

SELEÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA DE CONTROLE
DE ALETAS ESTABILIZADORAS

SELEÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA DE CONTROLE DE ALETAS
ESTABILIZADORAS

RESUMO

A estabilização do jogo a bordo é fator importante no desempenho dos navios de guerra e mercantes. O trabalho propõe a incorporação de técnicas modernas aos métodos convencionais de projeto de aletas estabilizadoras, procurando maximizar a eficiência desses navios ao longo de sua vida útil, ao invés de em uma específica condição do mar. Para isso, constrói-se uma função objetivo que considera a frequência dos aproamentos e dos diversos estados de mar, em conjunto com o efeito produzido por esses fatores na eficiência operativa, procurando maximizá-la pela seleção de ganhos adequados do sistema de controle

ON THE SELECTION OF FIN STABILIZING CONTROL SYSTEM PARAMETERS

ABSTRACT

The roll stabilization onboard is an important factor on the performance of naval and merchant ships. The paper proposes the introduction of recent advances in the conventional design of fin stabilizing devices, aiming the maximization of these ships efficiency during their lifetime, instead of at a particular sea condition. To get this aim, an objective function is set up, based on the heading and sea states frequency of occurrence, together with the effects caused by these factor in the operative efficiency, leading to a rational selection of proper gains to the fins control system.

JORGE PINHEIRO DA COSTA VEIGA
Capitão-de-Fragata, Engenheiro Naval
Escritório Técnico de Construção Naval em São Paulo
Caixa Postal 30077

babílística dos efeitos causados pelas diversas condições de operação na eficiência da missão do navio.

Por outro lado, nos últimos anos ocorreu uma série de avanços nos métodos de previsão dos movimentos do navio no mar, já se dispondo de diversos algoritmos que fazem essa previsão com uma precisão considerável. Também os métodos de representação do mar real que os navios enfrentarão durante sua vida útil estão hoje bem mais desenvolvidos.

O propósito desse trabalho é o de incorporar aos processos convencionais de projeto de estabilizadores técnicas recentes de representação do mar real e de previsão do comportamento do navio no mar, além de estabelecer um método racional para seleção de parâmetros do sistema de controle de aletas estabilizadoras. O objetivo visado é alcançar a máxima esperança estatística de eficiência sob as condições operativas previstas.

2.0 ESTABILIZAÇÃO DE NAVIOS

2.1 Mecanismos Estabilizadores

Para decidir sobre a necessidade de redução de movimentos excessivos, deve-se levar em conta uma série de fatores. No caso de navios de guerra são ponderados, entre outros, o desempenho satisfatório do sistema de armas, a capacidade de realizar operações tais como as de pouso e decolagem de aeronaves ou as de rebastecimento no mar, além da perda da eficiência humana por excessivos movimentos, como mostrado na figura 2.1, reproduzida da referência [1]. Essa mesma perda de eficiência humana, associada ao indesejável desconforto advindo de movimentos excessivos, a par da prevenção contra avarias de cargas, podem vir a recomendar uma redução desses movimentos também em navios mercantes.

Uma vez caracterizada a necessidade da redução de movimentos na fase de projeto, ela poderia ser obtida pela alteração das formas do casco. No entanto, esse recurso não é usualmente empregado pois a forma do casco já foi fixada por uma série considerável de fatores já comprometidos com outros aspectos que incluem

1. INTRODUÇÃO

Quando o arquiteto naval verifica as características de comportamento no mar, tanto de navios de guerra, como de certos navios mercantes, frequentemente se depara com a necessidade de reduzir o balanço do navio. Essa redução deve ser efetuada com a utilização de mecanismos estabilizadores.

A primeira idéia que ocorre é o emprego de bolinas fixas que podem propiciar uma considerável atenuação do jogo, só provocando custos de construção e operacionais reduzidos. No entanto, nem sempre essa redução é suficiente para garantir a operação eficiente do navio no desempenho de sua missão.

Nessas ocasiões, havendo necessidade de emprego de outros mecanismos estabilizadores mais onerosos, torna-se conveniente ponderar as vantagens que resultariam da redução do jogo contra as desvantagens associadas ao peso, ao espaço e aos custos adicionais provocados pela utilização desses mecanismos.

O emprego de um estabilizador capaz de atender a uma redução conveniente sob as piores condições de mar previstas para o navio resultará em medidas excessivamente grandes para as condições de operação mais usuais.

Portanto, é importante a limitação da condição de projeto, a consideração de condições médias mais representativas dos estados de mar em que o navio operará, ou, ainda, a verificação pro-

plitude de balanço responsável pelo maior desconforto a bordo, já nas operações de pouso de helicópteros, o mais importante é a redução do ângulo de balanço, e, ainda nas operações de transferência de carga também pode vir a ser importante a redução do afastamento lateral do navio ("sway"). Dessa forma, percebe-se a existência de diferentes fatores de mérito para as diversas operações e que poderão ser consideradas no projeto.

2.3 Método Convencional de Projeto de Aletas Estabilizadoras

Para avaliação do método convencional julgou-se conveniente considerar, preliminarmente, três aspectos importantes no projeto de aletas, que são:

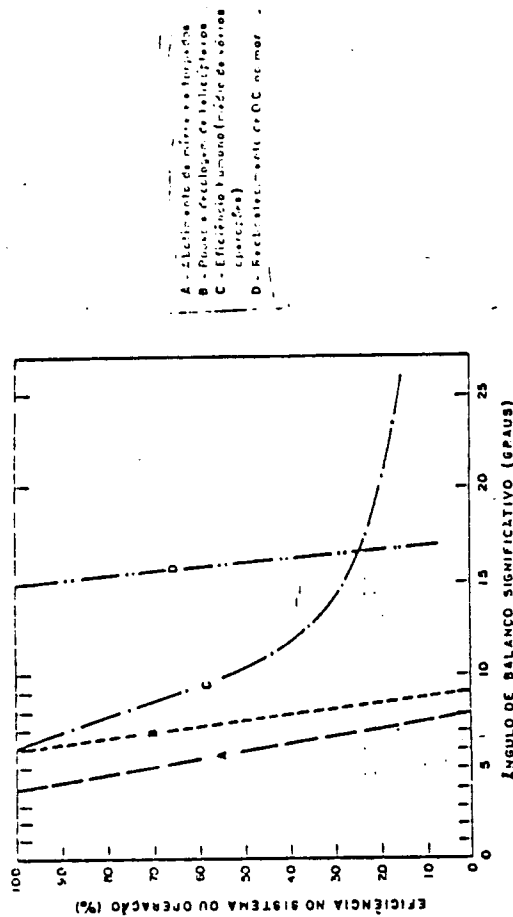
- a) previsão de movimento de balanço;
- b) requisitos do sistema estabilizador;
- c) projeto do sistema de controle.

2.3.1 Previsão de movimentos de balanço

Até hoje já se desenvolveu um número considerável de métodos para a previsão de movimentos de balanço que incluem processos teóricos, experimentais, ou híbridos, combinando resultados de ensaios com processos teóricos. Os primeiros são os mais suscetíveis de emprego na fase inicial de projeto e serão considerados em maior profundidade, muito embora os processos experimentais e, especialmente, os híbridos são de considerável valor para a verificação dos projetos executados.

Os métodos teóricos são suscetíveis de classificações de acordo com o número de graus de liberdade, com a consideração ou não de efeitos não-lineares, ou, ainda, de acordo com a teoria empregada na previsão dos movimentos.

Quanto aos graus de liberdade, os métodos consideram de um aos seis graus possíveis. Os mais recentes levam em conta todos os seis graus de liberdade [8], ou, desconsiderando o avanço, apenas cinco graus [9]. No entanto, esses métodos de cinco e seis graus, por se fundamentarem em teorias lineares, conduzem para embarcações com simetria em relação ao plano longitudinal a um desacoplamento entre os movimentos de balanço, deriva e guinada



VARIAÇÃO DE EFICIÊNCIA COM O ÂNGULO DE BALANÇO

FIGURA 2.1

entre si o arranjo geral e requisitos hidrodinâmicos específicos do casco e de seus acessórios.

