN; GORDON, 1986) é apresentada a implementação de um sistema de controle de lastro de uma sonda. No trabalho, o operador completa a malha fechada do sistema de controle através de um painel de controle. O computador gerencia alarmes, monitora e controla o nível do lastro por meio de comandos do usuário e disponibiliza gráficos de parâmetros.

Mais recentemente (WINJNGAARDEN; HEEMSKERK, 2000) propõem o uso do computador para determinar a seqüência de carregamento e de lastreamento ótima, além

de auxiliar na análise de condições críticas. O uso computacional se torna indispensável ao se levar em conta que as embarcações marítimas geralmente tendem a ter um aumento de peso seco de 4% ao ano ou em torno de 20 toneladas por ano de produção, no caso de plataforma de produção (ROED; KARLSEN; DAVIES, 1986). Esse aumento de peso se dá majoritariamente pela instalação de novos equipamentos.

Particularmente para o caso de guindastes, as ferramentas computacionais têm um papel ainda maior, pois além da compensação dos momentos estáticos, os momentos dinâmicos também são de grande importância, especialmente quando há mudança de calado (WINJNGAARDEN; HEEMSKERK, 2000). Tanto que foi proposto por (KLUG, 1979) um sistema de lastro de movimentação bastante rápido, que com as exigências regulamentais de hoje torna o auxílio computacional fundamental.

4.1 Softwares de plataformas de produção de petróleo

Para exemplificar o caso de uma unidade flutuante de produção de óleo, tem-se o trabalho de (KILMURRAY, 1987) que expõe como é o sistema de lastro da plataforma Balmoral. Nessa, o gerenciamento do lastro é feito por computadores do tipo estação de trabalho, localizado na sala de controle de lastro, e um sistema digital de controle distribuído (SDCD). Estes equipamentos permitem que o operador monitore os níveis dos tanques, pesos, estados das válvulas e bombas, estabilidade, calado e as ações que estão sendo realizadas. Com as informações de carga informadas pelo operador e as informações dos sensores de tanque, ancoragem e propulsores, o programa calcula a arfagem, a banda, o calado, o centro de gravidade vertical e as margens de estabilidade, acionando alarmes caso limites sejam excedidos. Todas essas informações compõem relatórios diários de estabilidade, alarmes e a tabela de carregamento.

Um dos aspectos que se destacam no sistema de lastro da plataforma Balmoral é a funcionalidade que foi denominada de *ballast advisor* (conselheiro de lastro), que na verdade faz o papel de um sistema especialista. Esta ferramenta auxilia no planejamento e execução de mudanças significativas no calado e carga (KILMURRAY, 1987). Como um sistema especialista, o sistema "conselheiro" sugere mudanças no lastro, tanques e alinhamento de bombas e válvulas, para uma dada operação. De forma geral as operações são divididas em mudança de carga, grandes mudanças de lastro e estabilidade avariada.

No primeiro tipo de situação, o operador insere no sistema a distribuição carga atual da embarcação ou pode-se propor mudanças na carga, como níveis de tanques, carga no *deck*, carga no guindaste ou mudança no centro de gravidade. Com esses dados, o sistema "conselheiro" calcula o estado da embarcação (calado, arfagem, banda, momentos, etc) e propõem novos níveis de tanques para que se mantenha o calado com arfagem e banda nulos.

Grandes mudanças no lastro ocorrem quando a plataforma muda sua situação atual, podendo esta estar em modo de trânsito, se deslocando; em modo de sobrevivência, em condições severas; ou em modo de operação, que é o esperado para a maior parte de sua vida útil. E para diminuir a possibilidade de erro do operador durante a mudança de

situação, os tanques de lastro são classificados como fixos, principais e de arfagem no programa da plataforma Balmoral. Então as operações são subdivididas em passos onde em cada um, o sistema "conselheiro" calcula o as mudanças necessárias no peso total e nos momentos usando tanques pré-selecionados.

Para o caso de avaria na estabilidade, o "conselheiro" dispõe da relação de compartimentos potencialmente capazes de sofrer dano e seus pesos em caso de inundação. Após o operador informar os dados e níveis de alagamento, o sistema sugere ações para aliviar os dados.

Após a aprovação do operador com relação à operação a se realizar, a atuação no controle de lastro pode ser feita de dois modos. No modo manual, o operador aciona válvulas e bombas individualmente pelo painel. O outro modo de atuação é o outro ponto de destaque do sistema de lastro da plataforma Balmoral, que é o modo semi-automático. Neste modo o sistema realiza cada passo da seqüência de lastreamento previamente determinada de forma autônoma, após a autorização do operador. Neste modo são usadas somente bombas para eliminar água para o mar e válvulas com ligação para o mar para permitir a entrada de água (KILMURRAY, 1987).

4.2 Sstab

Dentre os diversos programas disponíveis no mercado para auxiliar o controle de lastro, como o Autoload (AUTOSHIP SYSTEMS CORPORATION, 2006) e Hecsalv (HERBERT SOFTWARE SOLUTIONS, 2006), na indústria petroleira nacional destaca-se o Sstab que pode ser usado tanto para plataformas semi-submersíveis, navios ou sistemas marítimos compostos por mais de um casco. Esta seção tem o intuito de apresentar as principais funções do programa, pertinentes ao gerenciamento de lastro, e por isso é baseado na referência (COELHO; NASCIMENTO, 2002).

Este programa, como diversos outros, não visa a determinação automática dos pontos de operação mais adequados, mas se propõe como uma ferramenta para auxiliar a busca deste ponto de operação provendo visualizações e cálculos de forma fácil e rápida além de facilitar a análise dos resultados. Assim a escolha final da solução mais adequada é do operador do sistema de lastro. Na Figura 4.1 é apresentado um exemplo de tela do programa.

4.2.1 Classificação de Volumes

Todo o cálculo realizado pelo programa baseia-se na modelagem dos volumes, que tem a parte geométrica oriunda do programa *Mesh Generator* (MS). Este gera um modelo tridimensional que viabiliza diversas características desejáveis, especialmente no que tange à visualização de compartimentos e da embarcação e suas iterações com os líquidos. Como exemplos tem-se visualização do sistema sólido, transparente ou somente visualização das arestas das áreas dos volumes; pontos de vista em perspectiva que per-

