

HERMANO IGO KREBS

**UM ESTUDO SOBRE PILOTO
AUTOMÁTICO INTEGRADO
PARA NAVIOS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO, PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA.

CONSULTA
FD-687

**SÃO, PAULO
1987**

D.A - 19.08.87

MINISTRY OF EXTERNAL AFFAIRS
POLAND
FD-687

a meus pais,

Abraham (S.T.)
&
Katarzyna

Expressar agradecimento é certamente uma tarefa extremamente complexa, pois ao se dar o fecho a um trabalho, tem-se a tendência a se desejar poder agradecer até às sombras. Isto talvez não fosse indevido, visto que às sombras proporcionam sombra e com a grande vantagem de em geral não falarem.

Assim, excetuando-se as sombras, decidi agradecer a todos, entre os quais gostaria de destacar quatro instituições que estão diretamente associadas a este trabalho, financiando e provendo as condições acadêmicas para sua realização:

-CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;

-EPUSP-Escola Politécnica da USP;

-MONBUSHO-Ministério da Educação do Japão;

-UNY-Universidade Nacional de Yokohama.

Falar-se em instituições implica em se falar de pessoas e entre estas gostaria de destacar:

-Dr. Cêlio Tanigushi, Chefe do Departamento de Engenharia Naval da EPUSP e futuro diretor da mesma escola (obrigado pelo guarda-chuva).

-Dr. Moyses Szajn bok, Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, que costuma puxar as orelhas alheias em geral com razão (antecipando-me às correções, onde lê-se "em geral" leia-se "sempre").

-Dr. Toshi-ichi Tachibana, Chefe do Agrupamento de Hidrodinâmica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do E.S.P., que providenciou todas as apresentações e recomendações, que me foram necessárias para me tornar bolsista do MONBUSHO.

Ao realizar este trabalho tive o privilégio de trabalhar diretamente com dois grandes professores:

-Dr. Seiji Takezawa, Chefe do Departamento de Engenharia Oceânica da Universidade Nacional de Yokohama e meu orientador nesta instituição, que me incentivou a concluir este trabalho e colocou todos os recursos de seu laboratório a minha disposição.

-Dr. Hernani L. Brinati, meu orientador no Departamento de Engenharia Naval da EPUSP, que conseguiu um fato inédito: Orientar um discípulo teimoso do outro lado da espaçonave Terra, somente utilizando-se de meios como o correio, o conhecimento e bom senso.

Finalmente gostaria de mencionar os responsáveis técnicos do laboratório de dinâmica do Departamento de Engenharia Oceânica da U.N.Y., Takehiko Takayama e Kiyoshi Miyagawa, que providenciam qualquer parafernália; o Eng. Eletrônico Marcos de Salles Guerra Tsuzuki, que foi convocado a fazer uma revisão ortográfica; o Eng.

Naval Ning Ma que foi obrigado a traduzir do japonês as explicações do manual do hardware da U.N.Y. e ao Eng. Naval Hermano Igo Krebs pela datilografia, desenhos, paginação e pelo excelente cafezinho.

A todos, com excessão das sombras, meu sincero agradecimento.

Hermano Igo Krebs
Junho 1987 (Showa 62)

RESUMO

O piloto automático convencional se baseia na comparação do sinal de aproamento indicado no giroscópio com o rumo desejado e esta diferença atua como sinal de entrada no sistema de governo do navio. Além disto, o índice de desempenho do piloto automático convencional é restrito a manutenção do rumo.

Com o acentuado aumento do preço do petróleo, verificado a partir de 1973, o consumo de combustível tornou-se um dos itens relevantes na composição dos custos operacionais e os conceitos de controle automático de rumo passaram por uma revisão. Esta revisão acrescentou um novo parâmetro ao índice de desempenho do piloto automático: a redução das perdas propulsivas ou seja, a redução do consumo de combustível.

Independente da técnica de controle utilizada, o índice de desempenho é um aspecto básico na formulação do piloto automático.

Neste trabalho efetuou-se uma pesquisa dos índices de desempenho propostos na literatura, qual sua origem e os resultados obtidos em sua operação e simulação. Em seguida, utilizando técnicas de controle ótimo determinístico, calculou-se os ganhos do controlador ótimo e estabeleceu-se um procedimento para simulação da operação de uma embarcação com curso ideal reto, em águas abertas e irrestritas, verificando como varia o desempenho da embarcação com relação ao consumo.

ABSTRACT

An Optimal Fuel Consumption Automatic Pilot for a Straight Course.

The classical ship automatic pilot only takes into account course keeping, as its performance index. After the 1973 oil crisis, this concept passed through a review, which incorporated in its performance index, fuel consumption.

This dissertation reviews different performance indexes in the literature and suggests an approach for its formulation.

INDICE

		P9
	SIMBOLOGIA	8
	LISTA DE FIGURAS	14
	LISTA DE TABELAS	16
1.	O PILOTO AUTOMATICO	
1.1.	INTRODUÇÃO AO PROBLEMA	17
1.2.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	20
1.3.	OBJETIVO DO TRABALHO	24
1.4.	LINHAS GERAIS DO TRABALHO	24
2.	FUNDAMENTOS TEORICOS	
2.1.	INTRODUÇÃO	27
2.2.	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CONTROLE OTIMO DETERMINISTICO	28
2.2.1.	O PROBLEMA DETERMINISTICO LINEAR	30
2.2.2.	A SOLUÇÃO DO PROBLEMA	32
2.3.	A ESTABILIDADE DO SISTEMA COM CONTROLADOR	34
3.	O INDICE DE DESEMPENHO	
3.1.	INTRODUÇÃO	39
3.2.	ALGUNS INDICES DE DESEMPENHO	39
3.3.	O MAPEAMENTO DO INDICE DE DESEMPENHO	48
4.	MODELAGEM MATEMATICA	
4.1.	INTRODUÇÃO	53
4.2.	EQUAÇÃO DE MOVIMENTO	53
4.3.	ESFORÇOS SOBRE O VEICULO	55
4.3.1.	INTRODUÇÃO	55
4.3.2.	ESFORÇOS HIDRODINAMICOS ATUANTES NO CASCO	55
4.3.3.1.	ESFORÇOS HIDRODINAMICOS DEVIDOS AO LEME	55
4.3.3.2.	ESFORÇOS HIDRODINAMICA DEVIDOS A PROPULSOR	56
4.3.4.	ESFORÇOS DEVIDOS A FORÇAS DE EXCITAÇÃO EXTERNA	56
4.3.4.1.	INTRODUÇÃO	56
4.3.4.2.	FORÇAS EXTERNAS GERADAS PELA AÇÃO DO VENTO SOBRE AS PARTES EMERSAS DO NAVIO	58
4.3.4.3.	FORÇAS EXTERNAS GERADAS PELA AÇÃO DE CORRENTES	61
4.3.4.4.	FORÇAS EXTERNAS GERADAS PELA AÇÃO DE ONDAS	61
4.3.4.4.1.	INTRODUÇÃO	61
4.3.4.4.2.	FORÇAS E MOMENTOS DE 1ª ORDEM	62
4.3.4.4.3.	FORÇAS E MOMENTOS DE 2ª ORDEM	67
4.5.	O MODELO MATEMATICO DE MOVIMENTO DA EMBARCAÇÃO	69
4.5.1.	O MODELO MATEMATICO LINEAR	69
4.5.2.	O MODELO MATEMATICO NÃO-LINEAR	71

5.	SENSORES	
5.1.	INTRODUÇÃO	74
5.2.	SENSORES DO ANGULO DE RUMO E DE SUA TAXA DE VARIACÃO	74
5.3.	SENSORES DO ANGULO DO LEME	76
5.4.	SENSORES DA VELOCIDADE DE AVANÇO DA EMBARCAÇÃO	76
5.5.	SENSORES DA VELOCIDADE DE DERIVA DA EMBARCAÇÃO	78
5.6.	SENSORES DE AGENTES AMBIENTAIS	79
6.	IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO	
6.1.	INTRODUÇÃO	80
6.2.	PROCEDIMENTOS E ALGORITMOS	80
6.2.1.	O CORPO PRINCIPAL DO PROGRAMA	81
6.2.2.	SUBROTINAS PARA PROJETO DO CONTROLADOR-1ª ETAPA	83
6.2.2.1.	SUBROTINA PORTA2	83
6.2.2.2.	SUBROTINA PORTA	86
6.2.2.3.	FUNÇÃO FUN	86
6.2.2.4.	SUBROTINA EST	86
6.2.2.5.	SUBROTINA ZXK	87
6.2.3.	SUBROTINAS PARA PROJETO DO CONTROLADOR-2ª ETAPA	89
6.2.3.1.	SUBROTINA BARUD2	89
6.2.3.2.	SUBROTINA BARUD	92
6.2.3.4.	FUNÇÃO FUN4	92
6.2.3.5.	SUBROTINA EST4	92
6.2.3.6.	SUBROTINA ZXK4	92
6.2.4.	SUBROTINA FOR2ON	93
6.2.5.	SUBROTINA FOR1ON	97
6.2.6.	SUBROTINA FORVEN	98
6.2.7.	SUBROTINA GEOMETRIA	100
6.2.8.	SUBROTINA FORCOR	101
6.2.9.	SUBROTINA SOMFOR	101
6.2.10.	SUBROTINA MOVSH	101
7.	ANALISE DE RESULTADOS	
7.1.	INTRODUÇÃO	103
7.2.	DETERMINAÇÃO DO CONTROLADOR OTIMO	
7.2.1.	CONTROLADOR OTIMO LQ-ALGORITMO DE KLEINMAN	103
7.2.2.	CONTROLADOR OTIMO LQ-ALGORITMO DA MATRIZ DE SINAL	116
7.3.	MAPEAMENTO DO INDICE DE DESEMPENHO	134
8.	CONCLUSOES E SUGESTOES	137
APENDICES:		
APENDICE A- FAIXA DE APLICAÇÃO DA HIPOTESE DE FROUDE-KRYLOV		
APENDICE B- CONTROLABILIDADE DO SISTEMA NAVIO		
APENDICE C- OBSERVABILIDADE DO PAR $[A_0 \ C]$		
APENDICE D- PONTO INICIAL DE BUSCA PARA O ALGORITMO DE SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE RICCATI		

- APENDICE E- IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO ALGEBRICA DE RICCATI EM UM MICRO-COMPUTADOR-ALG. KLEINMAN
- APENDICE F- SUBROTINAS HITACHI-MSL2
- APENDICE G- CARACTERISTICAS DO NAVIO
- APENDICE H- O PROGRAMA DE COMPUTADOR-VETOR 3 VARIÁV. ESTADO
- APENDICE I- PASSO DE INTEGRAÇÃO E INTERVALO DE SIMULAÇÃO
- APENDICE J- IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO DE RICCATI-MATRIZ DE SINAL
- APENDICE K- O PROGRAMA DE COMPUTADOR-VETOR 4 VARIÁV. ESTADO

BIBLIOGRAFIA

SIMBOLOGIA

A simbologia esta organizada em letras latinas, gregas, operadores subscritos, superscritos e dimensões.

CAPITULO II :

$A_0(t), A_0$	matriz de coeficientes do sistema;
A_L	matriz de coeficientes do sistema autonomo;
$B_0(t), B_0$	matriz de coeficientes do sistema;
c_i	constantes;
$C_0(t), C_0$	matriz de coeficientes do sistema;
E_d	perturbações e agentes externos;
E_{ia}	incertezas dos atuadores;
E_s	erros e incertezas dos sensores;
$f(x(t), u(t))$	função vetorial n-dimensional;
$F(t)$	representação dos agentes externos;
$F_0(t)$	matriz simétrica pelo menos semi-definida positiva;
$g(x(t))$	função vetorial r-dimensional;
h^T	autovetores;
$H(t)$	Hamiltoniana;
I	matriz identidade;
$I.D.$	índice de desempenho;
$L(x(t), u(t))$	funcional que penaliza estado e controle;
M_Q	matriz simétrica pelo menos semi-definida positiva;
M_R	matriz definida positiva;
P	solução da equação algébrica de Riccati;
$Q_0(t), Q_0$	matriz simétrica pelo menos semi-definida positiva;
$R_0(t), R_0$	matriz simétrica definida positiva;
$u(t)$	vetor m-dimensional de controle;
$u_0(t), t \in [t_0, T]$	entrada ideal;
U	vetor de entrada do sistema;
U_r	vetor de entrada;
$V(x)$	função escalar;
$x(t)$	vetor n-dimensional de variáveis de estado;
x_e	estado de equilibrio;
$x_F(t)$	estado correspondente ao sistema forçado;
$x_L(t)$	estado correspondente ao sistema autonomo;
x_0	estado inicial no instante t_0 ;
$x_0(t), t \in [t_0, T]$	trajetória de estado ideal;
X	vetor das variáveis de estado;
\hat{X}	vetor das estimativas de estado;
$y(t)$	vetor p-dimensional de observação;
$y_0(t), t \in [t_0, T]$	saída ideal;
Y	vetor de saídas ou de medições do sistema;
α_0	termo de ordem superior;
β_0	termo de ordem superior;
δ	número real positivo;
λ^T	autovalores;
$\lambda^T(t)$	coestado;

σ número real positivo;
 $\phi(x(T))$ funcional que penaliza o estado final;
 $f(\delta x, \delta u, F, t) = \delta \dot{x}(t)$;
 $\int L(x, u, t) dt = I.D.$;
 $\dot{x}(t) = dx(t)/dt$;

m dimensão vetor de controle;
 n dimensão vetor de estado;
 r dimensão vetor de saída.

CAPITULO III :

a_i fator de penalização;
 A fator de penalização;
 Ar área do leme;
 B fator de penalização;
 cf coeficiente de resistência de atrito;
 ci constantes;
 cw coeficiente de resistência de onda;
 C fator de penalização;
 k coeficiente de resistência de forma;
 K, K' constantes de proporcionalidade;
 m_0 massa do navio;
 m_x, m_y massas adicionais nas direções longitudinal e transversal respectivamente;
 n rotação do propulsor;
 n_1 constante empírica;
 OP distância do C.G. ao centro de pivotamento da embarcação;
 r taxa de variação do ângulo de rumo d navio;
 R resistência do navio em linha reta;
 R_0, R_{casco} resistência do casco;
 R_δ resistência do leme, função do ângulo de razão de esbelteza;
 S razão de esbelteza;
 t coeficiente da redução da força propulsora
 T empuxo;
 T_p tempo;
 $T_1, T_2, T_3, T'3$ constantes de tempo;
 u velocidade de avanço da embarcação;
 v velocidade de deriva da embarcação;
 V_a velocidade do fluido próxima ao propulsor;
 V_p componente da velocidade da embarcação na direção do curso ideal;
 W coeficiente de esteira;
 $X_{\dot{u}}, X_{vr}, X_{vv}, X_\delta, \delta$ derivadas hidrodinâmicas;
 $\alpha = -(m + X_{vr})$
 $\beta_1 = 1/2 * X_{vv}$
 β ângulo de deriva;
 β_m valor médio do ângulo de deriva;
 $\gamma = 1/2 * X_\delta \delta$
 δ ângulo do leme;
 ΔR acréscimo de resistência do navio em relação a trajetória em linha reta;

$\Delta \varepsilon y_i$	desvio transversal do curso ideal;
η	fator de penalização;
$\lambda' = \frac{X_{vr} * OP}{172 * X_{\delta} \delta}$	
λ	fator de penalização;
λ_1	razão de aspecto do leme;
∇	deslocamento da embarcação;
ρ	densidade água salgada;
ψ	ângulo de rumo;
ψ_m	valor médio do ângulo de rumo.

CAPITULO IV :

A(Vko)	amplitude da onda;
Ala	área longitudinal projetada;
Ap	área projetada;
Ata	área transversal projetada;
B	boca;
cos(n,xi)	cosseno diretor;
Cya, Cna, Xa, Cxa	coefs. dos esforços obtidos da FIG.4.4.;
d σ	elemento de superfície;
F1c, F2c, F6c	respect. forças e momento que atuam sobre o veículo devido a ação da corrente;
g	aceleração da gravidade;
H	calado;
Ho	altura média das partes emersas;
Iz	momento de inércia do navio;
$j = \sqrt{-1}$;	
k	número de onda;
k1	coeficiente empírico;
L1a	comprimento da linha de água;
Loa	comprimento da linha de água;
Lpp	comprimento entre perpendiculares;
m	massa do navio;
n	normal orientada para o exterior do corpo;
n1	constante que depende do meio; para atmosfera é igual a 7,5;
N	momento que atua sobre o veículo segundo o eixo Sz0;
N1	momento que atua sobre veículo devido a atuação do leme;
N*	momento externo;
P	pressão;
S	espectro de onda;
Sf	espectro de força;
t	coeficiente de redução da força propulsora;
T	empuxo fornecido pelo hélice;
T(Vko)	período da onda em segundos;
u	componente de velocidade em relação eixo Gx;
uc	componente da veloc. corrente direção CGx;
v	componente de velocidade em relação ao eixo Gy;
vc	componente da veloc. corrente direção CGy;
V	velocidade de translação do navio;

Vc	velocidade da corrente;
Vk	velocidade em nós do vento formador das ondas a 64pés acima da superfície do mar;
V _{kz}	velocidade do vento a altura z;
V _{ko}	velocidade média a altura de referência(m/s);
w	frequência da onda;
w _e	frequência de encontro da onda;
x	posição com relação a um eixo fixo ao navio;
x _g	posição do CG segundo eixo CGx;
x _o	posição com relação ao eixo fixo à Terra;
X _l	força que atua sobre o veículo devido a atuação do leme;
X _o	força que atua sobre o veículo segundo o eixo S _{xo} ;
X*	esforço externo;
y	posição com relação a um eixo fixo ao navio;
y _o	posição com relação ao eixo fixo à Terra;
Y _l	força que atua sobre o veículo devido a atuação do leme;
Y _o	força que atua sobre o veículo segundo o eixo S _{yo} ;
Y*	esforço externo;
Z	altura vertical acima da superfície do mar;
Z _o	altura de referência;
β	ângulo de deriva da embarcação;
γ c	ângulo entre a veloc.da corrente e eixo CGx;
δ	ângulo do leme;
δ c	ângulo de comando para o leme;
ϵ i	movimento do navio;
ξ a	amplitude da onda;
θ	ângulo entre a velocidade de propagação da onda e a do navio;
μ	ângulo entre a direção do vento preponderante e a propagação de ondas;
∇	deslocamento.
ρ	densidade da água;
ρ a	densidade do ar(1,22557 kg/m ³);
τ	constante de tempo(aprox. 3 seg);
ϕ	potencial total das ondas;
ϕ d	potencial da onda refletida;
ϕ i	potencial da onda incidente;
ψ	ângulo de rumo da embarcação;
(1)	esforços de 1 ^a ordem;
(2)	esforços de 2 ^a ordem;
(i)	incidente;
(d)	refletido;

CAPITULO V :

f1	frequência do pulso emitido e refletido (Doppler-Sonar);
f2	frequência medida do pulso refletido;

k	coeficiente de proporcionalidade.
r	taxa de variação do ângulo de rumo do navio;
u	velocidade de avanço do navio;
v	velocidade de deriva do navio;
δ	ângulo do leme;
ψ	ângulo de rumo do navio;

CAPITULO VI :

afi	coeficientes associados às forças externas;
a _{xx}	elemento xx da matriz A ₀ ;
A	amplitude da onda;
AE	matriz definida para calculo do ganho de pré-alimentação;
A ₀	matriz de coeficientes do sistema;
BA _k	representação do sistema em malha fechada-algoritmo de Kleinman;
B ₀	matriz de coeficientes do sistema;
casco	ângulo da tangente à faixa;
C _i	constantes associadas às forças externas;
cos(n,xi)	cosseno diretor;
C	matriz definida por $C^T * C = Q_0$;
del x	incremento de espaço;
ds	elemento de superficie;
DVMFM	multiplicação de matrizes;
DVAFM	soma de matrizes;
DVAHM	soma de vetores;
DIF1M	inversão de matrizes;
DNSBM	resolução de um sistema algébrico não linear-método de Brent;
DLF1M	resolução de um sistema algébrico linear-método de Gauss;
F	representação dos agentes externos;
F _i	forças e momento externos, eixos x,y,z;
Fwe	frequência de encontro adimensionalizada;
g	aceleração da gravidade;
h	calado;
H	matriz Hamiltoniana definida para a solução da equação algébrica de Riccati via algoritmo de Barraud-matriz de sinal;
$i = \sqrt{-1}$;	
I.D.	Índice de desempenho;
In	matriz identidade de ordem n;
J	matriz n x n composta de blocos de Jordan;
k	número de onda;
ki	fator de multiplicação para forças de 2ª ordem;
K	solução de pré-alimentação;
L _k	ganho iterativo, algoritmo de Kleinman;
n _J	normal orientada para o exterior do corpo;
p _{xx}	elemento xx da solução da equação de Riccati;
P	solução da equação algébrica de Riccati;

Qo	matriz simétrica pelo menos semi-definida positiva;
QR	código de identificação do índice de desempenho;
Qxx	elemento xx da matriz Qo;
r	taxa de variação do ângulo de rumo do navio;
Ro	matriz simétrica definida positiva;
S	matriz de sinal da Hamiltoniana;
$S_{i,j,k}$	elemento ij da matriz S, durante a iteração j.
$u(t)$	vetor de controle;
v	velocidade de deriva da embarcação;
V_k	solução iterativa da equação de Riccati-algoritmo de Kleinman;
we	frequência de encontro da onda;
wo	frequência da onda;
$W1, W2, W12, W21$	matrizes de dimensão n x n;
$x(t)$	vetor de variáveis de estado;
x	posição com relação a um eixo fixo ao navio;
y	posição com relação a um eixo fixo ao navio;
y_m	posição média da faixa;
Z	posição com relação a um eixo fixo ao navio;
δ	ângulo do leme;
Δt	incremento de tempo;
ϵt	precisão desejada da iteração-algoritmo de Barraud;
θ	ângulo entre a velocidade de propagação da onda e a do navio;
λ	fator de penalização associado a matriz Ro;
ϕ_i	potencial da onda incidente;
ψ	ângulo de rumo da embarcação;
Re & Im	real e imaginário.