Emprega-se, portanto, dispositivos externos ou internos ao casco, chamados de estabilizadores, especificamente projetados para restringir os movimentos do navio entre valores limites, promovendo a estabilização de movimentos. Entre esses, para redução do balanço, pode-se citar as bolinas fixas, os tanques passivos, controlados ou ativos, os dispositivos com pesos móveis e as aletas estabilizadoras. Os próprios lemes são dispositivos que podem promover a estabilidade de balanço, a par de promover a manobrabilidade da embarcação.

As aletas estabilizadoras, em especial, são usadas aos pares, individualmente ou em composições múltiplas, sendo dispositivos ativos que, girando em direções convenientes em torno de um eixo transversal ao casco, geram momentos capazes de se opor aos momentos externos perturbadores. Podem ser empregadas sob qualquer estado de mar, proveniente de uma direção qualquer. No entanto, só são efetivas nas velocidades elevadas. As aletas podem ser rígidas,

dos de arfagem, caturro e avanço. Mesmo que se introduzam certas não-linearidades importantes, como ocorrem no movimento de balanço, esses dois grupos de movimentos permanecem desacoplados, não havendo portanto vantagem em se continuar considerando os movimentos de arfagem, caturro e avanço.

As comparações entre os valores calculados e medidos para os movimentos de balanço indicam que os métodos com um grau de liberdade são geralmente inadequados, principalmente devido ao grande efeito causado no balanço pelo movimento de deriva, que são considerados nos métodos mais apropriados de dois e três graus de liberdade.

A maioria dos métodos anteriores são baseados em modelos lineares, sendo a maior parte deles descrita no domínio da frequência. Quando se necessita de uma maior precisão, introduzem-se os efeitos não lineares.

Raros métodos chegam a considerar essas não linearidades e, quando o fazem, substituem a parcela não linear por outra denominada quase-linear, que permite uma resolução do tipo iterativa com tratamento linear das equações de movimento. É o caso do programa do NSRDC [8], implementado no Escritório Técnico de Construção Naval em São Paulo, da Marinha do Brasil, ETCNSP [10]

Como era de se esperar, esses métodos conduzem a uma melhor estimativa dos movimentos de balanço. No entanto, mesmo os métodos que não consideram essas não linearidades conduzem a resultados satisfatórios. Em se tratando de um movimento estabilizado e, portanto, de menor amplitude, pode-se admitir que todos esses métodos conduzam a resultados ainda mais satisfatórios.

2.3.2 Requisitos do sistema estabilizador

O requisito fundamental de um sistema estabilizador é a redução de balanço. No entanto, um estabilizador dispondo de suficiente área para provocar a redução total do balanço em todas as condições de mar seria economicamente inviável devido não só à excessiva potência necessária para o seu funcionamento nas condições mais severas, como também aos efeitos deletérios causados pela presença desse apêndice de dimensões avantajadas em mares mais amenos, nos quais sua utilização seria dispensável.

Para fins de projeto torna-se portanto necessário estabelecer o domínio de estados de mar em que deve atuar o sistema estabilizador, além de, nessas condições, identificar a capacidade de conveniente de redução de jogo para possibilitar a operação adequada dos sistemas de bordo.

O conhecimento da frequência de ocorrência dos estados de mar que a embarcação enfrentará é possível através do emprego de estatísticas publicadas referentes a diversas áreas do globo ou levantadas por órgãos governamentais para áreas contíguas ao litoral do Brasil. Nesses trabalhos as frequências de ocorrência são apresentadas em relação à altura significativa, ao período de ocorrência e à direção de onde provêm as diversas ondas. Essas estatísticas quando empregadas em conjunto com as frequências de ocorrência estimadas dos rumos verdadeiros do navio em projeto, obtidas por observações dos registros de bordo de navios semelhantes, permitem a estimativa das frequências com que esses estados de mar atingirão o navio sob determinada direção relativa à sua proa.

No que diz respeito ao estabelecimento do nível máximo de jogo aceitável, que sabe-se ser um valor subjetivo, ainda resta muito a fazer. No entanto, na falta de melhores dados, pode-se usar a figura 2.1 como indicativa de condições humanas médias. Trata-se da fixação da perda de eficiência como função do ângulo significativo de balanço para várias operações de navios de guerra e, mesmo, para a perda de eficiência humana. Esta última será a mais relevante no caso do projeto de aletas para um navio mercante.

No método de projeto convencional, estabelece-se a necessidade do emprego de apenas uma altura significativa do mar irregular, na qual o projeto deve basear-se, sem indicar uma razão especial para essa escolha. Admitindo esse mar, deve-se ainda fazer uma seleção do aproamento relativo à direção de propagação da onda que se apresenta como mais desfavorável. Nesse mar, e nesse rumo mais desfavorável, sugere-se que a média quadrática do processo aleatório de balanço seja fixada de forma que o ângulo permitível de jogo só seja atingido uma vez em certo número julgado conveniente de oscilações.

Convém observar que, mesmo que se tenha otimizado o sistema de estabilização para esse estado e rumo, o desempenho do sistema para outras condições de mar e aproamentos já não será tão eficiente, podendo resultar em um desempenho médio fora das melhores condições. Essa perda de eficiência poderia ser evitada considerando-se as frequências de ocorrência já mencionadas.

Por outro lado o objetivo fixado pode também não ser atingido para outras condições e aproamentos mesmo menos severos, podendo ocorrer situações em que o ângulo permissível de jogo seja atingido em frequência superior à desejada, como se verificará mais adiante.

2.3.3 Projeto do sistema de controle

Ao projetar um sistema de controle por aletas estabilizadoras, o arquiteto naval inicialmente se defronta com o dimensionamento dos seus escantilhões de forma a torná-los capazes de gerar momentos de intensidade suficiente para a estabilização. A seguir a sua preocupação se volta para o sistema de controle propriamente dito, devendo relacionar os movimentos da âleta aos do navio, de forma a produzir a maior redução de balanço possível.

Nos projetos antigos as dimensões das aletas eram fixas das por regras empíricas. Determinava-se as dimensões e a forma das aletas de modo que elas fossem suficientes para adernar o navio quando deslocando-se na velocidade de projeto, em águas calmas, de um ângulo estático de banda pré-fixado por experiências anteriores. Tal ângulo era denominado de "potência" das aletas, sendo o seu valor de 50° a 60° .

2.4 Proposta de Abordagem no Projeto do Sistema Estabilizador

Considerando os recentes progressos indicados anteriormente no campo da estimativa do comportamento de navios no mar, este trabalho se propõe a desenvolver uma nova abordagem para esse projeto, que considere:

- o emprego da técnica de Salvensen, Tuck e Faltinsen [14] para a estimativa dos coeficientes hidrodinâmicos das equações do movimento;

- o emprego dos três graus de liberdade acoplados de balanço, de guinada e de deriva;
- a introdução das técnicas mais refinadas propostas por Lloyd [15] e por Sears [16] no cálculo de sustentação desenvolvida nas aletas estabilizadoras;
- o dimensionamento da âleta para a condição mais desfavorável do jogo;
- a utilização opcional dos lemas na estabilização;
- a utilização de dados estatísticos sobre as prováveis condições de mar nas quais o navio operará; e
- a seleção dos ganhos do sistema de controle de forma a atender a uma função objetivo bem definida, que consiste da maximização da esperança estatística de eficiência nas operações que compõem a missão do navio.