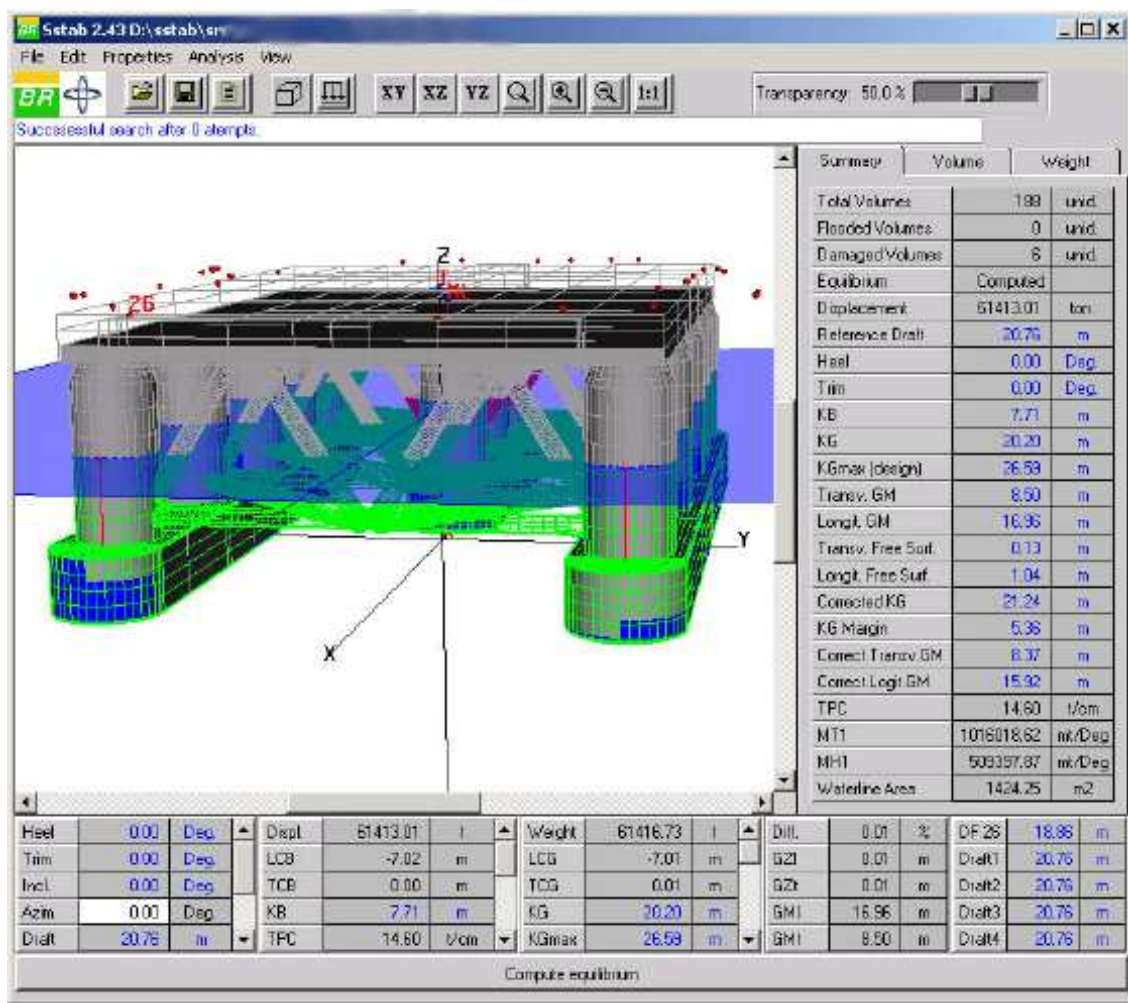


Figura 4.1: Exemplo de tela do Sstab.

mitem rotações, ou mudanças do ponto de vista; e ainda observação do movimento da embarcação na mudança de pontos operacionais.

Cada compartimento que compõe a embarcação é tratado de forma independente e após a sua geração pelo MS, ele é classificado em vários quesitos. O primeiro é quanto a sua posição, podendo ser interno ou externo. Os externos compõem a superfície do casco e os internos não entram em contato com o líquido externo.

Como exemplo de tanques em uma FPSO tem-se a figura 4.2 ilustrando o casco da plataforma, os tanques de lastro, o compartimento com a praça de utilidades, bombas de incêndio e seu acesso, e os tanques de carga.

Uma segunda classificação indica a capacidade de lastreamento, podendo ser lastreável ou não. Os lastreáveis contribuem com o peso associado ao nível de água no seu interior, quando não se encontra avariado. Conseqüentemente, está associado aos compartimentos lastreáveis a localização do sensor de nível, que informa o nível dentro do compartimento normalmente por meio da leitura de pressão.

Uma terceira classificação é quanto à integridade, podendo estar intacto, avariado

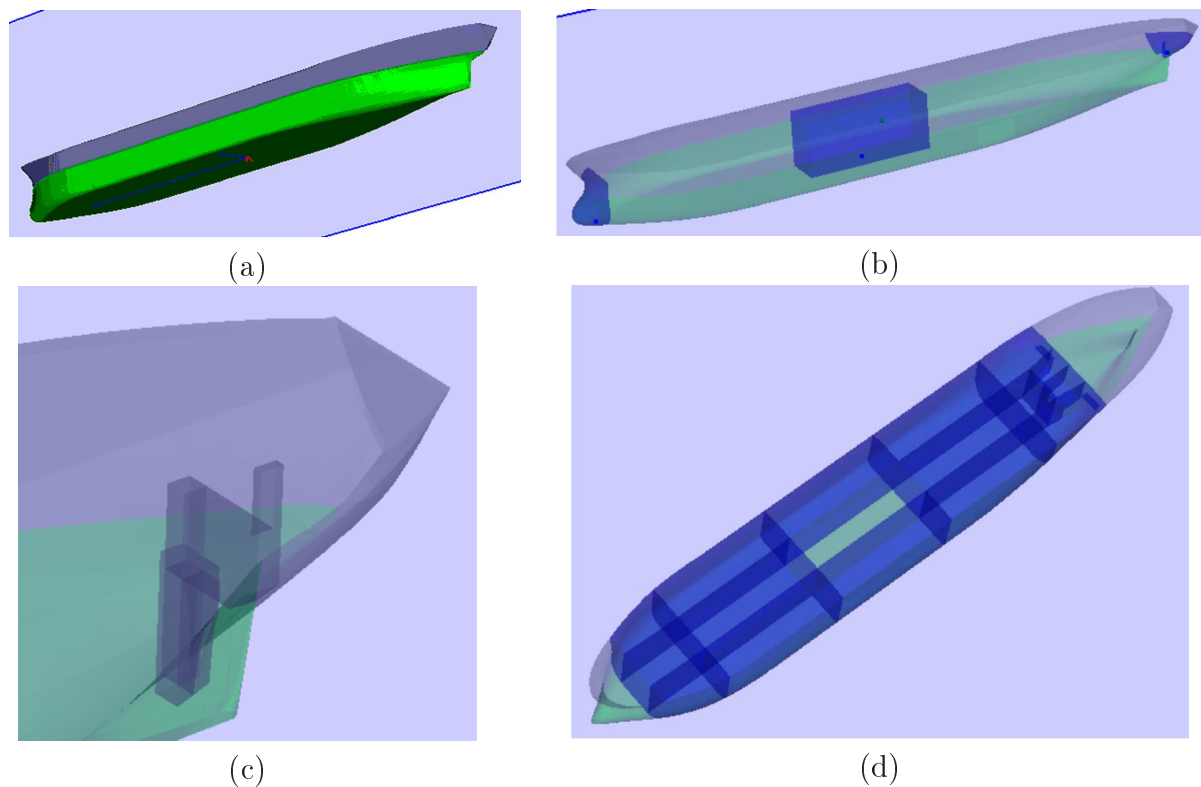


Figura 4.2: *Tanques de uma FPSO: (a) Vista inferior do casco no SSTAB. (b) Vista inferior dos tanques de lastro. (c) Acesso e praça de utilidades e das bombas de incêndio de bombordo e boreste. (d) Tanques de carga ao longo do modelo no software SSTAB.*

ou alagado. Os volumes intactos que são externos contribuem com o empuxo do sistema. Aos avariados estão associados à posição da avaria, que é uma coordenada informada pelo usuário. Estes volumes recebem água até o nível da linha d'água atual, dependendo da posição da avaria. Os classificados como alagado assumem esse estado devido a ação de linhas internas, resultantes de uma situação normal ou não.