CAPITULO VII :

a#	coeficiente do procedimento computacional para solução da Equação Algébrica de Riccati, com estado redundante;
Ao	matriz de coeficientes do sistema;
Bo	matriz de coeficientes do sistema;
Lo	ganho iterativo inicial, algoritmo Kleinman;
Qo	matriz simétrica pelo menos semi-definida positiva;
Qxx	elemento xx da matriz Qo;
r	taxa de variação do ângulo de rumo do navio;
Ro	matriz simétrica definida positiva;
$u(t)$	vetor de controle;
v	velocidade de deriva da embarcação;
$x(t)$	vetor de variáveis de estado;
δ	ângulo do leme;
ψ	ângulo de rumo da embarcação;

LISTA DE FIGURAS

	Pg
1.1. Pilotagem de Embarcações.	18
1.2. Trajetória de uma Embarcação durante Pilotagem.	18
1.3. O Piloto Automático Convencional.	19
1.4. Histograma das Publicações Analisadas.	22
1.5. Linhas Gerais do Trabalho.	26
2.1. Sistema Controlado.	27
2.2. Sistema Controlado Alternativa Estocástica.	28
2.3. Uma Visualização da Estabilidade.	35
2.4. Lugar Geométrico dos Autovalores.	36
3.1. Acréscimo de Resistência e Tempo de Percurso.	45
3.2. Sequência de Etapas.	47
3.3. Eficiência do I.D. p/ Duas Variáveis de Estado.	49
3.4. Mapeamento do I.D. com Relação ao Consumo.	50
3.5. Trajetória de uma Embarcação com Diferentes I.D. de um Instante Inicial até um Instante t_f .	51
4.1. Movimento no Plano.	53
4.2. Movimentos do Navio.	57
4.3. Movimento Relativos das Ondas.	57
4.4. Coeficientes Utilizados para Cálculo da força Externa Gerada pela Ação do Vento.	59 & 60
4.5. Navio sobre Ação de Corrente.	61
4.6. Velocidade do Navio e das Ondas.	62
4.7. A Resposta de um Sistema Linear ao Impulso de Dirac.	63
4.8. Altura Significativa de Onda.	65
4.9.1. Força de Avanço Média em Mar de Proa.	67
4.9.2. Força de Deriva Média em Mar de Través.	67
4.9.3. Força de Avanço e de Deriva Média e Momento de Guinada Médio em Mar de Bochecha.	68
5.1. Giroscópio-Configuração Básica.	75
5.2. Rate-Gyro-Configuração Básica.	75
5.3. Potenciômetro Resistivo.	76
5.4. Doppler-Sonar-Princípio Básico.	77
5.5. Doppler-Sonar-Configuração Básica.	77
5.6. Sensores para Forças Externas.	79
6.1. Mapeamento do Índice de Desempenho com Relação ao Consumo.	82
6.2. Abertura da Malha de Busca.	82
6.3. Diagrama de Blocos da Subrotina PORTA2.	85
6.4. Diagrama de Blocos Utilizado para a Solução da Equação de Riccati.	85
6.5. Diagrama de Blocos da Subrotina PORTA.	86
6.6. Diagrama de Blocos da Subrotina EST.	87
6.7. Diagrama de Blocos da Subrotina Zxk.	88
6.8. Diagrama de Blocos da Subrotina BARUD2.	91
6.9. Expansão dos Resultados para Qualquer Angulo de Encontro.	94

6.10.	Diagrama de Blocos Subrotina FOR2ON.	96
6.11.	Diagrama de Blocos Subrotina FOR1ON.	98
6.12.	Diagrama de Blocos Subrotina FORVEN.	100
6.13.	Diagrama de Blocos Subrotina MOVSH.	101
7.1.	Ganhos do Controlador Otimo-Constante de Tempo 62,5seg-Algorithm Kleinman-Faixa de 0,1 a 1,0.	113
7.2.	Ganhos do Controlador Otimo-Constante de Tempo 62,5seg-Algorithm Kleinman-Faixa de 0,1 a 0,2.	113
7.3.	Ganhos de Pré-Alimentação para Forças de Vento-Cte de Tempo 3seg-Algorithm de Kleinman.	114
7.4.	Ganhos do Controlador L.Q.-Cte de Tempo 3seg- Vento 6m/s-Algorithm de Kleinman.	114
7.5.	Ganhos do Controlador L.Q.-Cte de Tempo 3seg- Algorithm de Kleinman.	115
7.6.	Ganhos Comparativos.	131
7.7.	Ganhos Comparativos-Navios Estáveis e Instáveis-Procedimento (a#).	132 & 133
7.8.	Avaliador do Índice de Desempenho	135

LISTA DE TABELAS

	pg
1.1. Bibliografia de P.A. Pesquisada.	21
3.1. Índices de Desempenho.	39 a 42
3.2. Acréscimo de Resistência.	44
4.1. Sistemas para Adimensionalização.	69
5.1. Precisão do Equipamento Doppler-Sonar.	78
6.1. Resultados Aproximados do Navio Ancorado.	95
6.2. Linearização da FORVEN.	99
7.1.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 62,5seg-Algoritmo de Kleinman.	105 a 109
7.1.B. Ganhos do Controlador L.Q.-Cte de Tempo 62,5seg-Algoritmo de Kleinman.	105 a 109
7.2.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo de Kleinman.	110 a 112
7.2.B. Ganhos do Controlador L.Q.-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo de Kleinman-Força de Vento 3,6,9,12m/s.	110 a 112
7.3. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3s-Algoritmo Matriz de Sinal- Mariner.	119
7.4. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3s-Algoritmo Matriz de Sinal-Série 60.	119
7.5. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Navio Tanque 190.000 t carregado.	120
7.6. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Mineraleiro Petroleiro-carregado(A), lastro(B).	121
7.7. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Tanque 356.000 t-carregado(A), lastro(B).	122
7.8. Solução da Equação de Riccati-Navio Mariner-Computador Hitachi com Dupla Precisão(A), Micro-computador com Precisão Simples(B).	123
7.9. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Navio Mariner-Procedimento (a#).	124
7.10. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Navio Série 60-Procedimento (a#).	125
7.11. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Navio Tanque 190.000 t-Carregado-Procedimento (a#).	126
7.12. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Navio Mineraleiro Petroleiro-Carregado(A),Lastro(B)-Procedimento (a#).	127 & 128
7.13. Solução da Equação Algébrica de Riccati-Cte de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de Sinal-Tanque 356.000 t Carregado(A),Lastro(B)-Procedimento (a#).	129 & 130

CAPITULO I -O PILOTO AUTOMATICO

1.1.Introdução ao Problema

Na caracterização de um bom produto ou serviço, um dos fatores básicos a ser considerado é o custo. Atualmente no caso do serviço denominado transporte marítimo, o custo do combustível utilizado pode ser grosseiramente estimado para a maioria dos casos como estando na faixa dos 30 a 50% dos custos operacionais de um navio. Uma das consequências imediatas é o interesse por parte do armador em reduzir o consumo de combustível, que pode significar maior competitividade no mercado, lucro ou prejuízo na operação da frota.

Diversas opções se apresentam ao armador na tentativa de reduzir o consumo de combustível. Estas podem ser agrupadas nas seguintes áreas:

- instalações propulsoras e auxiliares;
- eficiência do propulsor;
- eficiência do casco;
- navegação e pilotagem.

Citando algumas medidas que se enquadram dentro destas opções tem-se:

- jateamento e pintura das partes submersas (obras vivas) com tintas anti-incrustantes mais modernas e otimização do período das docagens;

- manutenção da superfície dos propulsores;
- sistemas de recuperação para os gases de descargas;
- determinação do curso a ser percorrido pela embarcação levando-se em conta as condições ambientais reinantes.

Entre estas medidas existem algumas de custos de instalação e aplicação muito baixos, como por exemplo o Piloto Automático. Analisando-se a pilotagem de embarcações fora dos limites costeiros, esta tradicionalmente sempre foi realizada em duas etapas, conforme mostrado nas FIGS. 1.1 e 1.2.:

- na primeira a posição da embarcação em relação a Terra é determinada usualmente com o auxílio de sextante, compasso e do Sol. Em seguida, tendo em vista o objetivo desejado, um ângulo de rumo, ψ , é determinado.

- a segunda etapa consiste em se manter o rumo determinado com o auxílio de uma bússola ou de um giroscópio até que a primeira etapa seja refeita.

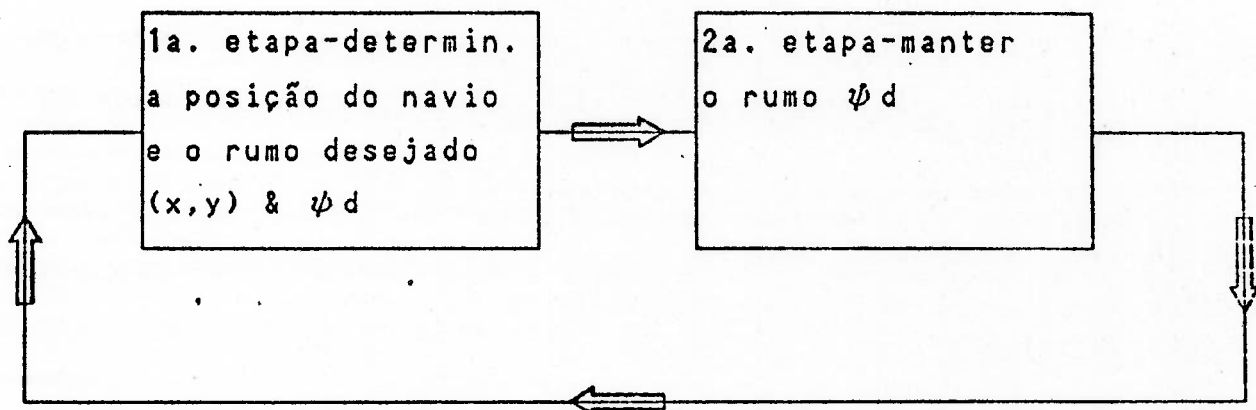


Fig.1.1. Pilotagem de Embarcações

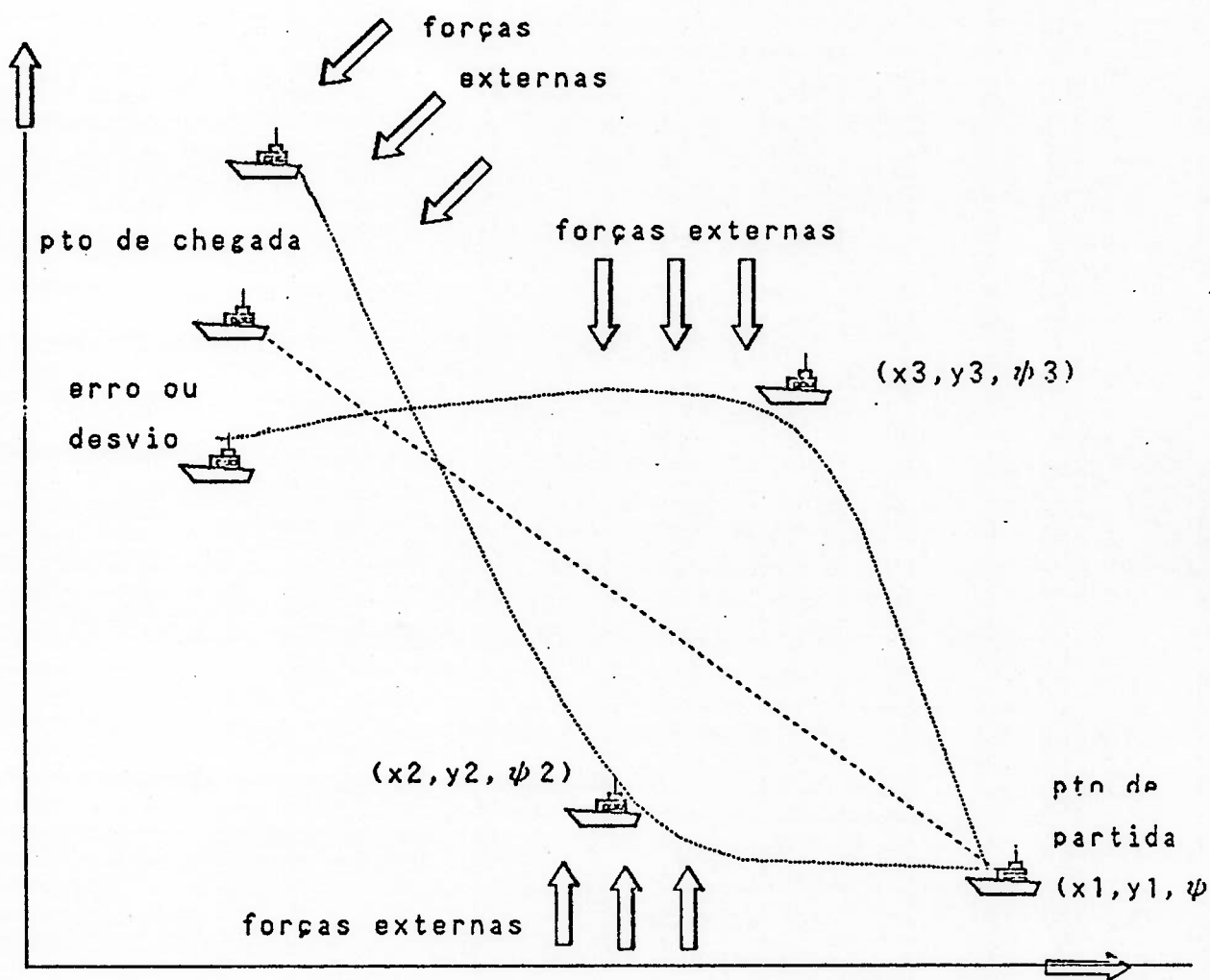


FIG.1.2. Trajetória de Um Navio Durante Pilotagem

Próximo ao começo da 1ª Guerra Mundial, Elmer Sperry desenvolveu o primeiro piloto automático cognominado Mecanismo Anti-Guinada, de forma construtiva totalmente mecânica e que automatizava a segunda etapa do processo de pilotagem [49]. Este piloto automático só foi superado no começo da década de 1950, quando o primeiro piloto automático P.I.D. (Proporcional-Integral-Derivativo) foi concebido. Este controlador tinha ganhos que eram ajustados conforme o deslocamento, a velocidade e os agentes externos.

A estratégia de controle do piloto automático convencional, seja de constituição mecânica ou eletrônica, baseia-se na comparação do sinal de aproamento com o indicado no giroscópio e esta diferença atua como sinal de entrada no sistema de governo do navio, conforme mostrado na FIG.1.3.

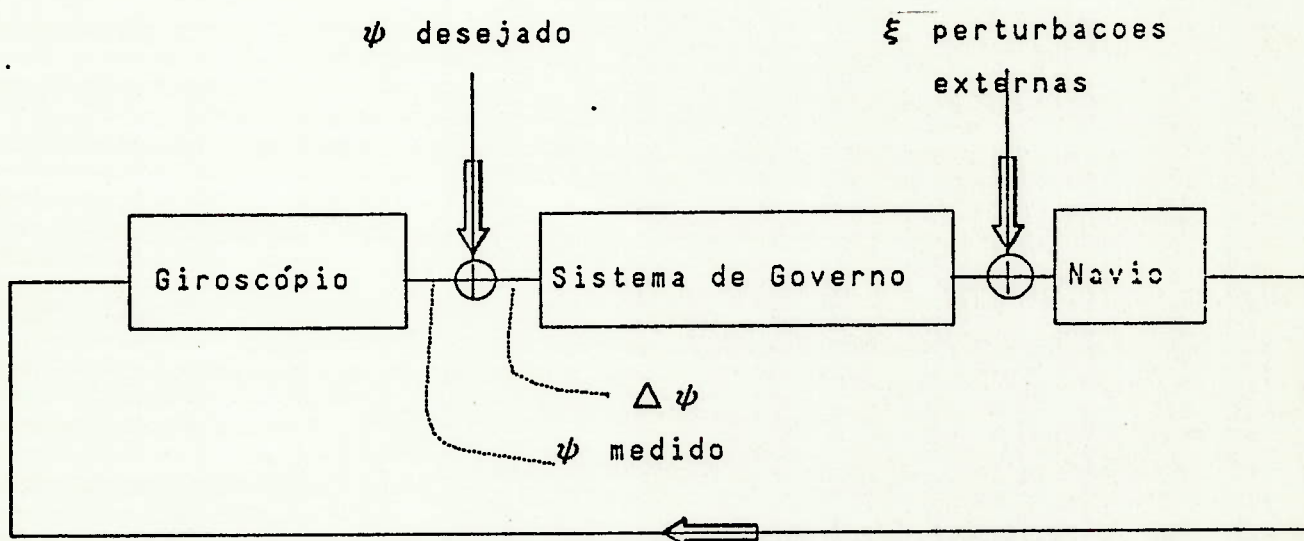


FIG.1.3. O Piloto Automático Convencional

Com o acentuado aumento do preço do petróleo verificado a partir de 1973, o consumo de combustível tornou-se um dos itens relevantes na composição dos custos operacionais e os conceitos de controle automático de rumo de navios passaram por uma revisão. Esta revisão acrescentou um novo parâmetro a ser considerado no projeto do controlador automático: a redução das perdas propulsivas ou seja, a redução do consumo de combustível. Sinteticamente, o piloto automático em sua tarefa de manter o rumo, deve executá-la através de um caminho que minimize as perdas propulsivas, geradas pela atuação dos mecanismos de controle de rumo, como o leme. Este piloto automático será aqui cognominado de Piloto Automático Integrado (P.A.I.).

1.2.Revisão Bibliográfica

Como mencionado na seção anterior, próximo ao começo da 1ª-Guerra Mundial Elmer Sperry desenvolveu o primeiro piloto automático, cognominado de Mecanismo Anti-Guinada de forma construtiva inteiramente mecânica. Na mesma linha, um dos primeiros trabalhos técnicos publicados sobre o assunto é o de Minorsky[1]. O objetivo era o de automatizar a função do timoneiro, na segunda etapa da pilotagem de uma embarcação, ou seja a manutenção do rumo.

O Mecanismo Anti-Guinada de Sperry foi superado no começo da década de 50 pelo piloto automático do tipo P.I.D.[2,3]. Este piloto automático foi concebido utilizando-se a teoria de controle clássica, porém o objetivo de controle era o mesmo do Mecanismo Anti-Guinada.

Na segunda metade da década de 60 e começo da década de 70 surgiram alguns trabalhos discutindo as causas do acréscimo de resistência a propulsão, quando navegando em curso reto e esboçando um objetivo de controle mais abrangente que o anterior[4,5,5a,6]. Este objetivo de controle pode ser expresso como sendo o da manutenção do rumo, atuando-se nos mecanismos de controle e governo da embarcação de forma a minimizar o acréscimo de resistência a propulsão.

A partir de 1973 com o acentuado aumento do custo do petróleo, os estudos relativos à conservação de energia foram acelerados. A pilotagem automática apresentou-se como uma das alternativas para a redução do consumo de combustível. Nesta época uma série de pesquisadores se voltaram ao problema e o aparente auge desta fase ocorreu durante o primeiro e até o momento único congresso de controle automático de navegação SSSAC-Symposium on Ship Steering Automatic Control em Genova-Italia-1980. Após este congresso houve certa continuidade de trabalhos, porém aparentemente em escala decrescente de intensidade. Na tabela 1.1. constam os trabalhos diretamente relacionados ao estudo do piloto automático que foram analisados.

A Tabela 1.1. esta longe de ser completa, porém acredita-se que as publicações mencionadas formam um conjunto representativo.

Analisando-se a tabela, pode-se afirmar que o trabalho pioneiro sobre a nova geração de piloto automático foi apresentado por Nomoto, que determinou a partir das leis de Newton, uma função de transferência para o P.A., que relaciona o desvio do ângulo de rumo com a variação do ângulo de leme, ou seja, dado um desvio de rumo para que ângulo o leme deverá ser posicionado. Além disso, Nomoto apontou a possibilidade de perdas propulsivas adicionais ao se navegar com curso desejado reto[4].

Koyama por sua vez propõe a minimização dessas perdas propulsivas pela adequada escolha dos ganhos do controlador P.I.D. Estes ganhos seriam escolhidos de forma a minimizar um índice de desempenho, que seria uma composição da média quadrática do desvio do rumo desejado com a média quadrática do ângulo de leme. Koyama sugeriu tal composição para um navio Mariner[5,5a].

Norrbin mostrou que o índice de desempenho sugerido por Koyama esta relacionado com o acréscimo de resistência a propulsão, dando uma conotação física a composição acima. Norrbin sugere outro valor para o mesmo navio Mariner, da ordem de 40

vezes menor que o sugerido por Koyama[6].

Com o Choque do Petróleo de 1973, o interesse e estudo do problema de pilotagem automática foi reforçado. Grande número de trabalhos foram publicados em 1980 como mostra a FIG.1.4.