O método de Frank [13] associado à teoria desenvolvida por Salvensen, Tuck e Faltinsen [14] se constitui em um dos processos mais precisos de que se dispõe atualmente para a verificação dos movimentos do navio no mar [17], com claras vantagens sobre o emprego de um método unidimensional baseado na hipótese nem sempre justificável de Froude-Krylov, na qual não se considera a perturbação nas ondas causada pela presença do navio e, ainda, no qual os coeficientes relativos às forças restauradoras são admitidos como independentes da frequência da excitação [6]. O método permite determinar teoricamente as funções de transferência do sistema linear como função de frequência de excitação sendo mais conveniente na fase inicial de projeto que os processos híbridos propostos por Lloyd [15].

Após a determinação das funções de transferência, o emprego das teorias de vibrações aleatórias de sistemas lineares [18] permite determinar o espectro de amplitude de balanço em função do espectro da excitação provocada pelas ondas. No entanto, o método a ser utilizado, efetuando as integrações no domínio dos comprimentos de onda ao invés de no domínio de frequências, não provocando descontinuidades de frequência de excitação, conduz a melhores estimativas das estatísticas relacionadas com o processo aleatório de balanço.

Para o cálculo dos momentos restauradores produzidos pelas aletas, foi considerada a variação harmônica do empuxo nas superfícies da aleta, provocada pela oscilação da velocidade das ondas atuando na frequência de encontro, pelo emprego das funções de Sears [16], tornando o coeficiente do momento também dependente da frequência.

O dimensionamento da aleta considera as restrições impostas pelo projeto específico, além de garantir a operação eficiente até um determinado estado de mar fixado pelo projetista, mesmo que o navio nessa condição aprofunde na direção mais desfavorável. Para tanto a área e a deflexão máxima da aleta serão determinadas para essa pior direção e para a frequência de pico correspondente. Não se emprega portanto o conceito empírico de "potência" dos estabilizadores, muito embora esse conceito pudesse ser empregado para essa pior condição de mar.

Para a seleção dos parâmetros do controle, admite-se distribuições probabilísticas de estados de mar e de rumos prováveis. De posse dessas distribuições, pode-se determinar a distribuição probabilística dos estados de mar em relação à proa do navio. Com o emprego da figura 2.1, pode-se calcular a média de redução de eficiência provocada por esses mares ao se utilizar os diversos ganhos possíveis de controle. Um processo de busca sistemática conduz à seleção desses ganhos visando a mínima redução de eficiência. Durante a pesquisa desse mínimo são impostas outras restrições para garantir o funcionamento satisfatório do sistema, e que incluem: a proibição do ângulo de deflexão e velocidade máximos da operação da aleta serem atingidos com alta frequência, o que provocaria o funcionamento não linear do sistema, bem como a limitação dos ganhos de forma a ter-se potências de acionamento compatíveis com os sistemas reais. O método convencional, apesar de fazer restrições quanto à frequência de ocorrência das deflexões e velocidades máximas, não tem por objeto a maximização de eficiência, não conseguindo também distinguir os ganhos que conduzem à visada redução máxima de balanço.

3.0 PROJETO DE ALETAS ESTABILIZADORAS

3.1 Considerações Preliminares

Na apresentação da proposta de nova abordagem a ser empregada no projeto das aletas estabilizadoras (seção 2.4) foram indicadas as diferenças que justificam o seu desenvolvimento, tendo-se esclarecido as razões que levavam a considerar os métodos com um grau de liberdade e com três graus de liberdade.

O método de projeto consiste de etapas de modelagem e de projeto que, quando aplicadas de forma sequencial conduzem à solução do problema.

Nas etapas iniciais são desenvolvidos modelos matemáticos que pretendem representar:

- o movimento do navio no mar regular;
- o mar irregular;
- o movimento do navio no mar irregular;
- as forças desenvolvidas nas aletas estabilizadoras;
- o movimento do navio estabilizado no mar irregular;
- a função objetivo do sistema de controle;
- o sistema de controle;
- o movimento do navio estabilizado, com controle, no mar regular e irregular.

As etapas de projeto que são desenvolvidas a seguir, com a utilização dos modelos do sistema, conduzem à especificação do sistema de controle. Essas etapas estabelecem:

- o dimensionamento inicial das aletas;
- os ganhos do sistema de controle.

Nas seções seguintes apresentam-se os processos empregados em algumas dessas etapas, omitindo-se todos os desenvolvimentos que, muito embora tenham constituído importantes partes do trabalho, só sobrecarregariam o texto e prejudicariam a sua clareza.

A Figura 3.2 reproduz o sistema cartesiano que define a posição instantânea do navio em relação a um eixo inercial, dotado de sua velocidade média de avanço. Na mesma figura procura-se designar os seis graus de liberdade de que o navio é usualmente dotado.

vel alterá-lo, extirpando do mesmo as partes dispensáveis, e retirando em dois subprogramas as grandezas relevantes ao problema da estabilização do balanço.

Do subprograma AM3D são extraídos os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento relativos a cada seção do navio e, ainda, os do navio como um todo.

Do subprograma ML3D, que emprega os valores de AM3D, são retiradas as funções de transferência relativas ao balanço, à guinada e à deriva, para os requeridos ângulos de aproamento, velocidades e comprimentos da onda. Essas receptâncias serão empregadas no processo com três graus de liberdade, para a determinação da resposta do navio ao mar irregular.

3.3 Descrição do mar irregular

A descrição do mar irregular multidirecional é usualmente feita ponderando-se o espectro unidirecional através das suas possíveis direções, pelo emprego de funções adequadas que conservam uma mesma energia total do espectro. A forma geral é dada por:

$$S_{\zeta}(w, \chi) = A_n \cos^n \chi \quad S_{\zeta}(w) \quad (3.3.1)$$

onde:

$S_{\zeta}(w)$ - é a forma espectral usual admitida pela ITTC e também pela ISSC.

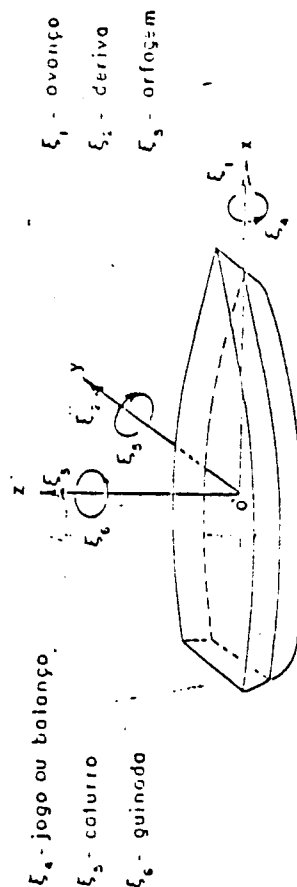
χ - ângulo entre a direção considerada e a direção predominante do mar.

n - índice de concentração direcional do espectro.

A_n - fator de normalização do espectro.

3.4 Modelagem das Aletas Estabilizadoras

A modelagem matemática das aletas estabilizadoras ficará completa se forem especificadas as forças e os momentos gerados pelas mesmas, a par da especificação de seu mecanismo de controle.



SISTEMA DE COORDENADAS UTILIZADO

FIGURA 3.1

As equações do movimento adotadas no presente trabalho, tem a seguinte forma:

$$\sum_{k=1}^6 (M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\xi}_k + B_{jk} \dot{\xi}_k + C_{jk} \xi_k = F_j e^{i\omega t} \quad j=1, \dots, 6. \quad (3.2.1)$$

na qual os coeficientes acima se referem às matrizes e vetores a seguir mencionados:

M_{jk} - matriz de massa

A_{jk} - matriz de massa adicionada

B_{jk} - matriz de amortecimento

C_{jk} - matriz de forças hidrostáticas por unidade de deslocamento.