Pelas classificações, pode-se destacar que o tanque interno avariado reduz o empuxo total, porém somente pela parcela que está abaixo da linha d'água. Porém, se o tanque interno está alagado, não influencia no empuxo, mas o peso do líquido interno é incorporado ao sistema.

4.2.2 Cálculo dos Volumes

O Sstab usa uma modelagem feita com a fronteira de cada compartimento sendo representada por um conjunto de faces. Por esta razão é usado o Teoremas de Green para calcular áreas como integrais numéricas de linha, e o Teorema de Stokes para calcular volumes como integrais de superfícies. No cálculo do volume, o programa fornece também a posição do centro de carena de cada compartimento.

No cálculo de alagamento, o programa separa as faces do volume classificando-as como faces emersas, submersas e parcialmente submersas. As faces emersas são descar-

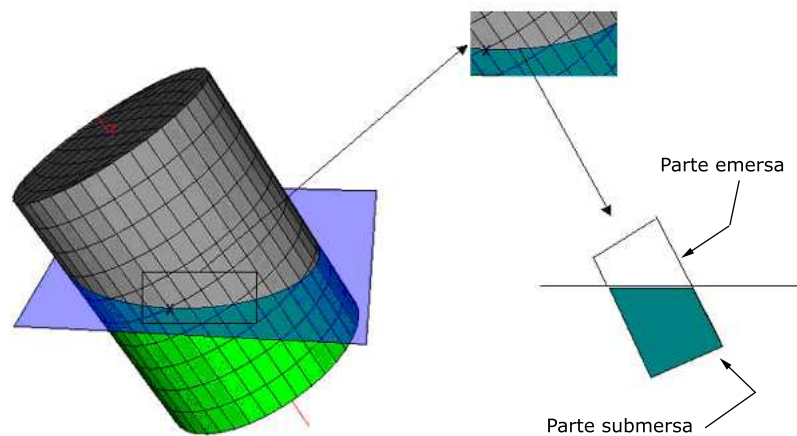


Figura 4.3: *Exemplo de como é tratado um volume parcialmente submerso.*

tadas do cálculo do volume de líquido de alagamento, ao contrário das áreas das faces submersas, que são usadas em sua totalidade na integração que fornece o volume alagado. Para as faces parcialmente emersas, a área usada no cálculo é definida usando a linha d'água. Na prática, as faces parcialmente submersas são divididas em duas faces, uma totalmente emersa e outra totalmente submersa. E que resultam em dois volumes, um emerso e outro submerso. A Figura 4.3 ilustra como é feito.

4.2.3 Variações no Equilíbrio

São muitos aspectos que influenciam na dinâmica do equilíbrio, mas alguns merecem destaque, principalmente o tanque de lastro, que é o principal mecanismo de atuação. A influência no equilíbrio dos tanques de lastro, quando intactos, é no centro de gravidade, que varia no tempo em razão das inclinações. E quando avariados, deixam de contribuir com o peso. Para os tanques de lastro classificados como externos quando avariados, além de deixarem de contribuir com o peso eles também reduzem o empuxo da plataforma.

É importante destacar que o volume alagável não é necessariamente o mesmo que o volume do tanque, pois a carga deste ocupa um espaço que o líquido não irá ocupar, como mostrado na figura 4.4. Esta diferença é levada em conta no momento da modelagem do espaço como permeabilidade do tanque. A permeabilidade é a razão entre "quantidade volumétrica que preenche o tanque totalmente e o volume deslocado de água pela casca externa do tanque".

A influência do vento na estabilidade também é significativa, e no programa é calculada conforme a formulação apresentada no Código Modu de 1989. O cálculo é executado automaticamente, caso as áreas de vento estejam modeladas. Essas áreas são aquelas que estão sob a ação direta do vento, e o usuário deve fornecer para o programa, informações do modelo como áreas longitudinais, transversais e verticais, além da posição do centro geométrico em relação à quilha e o coeficiente de forma geométrico. Um exemplo da tabela usada para a determinação da curva de vento é mostrado na figura 4.5.

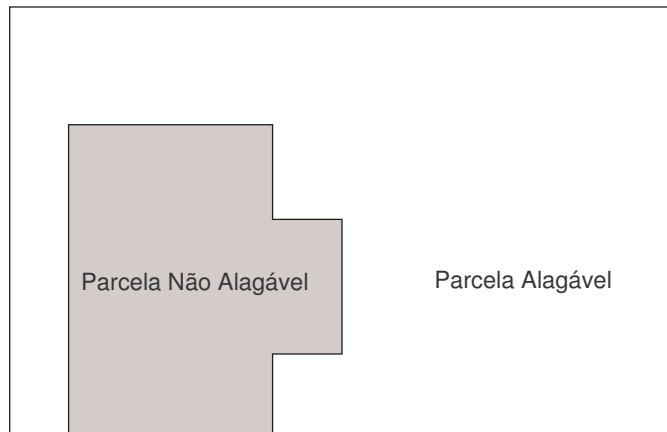


Figura 4.4: *Exemplo de um compartimento cujo volume alagável é diferente do volume do compartimento.*

4.2.4 Determinação do Equilíbrio

Antes de início do cálculo, parâmetros como a densidade da água, a posição dos sensores dos tanques, tão como a permeabilidade e demais atributos relacionados à modelagem devem ser especificados.

O programa realiza o cálculo para a determinação do ponto de equilíbrio de forma separada para cada elemento que o compõe. São eles as forças verticais, o momento de trim e o momento de banda. As forças verticais são encontradas buscando uma posição vertical da embarcação que iguale a força total de empuxo com o peso total do sistema. As maneiras de encontrar o equilíbrio dos momentos de trim e banda são similares. O de trim é encontrado equilibrando os momentos em torno do eixo transversal do sistema, comparando as coordenadas do centro de gravidade com o centro de empuxo na direção longitudinal. Para o momento de banda é usado o eixo longitudinal e comparam-se as coordenadas do centro de gravidade com o centro de empuxo na direção transversal.

O programa Sstab usa as expressões derivadas da matemática de pequenos ângulos para a definição da altura metacêntrica, que é usado na aferição da condição de equilíbrio momentânea e a comparação com as curvas de KG máximo. Normalmente, o usuário usa o gráfico das curvas de KG máximo com os valores de $GM = 1,0$ e $GM = 0,3$. Porém é dever do usuário ficar atento para o caso do equilíbrio instável, quando a altura metacêntrica é negativa.

Após o cálculo do equilíbrio o programa fornece a condição final de equilíbrio da plataforma. Retornando ao usuário os valores de calado, trim, banda, deslocamento que representa a condição real da unidade, além da representação da plataforma em três dimensões nessa situação.