Autor	Data da publicação (19xx)												t								
	66	7	8	9	70	1	2	3	4	5	6	7		8	9	80	1	2	3	4	5
Nomoto	1																				1
Koyama		1	1																		2
Norrbin						1															1
Kaellstroem & Norrbin & Aestroem													1	2		1	1		1		6
Reid & Williams & Moore & Youhanaie & Griffin & Mears													1	2		1	3	3	3		13
Broome & Rush & Keane Marshall & Lambert												1	1								3
Tiano & Brink & Volta & Verbruggen & Ayza										1			1	2		2					6
Clarke Amerongen & Lenke & Land														1		4		1			2
Mort & Linkens Hasegawa															1		1				1
Zwidweg Beck & Chislett Garcia & Thaler Majohr & Beckerer & Bogdanov																		1			1
Oldenburg										1											1
Hashiguchi (Hitachi) Coleman & Wang (Sperry) Racal-Decca Pilot 780 Kanamaru & Sato (Mitsubichi) & Ono, Segawa, Nakagawa														1							1
															1						1
																1					1
																	1				1
																					2

TABELA 1.1. Bibliografia de P.A. Pesquisada

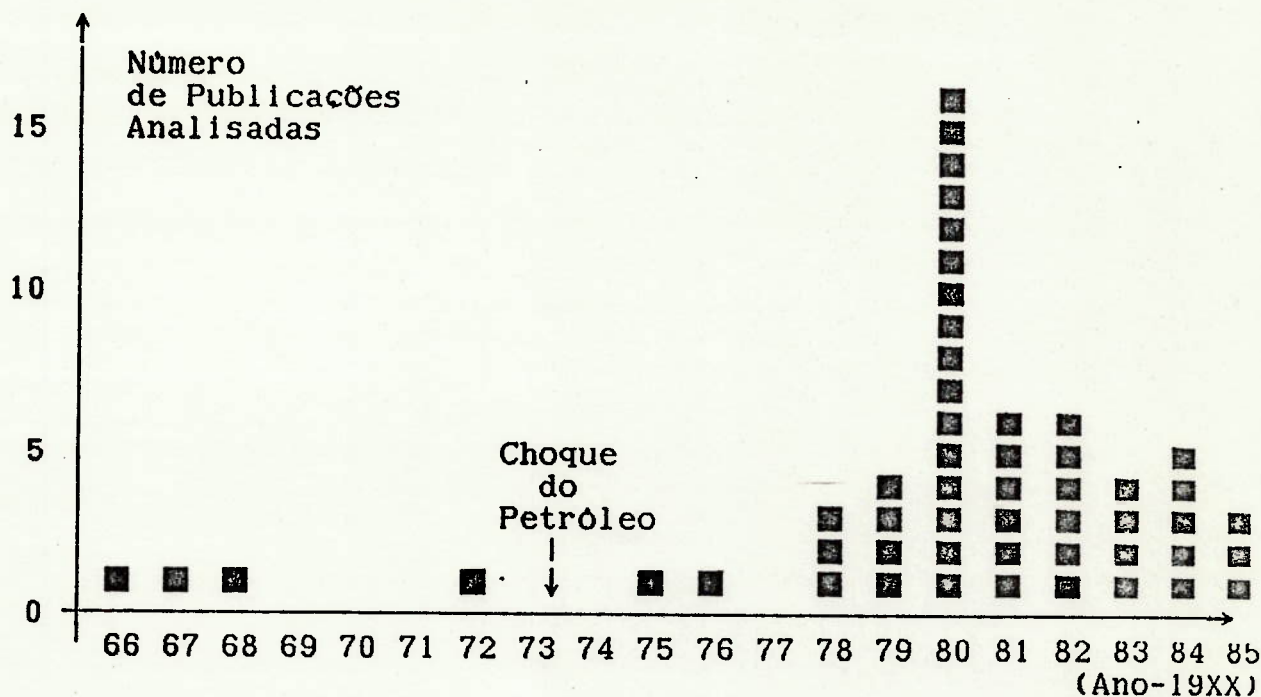


FIG.1.4. Histograma das Publicações Analisadas

Os trabalhos diferem um dos outros pela técnica de controle que utilizam:

- P.I.D. com Ganho Adaptativo;
- Média Móvel Auto-Regressiva (A.R.M.A.);
- Linear Quadrático (L.Q.);
- Linear Quadrático Gaussiano (L.Q.G.);
- Modelo de Referência Adaptativo (M.R.A.S.);
- Auto-Ajustável.

Pelo volume de publicações deve-se mencionar os trabalhos de Reid, Griffin & et.all. [7 a 19]-que apresentam evolução, passo a passo, no tratamento do problema de pilotagem automática. Listando-se as publicações analisadas em ordem cronológica de publicação tem-se:

- Um novo critério para projeto de controlador de navios de forma a melhorar a manobra em mar agitado.(1978)
- Uma proposta de índice de desempenho para perdas propulsivas devido a manobra.(1980 & 1982)
- Um controlador ótimo para navios porta-container de alta velocidade, parte 1 & 2.(1980)
- A comparação do desempenho da pilotagem automática de um navio tipo tanque VLCC(Very Large Crude-Oil Carrier) com a aplicação de técnicas de controle clássica e L.Q.G.(1981)
- Perdas de energia de um navio tanque em pilotagem automática devido ao ciclo limite, parte 1 & 2.(1982)

- Considerações sobre a estabilidade de piloto automático.(1983)
- Perdas de energia relacionadas com a pilotagem automática de navios em ondas, partes 1 & 2.(1983)
- Um método para otimização da performance do controlador convencional de navios.(1984)

A evolução do problema do ponto de vista de Reid e colaboradores poderia ser descrita como sendo:

- Passo 1-Identificação do problema.
- Passo 2-Proposta de um índice de desempenho e de um controlador.
- Passo 3-Aplicação a navios-tipo.
- Passo 4-Análise da estabilidade de navios com piloto automático.
- Passo 7-Análise da perda de energia.
- Passo 8-Otimização de um P.A. tipo P.I.D.partindo-se de considerações sobre estabilidade.

Reid propôs um índice de desempenho apesar de nem sempre utilizá-lo.Quanto a técnica de controle,Reid alternou entre um controlador P.I.D. com índice de desempenho quadrático e um controlador Linear Quadrático.

Verificando-se o que foi sugerido por outros autores para os passos 1 & 2,observou-se que Clarke[20,21] propôs um índice de desempenho quadrático baseado em sua análise da resistência a propulsão e a operação de pilotagem.Este índice de desempenho é diferente do proposto por Norrbin e Koyama pela inclusão de um termo proporcional ao quadrado da taxa de variação do ângulo de rumo.Clarke verificou como varia o seu índice de desempenho com a variação dos ganhos de um piloto automático tipo P.I.D. para um navio estável em linha reta e outro instável.

Nesta mesma linha,Broome e colaboradores[22,23,24] realizaram ensaios com um modelo estável em linha reta para a determinação do índice de desempenho,sugerindo o mesmo obtido por Clarke. Posteriormente,verificaram como variava o índice de desempenho em função dos ganhos de um controlador tipo P.I.D.Finalmente analisaram como comparar os resultados obtidos através de modelo e de simulação.

Amerongen e colaboradores[25 a 30] aplicaram como técnica de controle o M.R.A.S. e verificaram através de simulação e ensaio qual seria a composição ideal de um índice de desempenho da forma sugerida por Norrbin e Koyama.O objetivo seria o de percorrer a distância estipulada no menor tempo,supondo a potência da instalação propulsora constante.A composição obtida por Amerongen não é constante,mas varia com o estado de mar e navio.

Tiano,Brink e colaboradores[31 a 36] aplicaram como técnica de controle o A.R.M.A.,simulando a manobra de forma a obter o índice de desempenho apropriado na forma sugerida por Norrbin e Koyama.Porém Tiano e Brink otimizaram em função da componente da velocidade na direção do rumo desejado.Seus resultados variam com a embarcação e com o estado de mar.

Källström e seus colaboradores[37 a 42] adotaram o índice de desempenho sugerido por Norrbin e realizaram uma série de ensaios

em escala real, obtendo uma redução de consumo de combustível da ordem de 0,5%. Quanto à técnica de controle utilizaram procedimentos de identificação e controle (auto-ajustável).

Finalmente Mort & Linkens[43,44] discutiram a utilização de um controlador do tipo auto-ajustável, mas não se detiveram na análise do índice de desempenho.

É interessante ressaltar os trabalhos de autores associados a empresas que produzem equipamentos para a pilotagem automática de embarcações[45 a 49]. Estes, até o presente, adotaram como técnica de controle o P.I.D. com ganhos adaptativos. Entre tais trabalhos destaca-se o de Kanamaru & Sato[48], que baseados em considerações de acréscimo do consumo de combustível obtiveram um índice de desempenho diverso dos anteriores.

Para finalizar, deve-se assinalar que, independentemente da técnica de controle utilizada, uma questão básica é a definição do índice de desempenho e relativamente a ele não há consenso.

1.3. Objetivo do Trabalho

Afunção de custo ou índice de desempenho quadrático é um aspecto básico na formulação do piloto automático. Os diversos pilotos automáticos propostos, independente da técnica de controle adotada, tentam minimizar este índice de desempenho. Porém, minimizar o índice de desempenho pode nem sempre representar a minimização do consumo.

Os objetivos deste trabalho foram o de pesquisar a bibliografia sobre o assunto verificando quais os índices de desempenho propostos na literatura, qual sua origem e os resultados obtidos em sua operação ou simulação. Em seguida, utilizando-se de técnicas de controle ótimo determinístico, simular a operação de uma embarcação com curso ideal reto, em águas abertas e irrestritas, sob diversas condições externas, verificando como varia o desempenho da embarcação com relação ao consumo, utilizando diferentes índices.

Com os resultados obtidos procede-se ao mapeamento dos índices de desempenho, delimitando-se uma região de índices otimizados em relação ao consumo de combustível. Como última etapa deste trabalho efetua-se uma análise dos P.A. existentes e propostos em relação aos mapas obtidos. Como técnica de controle ótimo determinístico será utilizado um controlador linear com índice de desempenho quadrático-L.Q.

1.4. Linhas Gerais do Trabalho

Os fundamentos teóricos do piloto automático proposto são apresentados no capítulo II. A técnica de controle utilizada é apresentada através dos itens: Filosofia de controle, O Controle Ótimo Determinístico, Formulação do Problema e a Solução do Problema, A Estabilidade do Sistema com Controlador.

No capítulo III apresenta-se os diversos índices de desempenho propostos pelos autores mencionados na pesquisa bibliográfica, bem como comentários sobre estes índices e os resultados por eles obtidos. Em seguida descreve-se o procedimento adotado para se efetuar o mapeamento do índice de desempenho para um con-

trolador linear quadrático, tendo em vista o consumo de combustível.

Os modelos e considerações necessárias a implementação do controlador são descritas no capítulo IV através das seções: Equação de Movimento, Esforços sobre o Veículo, o Modelo Matemático.

No capítulo V é efetuada uma descrição dos sensores disponíveis no mercado e seu princípio de funcionamento. A implementação e simulação do P.A.I. é mostrada no capítulo VI, onde também são descritos os procedimentos e algoritmos para confecção do programa computacional.

No capítulo VII é feita a comparação entre os índices citados e os mapas do índice de desempenho obtidos, bem como são apresentados comentários sobre a realização física destes índices, tendo em vista a limitação representada pelos sensores.

As conclusões e sugestões são apontadas no capítulo VIII, seguindo-se os apêndices com os programas computacionais, as características do navio utilizado e as condições ambientais utilizadas para a obtenção da estima das forças externas os resultados obtidos e finalmente a bibliografia. As linhas gerais do trabalho estão indicadas na FIG.1.5.


```

*****
*   CAPITULO I   *
*  INTRODUÇÃO  *
*****
▼
*****
*   CAPITULO II   *
* FUNDAMENTOS TEORICOS *
* (teoria de controle u- *
* tilizada)      *
*****
▼
*****
*   CAPITULO III   *
* O INDICE DE DESEMPENHO *
* (I.D. dos diversos *
* autores e o procedimento *
* para mapeamento)    *
*****
▼
*****
*   CAPITULO IV   *
* O MODELO MATEMATICO *
* (equações de movimento e *
* forças externas)    *
*****
▼
*****
*   CAPITULO V   *
*  SENSORES    *
*****
▼
*****
*   CAPITULO VI   *
* IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO *
*(implementação do controlador *
* e simulação do movimento) *
*****
▼
*****
*   CAPITULO VII   *
* ANÁLISE DE RESULTADOS *
* (análise e comparação com *
* I.D. propostos)      *
*****
▼
*****
*   CAPITULO VIII   *
* CONCLUSÕES E SUGESTÕES *
*****

```

FIG.1.5. Linhas Gerais do Trabalho

CAPITULO II - FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. Introdução

Todo sistema físico a ser controlado pode ser visualizado como sendo composto de três elementos básicos, como mostra a FIG.2.1.

- atuadores: elementos físicos que traduzem os sinais de comando em entrada real do sistema;
- sistema: elemento físico a ser controlado;
- sensores: elementos físicos que medem e indicam variáveis físicas do sistema.

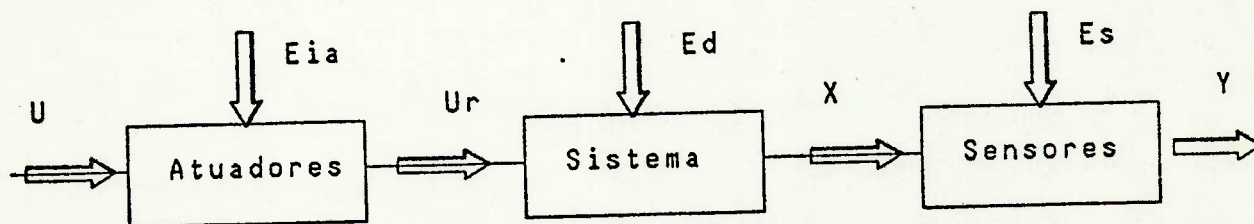


FIG.2.1. Sistema Controlado

Na FIG.2.1. utiliza-se a seguinte notação:

- U é o vetor de entrada do sistema;
- E_{ia} representa as incertezas dos atuadores;
- U_r é o vetor de entrada real;
- E_d representa as perturbações e agentes externos;
- X é o vetor das variáveis de estado;
- E_s representa os erros e incertezas dos sensores;
- Y é o vetor de saídas ou de medições do sistema.

Controlar o sistema representado na FIG.2.1. significa encontrar os comandos de entrada adequados, de forma que a evolução no tempo das variáveis de estado ou a saída do sistema seja satisfatória para a condição desejada.

Este controle para um sistema com realimentação pode ser expresso como sendo o de encontrar um compensador acionado pelas indicações dos sensores, que gere comandos de entrada adequados, de forma que a evolução no tempo das variáveis de estado ou da saída do sistema seja satisfatória para a aplicação desejada. Dependendo do tipo de problema e de sua formulação, a metodologia de controle será determinística ou estocástica.

Em uma análise determinística supõe-se inicialmente que todas as entradas e estados sejam acessíveis, as dinâmicas conhecidas, os erros e distúrbios ou não existentes ou conhecidos. Em geral, para sistemas mais complexos, costuma-se realimentá-los de forma a torná-los relativamente insensíveis a distúrbios externos e variações de parâmetros do sistema, ou seja dados $y_0(t)$ e $x_0(t)$ ideais, realimenta-se o sistema com $u(t)$ tal

que $\delta x(t)$ e $\delta y(t)$ sejam em módulo os menores possíveis, onde:

$$\delta x(t) = x(t) - x_0(t)$$

$$\delta y(t) = y(t) - y_0(t)$$

Já em uma análise estocástica supõe-se inicialmente que nem todas as variáveis de estado possam ser medidas e nem todos os erros e distúrbios sejam conhecidos. Neste caso deve-se utilizar um estimador de estado ou filtro que baseado nos valores passados das observações estime e gere valores o mais próximo possível dos estados reais, como mostra a FIG.2.2. Pode-se dizer que o objetivo é obter um controlador de desvios que baseado nos desvios estimados das variáveis de estado, gere comandos de correção, de forma que os desvios das variáveis de estado sejam em módulo os menores possíveis para todos os instantes.

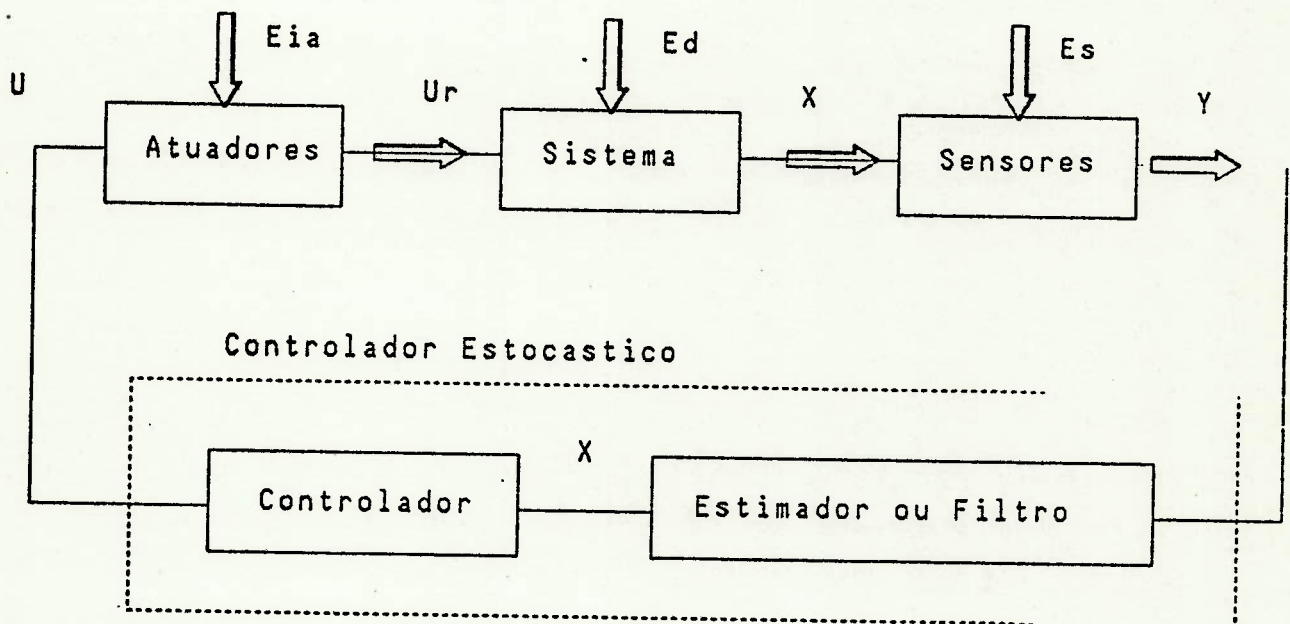


FIG.2.2. Sistema Controlado-Alternativa Estocastica

Na FIG.2.2. \hat{X} é o vetor das estimativas de estado.

No caso do problema de controle em questão, o Piloto Automático Integrado, é em sua aplicação essencialmente estocástico, no entanto em uma primeira abordagem utilizar-se-a de técnicas de controle ótimo determinístico.

2.2. Formulação do Problema de Controle Determinístico

Considere-se um sistema descrito pelo seguinte modelo matemático:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)); \quad x(t_0) = x_0 \quad (2.1)$$

onde $x(t)$ é um vetor n-dimensional de variáveis de estado;
 $u(t)$ é um vetor m-dimensional de controle;
 x_0 é o estado inicial no instante t_0 ;
 $\dot{x}(t) \triangleq dx(t)/dt$;
 $f(x(t), u(t))$ é uma função vetorial n-dimensional.

O sistema é considerado invariante no tempo e a função $f(x(t), u(t))$ é considerada contínua e pelo menos duas vezes diferenciável em relação a $x(t)$ e $u(t)$. Assim atende-se as hipóteses do teorema de existência e unicidade da solução [56, 59]. Considere-se a seguinte função de observação:

$$y(t) = g(x(t)) \quad (2.2)$$

onde $y(t)$ é um vetor r-dimensional de observação;
 $g(x(t))$ é um função vetorial r-dimensional.

O vetor de funções $g(x(t))$ é suposto contínuo e pelo menos duas vezes diferenciável em relação a $x(t)$. Assim atende-se as hipóteses do teorema de existência e unicidade da solução [56, 59]. Além disso, note-se que a dinâmica dos sensores e atuadores pode ser incorporada a dinâmica da planta.

Deve-se também estabelecer qual é a resposta ideal do trinômio entrada-variáveis de estado-saída do sistema para qualquer instante de tempo, ou seja para uma dada condição inicial x_0 , tem-se:

$u_0(t)$, $t \in [t_0, T]$ é a entrada ideal;
 $x_0(t)$, $t \in [t_0, T]$ é a trajetória de estado ideal;
 $y_0(t)$, $t \in [t_0, T]$ é a saída ideal.

que estão relacionados através de:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0(t) &= f(x_0(t), u_0(t)) \\ \dot{y}_0(t) &= g(x_0(t)) \end{aligned} \quad (2.3)$$

deseja-se obter o vetor de controle $u(t)$, tal que a função de custo seja mínima.

$$I.D. = \phi(x(T)) + \int_{t_0}^T L(x(t), u(t)) dt \quad T_0 \leq t \leq T \quad (2.4)$$

onde $\phi(x(T))$ é um funcional que penaliza o estado final
 $L(x(t), u(t))$ é um funcional que penaliza estado e controle.