F_j - vetor de forças excitantes

e ω já representa a frequência de encontro, que é a relevante ao problema.

No processo com três graus de liberdade, os coeficientes e as funções de transferência foram obtidos pela adaptação do programa SEA6D [8], implementado para a programoteca do DEN-EPUSP [10]. Após a identificação das variáveis desse programa foi possível

β - ângulo de deflexão da aleta

$F_{2\beta}$ - coeficiente angular na origem da curva de $F_2 \times \beta$

$F_{4\beta}$ - coeficiente angular na origem da curva de $F_4 \times \beta$

$F_{6\beta}$ - coeficiente angular na origem da curva de $F_6 \times \beta$

3.5 Objetivos do Sistema de Controle

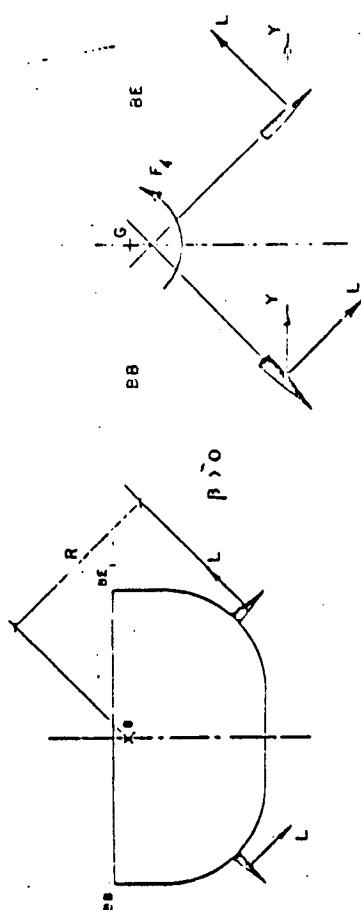
3.5.1 Frequência de ocorrência de estados de mar

Ao longo de sua vida útil o navio deverá enfrentar uma grande variedade de estados de mar provenientes de várias direções. Para o projeto do sistema de controle do estabilizador há necessidade de estimar a frequência de ocorrência desses estados de mar. Essa previsão é possível desde que se conheça a missão do navio e se disponha de valores relativos à ocorrência de mar nas diversas zonas de atuação do navio.

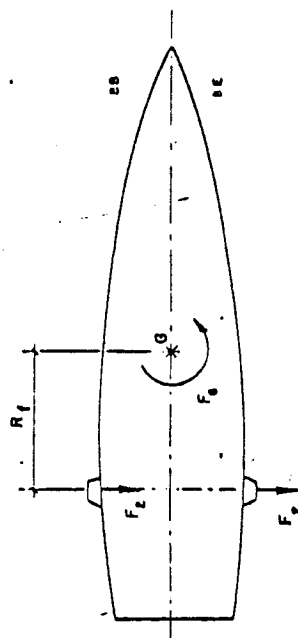
Para a previsão das condições de mar que ocorrem em várias zonas do globo pode-se utilizar o trabalho de Hogben e Lamb [20] que fornece a frequência de ocorrência das diversas condições de mar em termos de alturas significativas, períodos característicos e rumos. Essas condições ficarão completamente definidas uma vez que se adote uma formulação específica para representação espectral do mar.

A tabela 3.5.1 apresenta um exemplo de descrição das condições de mar para um navio que venha a operar no litoral sul do Brasil, para emprego em formulações espectrais de dois parâmetros. Nessa tabela são fornecidas as frequências de ocorrência dos diversos estados de mar nos diversos rumos verdadeiros predominantes na propagação das ondas.

Para completa descrição probabilística das condições de operação do navio deve-se ainda considerar a missão do navio, que conduzirá a uma distribuição de probabilidades de rumos em que o navio deverá operar. Essa frequência de rumos é de obtenção simples, uma vez que tanto os Registros de Bordo dos navios mercantes, como os Livros de Quadro da Marinha do Brasil, contêm esses registros.



L - Sustentação no perfil
 F_2 - Força de deriva
 F_4 - Momento de balanço
 F_6 - Momento de guinada



FORÇAS E MOMENTOS RELEVANTES GERADOS PELAS ALETAS

FIGURA 3.2

Dentro da teoria linear que está sendo empregada, as forças e os momentos gerados por um par de aletas, indicados na figura 3.2, podem ser expressos pelas seguintes relações,

$$F_2 = F_{2\beta} \beta \quad (3.4.1)$$

$$F_4 = F_{4\beta} \beta \quad (3.4.2)$$

$$F_6 = F_{6\beta} \beta \quad (3.4.3)$$

nas quais:

- F_2 - força de deriva
- F_4 - momento de balanço
- F_6 - momento de guinada

RUMOS PREDOMINANTES DAS ONDAS

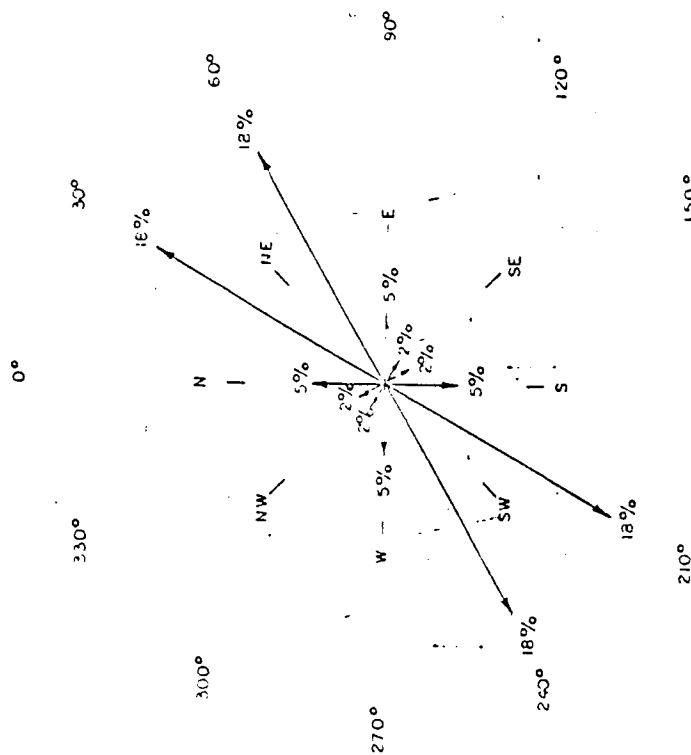
$H_{1/3}$ (m)	T_L (seg)	000	030	060	090	120	150	180	210	240	270	300	330
0	-	3	4	1	3	1	4	5	5	6	4	2	2
1	5	29	18	17	12	18	35	56	47	31	21	28	30
2	6	47	33	23	8	9	27	71	64	36	31	38	53
3	7	15	20	4	2	3	7	21	15	8	5	12	14
4	8	5	9	3	1	-	3	5	3	3	2	2	5
5	8	4	3	1	1	-	-	1	7	1	-	-	1
6	8	1	2	1	-	-	-	-	-	1	-	-	1
7	8	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
>8	8	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FREQUÊNCIAS DE OCORRÊNCIA DE ESTADOS DE MAR (FM 1000)

TABELA 3.5.1

A figura 3.3 apresenta um exemplo dessa distribuição de rumos para um navio que venha a operar no litoral Sul do Brasil e no qual predominarão os rumos SW e NE.

Considerando-se na fase de projeto uma independência entre os processos aleatórios descritivos do mar e da seleção de rumos, pode-se obter a frequência de ocorrência das direções predominantes de atuação dos estados de mar em relação à proa. Essas direções relativas, ou polares, serão as relevantes para utilização no projeto do navio.



FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE RUMOS

FIGURA 3.3

A frequência de ocorrência dessas direções polares dos estados de mar pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$P_{\mu}(\mu_{Oj}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{\mu/R}(\mu_{Oj}/R_i) P_R(R_i) \quad (3.5.1)$$

na qual:

- n - número total de rumos considerados
- m - número total de direções predominantes do mar consideradas
- R_i - evento correspondente a ter-se o navio no rumo R_i

ν_{oj} - evento correspondente a ter-se o mar atuando com uma direção predominante ν_{oj} relativa à proa.

$P_R(.)$ - probabilidade de ocorrência do rumo R_1 , como ilustrado na figura 3.3.

$P_{\mu/R}(\nu_{oj}/R_1)$ - probabilidade de ocorrência da direção predominante ν_{oj} sendo dado o rumo R_1 .

Uma vez que do aspecto de comportamento no mar não há diferença entre o navio enfrentar mares em uma mesma direção polar atuando por boreste ou por bombordo, essa última probabilidade será dada por:

$$P_{\mu/R}(\nu_{oj}/R_1) = P_{\mu}(R_1 - \nu_{oj}) + P_{\mu}(R_1 + \nu_{oj}) \quad (3.5.2)$$

sendo:

$P_{\mu}(.)$ - probabilidade de ocorrência do rumo verdadeiro de propagação das ondas (.)

Usando essas últimas expressões pode-se calcular as diversas probabilidades de ocorrência para o caso do navio exemplificado anteriormente, tendo resultado os valores apontados na tabela 3.5.2. Esses valores são computados internamente no programa que avalia o mérito do sistema de controle.

DIREÇÃO POLAR DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

$H_{1/3}(m)$	$T_1(seg)$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0		38	73	62	54	62	73	38
1	5	285	574	570	563	570	574	285
2	6	367	739	708	673	708	739	367
3	7	113	219	202	191	202	219	113
4	8	41	74	62	56	62	74	41
5	8	12	24	18	12	18	24	12
6	8	8	12	7	6	7	12	8
7	8	2	2	1	0	1	2	2
>8	8	4	5	1	1	1	5	4

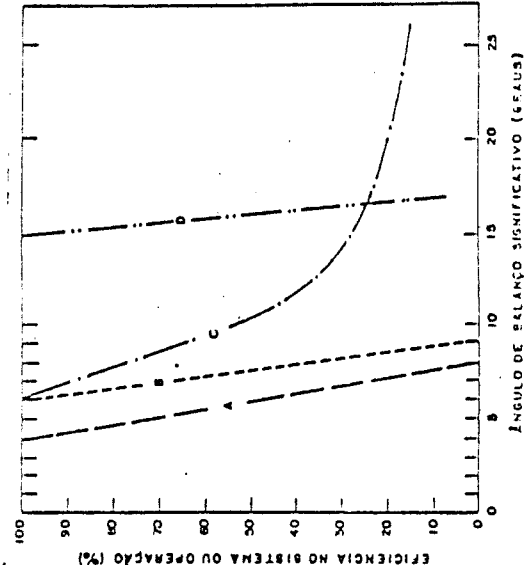
FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DA INCIDÊNCIA DE ONDAS EM (10000)

TABELA 3.5.2

3.5.2 Estabelecimento de funções objetivo

Muito embora o sistema estabilizador possa funcionar em todas as condições de mar indicadas na tabela 3.5.2, a sua necessidade só se fará sentir para os mares em que, caso o sistema não existisse, a eficiência do homem, ou o conforto de passageiros, ou a missão do navio passassem a ficar prejudicados.

A figura 3.4 apresenta curvas que possibilitam estimar, com o função do ângulo de balanço significativo, a perda de eficiência humana em navios em geral, em diversas operações habituais de navios de guerra. Nessa figura percebe-se que até um ângulo significativo de balanço de 4° não há perda de eficiência devido ao jogo em qualquer operação. Já para um balanço significativo de 7°, a eficiência humana cairá para 90%, as operações com pouso e decolagem de helicópteros serão reduzidas a 65% e a probabilidade de abater um torpedo ou míssil se reduz a apenas 20%.



A - Zestabelecimento de eficiência a 100%
 B - Pouso e decolagem de helicópteros
 C - Eficiência humana (média de várias operações)
 D - Fracasso de O.C. no mar

VARIAÇÃO DE EFICIÊNCIA COM O ÂNGULO DE BALANÇO

FIGURA 3.4

O emprego das funções de transferência desenvolvidas nos apêndices A e B em conjunto com os métodos indicados em 3.4 permite verificar o ângulo significativo de balanço correspondente aos diversos mares indicados na tabela 3.5.2. A tabela 3.5.3 contém resultados típicos de cálculos de balanço significativo em um navio real. Nessa tabela pode-se constatar que o sistema de estabilização só será útil a partir dos estados de mar indicados por sombras, nos quais, dependendo da operação em questão, o ângulo significativo de balanço assumirá valores prejudiciais.

APROXIMAÇÕES

$H_{1/3}$	T_1	30°	60°	90°	120°	150°
1,0	4,0	0,53	0,64	0,53	0,13	0,03
2,0	5,0	1,25	1,76	1,47	0,45	0,12
3,0	6,0	2,12	2,59	2,12	0,80	0,30
4,0	7,0	2,92	3,71	2,92	1,21	0,61
5,0	8,0	3,52	4,40	3,52	1,61	1,00
6,0	8,0	4,22	4,99	4,22	1,91	1,21
7,0	8,0	4,99	5,21	4,99	2,11	1,41
8,0	8,0	5,64	5,53	5,64	2,31	1,61

AMPLITUDES SIGNIFICATIVAS DE BALANÇO

TABELA 3.5.3

Esses estados de mar nos quais há necessidade de estabilização, em conjunto com a perda de efetividade gerada após essa estabilização, devidamente ponderada pela frequência de ocorrência desses diversos estados suscita a formulação do objetivo a ser alcançado que é a maximização da eficiência na operação desejada. Essa eficiência pode ser expressa por:

$$FO = \max_{k=1}^i P_k (\bar{H}_{1/3}, \mu) \cdot \left| \bar{\epsilon}_{1/3} \right|_k \quad (3.5.3)$$

onde:

i - número de estados de mar considerado

FO - função objetivo

$P_k (\bar{H}_{1/3}, \mu)$ - probabilidade de ocorrência do mar k , de altura significativa $\bar{H}_{1/3}$ e aproamento como indicado na tabela 3.5.2.

$\bar{\epsilon}_{1/3}$ - ângulo significativo de balanço estabilizado
 $\left| n(.) \right|_k$ - eficiência do mar k , como definido pela figura 3.3, na operação desejada, como função do ângulo significativo de balanço (ϵ).

Convém observar que uma vez que se empregue um sistema de controle adequado, essa função objetivo será tanto melhor satisfeita quanto maior foi a dimensão da aleta, havendo portanto necessidade de se impor uma restrição quanto ao tamanho, ou melhor ainda, quanto à potência instalada na máquina. Essa restrição será imposta com base nos requisitos do projeto do navio que usualmente estabelecem que o navio deva operar sem restrições até um determinado estado de mar. Para esse mar, percorrendo-se a tabela 3.5.3, pode-se verificar a direção predominante que conduz ao maior ângulo significativo de balanço. O dimensionamento inicial da aleta, no que diz respeito ao tamanho e potência instalada, será então executado para esse estado de mar, sendo a otimização conduzida já com o conhecimento da aleta estabilizadora.