As formas de se encontrar o equilíbrio podem ser alteradas e configuradas para atender a necessidades especiais do usuário. Uma possibilidade é a fixação do valor do trim ou da arfagem para que na análise de estabilidade, o modelo do projeto fique impossibilitado de variar o ângulo de inclinação transversal ou longitudinal, respectivamente.

The screenshot shows a software window titled "LCS Heeling Areas" with two tabs: "Wind Heeling Areas" and "Tables of Shape factor". The "Tables of Shape factor" tab is active, displaying a table with 14 columns and 17 rows. The columns are: Item, Name, Active, N° Elem, Area Lg, Center L, Height L, Area Tv, Center T, Height T, Area Hz, Center H, Height H, and Shape Factor. The "Number of area items" is 17 and "Wind Velocity" is 40.00. The table lists 17 items, including Deck Box, various Columns (C1-C5, W1-W5), and Pontoon components (C, E, W). Active items are highlighted in green, and inactive items are in grey. A "Close" button is at the bottom center.

Item	Name	Active	N° Elem	Area Lg	Center L	Height L	Area Tv	Center T	Height T	Area Hz	Center H	Height H	Shape Factor
1	Deck Box	active	1	720.00	37.00	6.00	480.00	37.00	6.00	9600.00	40.00	80.00	1.00
2	Column C1	inactive	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
3	Column C2	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
4	Column C3	inactive	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
5	Column E1	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
6	Column E2	inactive	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
7	Column E3	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
8	Column E4	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
9	Column E5	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
10	Column W1	inactive	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
11	Column W2	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
12	Column W3	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
13	Column W4	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
14	Column W5	active	1	300.00	21.50	25.00	300.00	21.50	25.00	113.10	34.00	12.00	0.50
15	PontoonC	inactive	1	540.00	4.50	9.00	135.00	4.50	9.00	900.00	9.00	15.00	1.01
16	PontoonE	active	1	1080.00	4.50	9.00	135.00	4.50	9.00	1800.00	9.00	15.00	1.01
17	PontoonW	inactive	1	1080.00	4.50	9.00	135.00	4.50	9.00	1800.00	9.00	15.00	1.01

Figura 4.5: Tabela para a geração da curva de ventos.

Outra possibilidade de configuração que o usuário tem é forçar o centro de gravidade e o peso de projeto para determinados valores.

4.2.5 Relatórios

O Sstab gera relatórios que espelham o boletim de estabilidade emitido diariamente a bordo. Dentre as informações disponíveis para o relatório estão a localização da unidade e informações sobre o pessoal a bordo. A cada quatro horas devem ser registradas informações que podem constar no relatório. Estas informações são com relação aos tanques, incluindo os de suprimento, aos cabos de ancoragem e situação da embarcação.

4.2.6 Curvas disponíveis para análise

Para facilitar a análise de estabilidade, o programa possibilita a geração de curvas e diagramas com esse fim, como tabela hidrostática, gráficos hidrostáticos, diagrama de estabilidade e curvas cruzadas. O diagrama de estabilidade da unidade, cujas curvas do momento de endireitamento e momento de emborcamento provocado pelo vento devem ser construídas para todos os calados de operação, incluindo as condições em trânsito. O diagrama deve considerar os eixos mais críticos e a superfície livre dos líquidos nos tanques. Também deve ser considerando a carga máxima no deck com equipamentos na

posição mais desfavorável. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram, respectivamente, o diagrama de estabilidade e a tabela referente.

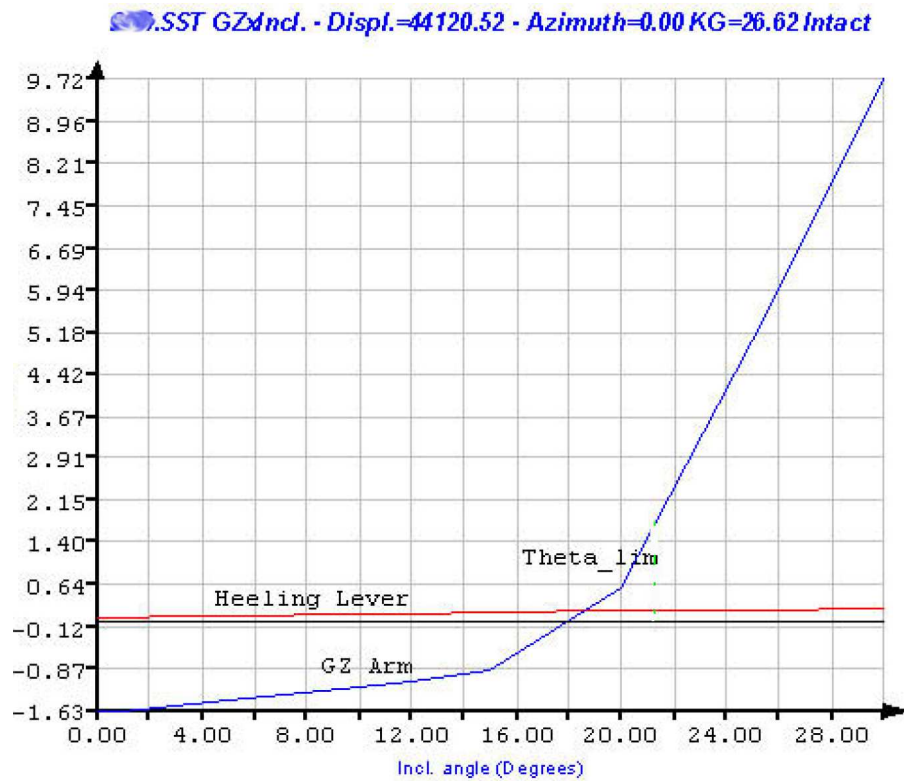


Figura 4.6: Exemplo de diagrama de estabilidade.

As curvas cruzadas de estabilidade, ou também denominado gráfico de Carenas Inclínadas, são constituídas por uma série de curvas que representam, para cada ângulo de inclinação, o valor do braço de estabilidade em função do deslocamento também pode ser obtido. A Figura 4.8 mostra um exemplo das curvas cruzadas de estabilidade.

Na Figura 4.9 está um exemplo de curva de KG máximo para os valores de $GM = 1,0$ e $GM = 0,3$.

Point	Incl (deg)	Trim (deg)	GZ arm (m)	Draft (m)	WHL (m)	FP Height (m)	Lowest FP
1	0.000	-1.000	-0.323	20.803	0.016	17.926	27
2	1.000	-0.118	-0.213	20.901	0.024	17.599	34
3	3.000	1.382	0.024	21.115	0.040	15.267	32
4	5.000	3.146	0.249	21.310	0.056	12.644	32
5	10.000	6.939	0.920	21.912	0.094	5.600	25
6	12.000	7.529	2.082	22.090	0.108	3.257	25
7	15.000	7.617	5.464	22.003	0.129	0.520	25
8	20.000	9.726	11.008	21.841	0.161	-5.117	25
9	25.000	13.347	13.781	21.661	0.188	-11.468	25
10	30.000	17.601	14.769	21.686	0.210	-18.092	25
Parameter	Value	IMO 1989	DNV 1989	ABS 1991			
Theta_0	2.800						
Theta_1	3.154						
Theta_2	Out of range						
Theta_d	15.586						
Theta_lim	15.586						
Stab_range	12.432						
GZ/WHL_max	44.202						
Area_ratio	17.231	Area_ratio:1.3	Area_ratio:1.3	Area_ratio:1.3			

Figura 4.7: Tabela usada na geração do exemplo anterior.