Esta minimização pode ser efetuada através de técnicas como as do cálculo das variações, princípio dos máximos de Pontryagin ou técnicas numéricas como o método do gradiente e outros.

2.2.1. O Problema Determinístico Linear

Considere-se o sistema definido por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(x(t)) \end{aligned} \quad (2.5.)$$

Supondo-se que:

$(u_0(t), x_0(t), y_0(t))$ correspondem ao trinômio ideal, também chamado de referência ou não perturbado;

$(u(t), x(t), y(t))$ correspondem ao trinômio real.

ambos satisfazendo o modelo do sistema definido em (2.5.) acima, então:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0(t) + \delta x(t) \\ u(t) &= u_0(t) + \delta u(t) \\ y(t) &= y_0(t) + \delta y(t) \end{aligned} \quad (2.6.)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \dot{x}_0(t) + \delta \dot{x}(t) = f(x_0(t) + \delta x(t), u_0(t) + \delta u(t)) \\ y(t) &= y_0(t) + \delta y(t) = g(x_0(t) + \delta x(t)) \end{aligned} \quad (2.7.)$$

Admita-se que as funções f & g possam ser expandidas em série de Taylor em torno da referência ou seja:

$$\begin{aligned} f(x(t), u(t)) &= f(x_0(t), u_0(t)) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_0 * \delta x(t) + \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_0 * \delta u(t) \\ &+ \alpha_0(x(t), u(t)) \end{aligned}$$

$$g(x(t)) = g(x_0(t)) + \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_0 * \delta x + \beta_0(x(t)) \quad (2.8.)$$

onde α_0 e β_0 são termos de ordem superior.

Tem-se então:

$$\delta \dot{x}(t) = A_0(t) * \delta x(t) + B_0(t) * \delta u(t) + \alpha_0(\delta x(t), \delta u(t))$$

$$\delta y(t) = C_0(t) * \delta x(t) + \beta_0(\delta x(t))$$

(2.9.)

onde $A_0(t), B_0(t), C_0(t)$ são os Jacobianos:

$$A_0(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$n \times n$

$$B_o(t) \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{bmatrix}$$

n x m

$$C_o(t) \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_r}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_r}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

r x n

Calculando-se os Jacobianos em torno da referência $x_o(t), u_o(t)$ e desprezando-se os termos de ordem superior vem:

$$\delta \dot{x}(t) = A_o(t) * \delta x(t) + B_o(t) * \delta u(t)$$

$$y(t) = C_o(t) * \delta x(t)$$

(2.10.)

que é o modelo determinístico linearizado.

Uma função de custo que penaliza o erro do sistema e a energia requerida pela ação de controle é a função de custo quadrática[51]:

$$I.D. = \delta x^T(T) * F_o * \delta x(T) + \int_0^T [\delta x^T(t) * Q_o(t) * \delta x(t) + \delta u^T(t) * R_o(t) * \delta u(t)] dt$$

(2.11.)

onde F_o e $Q_o(t)$ são matrizes simétricas pelo menos semi-definidas positivas.

$R_o(t)$ é uma matriz simétrica definida positiva.

Note-se que de acordo com o Teorema de Silvester[58,59] uma matriz quadrada para ser definida positiva é necessário e suficiente que os determinantes de ordem menor e da matriz;

$$\det[W_{11}], \det \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}, \dots, \det \begin{bmatrix} W_{11} \dots W_{1n} \\ \vdots \\ W_{m1} \dots W_{mn} \end{bmatrix}, \dots, \det[W]$$

sejam todos positivos. Sendo que se um dos determinantes for igual a zero a matriz é semi-definida positiva.

Em caso do sistema ser estacionário, tem-se:

$$A_0(t) = A_0, \quad B_0(t) = B_0, \quad C_0(t) = C_0$$

Neste caso, o controle $\delta u(t)$ deve minimizar a seguinte função de custo quadrática:

$$I.D. = \int_{t_0}^{t_f} [\delta x^T(t) * Q_0 * \delta x(t) + \delta u^T(t) * R_0 * \delta u(t)] dt \quad (2.12.)$$

onde Q_0 é uma matriz simétrica pelo menos semi-definida positiva;

R_0 é uma matriz simétrica definida positiva.

Note-se que neste caso o termo em F_0 não foi incluído. No caso não estacionário, o termo em F_0 penaliza o estado final de forma a manter $\delta x(T)$ limitado e pequeno, visto que próximo ao estado final a atuação do controle $\delta u(t)$ não é necessariamente eficaz. Já no caso invariante no tempo o controle $\delta u(t)$ deve garantir a estabilidade do sistema, ou seja $\lim_{t \rightarrow \infty} \delta x(t) = 0$. Desta forma não há necessidade de se penalizar o estado terminal, que no caso invariante com o tempo ocorre para $t \rightarrow \infty$.

Incluindo-se a ação de agentes externos $[F(t)]$ o sistema será representado por:

$$\delta \dot{x}(t) = A_0 * \delta x(t) + B_0 * \delta u(t) + F(t) \quad (2.13)$$

$$\delta y(t) = C_0 * \delta x(t)$$

Sendo o objetivo de controle expresso pela minimização do mesmo índice de desempenho quadrático para sistemas invariantes no tempo mencionado anteriormente com as condições de contorno dadas pelos estados inicial $\delta x(t_0) = \delta_0$ e o pelo final $\delta x(t_f) = 0$.

2.4.2. A Solução do Problema

A solução do problema pode ser obtida através de diversas técnicas. Dentre elas será utilizado o Princípio do Mínimo de Pontryagin, desenvolvido originalmente para problemas de mecânica clássica [58]. Antes de enunciar-lo define-se a Hamiltoniana dada por:

$$H(t) = L(x, u, t) + \lambda^T * f(\delta x, \delta u, F, t) \quad (2.14.)$$

onde $f(\delta x, \delta u, F, t) = \delta \dot{x}(t)$

$$\int L(x, u, t) dt = I.D.$$

$\lambda^T(t)$ é denominado de coestado, possuindo um comportamento semelhante ao estado.

Com a condição necessária para mínimo deve-se ter,

$\frac{\partial H}{\partial (\delta x)} = 0$, que conduz a equação de coestados dada por:

$$\lambda^T(t) = -\frac{\partial H(t)}{\partial x} \quad (2.15.)$$

Aplicando-se o procedimento de Pontryagin ao sistema em estudo obtem-se:

$$H(t) = \delta x^T(t) * Q_0 * \delta x(t) + \delta u^T(t) * R_0 * \delta u(t) + \lambda^T(t) * [A_0 * \delta x(t) + B_0 * \delta u(t) + F(t)]$$

$$\lambda^T(t) = -\frac{\partial H(t)}{\partial x} = -\delta x^T(t) * Q_0 - \lambda^T(t) * A_0 \quad (2.16)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -Q_0^T * \delta x(t) - A_0^T * \lambda(t)$$

Pode-se agora enunciar o Princípio do Mínimo (ou Máximo) de Pontryagin:

"O valor da variável de controle, da variável de estado e do coestado que minimiza a Hamiltoniana $H(t)$, quando aplicado ao sistema, minimiza a função de custo".

Isto implica em que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(t)}{\partial (\delta x)} &= 0 \\ \frac{\partial H(t)}{\partial \lambda} &= 0 \\ \frac{\partial H(t)}{\partial (\delta u)} &= 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

utilizando $\frac{\partial H(t)}{\partial (\delta u)} = 0$

obtem-se:

$$\delta u^T(t) * R_0 + \lambda^T(t) * B_0 = 0 \quad (2.18)$$

$$R_0^T * \delta u(t) + B_0^T * \lambda(t) = 0$$

$$\delta u(t) = -(R_0^T)^{-1} * B_0^T * \lambda(t)$$

Com as equações obtidas acima: a equação de estados, a equação de coestados, a equação do Princípio do Mínimo de Pontryagin e as condições de contorno obtêm-se o controle ótimo. O sistema a ser resolvido é pois:

$$\delta u(t) = -(R_0^T)^{-1} * B_0^T * \lambda(t) \quad (2.19.)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -Q_0^T * \delta x(t) - A_0^T * \lambda(t)$$

$$\delta \dot{x}(t) = A_0 * \delta x(t) + B_0 * \delta u(t) + F(t)$$

A solução geral da equação (2.19) é da forma:

$$\lambda(t) = P * \delta x(t) + K \quad (2.20.)$$

derivando vem:

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{P} * \delta x(t) + P * \delta \dot{x}(t) + \dot{K} \quad (2.21.)$$

eliminando-se $\lambda(t)$ e $\dot{\lambda}(t)$ em (2.19.) vem:

$$(\dot{P} + P * A_0 - P * B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * P + Q_0^T + A_0^T * P) * \delta x + (\dot{K} - P * B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * K + P * F + A_0^T * K) = 0$$

a solução para $\delta x(t) \neq 0$ é:

$$\dot{P} + P * A_0 - P * B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * P + Q_0^T + A_0^T * P = 0 \quad (2.22.)$$

$$\dot{K} - P * B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * K + P * F + A_0^T * K = 0$$

onde a primeira equação do sistema é a equação matricial de Riccati, que é integrada numericamente para tempos regressivos com a condição final $P(t_f) = 0$.

Para o sistema invariante no tempo há uma simplificação adicional $\dot{P} = 0$ e $\dot{K} = 0$.

Uma vez conhecidos P e K, o controlador ótimo de (2.22) é:

$$\delta u(t) = -(R_0^T)^{-1} * B_0^T * [P * \delta x(t) + K] \quad (2.23.)$$

2.3. A Estabilidade do Sistema com Controlador

As ferramentas necessárias para a solução do problema do controlador com índice de desempenho quadrático estão expostas nos itens precedentes, sendo que um dos requisitos exigidos a um sistema com controlador é que o mesmo seja estável.

Considere-se um sistema livre qualquer;

$$\dot{x} = f(t, x) \quad (2.24)$$

tomando-se o estado de equilíbrio do sistema livre acima como sendo x_e :

$$f(t, x_e) = 0 \quad (2.25)$$

Dado o número real positivo δ e um sistema de coordenadas de origem em x_e . Então se o sistema é iniciado em um estado $x(t_0) = x_0$ e que $\|x_0 - x_e\| < \delta$, então x_0 pertence a uma bola de raio δ e centro em x_e .

Define-se $x_e \in R^n$ como um ponto de equilíbrio Liapunov estável se dado qualquer $\varepsilon > 0$ for possível determinar em correspondência um δ , $0 < \delta \leq \varepsilon$ tal que:

$$\|x_0 - x_e\| < \delta \rightarrow \|\phi(t, x_0)\| < \varepsilon, 0 \leq t < m_2$$

O estado x_e é assintoticamente estável se:

-for estável

- \exists um $\sigma > 0$ tal que se $\|x_0 - x_e\| < \sigma$ então
 $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t, x_0) = 0$

A FIG.2.3. ilustra as definições acima.

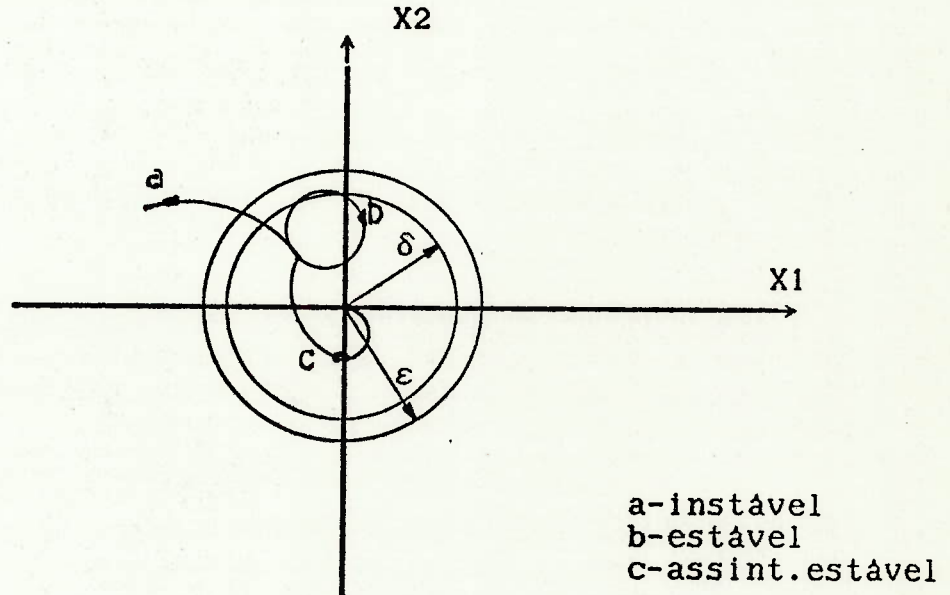


FIG.2.3. Uma Visualização da Estabilidade

Como visto na seção 2.2. o controlador ótimo é dado (2.23)
 por:

$$\delta u(t) = - (R_0^T)^{-1} * B_0^T * [P * \delta x(t) + K]$$

onde o primeiro termo depende do estado, enquanto que o segundo termo é função das forças externas. Substituindo-se o controlador ótimo no sistema (2.13) tem-se:

$$\delta \dot{x}(t) = [A_0 - B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * P] * \delta x(t) + F(t) - B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * K \quad (2.26.)$$

O sistema controlado (2.26) pode ser decomposto em duas parcelas; uma correspondente a um sistema autônomo e outra dependente das forças externas, ou seja:

$$\delta \dot{x}(t) = \delta \dot{x}_L(t) + \delta \dot{x}_F(t) \quad (2.27)$$

O sistema linear autônomo é dado por:

$$\delta \dot{x}(t) = A_L * \delta x(t) \quad (2.28)$$

$$A_L = A_0 - B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * P$$

A parcela dependente da força externa é dada por:

$$\delta \dot{X}_F = F(t) - B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * K \quad (2.29)$$

Na ausência de esforços externos tem-se o sistema linear autônomo expresso em (2.28) e cuja solução tem a forma:

$$X = h * e^{\lambda t} \quad (2.30)$$

onde $h^T = [h_1, h_2, \dots, h_n]$ são os autovetores e $\lambda^T = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$ são os autovalores obtidos da equação associada:

$$(A_L - \lambda * I) * h = 0 \quad (2.31)$$

onde I é a matriz identidade.

Portanto:

$$\text{Det}(A_L - \lambda * I) = 0 \quad (2.32)$$

Se todos autovalores da matriz A_L forem distintos dois a dois então com os correspondentes autovetores tem-se:

$$X = c_1 * X_1 + c_2 * X_2 + \dots + c_n * X_n \quad (2.33)$$

onde c_i são constantes
 $X_i = h_i * e^{\lambda_i * t}$

Esta é a solução geral do sistema (2.28). A condição de estabilidade assintótica para sistemas lineares é que todos os autovalores tenham parte real negativa, ou seja estejam no semi-plano esquerdo da FIG.2.4.

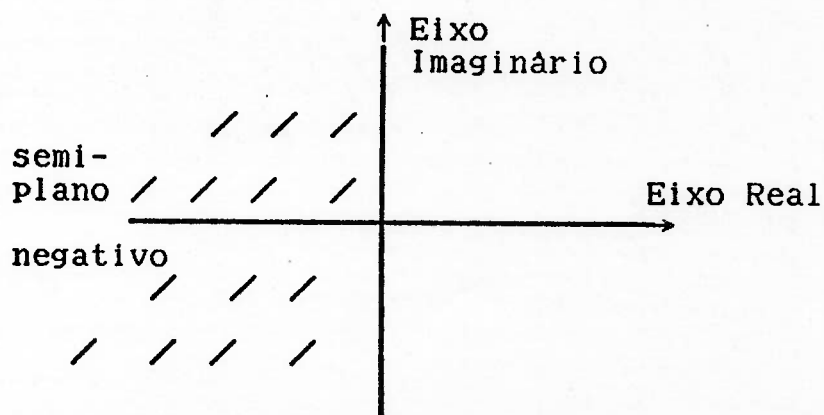


FIG.2.4. Lugar Geométrico dos Autovalores

Note-se que apesar da estabilidade assintótica ter sido expressa para sistemas lineares, esta também é válida para sistemas

linearizados.

Para se evitar o cálculo dos autovalores de A_L pode se optar por um método indireto baseado no "Segundo Método de Liapunov" [59].

Inicialmente define-se a função escalar $V(x)$ como definida positiva (negativa) se para todos os pontos não nulos de x , na região esférica $\|x\| \leq k$, os valores de $V(x)$ são positivos (negativos), ou seja:

$$\begin{aligned} V(x) &> 0 & (< 0) \\ V(0) &= 0 \end{aligned}$$

O teorema da estabilidade assintótica de Liapunov afirma que seja $V: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$, $V \in C^1$ $0 \in \Omega$ $(a, b) \subset \mathbb{R}^n$ e se esta função satisfizer as hipóteses:

- (a) $V(0) = 0$
- (b) $V(x) > 0$, $x \neq 0$
- (c) $V(x) < 0$, $x \neq 0$

a origem é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável.

Para sistemas autônomos expressos na forma da equação (2.28) uma possível função $V(x)$ pode ser construída admitindo-se que:

$$V(x) = x^T * MR * x \quad (2.34)$$

Pode-se considerar somente a parte simétrica de MR , visto que a parcela anti-simétrica se anula [59]

$$V(x) = \dot{x}^T * MR * x + x^T * MR * \dot{x}$$

substituindo-se o sistema autônomo obtem-se:

$$\dot{V}(x) = x^T * (A_L^T * MR + MR * A_L) * x = -x^T * MQ * x \quad (2.35)$$

$$\text{com } MQ = -(A_L^T * MR + MR * A_L)$$

Assim sendo para se satisfazer o teorema de estabilidade de Liapunov é necessário e suficiente que:

- (a) MQ seja uma matriz simétrica pelo menos semi-definida positiva.
- (b) MR seja uma matriz definida positiva.

Expandindo-se os termos de A_L tem-se:

$$MQ = -[A_0 - B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * P]^T * MR - MR * [A_0 - B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * P]$$

$$\text{Fazendo-se: } P = MR$$

$$Q_0 = MQ - [B_0 * (R_0^T)^{-1} * B_0^T * P]^T * P$$

obtem-se a primeira equação de (2.22) para sistemas invariantes no tempo. Como visto em (2.12) a matriz Q_0 é simétrica

e pelo menos semi-definida positiva; para o sistema de controle ser assintoticamente estável de acordo com Liapunov é necessário que a matriz P seja definida positiva. Este resultado poderia ter sido obtido diretamente, observando-se que a Hamiltoniana expressa em (2.14) também pode ser expressa como sendo:

$$H(t) = L(x, u, t) + V(x) \mid u$$

$$\text{com } V(x) = x^T * P * x$$

Assim sendo para se verificar a estabilidade do sistema deve-se verificar se a matriz P obtida é positiva.

CAPITULO III - O INDICE DE DESEMPENHO

3.1. Introdução

Como mencionado na seção "1.3. Objetivo do Trabalho", um aspecto básico para todos os pilotos automáticos propostos é a formulação do índice de desempenho. Visto que o piloto automático tem como objetivo minimizar este índice, torna-se essencial para o bom desempenho do piloto automático, com relação a minimização do consumo de combustível, que o índice de desempenho seja o indicador mais fiel possível do consumo de combustível. Para tal, a compreensão das funções da pilotagem automática de embarcações torna-se básica e os diversos índices de desempenho propostos refletem essencialmente os diferentes objetivos fixados. Neste capítulo são apresentados alguns índices de desempenho e o procedimento adotado neste trabalho para o estabelecimento do índice de desempenho.

3.2. Alguns Índices de Desempenho

Os índices de desempenho propostos, que constam da pesquisa bibliográfica estão listados na tabela 3.1. Nela ψ é o valor médio do erro do ângulo de rumo, δ é o valor médio do ângulo do leme, λ é o fator de penalização, v é o valor médio da velocidade transversal e r é o valor médio da taxa de guinada.