3.6 Dimensionamento do Sistema de Controle

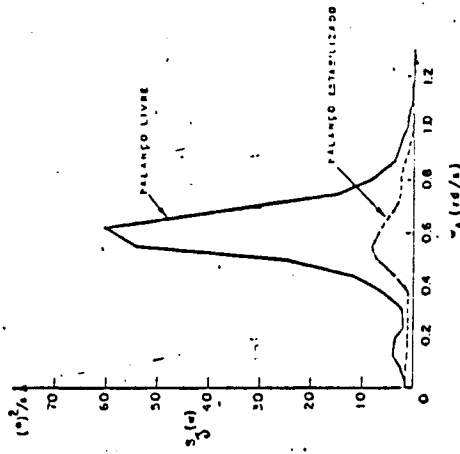
3.6.1 Dimensionamento preliminar das aletas

No projeto de sistemas de estabilização inicialmente não se dispõe de valores para fixação da forma e da área das aletas. É comum, no entanto, se dispor de um valor máximo da sua envergadura, fixado pela maior projeção permissível para fora do costado. Por facilidade de construção, é também costume empregar-se formas trapezoidais para a sua área projetada.

Nos projetos usuais, para fixação da área das aletas, costuma-se empregar uma regra empírica baseada no conceito de "potência" do sistema estabilizador. Muito embora se trate de um conceito simples, o emprego dessa regra costuma levar a valores elevados

da área. Tal fato foi confirmado ao se verificar que a área dos estabilizadores empregados na Marinha do Brasil seriam superdimensionados por essa regra, resultando áreas 40% superiores às instaladas, que já satisfazem plenamente.

A fixação do critério empregado para determinação da área da aleta adveio da observação de casos processados e que serão ilustrados posteriormente, que indicam que os mares que geram balanços mais severos antes da estabilização permanecem bastante próximos aos mais rigorosos após a estabilização. Essa afirmativa é válida tanto para as diversas direções de atuação do mar como para as frequências mais desfavoráveis em um mesmo espectro. A figura 3.5, reproduzida de [11] também confirma essa tendência.



ESPECTROS LIVRE E ESTABILIZADO
FIGURA 3.5

Como nas especificações estabelece-se até que condições de mar o navio deve operar a contento, pode-se, com base na observação anterior, procurar dimensionar a área da aleta de forma a que o navio opere satisfatoriamente na pior direção de apraimento ao mar e na pior frequência de encontro.

No caso do exemplo apresentado na tabela 3.5.3, sendo o navio projetado para operações até mar 5 ($\xi_{1/3} < 4m$), a área do estabilizador será dimensionada para mar de alheta, devendo o mesmo operar de forma a reduzir, de acordo com a figura 3.4 o ângulo de balanço na frequência de pico a um valor de 4° , para garantir a operação eficiente nesse pior mar.

Para promover a desejada redução, a determinação das dimensões necessárias da aleta, que incluem a área, o ângulo de deflexão máximo ($\beta_{\max}$) e, principalmente, a razão de aspecto do perfil, pode ser feita pelo emprego das expressões usuais de cálculo de forças e momentos em superfícies de sustentação adjacentes ao casco. Deve-se considerar que $\beta_{\max}$ deve ser inferior ao ângulo de quebra de empuxo, e procurar obter uma geometria das aletas de modo a que o produto de sua área pelo coeficiente de empuxo reproduza o momento excitante desejado.

3.6.2 Determinação dos parâmetros de controle

Após o conhecimento da forma, das dimensões e do coeficiente de empuxo do estabilizador pelo emprego da teoria formulada anteriormente, pode-se conhecer os coeficientes de proporcionalidade de b_{2j} que permitem calcular as forças e momentos excitantes causados pela deflexão da aleta.

Pode-se proceder então à determinação dos parâmetros que definem a lei de controle, de tal forma a se alcançar o máximo valor da função objetivo enunciada em 2.5. Para isso deve-se empregar um processo de busca desses valores extremantes.

Observando a função objetivo verifica-se que os movimentos ou velocidades de guinada e de deriva não participam de sua formação, não contribuindo de maneira direta de sua avaliação. Verifica-se também que a contribuição indireta, através de coeficientes de controle que posicionem a deflexão da aleta como uma função desses movimentos e velocidades não seria razoável, uma vez que as forças e momentos em balanço gerados pelas aletas estabilizadoras devido à deriva e à guinada são desprezíveis. Portanto, decidiu-se desprezar esses ganhos e fazer o controle exclusivamente proporcional ao deslocamento e à velocidade de balanço:

$$\beta = k_1 \xi_4 + k_2 \dot{\xi}_4 + k_3 \xi_4$$

O processo de busca sistemática foi escolhido para a determinação desses coeficientes, tendo-se produzido programas de computador que, após análise dos valores resultantes de uma malha

inicial de variação desses coeficientes, permite ao analista, em sucessivos processamentos, verificar os valores que conduzem ao máximo da função objetivo. No exemplo apresentado decidiu-se considerar k_3 nulo para maior clareza da exposição.

Após o conhecimento do espectro da resposta em balanço, empregando as funções de transferência determinadas como indicado nos apêndices A e B, pode-se calcular o espectro do ângulo de deflexão da aleta por:

$$S_{\beta}(w_e) = (k_1^2 + w_e k_2^2) S_{RE}(w_e)$$

De posse desse espectro será possível verificar a probabilidade do ângulo de deflexão vir a encontrar o seu esbarro máximo. Naturalmente, havendo uma frequência de ocorrência desse encontro muito elevada, o sistema de controle deixaria de ser linear, passando a ser do tipo "liga-desliga".

Para evitar que a não linearidade desse controle venha a prejudicar o modelo empregado, admite-se que o estabilizador só possa atingir a sua deflexão máxima no máximo em uma a cada dez oscilações nas condições de mar de projeto [11].

Admitindo um espectro de faixa estreita, cuja estatística de máximos possa ser descrita por uma distribuição de Rayleigh, pode-se escrever que:

$$P(\beta > \beta_{\text{máx}}) = \exp \left| -\beta_{\text{máx}}^2 / 2E_{\beta} \right| ,$$

onde:

E_{β} - área sob o espectro da deflexão da aleta.

O espectro da velocidade de deflexão da aleta pode ser obtido a partir do espectro do ângulo de deflexão por [18].

$$S_{\dot{\beta}}^2(w_e) = (w_e^2 k_1^2 + w_e^4 k_2^2) S_{RE}(w_e)$$

Pelo mesmo motivo da limitação da frequência de ocorrência do ângulo de deflexão máxima, também deve-se impedir que a velocidade máxima de comando dessas deflexões seja atingida com muita assiduidade. Essa limitação também está ligada à impossibilidade

de do sistema de controle demandar uma potência superior àquela para a qual foi projetado. Costuma-se limitar em 1% a probabilidade dessa ocorrência.

Admitindo-se a distribuição de Rayleigh, essa probabilidade pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$P(\beta > \beta_{\text{máx}}) = \exp \left| -\beta_{\text{máx}}^2 / 2E_{\beta} \right| , \quad (3.6.29)$$

na qual:

E_{β} - área sob o espectro de velocidade da aleta.

3.6.3 Programas de Computador para seleção dos ganhos

Foram desenvolvidos programas de computador que procedem a busca sistemática dos valores dos ganhos extremantes nos casos dos processos com um ou três graus de liberdade, respectivamente. Durante a varredura são calculadas as probabilidades de que os valores extremos venham a ser excedidos. As buscas podem ser suas pensas para ganhos que conduzam a valores excessivos da deflexão máxima da aleta, ou da sua velocidade de comando, como indicado anteriormente ou pelo usuário.

Após a leitura dos parâmetros que definem um campo de variação inicial, discreta os programas calculam para cada par (k_1, k_2) para cada aprofundamento do mar, e para as diversas condições de mar, especificadas por uma altura significativa e um período característico, os resultados parciais do sistema de controle, que consistem dos seguintes valores:

SIG0 - raiz da área sob o espectro de amplitude de balanço.

SIG1 - raiz do momento de ordem dois do espectro de amplitude de balanço.

SIG2 - raiz do momento de ordem quatro do espectro de amplitude de balanço.

PBETA - probabilidade de que a deflexão máxima da aleta seja ultrapassada.