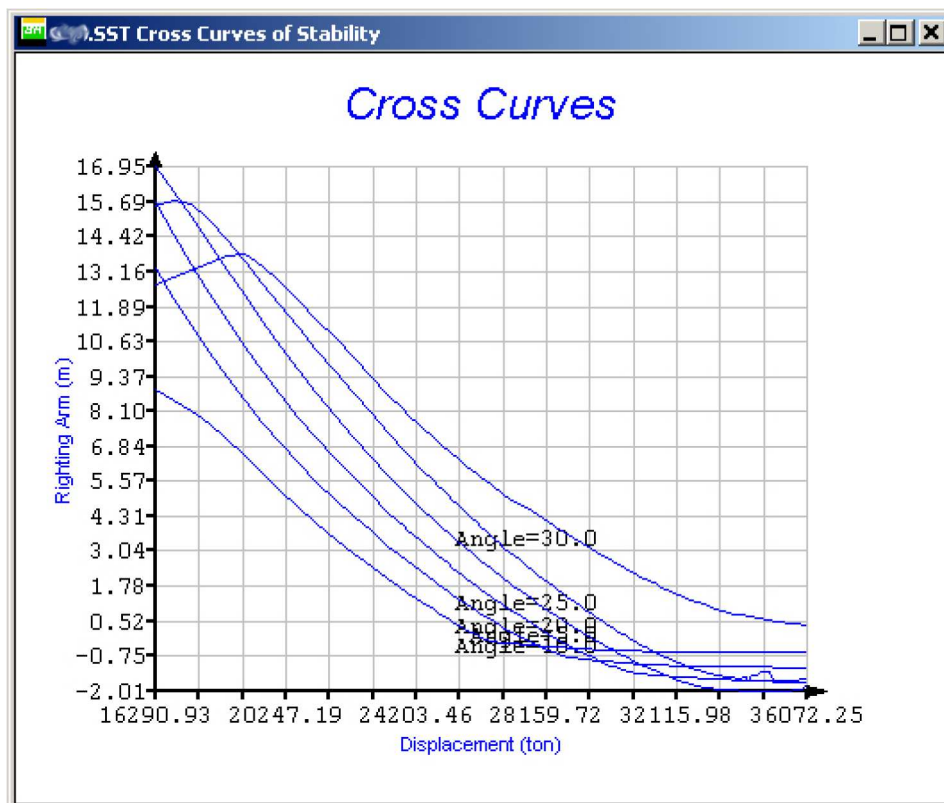


Figura 4.8: Exemplo de curvas cruzadas de estabilidade

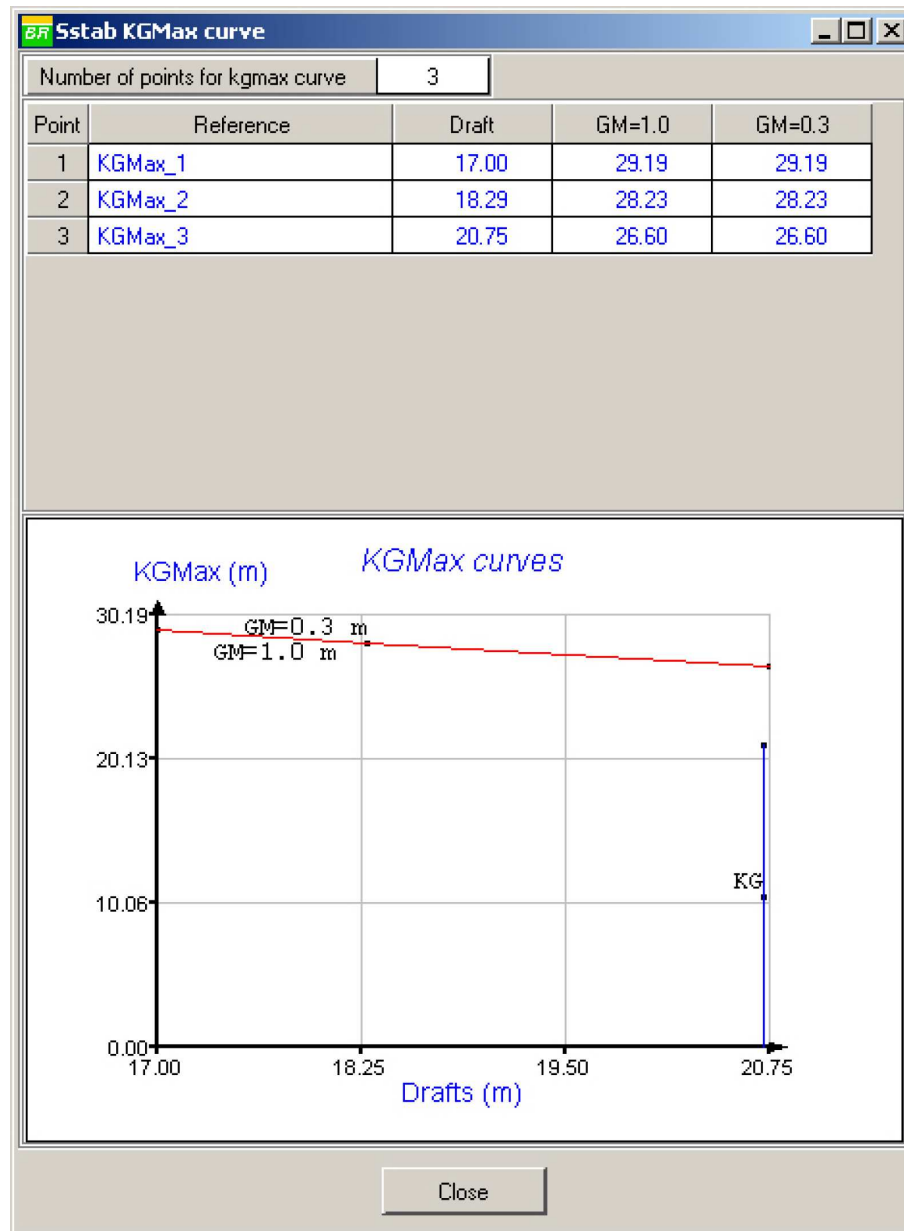


Figura 4.9: Exemplo de curva de KG máximo.

Capítulo 5

Alternativas para a Automação do Controle de Lastro

Apesar de ser estudado e utilizado há mais de um século, o controle de lastro de embarcações ainda é usualmente realizado manualmente e com total dependência do ser humano, no caso, o operador de lastro. Essa tradição é consequência da importância que o controle de lastro tem sobre a estabilidade da embarcação, pois a má operação do sistema de lastro pode levar a embarcação à instabilidade e provocar seu emborcamento. Acidentes envolvendo plataformas semi-submersíveis, como o famoso acidente da plataforma P-36 (ANP, 2001), ou até mesmo incidentes em FPSOs, como o ocorrido com o P-34 (ANP, 2003), têm ligação em algum instante com o sistema de lastro, o que mostra a importância deste sistema na integridade das plataformas.