Tabela 3.1. Índices de Desempenho

Autor	Ref	Data	I.D. Proposto(forma)	Comentário
Koyama	5	1968	$J = \psi^2 + \lambda * \delta^2$	λ depende do navio. Navio Mariner $\lambda = 8$
Norrbin	6	1972	$J = \psi^2 + \lambda * \delta^2$	$\lambda = 0,084$ para navios de formas cheias. $\lambda = 0,14$ para navios de formas finas
Källström	37	1982	$J = \psi^2 + \lambda * \delta^2$	$\lambda = 1/14$ navio carregado $\lambda = 1/10$ lastro resultados de simulação p/ tanque 356.000 t dwt
	39	1984		λ experimento=0,20 λ estimado=0,19(Norrbin-6) ferry 2 lemes 2 hélices Tor-Britania

Autor	Ref Data	I.D. Proposto(forma)	Comentário
Reid	7 1978	$J1 = \lambda * \psi^2 + \delta^2$ $J2 = \lambda * \psi^2 + \delta^2$ $J3 = \lambda * v * r + \delta^2$ $J4 = \lambda * \psi^2 + \lambda * v * r + \delta^2$	Este trabalho propõe um procedimento, assim não se menciona os resultados das simulações.
	11 1981	J1 anterior	<p>ângulos de encontro c/onda 30,45,60,90,120° p/navio tanque de 250.000 t dwt estado mar Beaufort 8, vel 15 nós.</p> <p>Valor ótimo estimado: $\lambda = 29,5$ condição carregado $\lambda = 15,8$ lastro</p> <p>Valor ótimo da simulação: $\lambda = 7,4$ condição carregada $\lambda = 3,9$ lastro</p>
	12 1982	$J5 = \lambda * v * r + \eta * v^2 + \delta^2$ J2 J1	<p>J5 é suposto "exato", considerando v não disponível aproxima J1 & J2.</p> <p>navio porta-contentor $\lambda' = 6,72$ (16 nós) $\lambda' = 3,25$ (24 nós) $\lambda' = 1,68$ (32 nós)</p> <p>navio porta-contentor $\lambda = 4,2$</p>
	17 1983	J1 J3	<p>$\lambda = 4,1$ porta-contentor $\lambda = 26,65$ tanque 400.000 t dwt</p> <p>$\lambda = 5,39$ porta-contentor $\lambda = 27,84$ 400.000 t dwt</p>
	15 1984	J1	<p>tanque 250.000 t dwt 15 nós $\lambda = 29,5$ plena carga $\lambda = 15,8$ lastro</p> <p>LNG 125.000 m³ 20,5 nós $\lambda = 16,1$</p> <p>navio porta contentor 53.500 t dwt 32 nós $\lambda = 3,7$</p>

Autor	Ref	Data	I.D. Proposto(forma)	Comentário
Clarke	20	1980	$J=A*\psi^2+B*r^2+C*\delta^2$	(1) tanque 200.000 t dwt 15 nós (2) porta-contentor 55.000 t dwt, 30 nós
Condição da Instal. Prop.				
				(1) (2)
Rotação	A			0,5 0,5
Constante	B			35524,1 2298,7
	C			2,109 0,885
Potência	A			0,5 0,5
Constante	B			26703,1 1211,6
	C			1,586 0,466
Torque	A			0,5 0,5
Constante	B			21968,1 718,6
	C			1,304 0,276
Empuxo	A			0,5 0,5
Constante	B			15877,5 167,6
	C			0,942 0,064
Velocidade	A			1,474 1,731
Constante	B			78730,4 4195,2
	C			4,675 1,6150

Broome	22	1978	$J=A*\psi^2+C*\delta^2$	ensaio modelo Manchester-Challenge 14.800t 16nós (Clarke[20]) A=0,5 C=0,46
	23	1980		(Norrbin[6]) A=0,014 C=0,1

Kanamaru 48 1980
 $J=a_1*\psi^2+a_2*\psi*r+a_3*r^2+a_4*\psi*\delta+a_5*r*\delta+a_6*\delta^2$

onde $a_0=1/2$
 $a_1=a/u$
 $a_2=a/u^2*\{a/2-\frac{m_0+m_y}{[cw+(1+k)*cf]*\rho/2*\nabla^{2/3}}\}$
 $a_3=b/u$
 $a_4=b/u^2*\{a-\frac{m_0+m_y}{[cw+(1+k)*cf]*\rho/2*\nabla^{2/3}}\}$
 $a_5=\frac{b^2}{2*u^2}+\frac{n_1*(1-w)^2*(1+3,6*S_{1,5})}{[cw+(1+k)*cf]*\rho/2*\nabla^{2/3}}*\frac{Ar*\lambda}{\lambda^{1+2,2}}$
 $a=K'/K*[1-(T'3-T3)/(T1+T2-T3)]$
 $b=K'*(T'3-T3)/(T1+T2-T3)$

Autor	Ref Data	I.D. Proposto(forma)	Comentário
sendo			
		c_w	é o coeficiente de resistência de onda;
		c_f	é o coeficiente de resistência de atrito;
		k	é o coeficiente de resistência de forma;
		ρ	é a densidade água salgada;
		∇	é o deslocamento da embarcação;
		w	é coeficiente de esteira;
		A_r	é a área do leme;
		n_1	é uma constante empírica;
		S	é a razão de esbelteza;
		λ_1	é a razão de aspecto do leme;
		T_1, T_2, T_3, T'_3	são constantes de tempo;
		K, K'	são constantes de proporcionalidade;
		m_0	é a massa do navio;
		m_x, m_y	representa as massas adicionais nas direções longitudinal e transversal respect.

Amerongen25	1978	$J_1 = \psi^2 + \lambda * \delta^2$	$\lambda = 10$
		$J_2 = \psi^2 + \lambda_1 * r^2 + \lambda_2 * \delta^2$	$\lambda_1 = 0,3$ $\lambda_2 = 15$ valores obtidos utilizando a formulação de Norrbinn[6]
27	1980	J_2	$\lambda_1 = 1600$ (cargueiro) $\lambda_2 = 6$ $\lambda_1 = 15000$ (tanque) $\lambda_2 = 8$
		J_1	$\lambda = 0,04$ mar calmo ou grandes navios; $\lambda = 4$ mar agitado ou pequenos navios
30	1984	J_1	$\lambda = 0,1$ mar calmo ou grandes navios; $\lambda = 4$ mar agitado ou navios pequenos.
Tiano	33 1980	$J = \psi^2 + \lambda * \delta^2$	Levanta curvas de λ para tanque de 250000 t desloc. e porta-contentor 43000 t. Altura de onda significat. 4m e 6m, mar de bochecha 30° mar de través 90° e mar de aleta 150°. Note-se que nas curvas obtidas tem-se $\lambda < 1$

Tabela 3.1. Indices de Desempenho

Koyama (& Matora) [5a] em seu trabalho pioneiro analisou a equação de avanço da embarcação, descrevendo-a por:

$$(m_0 + m_x) \cdot \dot{u} = (m_0 + m_y) \cdot u \cdot \dot{\psi} + X \quad (3.1)$$

onde m_0 é a massa do navio;
 m_x, m_y são as massas adicionais nas direções longitudinal e transversal respectivamente;
 ψ é o ângulo de rumo;

As forças externas agentes na embarcação foram dadas por:

$$X = T \cdot (1 - t) - R_{\text{casco}} - R_{\delta} \quad (3.2)$$

onde T é o empuxo;
 t é o coeficiente da redução da força propulsora;
 R_{casco} é a resistência do casco;
 R_{δ} é a resistência do leme.

Verificou em seguida como variam as perdas com as forças centrífugas devido a atuação das ondas, leme e vento, que correspondem ao termo em $u \cdot \dot{\psi}$ da equação (3.1). Obtendo para o caso cíclico a seguinte aproximação para o valor médio:

$$E\{(m_0 + m_y) \cdot u \cdot \beta \cdot \dot{\psi}\} = 1/2 \cdot (m_0 + m_y) \cdot u \cdot \dot{\psi}_m \cdot \beta_m \cdot \cos \theta \quad (3.3)$$

onde β é o ângulo de deriva;
 $\dot{\psi}_m$ & β_m são os valores médios dos ângulos de rumo e deriva.

No que se refere as ondas, Koyama considerou que as frequências das ondas são muita altas para serem compensadas pela atuação do leme e com relação a atuação do leme para um navio cargueiro tipo Mariner, determinou experimentalmente como varia o empuxo:

$$\frac{\Delta T}{T} = 4 \cdot \delta^2 \quad \delta \text{ em radianos} \quad (3.4)$$

Admitiu que as perdas em uma atuação senoidal do leme seriam proporcionais a $2 \cdot \delta_m^2$, onde δ_m seria o valor médio do ângulo de leme.

O referido autor também levou em consideração o acréscimo de percurso devido ao serpenteamento da embarcação em torno de uma trajetória ideal reta, obtendo para um movimento serpenteado de forma senoidal a razão do percurso real pelo percurso ideal reto como sendo proporcional a $\psi^2/4$.

Considerando somente as perdas pelo aumento do percurso e pela atuação do leme como sendo significativas, Koyama propôs o seguinte índice de desempenho:

$$J = \psi^2 + \lambda \cdot \delta^2 \quad \text{com } \lambda = 8 \text{ para o Mariner} \quad (3.5)$$

Norrbin [6] em seu trabalho identifica as perturbações externas que podem causar um acréscimo de resistência, listando oito possíveis causas:

- vento;
- jogo do navio;
- arfagem;
- onda refletida;
- estado de mar, que interage com a camada limite e a geração de ondas pela proa e popa;
- escorregamento lateral ou deriva pela ação de vento;
- acoplamento dos movimentos de deriva e guinada;
- ação do leme.

Apesar de considerar todos os itens listados acima como sendo significativos, Norrbin optou por se fixar apenas nos três últimos. Posteriormente ele concluiu que o sexto item acima tem pouca influência. Além disso, Norrbin compara o índice de desempenho sugerido por Koyama (& Matora) com os resultados por ele obtido através da análise de formulações semi-empíricas associadas a resistência a propulsão, tendo obtido que o acréscimo a resistência devido a atuação do leme é proporcional a δ^2 e o acréscimo de resistência devido ao acoplamento entre os movimentos de guinada e deriva é proporcional a ψ^2 . Norrbin deu um sentido físico e quantitativo ao índice qualitativo proposto por Koyama, obtendo para diferentes tipos de embarcações os acréscimos de resistência mostrados na tabela 3.2.

Formas do Navio	$\frac{\Delta R}{R}$	$\frac{\Delta R}{R}$
cheias-tipo tanque	$45 * \psi^2$	$3,8 * \delta^2$
finas-tipo liner	$21 * \psi^2$	$3 * \delta^2$

Tabela 3.2. Acréscimo de Resistência

Para o Mariner obteve: $\frac{\Delta R}{R} = 3,4 * \delta^2$

onde ΔR representa o acréscimo de resistência do navio em relação a trajetória em linha reta.

R representa a resistência do navio em linha reta.

Da tabela 3.2. acima conclui-se que:

$$J = \psi^2 + \lambda * \delta^2 \quad \text{com } \lambda = 0,0844 \text{ para navio de forma cheia}$$

$$\lambda = 0,1428 \text{ para navio de forma fina} \quad (3.6)$$

Por sua vez Kanamaru & Sato [48] expressam seu índice de desempenho considerando as seguintes hipóteses:

- velocidade de avanço $u = \text{cte}$
- ângulo de deriva $|\beta| \ll 1$
- desvio do ângulo de guinada estabelecido $|\Delta\psi| \ll 1$

Considerando as hipóteses acima, eles expressam o aumento de resistência em termos da equação de avanço de uma embarcação:

$$(m_0 + m_x) \cdot \dot{u} = (1-t) \cdot T - (m_0 + m_y) \cdot u \cdot \beta \cdot \dot{\psi} - R_0 - R_\delta \quad (3.7)$$

onde R_0 é a resistência do casco;
 R_δ é a resistência do leme, função do ângulo de deflexão.

Expressando a energia em um intervalo de tempo $[0, T_p]$ obtiveram:

$$E = \int_0^{T_p} (1-t) \cdot T \cdot u \, dt = \int_0^{T_p} (m_0 + m_y) \cdot u^2 \cdot \beta \cdot \dot{\psi} \, dt + \int_0^{T_p} R_\delta \cdot u \, dt + \int_0^{T_p} R_0 \cdot u \, dt \quad (3.8)$$

O primeiro termo da equação representa a energia consumida pelo acréscimo de resistência devido a ação de ventos e ondas, enquanto que o segundo expressa a energia consumida pela resistência do leme. O terceiro termo representa a energia consumida em uma viagem ideal. Dos termos acima, o terceiro não pode ser reduzido, enquanto que os demais representam o acréscimo no consumo de energia que se deseja minimizar.

Kanamaru & Sato também consideraram o acréscimo de tempo para cumprir o percurso devido a deriva como mostra a FIG.3.1.

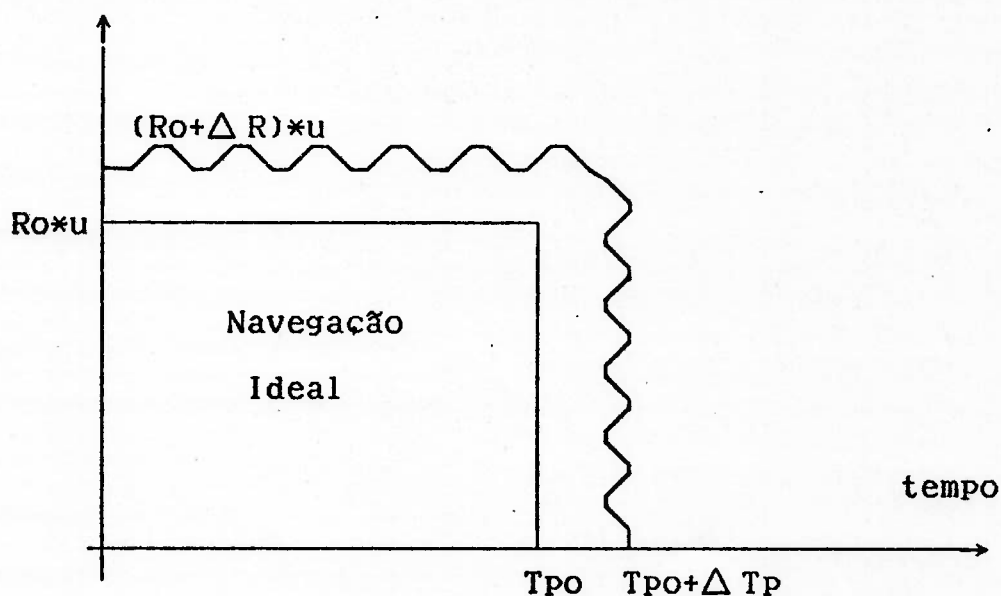


FIG.3.1. Acréscimo de Resistência e Tempo de Percurso

Este acréscimo de tempo foi expresso através de:

$$\frac{\Delta T_p}{T_p} = \frac{1}{T_{p0}} * \int_0^{T_p} \frac{(\Delta \psi - \beta)^2}{2} \, dt \quad (3.9)$$

Obtem-se assim, o seguinte índice de desempenho:

$$J = 1/Tp * \int_0^{T_p} (a_0 * \Delta \psi^2 + a_1 * \Delta \psi * \dot{\psi} + a_2 * \Delta \dot{\psi}^2 + a_3 * \Delta \psi * \delta + a_4 * \Delta \dot{\psi} * \delta + a_5 * \delta^2) dt \quad (3.10)$$

Reid [7 à 19] por sua vez sugere diferentes índices de desempenho e os utiliza em seus diversos trabalhos. Estes índices surgem de considerações físicas, que propõem a minimização do acréscimo de resistência na equação de avanço da embarcação expressa por:

$$(m - X_{\dot{\psi}}) * \ddot{\psi} = X_0 + (m + X_{Vr}) * V * R + 1/2 * X_{Vv} * V^2 + 1/2 * X_{\delta \delta} * \delta^2 + (1-t) * T(Va, n) + X_{ext} \quad (3.11)$$

onde $X_{\dot{\psi}}$, X_{Vr} , X_{Vv} , $X_{\delta \delta}$ são as derivadas hidrodinâmicas;
 Va é a velocidade do fluido próxima ao propulsor;
 n é a rotação do propulsor.

O termo X_0 representa a resistência em uma navegação ideal expressa por:

$$R_0 = -X_0 = (1-t_0) * T_0 \quad (3.12)$$

Os outros termos representam a força adicional devida aos efeitos de inércia em um plano lateral, a guinada e deriva, a resistência do leme e as forças externas. Reid tece considerações sobre os efeitos da resistência adicional gerada pelas forças externas X_{ext} e sobre o empuxo $(1-t) * T * (Va, n)$, minimizando a soma das parcelas:

$$\Delta X = (m + X_{Vr}) * V * R + 1/2 * X_{Vv} * V^2 + 1/2 * X_{\delta \delta} * \delta^2 \quad (3.13)$$

Assim, o índice de desempenho proposto por Reid é da forma:

$$J = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \{ 1/2 T_p * \int_0^{T_p} [-\alpha * V * R + \beta_1 * V^2 + \gamma * \delta^2] dt \} \quad (3.14)$$

$$\text{onde } \alpha = -(m + X_{Vr}) \\ \beta_1 = 1/2 * X_{Vv} \\ \gamma = 1/2 * X_{\delta \delta}$$

Como definido no capítulo II, para poder utilizar as técnicas de otimização usando um índice de desempenho quadrático é necessário que a matriz Q_0 do índice seja simétrica e pelo menos semi-definida positiva. Levando em conta que no índice (3.14) a matriz Q_0 é indefinida e que o termo em $V * R$ é pequeno quando comparado com os termos em V^2 e δ^2 [18], Reid sugere outro índice simplificado:

$$J = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \{ (1/2 T_p) * \int_0^{T_p} (\lambda' * \dot{\psi}^2 + \delta^2) dt \} \quad (3.15)$$

onde $\lambda' = \frac{X_{Vr} * OP}{1/2 * X_{\delta \delta}}$
 OP é a distância do C.G. ao centro de pivotamento da embarcação.

Um dos aspectos interessantes sucitados pela pilotagem automática é a dependência do índice de desempenho da instalação propulsora, o que pode ser observado analisando-se a equação de avanço da embarcação, por exemplo (3.11). Clarke [20,21] analisou os aumentos do percurso e do tempo, durante o serpenteamento da embarcação, quando navegando em um curso ideal reto e a diminuição da velocidade de avanço da embarcação. Além disso, levou em conta os diferentes tipos de instalações propulsoras obtendo uma função de custo da forma:

$$J = \int_0^r A \cdot \psi^2 + B \cdot r^2 + C \cdot \delta^2 dt \quad (3.16)$$

onde os termos A, B e C dependem do tipo de navio e da instalação propulsora.

Um dos aspectos do índice de desempenho de Clarke e de todos os demais autores mencionados na Tabela 1.1. é a substituição da velocidade de deriva por uma aproximação da mesma, função da taxa de guinada, admitindo que a embarcação pivote em torno de um ponto fixo próximo a proa. Isto é efetuado porque a velocidade de deriva não é facilmente mensurada. Quanto aos resultados de Clarke, estes indicam para a direção do índice proposto por Koyama, visto que, de acordo com os seus resultados, as perdas devido a atuação do leme possuem um custo maior que as perdas devido aos desvios de rumo. Uma melhora significativa do consumo de combustível é observada para navios instáveis em linha reta, como os navios tanque; enquanto que para navios estáveis em linha reta a melhora é bem menos acentuada. Clarke verificou como variam os ganhos de um P.A. do tipo P.I.D. em relação ao seu índice.

Os índices propostos pelos autores mencionados até este ponto foram obtidos através de uma sequência de etapas, que poderia ser definida como sendo:

Inicialmente define-se o objetivo do piloto automático. Em seguida, examina-se os termos da equação de avanço do navio, determinando-se no final a forma do índice de desempenho, como é mostrado na FIG.3.2.

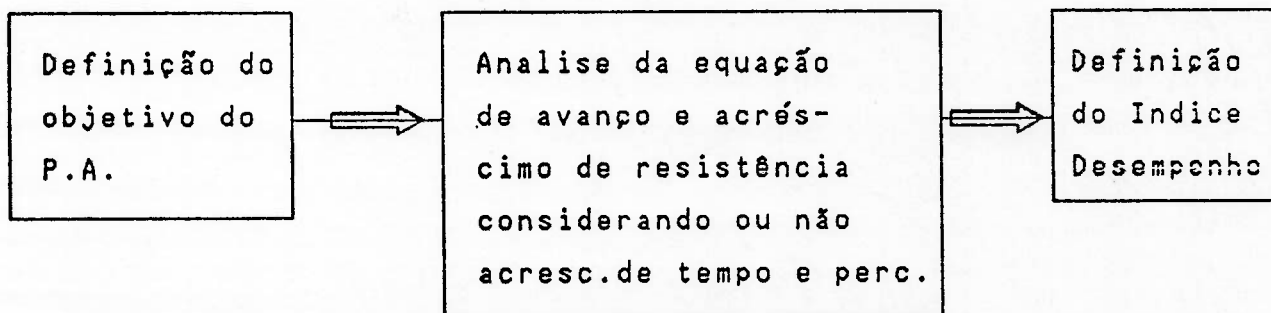


FIG.3.2. Sequência de Etapas

Outros autores adotaram um procedimento diferente. Eles definem um objetivo para o piloto automático e em seguida examinam, através de testes em escala real ou em simulações, qual o índice de desempenho quadrático, que melhor se ajusta a este objetivo. Dentro desta linha Källström & Norrbin [42], que realizaram uma série de experimentos em escala real com o navio ferry "Tor Britannia" examinando qual seria o índice de desempenho apropriado, confirmaram o índice proposto por Norrbin.

Broome [22] por sua vez admitindo como hipótese que o índice de desempenho fosse função de:

$$J = c_1 * \psi^2 + c_2 * \delta^2 + c_3 * \psi^2 + c_4 * \delta^2 \quad (3.17)$$

realizou experimentos com um modelo de navio estável em linha reta obtendo termos que considerou significativos para c_1 e c_2 , concluindo que esses fatores de penalização eram da mesma ordem de grandeza. Note-se que aparentemente os resultados são limitados, pois em seu trabalho seguinte, mencionado na bibliografia [23], Broome efetuou um mapeamento dos ganhos de um P.A. do tipo P.I.D., utilizando o índice de desempenho proposto por Norrbin.

Tiano [31 a36] simulou a manobra de pilotagem automática com diversos índices de desempenho da forma sugerida por Koyama e por Norrbin:

$$J = \psi^2 + \lambda * \delta^2$$

verificando como variam os coeficientes de penalização dos ângulos de guinada e leme para diferentes tipos de embarcações e estado de mar. O objetivo utilizado foi a maximização da componente da velocidade na direção do rumo desejado, supondo que o empuxo seja constante.

Amerongen [25 a 30] apesar de empregar uma técnica de controle diferente da de Tiano, utilizou o mesmo procedimento no que se refere a determinação do índice de desempenho, porém fixou como objetivo a minimização do tempo de viagem entre dois portos, supondo potência da instalação propulsora constante.