PVBETA - probabilidade de que a velocidade máxima de deflexão da aleta seja ultrapassada.

EPIC - eficiência resultante do controle empregado.

O programa apresenta ainda os valores totais dessas probabilidades e de eficiência que ocorreriam nesse aproamento empregando-se esse par de ganhos, considerando-se a frequência condicional de ocorrência dos diversos estados de mar nesse rumo relativo.

O programa inicia a apresentação pelo par $(0,0; 0,0)$, que corresponde a ter-se aletas presentes, porém, imóveis. A tabela 3.6.1 apresenta os resultados obtidos para os aproamentos de 0° a 180° , de 30° em 30° .

Note-se que, no caso de um mar unidirecional, os espectros correspondentes aos mares de proa e popa são nulos, o que não ocorre em um mar multidirecional.

Verifica-se também que nessas condições a eficiência do navio será bastante baixa nos mares de alheta a 60° , travês e bochecha a 120° , sendo aceitável nos demais mares. Confirma-se com esses resultados a sensação percebida por operadores de bordo e indicada nos métodos convencionais de que há mares com direções predominantes inferiores a 90° que são mais rigorosos do que os de travês.

A tabela 3.6.2 apresenta os mesmos resultados para o navio estabilizado, com o par de ganhos $(2,0; 6,0)$. Por ela pode-se observar a sensível melhora que ocorre nos mares de alheta a 60° e travês. No entanto, convém notar que esse controle não proporciona melhoras tão sensíveis nos demais mares. Pode até mesmo ocorrer que para outros pares de ganhos se obtenha piores resultados que os do navio sem controle.

Essa constatação sugere que o sistema de controle, além de ter condições de maximização da eficiência global deva também permitir uma variação nos ganhos do sistema de tal forma a buscar as melhores eficiências também em um determinado aproamento.

A determinação dos ganhos ótimos pode ser realizada com os valores finais reproduzidos na tabela 3.6.3, que contém os resultados globais do sistema de controle. Nela podem ser observados os seguintes resultados para cada par de ganhos do sistema de controle:

FO - Valor da função objetivo como definido em 2.5.2.

PBETA - Probabilidade de que sejam solicitados valores superiores à deflexão máxima da aleta.

[illegible]

RESULTADO DO SISTEMA DE CONTROLE ($x_1 = 0, x_2 = 0$)

TABELA 3.6.1

PVBETA - Probabilidade de que sejam requeridos valores superiores à velocidade máxima de deflexão da aleta.

X11	X12	F0	PVBETA	X11	X12	F0	PVBETA
0.0	0.0	71.35	0.00	0.0	2.0	73.90	0.05
0.0	0.0	77.25	1.63	0.0	0.0	60.76	3.11
0.0	0.0	63.57	5.03	0.0	10.0	75.90	7.11
2.0	0.0	72.03	11.40	2.0	2.0	74.70	6.37
2.0	0.0	77.91	7.01	2.0	0.0	60.76	6.64
2.0	0.0	63.16	0.23	2.0	10.0	65.60	10.66
4.0	0.0	70.03	22.55	4.0	2.0	77.12	14.69
4.0	0.0	79.47	14.56	4.0	0.0	61.01	17.68
4.0	0.0	63.83	17.70	4.0	10.0	65.93	17.80
6.0	0.0	70.64	31.04	6.0	2.0	78.20	24.72
6.0	0.0	60.52	27.34	6.0	0.0	62.65	26.35
6.0	0.0	60.59	25.64	6.0	10.0	66.40	25.16
8.0	0.0	75.20	41.07	8.0	2.0	77.01	35.26
8.0	0.0	81.21	33.43	8.0	0.0	62.55	32.69
8.0	0.0	64.51	32.02	8.0	10.0	65.95	31.31
10.0	0.0	75.29	42.39	10.0	2.0	78.20	39.97
10.0	0.0	60.42	38.73	10.0	0.0	62.33	37.73
10.0	0.0	63.94	36.65	10.0	10.0	65.35	36.08

RESULTADOS GLOBAIS DO SISTEMA DE CONTROLE

TABELA 3.6.3

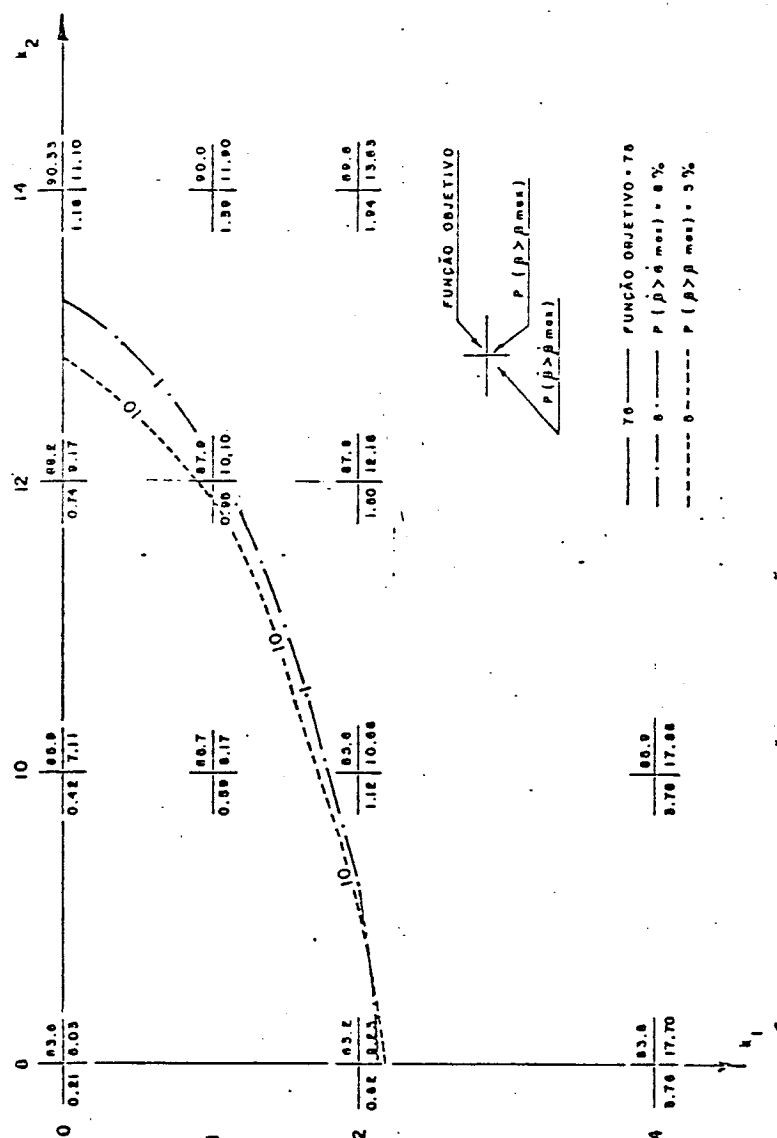
Esses valores foram registrados na figura 3.6 e permitiram a construção de curvas de nível correspondentes aos lugares geométricos dos pontos de mesma função objetivo e de mesma probabilidade de exceder a deflexão máxima ou a velocidade máxima de controle da aleta. Essas curvas pretendem facilitar a localização do par de ganhos que conduzem à máxima eficiência global.

Das curvas de iso-eficiência observa-se que a máxima eficiência para o campo de busca estipulado seria obtida com o emprego da lei de controle dada por:

$$\beta = 6\epsilon_4 + 10\epsilon_4$$

No entanto, nessas condições as probabilidades de demanda da deflexão máxima e da velocidade máxima de deflexão da aleta seriam de 25,2% e 8,2%, respectivamente, que são valores considerados excessivos.

Deve-se portanto localizar os ganhos extremantes sujeitos aos limites estabelecidos em 3.6.3, que são de 10% e 1% para a deflexão e velocidade de controle máximos, respectivamente.