Existem diversas dificuldades na implementação de um controle automático de lastro. Uma delas é a questão da retroalimentação, pois, apesar do calado e das inclinações da embarcação serem medidos hoje com relativa facilidade, a alteração destas variáveis ocorrem, na maior parte, pela ação humana na movimentação de cargas na embarcação. O controle automático deveria sentir estas alterações para poder agir, mas como a movimentação de cargas pode ser mais rápida que a capacidade de reação do sistema, pois a vazão das bombas de lastro é limitada, esta diferença de velocidade poderia levar a embarcação a uma variação brusca de sua condição. Neste caso, a ação do operador age como um controle antecipatório, pois ao saber como as cargas irão se mover, ele age antecipadamente na movimentação do lastro para evitar a perda de estabilidade.

Apesar deste problema descrito, existem na literatura, algumas implementações que citam alternativas ao controle automático de lastro ou até mesmo novos conceitos em sistemas de controle que poderiam ser avaliados para aplicações em lastro.

Não é objetivo deste trabalho desenvolver novas soluções, mas somente avaliar possíveis caminhos para o desenvolvimento do controle automático aplicado ao problema de lastro. Para isso, apresentaremos neste capítulo algumas abordagens usualmente aplicadas em problemas de controle e automação que poderiam ser adotadas no problema em

questão.

5.1 Sistemas Especialistas

Segundo (SAITO; CAMPOS, 2004), sistemas especialistas são sistemas inteligentes baseados em conhecimentos. Basicamente, um sistema especialista pode ser visto como uma plataforma que auxilia a tomada de decisão utilizando, para isso, um banco de dados que consolida o conhecimento dos especialistas da área a respeito de um determinado problema. Esse banco de dados é denominado *base de conhecimentos* e é manipulado e acessado através de *regras e/ou procedimentos*. O cérebro do sistema especialista é denominado *motor de inferência* e contém um conjunto de algoritmos de busca que, para um dado problema especificado através de uma interface de usuário, vai explorar a base de conhecimentos e buscar a solução adequada. A estrutura de um sistema especialista está mostrada na Figura 5.1.

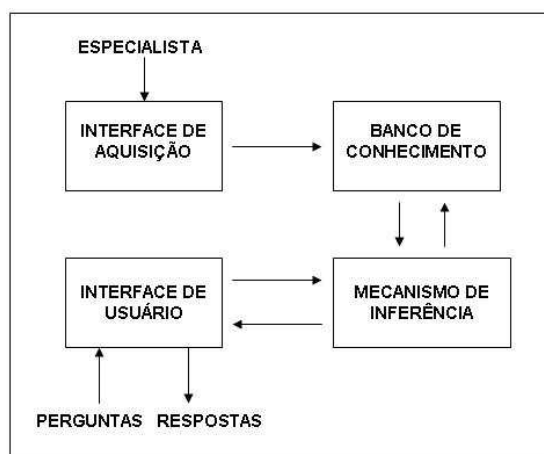


Figura 5.1: *Estrutura de um sistema especialista.*

Foram encontradas na literatura, referências a duas abordagens diferentes de sistemas especialistas relacionados a controle de lastro.

No artigo (HOCK; BALABAN, 1984) é descrito um sistema de análise de falhas em uma plataforma semi-submersível de casco duplo, que evita que uma falha simples ou múltiplas falhas não catastróficas causem a desestabilização da embarcação.

No caso de falha simples, inicialmente é determinada a ocorrência de uma falha e, então, associa-se essa falha com suas conseqüências utilizando um sistema lógico, com portas *E* e *OU*. A partir daí, existe na base de conhecimento uma árvore de decisão para a definição da ação do operador em cada caso.

No caso de falhas mais complexas, que são falhas menos previsíveis e que não estão descritas no banco de conhecimento, é feita uma análise dos efeitos observados e então o erro presente é associado a erros previstos nos diagramas lógicos e árvores de decisão. Geralmente, para os mesmos efeitos, as decisões levantadas pelo sistema são comple-

mentares ou similares, o que leva, de qualquer forma, a embarcação a uma situação segura.

Foi comentado na Seção 4.1 o exemplo da plataforma Balmoral (KILMURRAY, 1987), onde é descrito um sistema de controle em uma embarcação de produção de petróleo. O sistema descrito é um exemplo da utilização de um sistema especialista em controle de lastro. O denominado "conselheiro de lastro" é a compilação dos conhecimentos de especialistas sobre o comportamento da plataforma em relação a alterações de carga e lastro.

Uma característica desse sistema é a disponibilidade de atuação manual ou semi-automática. Após a sugestão do sistema sobre qual deve ser a próxima configuração do sistema de lastro, o operador pode decidir por levar o sistema a este ponto atuando sobre as válvulas e bombas necessárias (sistema manual), ou permitindo que o próprio *software* possa agir para levar o sistema a condição sugerida (sistema semi-automático). A atuação semi-automática é um dos métodos estudados mais próximos do controle automático de lastro, pois só necessita do aval do operador para automaticamente levar a plataforma de uma condição de lastro para outra.

5.2 Controle Avançado

Na indústria do petróleo, principalmente na área de refino, é comum denominar controle avançado o uso de técnicas de controle que se situam em um nível de controle acima do controle regulatório normal.

Nível de controle é uma denominação encontrada na indústria quando se utiliza o controle em camadas. A implementação de controle em camadas é utilizada na automação de sistemas complexos, como controle de planta inteira na indústria petroquímica (LARSSON; SKOGESTAD, 2000), e se baseia em ações de controle que agem em diferentes escalas de tempo, geralmente níveis mais altos agem com uma frequência menor. Cada nível recebe uma retroalimentação ou informação do processo, ou nível abaixo, e segue os *set-points* gerados pelos níveis superiores.

O controle avançado envia os *set-points* para o controle regulatório e recebe informações do processo e do próprio controle regulatório, mas age somente uma vez a cada minuto. O controle regulatório, por sua vez, age em ciclos mais rápidos, especificados pelo ciclo do controlador.

O processo do controle avançado segue os seguintes passos (SPANDRI, 2006):

- registra as alterações ocorridas nos *set-points* de todas as variáveis manipuladas, com isso, faz previsões do valor futuro para as variáveis controladas;
- pesquisa quais variações são necessárias em todas as variáveis manipuladas para deixar as previsões futuras das variáveis controladas dentro de faixas aceitáveis de mínimo e máximo. Isso é uma otimização que usa programação linear ou quadrática e que define os objetivos para as variáveis manipuladas;

- encaminha a unidade suavemente, ao longo do tempo, para os objetivos definidos pela otimização.

Como já foi apresentado anteriormente, existem *softwares* para o controle de lastro que calculam os valores de nível de lastro para que se atinja a posição mais segura, em termos de estabilidade, da embarcação, sem violar suas restrições construtivas e estruturais. Como a ferramenta já gera um modelo aproximado da embarcação real, pode-se saber antecipadamente qual a reação da embarcação a cada variação da distribuição de carga ou variação do sistema de lastro.

Utilizando os mesmos conceitos do controle avançado para o refino, uma possível abordagem é a utilização do controle regulatório nos níveis de tanques, seguindo *set-points* gerados pelo *software*. Os dados de entrada do controle avançado podem ser os sensores de nível, calado e inclinação, além da distribuição de carga na embarcação que deveria ser informada pelo operador de lastro.