Como comentário final desta seção sugere-se ao leitor interessado no problema as seguintes referências:

- | | |
|-------------------------------------|------------------|
| -Definição do problema | -ref.4,5,6; |
| -P.A.tipo P.I.D. c/ I.D. Quadrático | -ref.7,20,21,48; |
| -P.A.tipo M.R.A.S. | -ref.30; |
| -P.A.tipo A.R.M.A. | -ref.33,36; |
| -P.A.tipo Auto-Ajustável | -ref.37,39,41. |

3.3.0 Mapeamento do Índice de Desempenho

A utilização de técnicas de controle moderno podem ser poderosas ferramentas na solução de problemas de identificação e controle. Porém, o controlador obtido partindo-se de um índice de desempenho não apropriado, independentemente da técnica utilizada para controle, não será ótimo no que se refere a minimização do consumo de combustível. Analisando-se os índices propostos por diversos autores fica evidenciado que não há um consenso a

respeito de como seria o índice de desempenho mais apropriado. Tendo em vista os recursos computacionais e de simulação disponíveis optou-se por um procedimento similar ao utilizado por Tiano e Amerongen, ou seja ao invés de se entrar em considerações sobre a resistência à propulsão no desenvolvimento do índice de desempenho quadrático, preferiu-se mapeá-lo com relação ao objetivo de minimização do consumo de combustível como mostra a FIG.3.4. Assim sendo escolhe-se um índice de desempenho, calcula-se o controlador ótimo que minimiza este índice. Em seguida simula-se uma viagem, calculando-se o consumo. Este procedimento é repetido para uma região de índices de desempenho, efetuando-se o mapeamento com relação ao objetivo de minimização do consumo com mostrado na FIG.3.3.

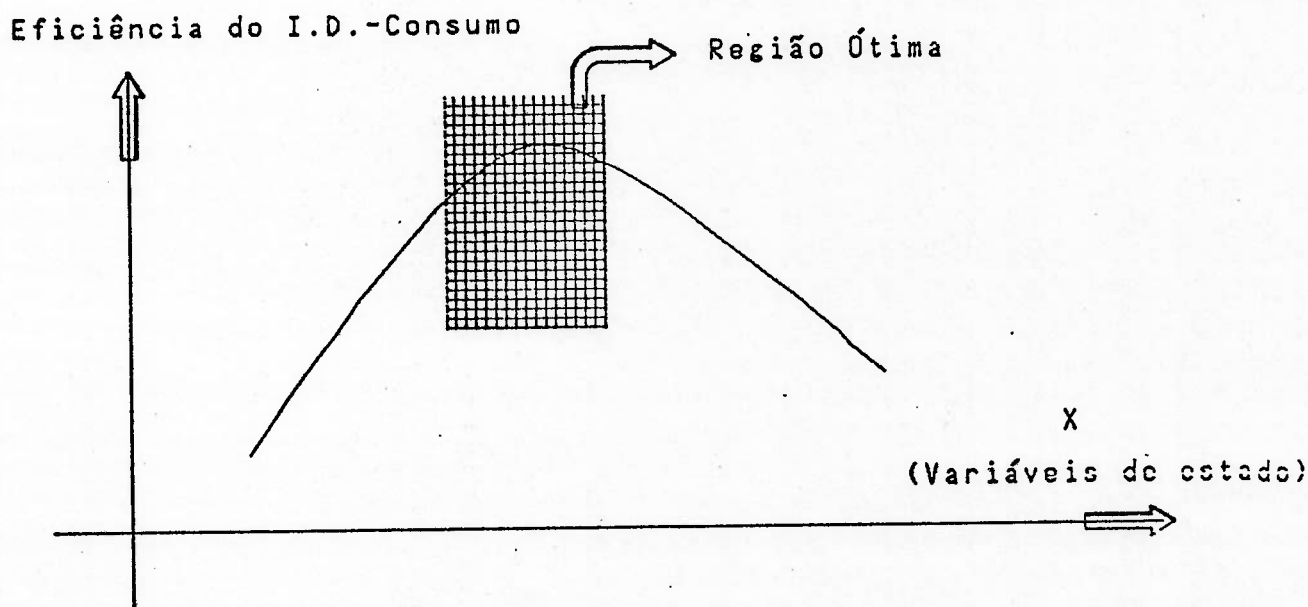


FIG.3.3. Eficiência do I.D.

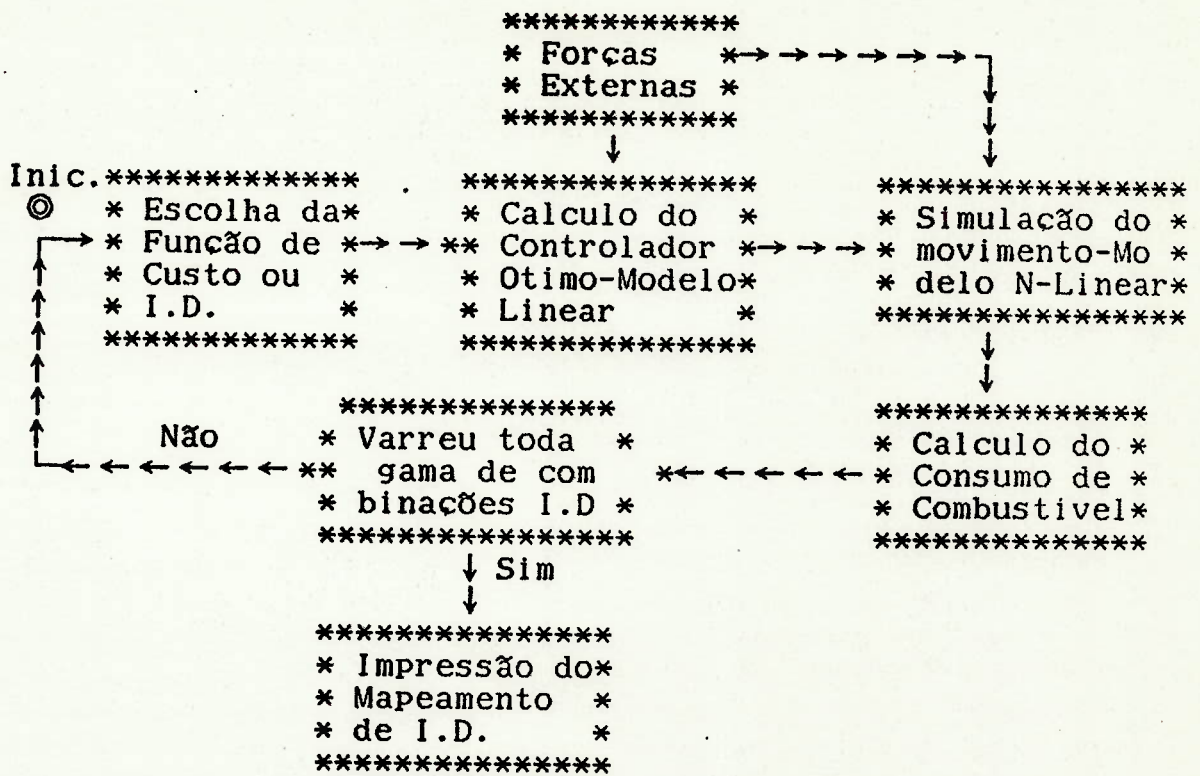


FIG.3.4.Mapeamento do I.D. com Relação ao Consumo

Para se empregar este procedimento é necessário definir precisamente o objetivo do piloto automático. Por exemplo, um "objetivo" amplo definido como sendo "levar a embarcação do porto de partida ao porto de chegada, com consumo mínimo" foge do escopo do piloto automático, visto que envolveria análise das condições meteorológicas, correntes marítimas, etc... Donde, define-se o objetivo do piloto automático como sendo:

Maximizar a componente da velocidade na direção do rumo desejado e minimizar o desvio transversal ao rumo desejado.

Admite-se que o desvio transversal da posição no instante t_f em relação a trajetória ideal seja percorrido em uma navegação ideal, como é mostrado na FIG.3.5.

A componente da velocidade na direção do rumo e a sua média são dadas por:

$$V_p(t) = [v(t)^2 + u(t)^2]^{1/2} \cdot \cos[\psi(t) - \psi_{\text{desejado}} - \beta(t)] \quad (3.18)$$

$$V_{pm} = 1/T \int_0^T V_p(t) dt \quad (3.19)$$

Penalizando-se o desvio transversal da posição do navio no instante t_f com relação ao rumo desejado e supondo uma navegação ideal durante o percurso hipotético, correspondente na FIG.3.5. a coordenada y_{og} , tem-se o avaliador:

$$\text{Avaliador} = 1/T \left\{ \int_0^T V_p(t) dt - | \Delta \varepsilon (Y_{og}) | \right\} \quad (3.20)$$

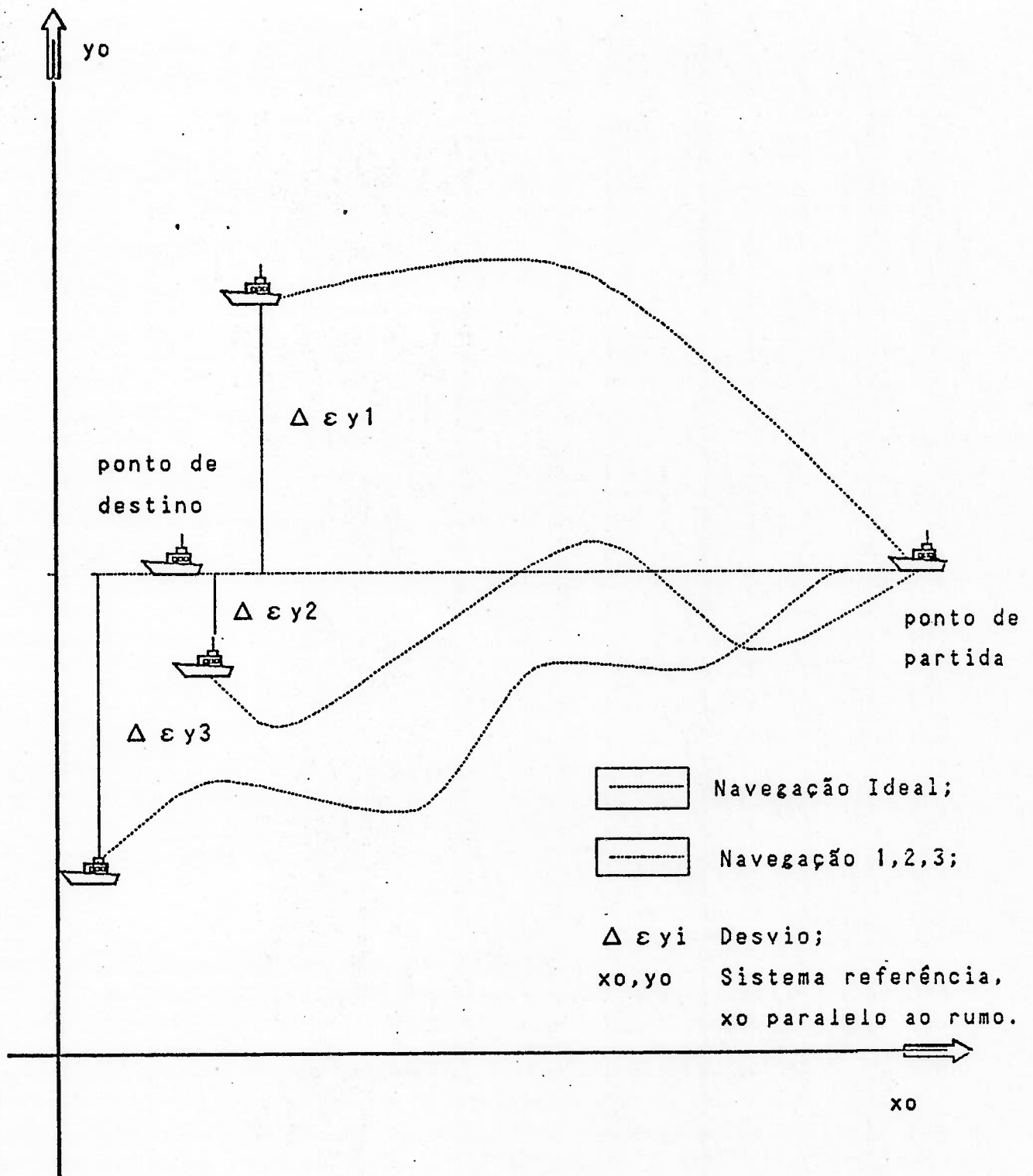


FIG.3.5. Trajetória de uma Embarcação com Diferentes I.D. de um Instante Inicial ate um Instante Final T_f

Há dois aspectos básicos que diferenciam este mapeamento do realizado por Tiano[33]. Como mencionado anteriormente, Tiano pesquisou um índice de desempenho quadrático, que otimizasse a componente da velocidade da embarcação na direção do rumo desejado; não impondo nenhuma penalização ao desvio transversal da embarcação do rumo ideal. Assim, não há uma diferenciação entre dois índices de desempenho que resultem em um mesmo valor médio da componente da velocidade na direção do rumo desejado, porém com diferentes desvios transversais.

Outro aspecto é quanto a forma do índice de desempenho quadrático utilizada. Tiano assumiu um índice de desempenho na forma sugerida por Norrbín e Koyama, neste índice está implícito que se considera a velocidade de deriva como não disponível e que se aproxima v por alguma função de ψ , r ou δ .

No mapeamento proposto, além de se otimizar a componente da velocidade da embarcação no rumo desejado e penalizar-se o desvio transversal final, pesquisa-se um índice que seja combinação de todos os termos da equação de estados do sistema. Isto permitirá adicionalmente avaliar-se em termos de objetivo do piloto automático, qual é o custo da aproximação da velocidade transversal no índice de desempenho quadrático.

Note-se que, como mencionado no capítulo II eq.2.12., as matrizes de penalização do índice de desempenho são simétricas, sendo que Q_0 é uma matriz pelo menos semi-definida positiva e R_0 é uma matriz definida positiva. Além destas condições será imposta uma limitação adicional na escolha das matrizes Q_0 e R_0 , que deverão ser matrizes diagonais. Esta limitação diminui os cálculos computacionais e compromete os resultados somente no caso de matrizes que não possam ser diagonalizadas, ou seja neste caso os vetores que compõem Q_0 e R_0 seriam linearmente dependentes.

CAPITULO IV - MODELAGEM MATEMATICA DO MOVIMENTO DO NAVIO

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos utilizados no projeto, simulação e avaliação de desempenho do piloto automático. São apresentados em sequência as equações do movimento, uma descrição dos esforços atuantes e a formulação do modelo de movimento da embarcação em termos de variáveis de estado, inclusive uma versão não linear.

4.2. Equações de Movimento

As equações do movimento são deduzidas a partir da aplicação das leis de Newton ao movimento do navio como mostra a FIG.4.1. Nesta figura estão indicados dois sistemas de referência; um fixo à terra $Sx_0y_0z_0$ e outro solidário ao navio $CGxyz$.

Admitindo que o movimento no plano horizontal seja desacoplado do movimento em outro plano e que se tenha águas abertas e irrestritas, obtem-se as equações para forças e momentos:

$$\begin{aligned} X_0 &= m \cdot \ddot{X}_{og} \\ Y_0 &= m \cdot \ddot{Y}_{og} \\ N &= I_z \cdot \ddot{\psi} \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde:

X_0, Y_0, N representam, respectivamente, as forças e o momento que atuam sobre o veículo segundo os eixos Sx_0, Sy_0, Sz_0 ;

m, I_z são a massa e o momento de inércia do navio;
 $\ddot{X}_{og}, \ddot{Y}_{og}$ representam as acelerações do centro de gravidade (CG) e $\ddot{\psi}$ a aceleração angular do navio.

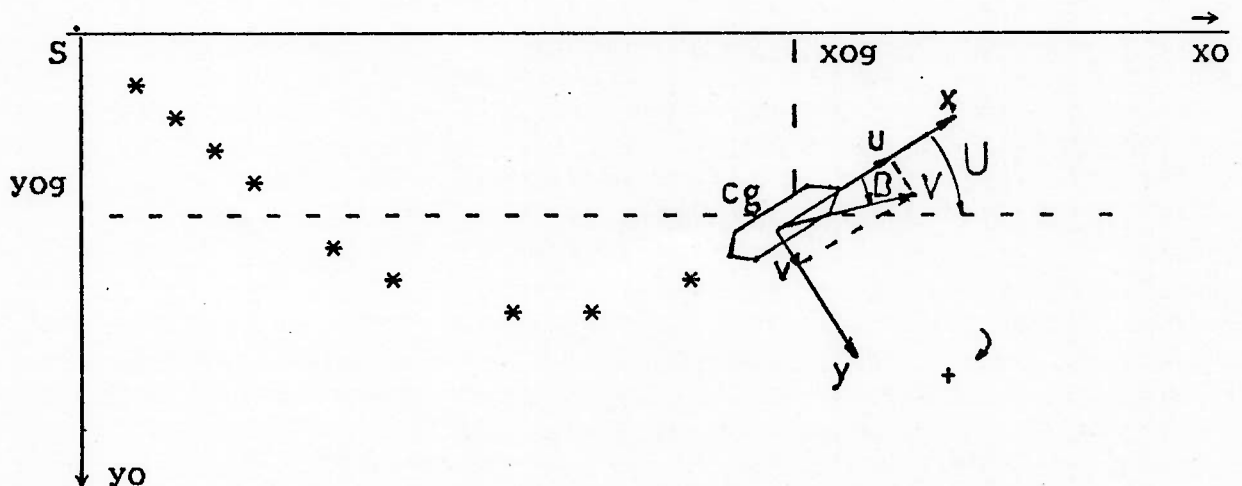


FIG.4.1. Movimento no Plano

Na FIG.4.1. estão representadas as variáveis que caracterizam o movimento do navio:

V é a velocidade de translação do navio;
u e v são as componentes de velocidade em relação aos eixos Gx e Gy respectivamente;
 ψ é o ângulo de rumo;
 β é o ângulo de deriva.

Referindo-se aos eixos fixos do navio, tem-se a expressão de forças:

$$\begin{aligned} X &= X_0 \cos \psi + Y_0 \sin \psi \\ Y &= -X_0 \sin \psi + Y_0 \cos \psi \end{aligned} \quad (4.2)$$

As velocidades da embarcação em relação aos dois sistemas de referência estão relacionadas através de:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{og} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_{og} &= u \sin \psi + v \cos \psi \end{aligned} \quad (4.3)$$

Derivando (4.3.) e introduzindo este resultado junto com a (4.2.) em (4.1.) resulta:

$$\begin{aligned} X &= m [\dot{u} - v \dot{\psi}] \\ Y &= m [\dot{v} + u \dot{\psi}] \\ N &= I_z \ddot{\psi} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Em geral é mais conveniente fixar a origem dos eixos do sistema solidário ao navio na seção mestra, ou seja a meia-nau, em vez do centro de gravidade, uma vez que este varia com o carregamento. Neste caso as equações de movimento tomam a seguinte forma [60]:

$$\begin{aligned} X &= m (\dot{u} - \dot{\psi} * v - x_g * \dot{\psi}^2) \\ Y &= m (\dot{v} + u \dot{\psi} + x_g * \dot{\psi}^2) \\ N &= I_z \ddot{\psi} + m [x_g * (\dot{v} + u \dot{\psi})] \end{aligned} \quad (4.5)$$

Linearizando-se (4.5.) em torno de uma trajetória reta como referência ($u_1 = V$ constante, $v_1 = 0$ constante e ψ constante), obtém-se:

$$\begin{aligned} X &= m \dot{u} \\ Y &= m (\dot{v} + \psi * u_1 + x_g * \dot{\psi}^2) \\ N &= I_z \ddot{\psi} + m * x_g * (\dot{v} + \psi * u_1) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Chamando a velocidade angular do navio $\dot{\psi}$ de r vem:

$$\begin{aligned} X &= m \dot{u} \\ Y &= m (\dot{v} + r * u_1 + x_g * \dot{r}^2) \\ N &= I_z \ddot{r} + m * x_g * (\dot{v} + r * u_1) \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.3. Esforços sobre o Veículo

4.3.1. Introdução

Os esforços no plano horizontal sobre o veículo podem ser considerados como sendo de três tipos:

- esforços hidrodinâmicos devido ao casco;
- esforços hidrodinâmicos devido a propulsão e ao leme;
- esforços decorrentes das forças de excitação: ondas, ventos e correntes.

4.3.2. Esforços Hidrodinâmicos Atuantes no Casco

Os esforços hidrodinâmicos devido ao casco podem ser colocados na forma:

$$\begin{aligned} X_c &= F_x(u, v, \dot{u}, \dot{v}, \psi, \ddot{\psi}) \\ Y_c &= F_y(u, v, \dot{u}, \dot{v}, \psi, \ddot{\psi}) \\ N_c &= F_\psi(u, v, \dot{u}, \dot{v}, \psi, \ddot{\psi}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

A forma linear usualmente considerada para essas funções é a seguinte[60]:

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{\partial X}{\partial u} (u - u_1) + \dot{u} \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \\ Y_c &= \frac{\partial Y}{\partial v} v + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial Y}{\partial r} r + \frac{\partial Y}{\partial \dot{r}} \dot{r} \\ N_c &= \frac{\partial N}{\partial v} v + \frac{\partial N}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial N}{\partial r} r + \frac{\partial N}{\partial \dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Adotando-se a notação $\frac{\partial P}{\partial s} = P_s$, chega-se a:

$$\begin{aligned} X_c &= X_u (u - u_1) + X_{\dot{u}} \dot{u} \\ Y_c &= Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} \\ N_c &= N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.3.3.1. Esforços Hidrodinâmicos Devidos ao Leme

Os esforços hidrodinâmicos devidos ao leme podem ser colocados na forma:

$$\begin{aligned} X_l &= F_{Xl}(\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}) \\ Y_l &= F_{Yl}(\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}) \\ N_l &= F_{\psi l}(\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}) \end{aligned} \quad (4.11)$$

onde δ é o ângulo do leme.