EXTENSÃO E AMPLIAÇÃO DE RESULTADOS

FIGURA 3.7

Impondo essas restrições adicionais observa-se que os ganhos ótimos, ainda dentro desse primeiro campo de varredura, seriam obtidos na fronteira do seu domínio, com o controle expresso por:

$$\beta = 10\epsilon_4 \quad (5.3.3)$$

Entretanto, percebe-se ainda que o campo de busca deve ser estendido para a pesquisa de valores de $k_2 > 10$, que ainda atendem às restrições e parecem conduzir a melhores funções objetivo. A figura também sugere não haver necessidade da pesquisa de valores de $k_1 > 2$.

Processou-se dessa feita, para uma maior precisão, o programa tendo-se obtidos novos resultados globais constantes da figura 3.7 e que varrem o campo:

$$0 \leq k_1 \leq 2 \quad (5.3.4)$$

$$10 \leq k_2 \leq 14$$

pela nova figura conclui-se que o controle ótimo seria obtido com a lei:

$$\beta = 12.9\epsilon_4 \quad (5.3.5)$$

6.0 CONCLUSÕES

Apresentou-se em capítulos anteriores um novo método para projeto de aletas estabilizadoras. Procedimento análogo pode ser utilizado para outros sistemas de estabilização de navios. O método desenvolvido preenche necessidades geradas na fase de especificação de sistemas estabilizadores, através da previsão da redução de balanço admissível e que pode ser exigida de fornecedores.

O desenvolvimento do trabalho constituiu uma oportunidade de emprego integrado de uma série de programas complexos que vinham sendo produzidos nas pesquisas do Escritório Técnico de Construção Naval em São Paulo e no Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo nos últimos, além de outros especificamente desenvolvidos "ad hoc".

Confirmou-se pelo emprego do processo que os mares com aprofundamentos de albeta, com valores da ordem de 60° em relação à linha popa-proa, geram as maiores amplitudes de balanço. Esse resultado também é confirmado pelos processos convencionais e por observações a bordo.

No que diz respeito ao dimensionamento das aletas estabilizadoras, verificou-se que, devido a sua baixa razão de aspecto, o emprego de processos mais elaborados no cálculo de seu coeficiente de empuxo são desnecessários, sendo suficiente a utilização de expressões usuais, como as apresentadas por Mandel [12].

No entanto, o emprego das funções de Sears deve ser conservado, principalmente devido ao seu valor considerável nas altas frequências de encontro.

No dimensionamento do sistema de controle empregou-se uma função objetivo que consistia da maximização da eficiência das operações de bordo. Essa função pode ser facilmente modificada de forma a aceitar outras versões tais como a minimização do balanço significativo médio, etc.

Os ganhos ótimos são obtidos por um sistema gráfico que apresenta resultados do processo de busca sistemática. Nesse sistema são apresentadas curvas de mesma eficiência, em conjunto com outras que expressam as restrições da deflexão e da velocidade de deflexão da aleta não ultrapassarem os valores máximos permitidos numa certa frequência.

Não foram verificados casos em que os ganhos extremos estivessem fora da fronteira imposta por seus valores mínimos em conjunto com essas restrições. No entanto, ao contrário do que se poderia esperar, nem sempre o acréscimo do ganho proporcional ao ângulo de balanço conduzirá a um aumento de eficiência, havendo mesmo casos de perda dessa eficiência. A forma das curvas de mesma eficiência sempre indicaram haver um crescimento dessa eficiência com o acréscimo no ganho proporcional à velocidade de balanço. Entretanto, espera-se que essa tendência deva ser invertida para valores mais altos do ganho, indicando um excesso de momento estabilizador. Por essas observações, acredita-se ser possível que em outras aplicações se observe os ganhos extremamente no interior de seu domínio.

Inicialmente imaginava-se que o sistema de controle pudesse ser dimensionado para sua eficiência máxima em condições mé dias do estado de mar, através da especificação de um único par de ganhos para o sistema. Porém, verificou-se no exemplo apresentado que os ganhos ótimos obtidos dessa forma não são os mais adequados para todos os aproamentos, havendo mesmo casos em que esses ganhos são prejudiciais ora por conduzirem a violação das restrições de de flexões e velocidades de deflexão máximas nos diversos aproamentos, ora por não acarretar as melhores eficiências para todos os aproamentos.

Concluiu-se, portanto, pela necessidade de projetar o sistema de controle de forma a p permitir uma variação nos ganhos do sistema de controle para adaptá-lo aos diversos aproamentos. Com es sa ajustagem, será possível elevar ainda mais a eficiência global do sistema de controle que seria obtida com um par de ganhos fixo, atendendo-se as restrições em todos os aproamentos.

Ao contrário do que ocorre com o aproamento, a variação de altura significativa já não tem influência na determinação dos ganhos extremantes, sendo desnecessário adaptar-se os ganhos também à intensidade dos estados de mar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEONE, P.C., SOTELO, Jr.J. & CRUZ, J.J. Simulação de manobras de navios de superfície. Relatório 7306 do IPT, São Paulo, 1973.
- [2] DOGAN, P.P. Minimization of hydrofoil ship control power. Cambridge, MIT, 1973.
- [3] WEBSTER, W.C. Analysis of activated antiroll tanks. Transactions SNAME, New York, 1967.
- [4] Design data sheet DDS 92900-4, Passive anti-roll tanks. Department of the Navy, 1962.
- [5] KIRKMAN, K. Development and testing of a passive moving weight roll stabilizer for the USCG 82-foot class patrol boat. SNAME, Chasapeake, 1972.
- [6] ABKOWITZ, M.A. Stability and motion control of ocean vehicles. Cambridge, MIT, 1969.
- [7] CRUZ, J.J. Pilotagem automática de embarcações com emprego do controle estocástico. Dissertação apresentada à EPUSP para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 1981.
- [8] MEYERS, W.G. SHERIDAN, D.J. & SALVENSEN, N. Manual NSRDC ship motions and sea load computer program. NSRDC Report 3376, Washington, 1975.
- [9] STEEN, A. 5-D seakeeping program user's manual. Department of Ocean Engineering, Cambridge, Massachusetts, MIT, 1976.
- [10] SILVA, Jr. A. & VEIGA, J.P.C. Manual do usuário do programa ma SEA6D. Estudo Técnico nº221/1980 do ETCN-SP, São Paulo, 1980.
- [11] CONOLLY, J.E. Rolling and its stabilization by active fins. Transaction RINA, Londres, 1969.
- [12] Dados estatísticos sobre as ondas no litoral brasileiro. Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1978.
- [13] FRANK. Oscillation of cylinders in of below the free surface of deep fluids. Report 2375 NSRDC, Outubro, 1967.
- [14] SALVENSEN, N., TUCK, E.O. & FALTINSEN, O. Ship motions and sea loads. Transactions SNAME, New York, v. 78, 1970.
- [15] LLOYD, A. R. Roll stabilizer fins: A design procedure. Transactions RINA, Londres, 1974.
- [16] SEARS, W.R. Some aspects of nonstationary airfoil theory and its practical applications. Journal of the Aeronautical Sciences, Janeiro, 1941
- [17] BARR, A.R. & ANKUDINOV, V. Ship rolling, its prediction and reduction using roll stabilization, Marine Technology, Janeiro, 1977.
- [18] PRICE, W.G. & BISHOP, R.E.D. Probabilistic theory of ship dynamics. Londres, Chapman and Hall, 1974.
- [19] VEIGA, J.P.C. Proposta de Método para Projeto de Aletas Estabilizadoras. São Paulo, 1982.
- [20] HOGGEN, N. & LAMB, F.E. Ocean wave statistics. Her Majesty Stationery Office, Londres, 1967.