Neste caso, este controle avançado simula o controle antecipatório (*feedforward*) que é feito pelo operador ao saber sobre a variação das cargas do sistema e qual a sua influência no sistema.

5.3 Controle Nebuloso

Um dos grandes problemas enfrentados no desenvolvimento do sistema de controle de lastro é a dificuldade de desenvolver o modelo do processo.

Atualmente, uma maneira de lidar com essa dificuldade é a utilização dos chamados modelos nebulosos (do inglês *fuzzy*) (SAITO; CAMPOS, 2004) que tentam modelar não o processo em si, mas a ação humana sobre este processo através de variáveis lingüísticas e conjuntos nebulosos. Conjuntos *fuzzy* são conjuntos que evitam passagens bruscas entre dois estados, utilizando, no lugar da lógica booleana clássica, o conceito da lógica nebulosa (lógica *fuzzy*). Nesse contexto, em vez de um elemento pertencer ou não a um conjunto ($0 = \text{não pertence}$ ou $1 = \text{pertence}$), ele tem uma função de pertinência a um conjunto, que varia continuamente de 0 a 1 quanto mais o elemento pertencer a esse conjunto. Um exemplo de função de pertinência de um conjunto nebuloso pode ser visto na Figura 5.2.

Os sistemas *fuzzy* para controle de processo nasceram da observação de que o operador humano é capaz de controlar sistemas complexos de maneira satisfatória. Este controle *fuzzy* é uma função não-linear entre as variáveis de entrada e de saída, que reflete os conhecimentos dos operadores a respeito desse processo, representados na forma de conjuntos nebulosos e do conjunto de regras lingüísticas.

O controlador *fuzzy* tem as etapas de *fuzzificação*, que é a transformação do sinal em uma variável lingüística, um motor de inferências que são justamente as regras de controle e a *defuzzificação*, que é a transformação da variável lingüística de saída no sinal de controle. A base de conhecimento possui as regras de associação definidas pelo especialista. Uma representação gráfica do controlador *fuzzy* está na Figura 5.3.

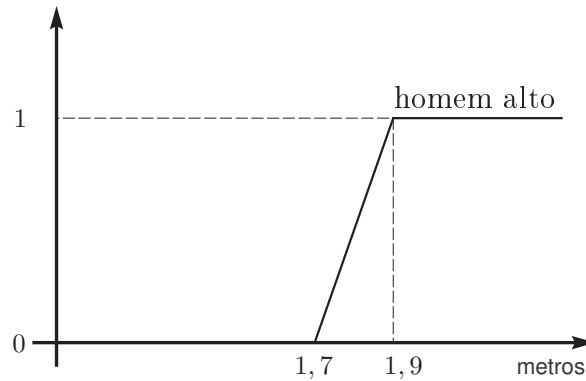


Figura 5.2: Exemplo de função de pertinência fuzzy.

O controle *fuzzy* possui uma teoria muito abrangente e não é a intenção deste trabalho discorrer sobre este tema. Para mais informações sobre sistemas nebulosos, ver a referência (KOSKO, 1996).

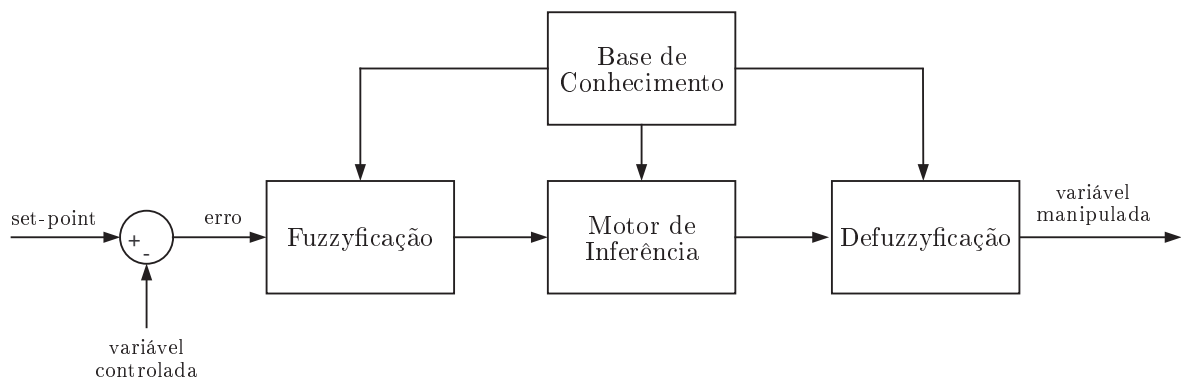


Figura 5.3: Representação gráfica de um controlador nebuloso.

Um controlador *fuzzy* pode ser uma solução para o controle do lastro por poder modelar o operador, que é a parte mais importante de todo o sistema de controle manual do lastro.

Apesar da importância da entrada de dados de movimentação da carga da plataforma, o sistema poderia simular as decisões que o operador toma nas operações do controle de lastro. Como ocorre no caso já citado da plataforma Balmoral (KILMURRAY, 1987), mesmo no sistema semi-automático o operador necessita aceitar os passos dados pelo sistema. Neste ponto, poderia-se modelar o que levou o operador a aceitar ou não a sugestão do sistema.

Em um sistema de controle *fuzzy*, a variável manipulada seria a vazão do lastro e as variáveis controladas seriam as inclinações e o calado. A distribuição de carga da embarcação deve estar na base de conhecimento do sistema, e qualquer alteração deve ser informada pelo operador. Todas as funções de pertinência seriam modeladas de acordo com as ações que atualmente são tomadas pelo operador. Por exemplo, se o

ângulo de trim estiver muito alto, a vazão de enchimento de um certo tanque deve ser alta, sendo ângulo muito alto e vazão alta variáveis linguísticas modeladas pelas funções de pertinência.

5.4 Controle de Lastro Dinâmico

O artigo (KLUG, 1979) relata um sistema de controle de lastro, conhecido como DBS (*dynamic ballasting system*), ou sistema de lastro dinâmico. Este sistema foi desenvolvido para atuar em embarcações com guindastes e somente é utilizado no momento da elevação e movimentação de cargas.

As embarcações foram desenvolvidas com a possibilidade de operar sem a utilização do DBS. Nesse caso, a ação dos guindastes causaria uma variação de ângulo de inclinação máximo de $\pm 6^\circ$, o que está dentro das margens seguras de operação. No entanto, com a utilização do DBS se garante uma variação de trim e banda teoricamente menor que $\pm 1^\circ$. Na prática se verifica que esses ângulos são mantidos na tolerância de $0,5^\circ$. O DBS sempre deve ser utilizado em conjunto com o controle de lastro convencional.

O DBS tem como característica excepcional a sua grande velocidade de resposta na variação do lastro. Isso é conseguido através de um processo que não utiliza bombas, mas sim a gravidade. Assim, é garantida uma capacidade de vazão alta, aproximadamente 4000 toneladas de água em menos de 50 segundos. Para tanto, utilizam-se dois grupos de tanques abaixo de cada guindaste, em duas alturas diferentes. O tanque superior é enchido com a ajuda de bombas antes do momento da operação e os tanques inferiores mantidos vazios ou com baixo nível de lastro. Durante a operação, se for necessário efetuar uma ação de lastreamento, os tanques inferiores são inundados com a água do mar pela abertura de válvulas. Se for necessário realizar uma ação de deslastreamento, os tanques superiores são abertos e descarregados por gravidade.