Admitiu-se como hipótese a linearidade da atuação do leme, tendo em vista que se espera um movimento lento do leme, na operação de manutenção de rumo do navio em águas abertas e ir-restritas. A forma linear usualmente considerada para esses fun-cionais é a seguinte[68]:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \delta * \frac{\partial X}{\partial \delta} = \delta * X \delta & (4.12) \\
 Y_1 &= \delta * \frac{\partial Y}{\partial \delta} = \delta * Y \delta \\
 N_1 &= \delta * \frac{\partial N}{\partial \delta} = \delta * N \delta
 \end{aligned}$$

4.3.3.2. Esforços Hidrodinâmicos Devidos ao Propulsor

Os esforços devidos a ação do propulsor podem ser representados por [6,60]:

$$\begin{aligned}
 X_p &= (1-t) * T & (4.13) \\
 Y_p &= 0 \\
 N_p &= 0
 \end{aligned}$$

onde T é o empuxo fornecido pelo hélice;
t é o coeficiente de redução da força propulsora.

4.3.4. Esforços Devidos a Forças de Excitação Externa

4.3.4.1. Introdução

No estudo do controlador, admite-se a existência de forças externas geradas por três tipos de interações entre o navio e o meio ambiente:

- ação direta do vento sobre as partes emersas do navio;
- ação de correntes marítimas sobre as partes imersas do casco;
- ação de ondas de superfície.

É interessante estabelecer dois aspectos normativos com relação a nomenclatura dos movimentos de translação e rotação de um navio e quanto aos tipos de mar e vento enfrentados por um navio, conforme mostra as FIG.4.2. e 4.3.

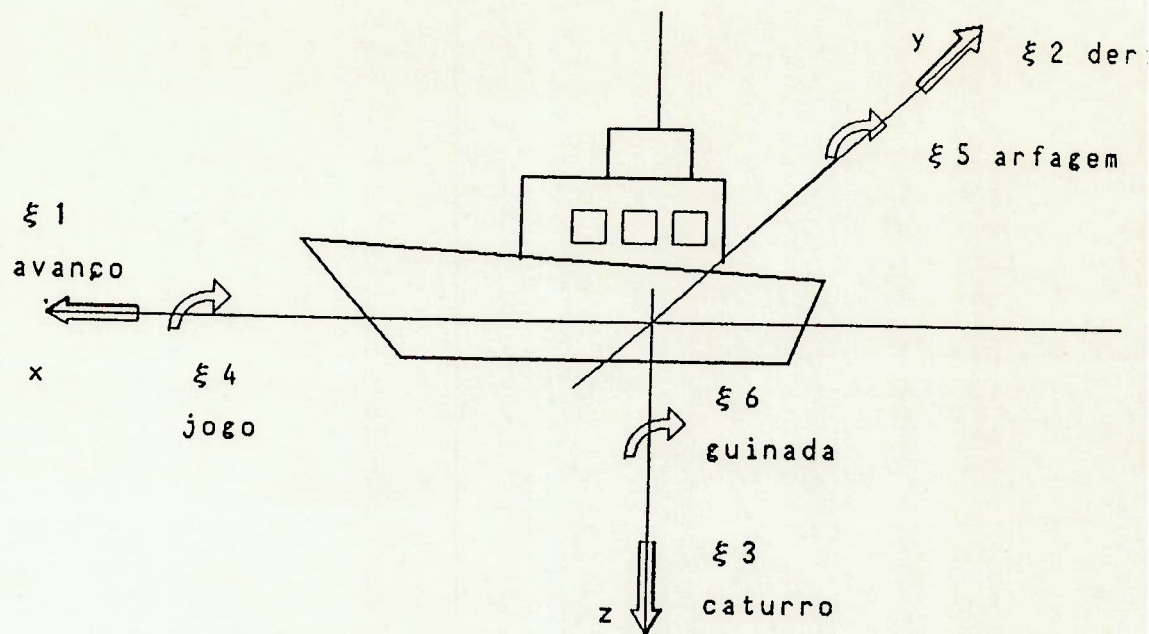


FIG.4.2. Movimentos de Navio

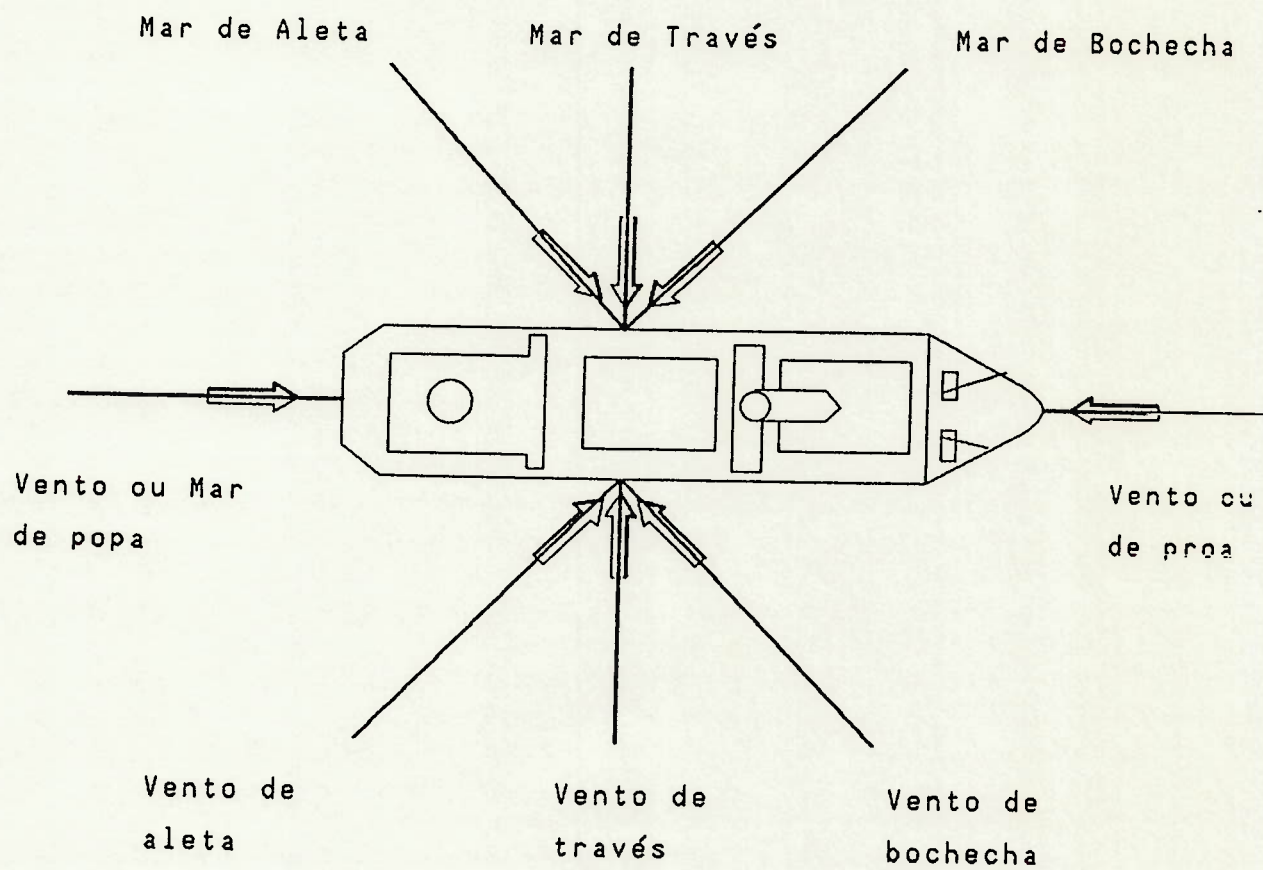


FIG.4.3. Movimento Relativos das Ondas

4.3.4.2. Forças Externas Geradas pela Ação do Vento sobre as Partes Emersas do Navio

A ação do vento pode ser decomposta em duas parcelas, a primeira representando a ação de um vento constante e a segunda as lufadas de vento e turbulência. Neste trabalho utilizou-se a componente referente ao vento constante, uma vez que a ação de lufadas de vento e turbulência sobre o navio, pode ser tratada como um ruído branco [36]. Porém, como as forças de excitação geradas por ondas também têm um caráter oscilatório, é suficiente que durante a simulação o P.A. reconheça este caráter estocástico.

Para a análise da parcela constante utilizou-se o modelo descrito por Davempont [61] para a variação vertical da velocidade do vento:

$$V_{kz}/V_{ko} = (Z/Z_0)^{1/n_1} \quad (4.14)$$

onde V_{kz} é a velocidade do vento a altura z ;
 V_{ko} velocidade média a altura de referência;
 Z é a altura vertical acima da superfície do mar;
 Z_0 é a altura de referência;
 n_1 é uma constante que depende do meio; para a atmosfera é igual a 7,5.

A força F gerada pelo vento é expressa por:

$$F = k_1 * L_{la} * \int_0^{H_0} (V_{kz})^2 dz \quad (4.15)$$

onde k_1 é um coeficiente empírico;
 L_{la} é o comprimento da linha de água;
 H_0 é a altura média das partes emersas, dada por
 $H_0 = A_p / L_{la}$;
 A_p é a área projetada.

Com base em uma série de experimentos para diversos tipos de embarcações obteve-se as seguintes expressões para os coeficientes de esforços [61]:

-força de deriva:

$$C_{ya}(\psi a) = \frac{F_{deriva}}{1/2 * \rho_a * A_{la} * V_{ko}^2} \quad (4.16)$$

-força de avanço:

$$C_{xa}(\psi a) = \frac{F_{avanço}}{1/2 * \rho_a * A_{ta} * V_{ko}^2} \quad (4.17)$$

-momento de guinada:

$$X_a(\psi a) = C_{na}(\psi a) / C_{ya}(\psi a) \quad (4.18)$$

$$C_{na}(\psi a) = \frac{M_{\text{guinada}}}{1/2 * \rho_a * A_a * L_oa * V_{ko}^2}$$

onde ρ_a é a densidade do ar (1,22557 kg/m³);
 A_a é a área longitudinal projetada;
 A_{ta} é a área transversal projetada;
 L_{oa} é o comprimento da linha de água;
 V_{ko} é a velocidade média à altura de referência;
 $C_{ya}, C_{na}, X_a, C_{xa}$ são os coefs. dos esforços obtidos das
 FIG.4.4.1. e 4.4.2.

Segundo a referência[61], o efeito da velocidade do navio é desprezível no cálculo das forças geradas pelo vento. Neste trabalho os esforços devido ao vento foram calculados considerando-se a velocidade de encontro e o ângulo de incidência do vento em relação ao navio.

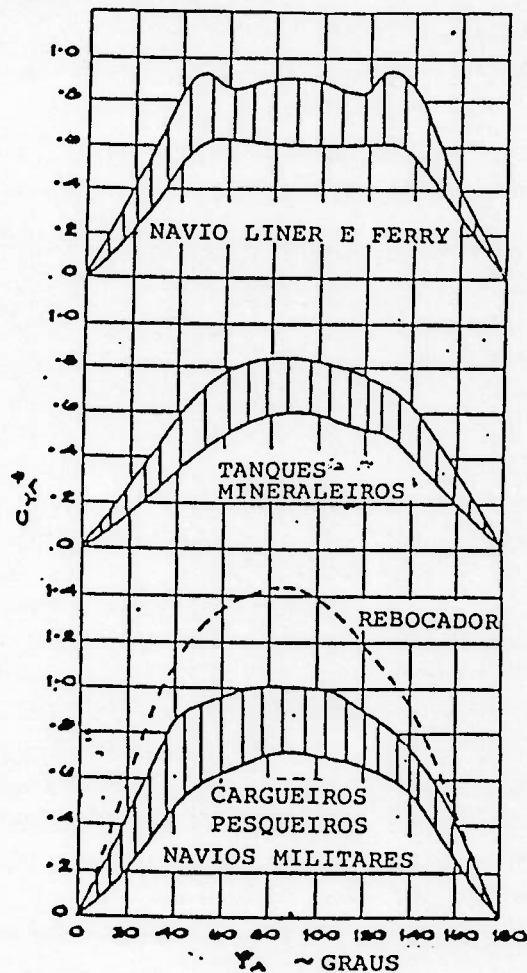


FIG.4.4.1. Coeficientes Utilizados para Cálculo da Força Externa Gerada pela Ação do Vento.

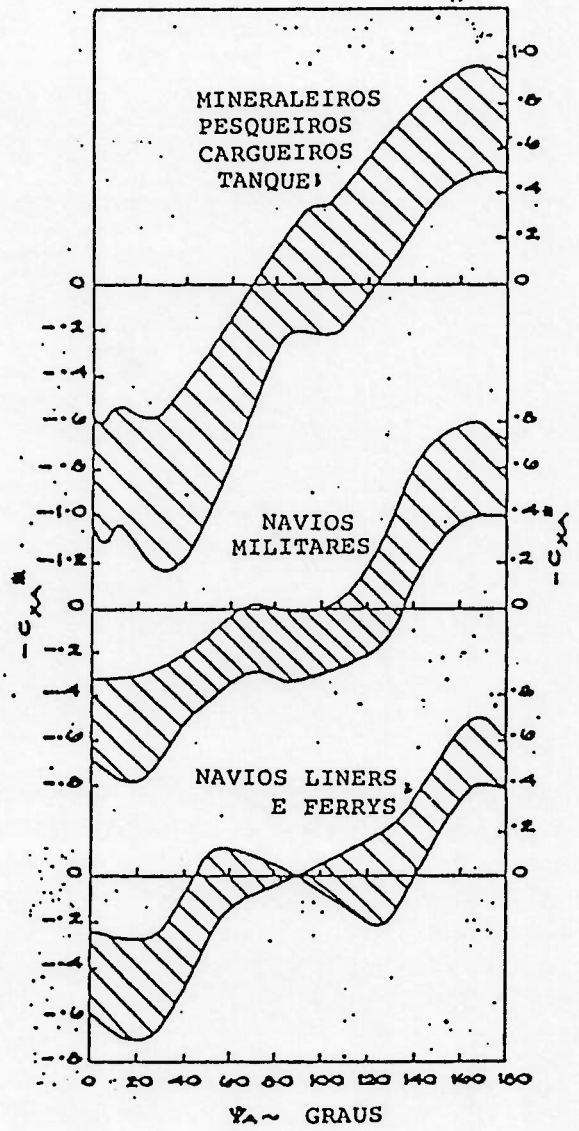
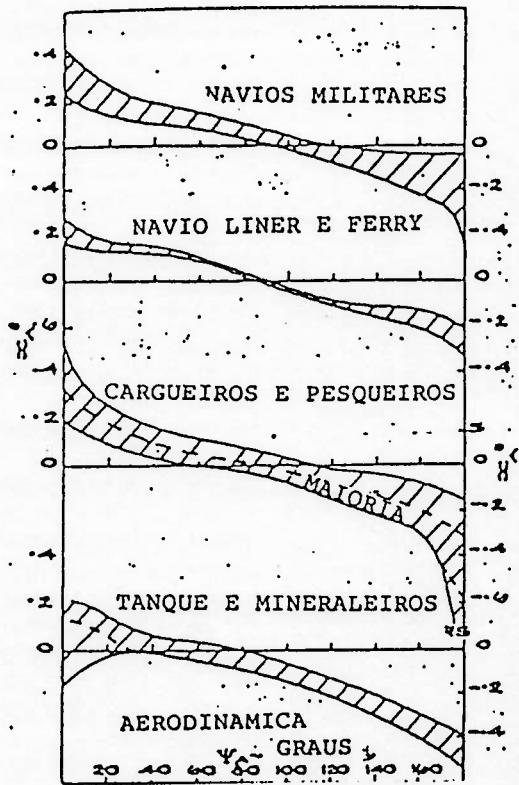


FIG.4.4.2. Coeficientes Utilizados para Calculo da Força Externa Gerada pela Ação do Vento.

4.3.4.3. Forças Externas Geradas pela Ação de Correntes

Admite-se que a corrente seja constante e uniforme; os seus efeitos podem ser calculados, adicionando-se às equações de movimento as suas contribuições, como é mostrado na FIG. 4.5.

$$\begin{aligned} F1c &= -m \cdot v_c \cdot r & (4.19) \\ F2c &= m \cdot u_c \cdot r \\ F6c &= m \cdot x_g \cdot u_c \cdot r \end{aligned}$$

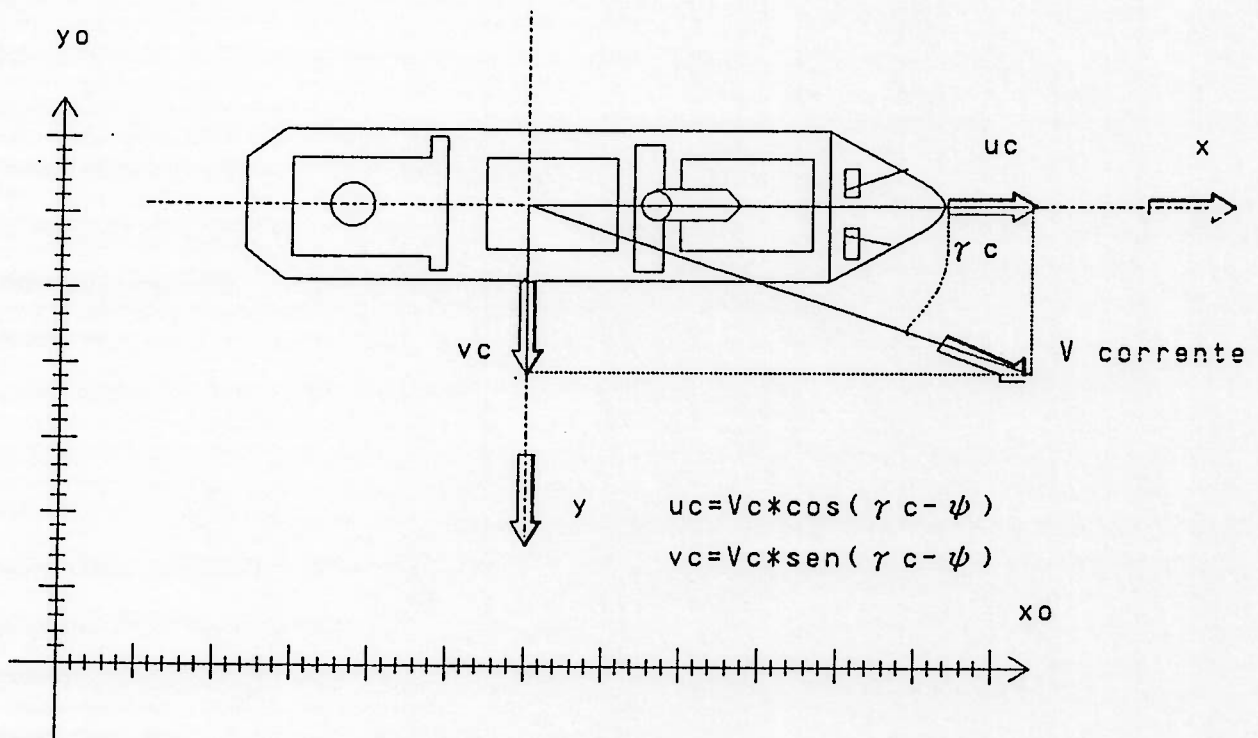


FIG.4.5. Navio Sob a Ação de Corrente

4.3.4.4. Forças Externas Geradas pela Ação de Ondas

4.3.4.4.1. Introdução

Considere-se o movimento do navio com velocidade de translação V e o trem de ondas com velocidade de propagação v_p ($v_p = w/k$). Define-se a frequência w_e , como a frequência com que o navio encontrará as ondas:

$$w_e = w - k \cdot V \cdot \cos \theta \quad (4.20)$$

onde w é a frequência da onda;
 k é o número de onda;
 θ é o ângulo entre as velocidades de propagação da onda e a do navio, como mostrado na FIG.4.6.

Em águas profundas tem-se $k=w^2/g$, donde:

$$w_e = w - (w^2/g) * V * \cos \theta = w * (g - w * V * \cos \theta) / g \quad (4.21)$$

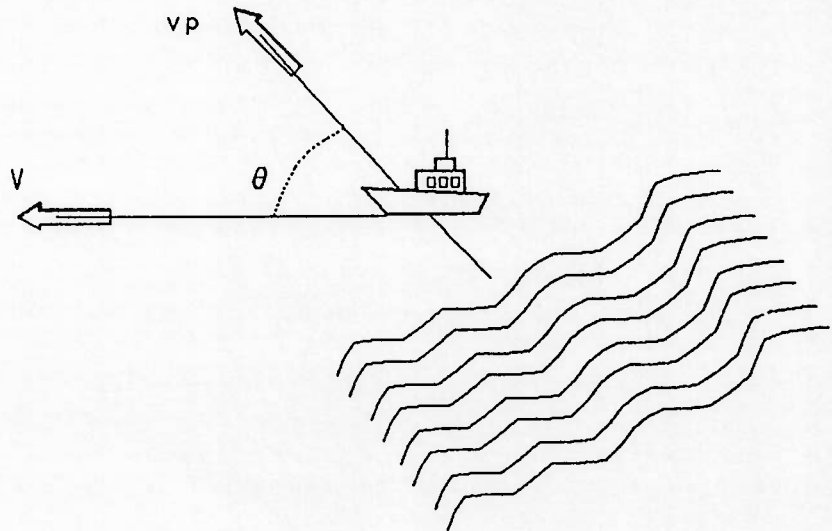


FIG.4.6. Velocidade do Navio e das Ondas

Admite-se que a força e momento médio que atuam sobre o veículo no plano horizontal sejam dados por:

$$X_{m_i} = X_{m_i}(1) + X_{m_i}(2) \quad (4.22)$$

onde o índice (1) indica a componente linear de 1ª-ordem da força e o índice (2) indica a componente não linear de 2ª-ordem.