Apesar do uso restrito a uma aplicação específica que, neste caso, é o controle de lastro na utilização de guindastes, o sistema de lastro dinâmico obteve os resultados desejados de controle da inclinação da embarcação. Os conceitos básicos nessa implementação podem servir de ponto de partida para o desenvolvimento de uma solução para a redução do tempo de resposta no controle lastro automático em plataformas de produção.

Capítulo 6

Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo discutir o problema de lastro em sistemas marítimos de produção de petróleo, tendo em vista a avaliação da possibilidade de automação do sistema de controle de lastro. Para isso, inicialmente foram apresentados aspectos básicos de engenharia naval relacionados com a estabilidade de embarcações. Em seguida, buscou-se mostrar aspectos práticos, como procedimentos de operação de lastro, o sistema de lastro propriamente dito, seus componentes e a principal ferramenta computacional utilizada no Brasil para suporte a operação desse sistema. Por fim, foram apresentadas iniciativas, presentes na literatura, para a automação do sistema de lastro.

As principais conclusões deste trabalho são:

- A operação do sistema de lastro em plataformas de produção de petróleo na Petrobras é feita de forma manual e depende diretamente do operador.
- A opção pelo controle manual é consequência da abordagem conservadora adotada no sistema de lastro, dada a grande importância que o mesmo tem na segurança da unidade.
- A automação do sistema de lastro poderia agregar segurança à operação, uma vez que diminuiria as chances de ocorrência de falha humana, daria condições ao operador de se dedicar mais a tarefas analíticas e decisões de alto nível.
- O monitoramento da estabilidade da embarcação e o controle do sistema de lastro são mais críticos em plataformas semi-submersíveis, como foi avaliado na Seção 2.6. Por conta disso, a automação do sistema de lastro teria impacto maior nesse tipo de embarcação.
- As iniciativas de automação do controle de lastro extraídas da literatura e apresentadas no Capítulo 5 podem servir de base para futuros desenvolvimentos na indústria nacional de óleo e gás.
- Os métodos apresentados no Capítulo 5 podem ser utilizados como ponto de partida para futuras implementações na automação do sistema de lastro. Dentre eles,

o desenvolvimento de sistemas especialistas se apresenta como uma boa opção, uma vez que essa abordagem já foi aplicada anteriormente ao problema em questão.

Por fim, esperamos ter contribuído com a literatura da área através da descrição de aspectos práticos e construtivos relacionados ao problema de automação do sistema de lastro em plataformas flutuantes de produção de óleo e gás.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. *Análise do Acidente com a Plataforma P-36*. Julho 2001. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petro/P36_0.asp>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. *Análise do Acidente com a Unidade Estacionária de Produção, Estocagem e Transferência, PETROBRAS XXXIV*. Janeiro 2003. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petro/P34_0.asp>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2007.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Guide for Conducting a Stability Test (Lightweight Survey and Inclining Experiment) to Determine the Light Ship Displacement and Centers of Gravity of a Vessel*. Philadelphia, EUA, 2004.

AUTOSHIP SYSTEMS CORPORATION. *Manual do Programa Autoload Versão 6.0*. Rio de Janeiro, Brasil, 2006. Disponível com o fabricante.

COELHO, L. C. G.; NASCIMENTO, A. S. A. *Manual do Programa SSTAB Versão 2.43*. Rio de Janeiro, Brasil, Agosto 2002. Disponível em: <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/~lula/sstab/sstab.pdf>>.

DEPARTMENT OF TRANSPORTS, CANADA. *Small Fishing Vessel Safety Manual*. Ottawa, Canada, 2003. Disponível em: <<http://www.tc.gc.ca/MarineSafety/TP/Tp10038>>. Acesso em: 3 de fevereiro 2007.

HANCOX, M. *Stability and Ballast Control*. Houston, EUA: Oilfield Publications Ltd., 1998. (Oilfield Seamanship Series, v. 7).

HAWN, L. L.; GORDON, B. A. A distributed data acquisition and control system for a semisubmersible drilling rig. In: *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, EUA: [s.n.], 1986. p. 323–331.

HERBERT SOFTWARE SOLUTIONS. *Hecsalv Feature List, Ship Design/Salvage and Emergency Response Suite of Software*. California, EUA, 2006. Disponível com o fabricante.

HOCK, C. J.; BALABAN, E. G. Fault analysis of a semisubmersible's ballast control system. In: *16th Annual Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, EUA: [s.n.], 1984. p. 173–178.

- KILMURRAY, B. A. Balmoral: Floating production vessel integrated control system. In: *19th Annual Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, EUA: [s.n.], 1987. p. 109–118.
- KLUG, S. A control-system for an ultra-high-speed ballasting equipment. In: *11th Annual Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, EUA: [s.n.], 1979. p. 307–314.
- KOSKO, B. *Fuzzy Engineering*. 1. ed. New Jersey, EUA: Prentice Hall, 1996.
- LARSSON, T.; SKOGESTAD, S. Plantwide control - a review and a new design procedure. *Modeling, Identification and Control*, v. 21, n. 4, Outubro 2000.
- MANZI, M. et al. Designing a ballast control system operator interface. In: *Proceedings of the 2005 Systems and Information Engineering Design Symposium*. Charlottesville, Virginia, EUA: [s.n.], 2005. p. 242–248.
- NISHIMOTO, K.; PINTO, M. O. *Hidroestática e estabilidade do navio e de sistemas oceânicos*. São Paulo, Brasil: [s.n.], 1995. Universidade Estadual de São Paulo, USP. Apostila disponível na biblioteca da Universidade Petrobras.
- NOWACKI, H.; FERREIRO, L. D. Historical roots of the theory of hydrostatic stability of ships. In: *8th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*. Madri, Espanha: [s.n.], 2003. p. 1–30.
- PETROBRAS. *Critérios Gerais para Projeto de Sistema Navais FPSO / FSO*. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- PETROBRAS. *Critérios Gerais para Projeto de Sistema Navais Semisubmersíveis*. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- ROED, K.; KARLSEN, K.; DAVIES, R. Maureen refloat project: Challenges to control weight and stability through a decommissioning project. In: *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, EUA: [s.n.], 1986.
- SAITO, K.; CAMPOS, M. M. de. *Sistemas Inteligentes em Controle e Automação*. Rio de Janeiro, Brasil: Ciência Moderna, 2004.
- SOUZA, L. de; AZEVEDO, G. Arquitetura naval: Conceitos básicos. *Mar & Mar*, 2006. Disponível em: <<http://www.maresbrazil.com/9/menu9.html>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2007.
- SPANDRI, R. *Controle Avançado*. Brasil, 2006. Apostila disponível na biblioteca da Universidade Petrobras.
- WINJGAARDEN, A. M.; HEEMSKERK, R. J. New stability approach for offshore construction vessels. In: *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, EUA: [s.n.], 2000.