4.3.4.4.2. Forças e Momentos de 1ª-ordem

Para um sistema linear genérico é possível se utilizar do seguinte procedimento:

Excita-se o sistema linear através de uma entrada conhecida e adequada; com a resposta obtida determina-se a função de transferência, como indicado na FIG.4.7. Então através do conhecimento de uma entrada qualquer e da função de transferência determinada obtém-se a saída. Este procedimento pode ser adotado para a estimativa de forças externas geradas pela ação de ondas de superfície ou seja, o navio é considerado um sistema linear e através da excitação do mesmo por ondas progressivas planas conhecidas, determina-se a função de transferência desejada. Conhecida a função de transferência, e tendo o mar real como entrada, pode-se estimar as forças externas.

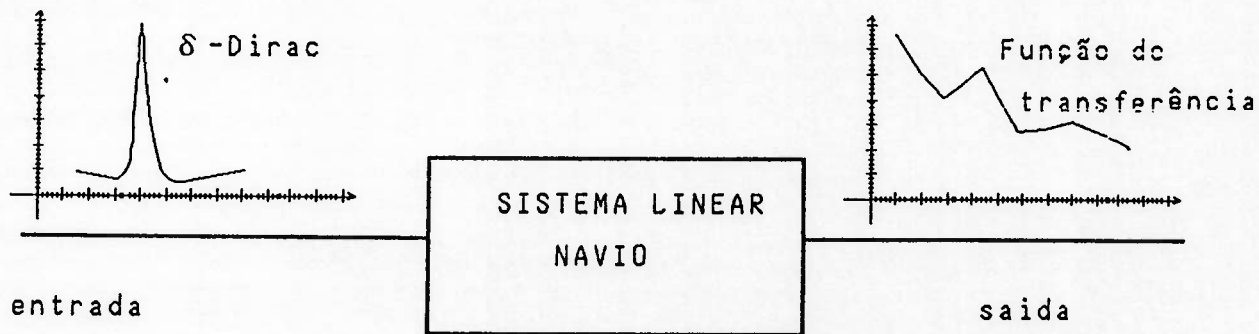


FIG.4.7. A Resposta de um Sistema Linear ao Impulso de Dirac

Com a hipótese da linearidade, os esforços hidrodinâmicos sobre um navio podem ser decompostos em duas parcelas (Princípio da Superposição). A primeira, devida às forças geradas pelas ondas atuando sobre um corpo fixo, denominadas de forças excitantes. A segunda, gerada pelo movimento oscilatório forçado em águas calmas, denominada forças restauradoras.

As forças hidrodinâmicas podem ser calculadas pela integração de pressões nos elementos de superfície:

$$X_i = \iint_S p \cdot \cos(n, x_i) \, d\sigma \quad , i=1 \text{ à } 6 \quad (4.23)$$

onde p é a pressão;
 n é a normal orientada para o exterior do corpo
 $d\sigma$ é o elemento de superfície;
 $\cos(n, x_i)$ é o cosseno diretor da normal $n, i=1 \text{ à } 3$;
 $\cos(n, x_{i+3}) = x_{i+1} \cdot \cos(n, x_{i-1}) - x_{i-1} \cdot \cos(n, x_{i+1})$.

Da equação de Bernoulli tem-se:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\rho}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi - \rho \cdot g \cdot z \quad (4.24)$$

onde ϕ é o potencial total das ondas.

Considerando-se que $\nabla \phi \cdot \nabla \phi$ é produto de ordem superior e desprezando-se as pressões hidrostáticas tem-se:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4.25)$$

O potencial total das ondas pode ser expresso na forma:

$$\phi = \phi_i + \phi_d$$

onde ϕ_i é o potencial da onda incidente;
 ϕ_d é o potencial da onda refletida.

Utiliza-se para a estimativa das forças excitantes a hipótese de Froude-Krylov, aplicável a corpos esbeltos de formas alongadas como navios, ou então a corpos pequenos quando comparados ao comprimento de onda. Esta hipótese considera que o potencial da onda refletida pode ser desprezado, $\phi_d \approx 0$. Onde:

$$\phi = \phi_i \quad (4.26)$$

Para uma onda progressiva plana incidente com um ângulo θ em relação a velocidade do navio, o potencial da onda pode ser expresso por [62]:

$$\phi_i = \frac{j * g * A}{w} * e^{-j * K * (x * \cos \theta - y * \sin \theta)} * e^{K * z} \quad (4.27)$$

onde g é a aceleração da gravidade;
 A é a amplitude da onda;
 w é a frequência da onda;
 K é o número da onda;
 $j = \sqrt{-1}$.

então:

$$X_i(1) = F_n^i = - \iint_S \rho * \frac{\partial \phi}{\partial t} * \cos(n, x_i) d\sigma \quad (4.28)$$

$$F_n^i = \text{Re} [e^{j * w * t} * j * \rho * w_0 * \iint_S n_j * \phi_i d\sigma]$$

com $w_0 = (K * g)^{1/2}$.

Note-se que deseja-se obter $F_n^i(w, \theta)$, ou seja as forças excitantes para diversas frequências de encontro e diversos ângulos de incidência, quando a amplitude for unitária. Supondo-se que o mar real seja uma composição de ondas regulares, $F_n^i(w, \theta)$ será a função de transferência relacionando a amplitude de onda e os esforços de 1ª ordem sobre o navio.

Admitindo-se que o mar real seja totalmente desenvolvido e descrito por um processo aleatório do tipo estacionário homogêneo e ergódico, a densidade de energia unidirecional $S^+(w)$, cognominada de espectro unidirecional de mar, pode ser descrita por diversos modelos, como por exemplo o Espectro de Pierson-Moskowitz [80]:

$$S^+(w) = A / w^5 * e^{-B / (w)^4} \quad (4.29)$$

onde w é dado em [rad/seg];
 V_k velocidade em nós do vento formador das ondas a 64 pés acima da superfície do mar;
 $A = 62,5$;
 $B = 97,4 * 10^4 / V_k^4$.

Na FIG. 4.8. a velocidade do vento formador e o estado de mar estão relacionados com a altura de onda significativa. Para se ob-

ter um espectro multidirecional de ondas, segundo a ITTC, adota-se o seguinte coeficiente de espalhamento:

$$S^+(w, \mu) = S^+(w) * \frac{2}{\pi} * \cos^2 \mu \quad (4.30)$$

onde μ é o ângulo entre a direção do vento preponderante e a propagação de ondas.

Levando-se em conta a frequência de encontro do navio com as ondas, tem-se:

$$S^+(w_e, \mu) = S^+(w, \mu) * \frac{1}{1 - 2 * w * V / g * \cos \theta} \quad (w_e \neq 0) \quad (4.31)$$

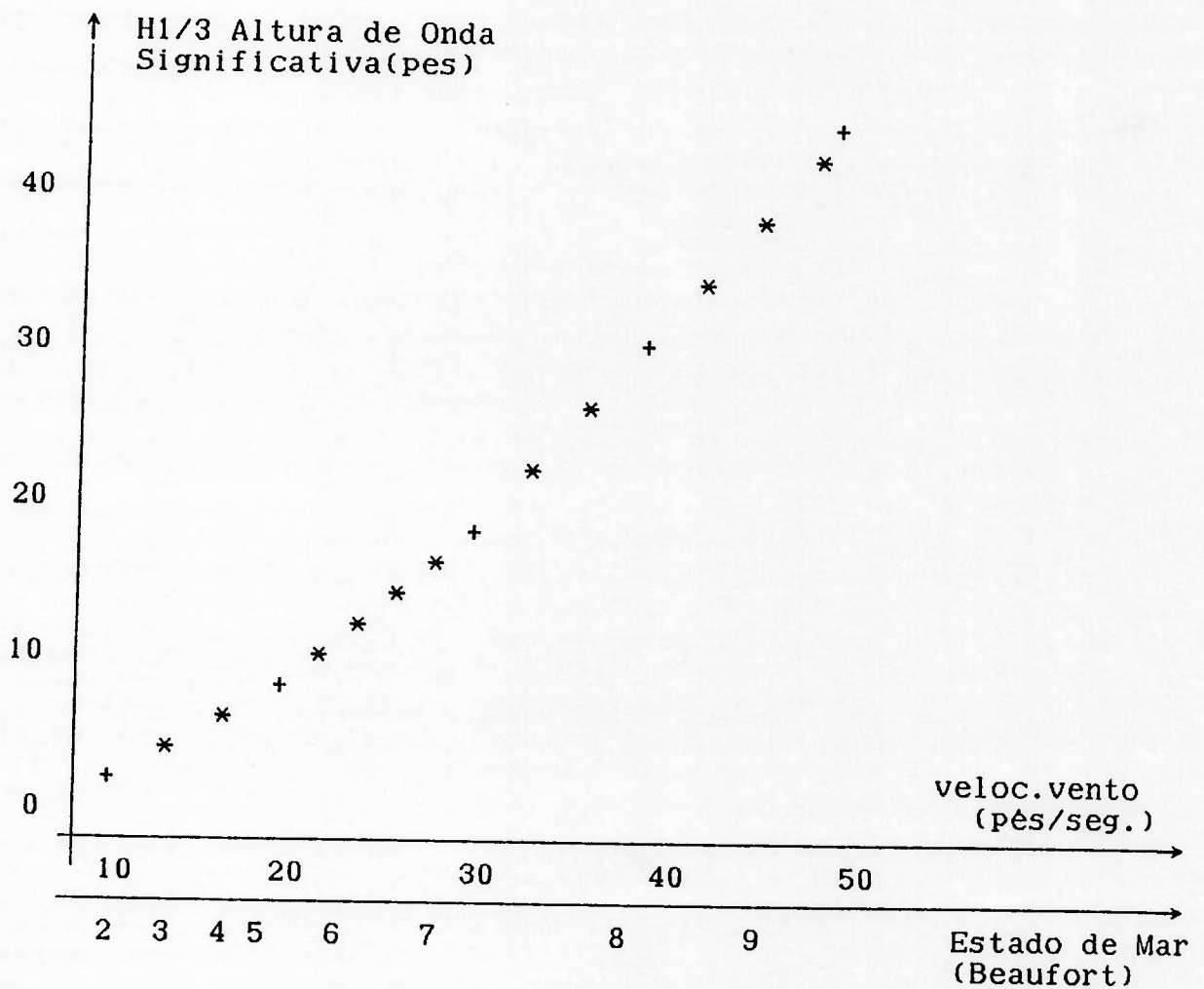


FIG.4.8. Altura Significativa de Onda

Desta forma, utilizando-se de algumas propriedades de sistemas lineares e de suas respostas a excitações aleatórias tem-se:

$$\begin{aligned}
S^{+qq}(we) &= S^+(we) * |h_{qq}(w)|^2 & (4.32) \\
S^{+qq}(we) &= we^2 * S^+(we) \\
S^{+qq}(we) &= we^4 * S^+(we)
\end{aligned}$$

Pode-se também efetuar o cálculo de momentos:

$$m_n = \int_0^\infty we^n * S^{+qq}(we) dwe \quad (4.33)$$

Para um mar descrito por um espectro unidirecional:

$$m_n = \int_0^\infty we^n * |H_{qq}(we)|^2 * S^+(we) dwe \quad (4.34)$$

Para um mar descrito por um espectro multidirecional:

$$m_n = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \int_0^\infty we^n * |H_{qq}(we, \mu)|^2 * S^+(we, \mu) dwe d\mu \quad (4.35)$$

Assim, o cálculo das forças e momentos médios, uma vez conhecido $F_n^i(we, \mu)$ será dado por:

$$S_f^{(1)}(we, \mu) = |F_n^i(we, \mu)|^2 * S^+(we, \mu) \quad (4.36)$$

onde S_f é o espectro de força.

A média será obtida através do Momento de 1ª Ordem e a variância através do Momento Central de 2ª Ordem:

$$F^{(1)} = E[S_f(we, \mu)] = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \int_0^\infty we * S_f(we, \mu) dwe d\mu \quad (4.37)$$

$$Var^{(1)} = E[S_f(we, \mu) - E(S_f(we, \mu))]^2 = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \int_0^\infty (we - F^{(1)})^2 * S_f(we, \mu) dwe d\mu$$

A média das forças e momentos de 1ª Ordem é suposta nula [62,63,64,65,76,77], visto o seu caráter puramente oscilatório. Apesar disto, para efeito de simulação, deseja-se incluir o caráter oscilatório das forças de 1ª Ordem tendo em vista dois aspectos:

- é importante que o piloto automático seja capaz de reconhecer este caráter oscilatório do movimento e não atue indevidamente.

- há uma interação entre as forças e momentos de 1ª Ordem e as demais forças geradas por excitação externa, através da variação oscilatória do aproamento do navio. Então, considerando-se uma onda com amplitude $A(V_{ko})$ [41]:

$$A(V_{ko}) = 0,015 * V_{ko}^2 + 1,5 \quad (4.38)$$

$$T(V_{ko}) = -0,0014 * V_{ko}^3 + 0,042 * V_{ko}^2 + 5,6$$

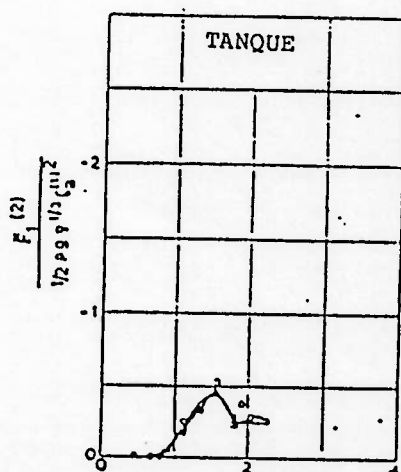
onde T é o período da onda em segundos;

V_{ko} é a velocidade do vento formador em m/s.

Esta onda está na direção do vento formador. Então, obtêm-se a força oscilatória devido a onda regular média gerada pelo vento V_{ko} , ou seja A e T são parâmetros de entrada para $F_n^i(we, \theta)$.

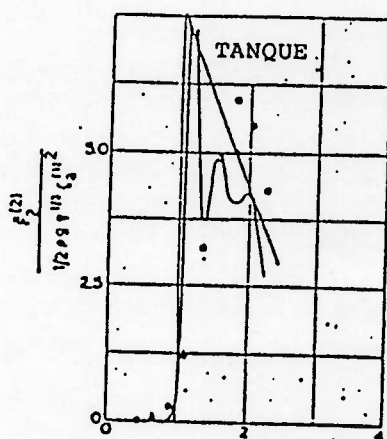
4.3.4.4.6. Forças e Momentos de 2a Ordem

O cálculo das forças e momentos de 2a Ordem é complexo, dependendo da solução do problema linear de 1a Ordem. Até presente data não se tem conhecimento de um procedimento analítico rápido para o seu cálculo. Decidiu-se por isto utilizar os resultados obtidos para um navio tanque ancorado [63]. Onde se obteve as funções de transferência, mostrada nas FIG.4.9.



$$w * \sqrt{(\nabla / 3 / g)}$$

FIG.4.9.1. Força de Avanço Média em Mar de Proa



$$w * \sqrt{(\nabla / 3 / g)}$$

FIG.4.9.2. Força de Deriva Média em Mar de Través

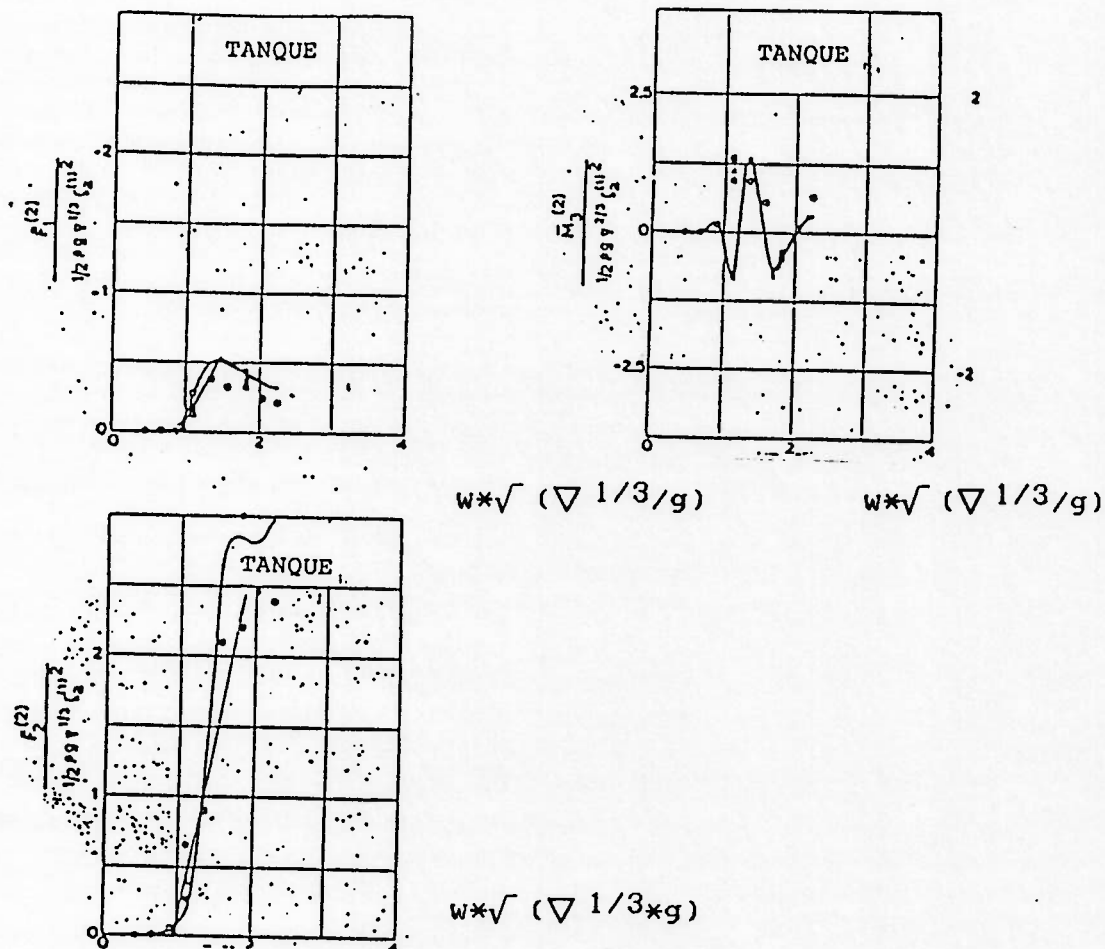


FIG.4.9.3. Força de Avanço e Deriva Média e Momento de Guinada Médio em Mar de Bochecha

As características gerais do navio tanque utilizado na determinação dos esforços de 2ª ordem das FIG.4.9. são:

-comprimento entre perpendiculares(Lpp)	310m;
-boca(B)	47,17m;
-calado(H)	18,90m;
-deslocamento(Δ)	234.826m ³ .

Além disso: ρ é a densidade da água;
 g é a gravidade;
 ξ é a amplitude da onda.

Para a estima das forças de 2ª Ordem utiliza-se as FIG.4.9.1./2./3., a onda representativa descrita em (4.38) e a frequência de encontro das ondas com a embarcação simulada.

4.4. O Modelo Matemático de Movimento do Navio

São utilizados no estudo dois modelos matemáticos distintos de movimento da embarcação. Para o projeto do piloto automático é empregado um modelo linear, chamado de modelo de trabalho. Para a simulação do movimento do navio é utilizado um modelo não linear, chamado de modelo de avaliação.

4.4.1. O Modelo Matemático de Trabalho

Introduzindo-se na equação (4.7) as componentes dos esforços que atuam sobre o veículo, obtem-se:

$$\begin{aligned} -X_u(u-u_1) + (m - X\dot{u})\dot{u} - T_o(1-t) - X\delta * \delta - F_{exc1} &= 0 \\ -Y_v v + (m - Y\dot{v})\dot{v} - (Y_r - m*u_1)r - (Y\dot{r} - m*x_g)\dot{r} - Y\delta * \delta - F_{exc2} &= 0 \\ -N_v v - (N\dot{v} - m*x_g)\dot{v} - (N_r - m*x_g*u_1)r + (I_z - N\dot{r})\dot{r} - N\delta * \delta - F_{exc6} &= 0 \end{aligned} \quad (4.39)$$

As equações de movimento (4.39) são, normalmente, colocadas em forma adimensional. Três sistemas de fatores de adimensionalização foram propostos [41, 60, 67], dois deles aplicáveis à veículos oceânicos com movimento de avanço predominante (SNAME e Norrbín) e o terceiro aplicável à veículos com movimento de avanço de pequena magnitude (Norrbín Bis); a Tabela 4.1. mostra estes sistemas. Neste trabalho será usado o sistema proposto pela SNAME.

Unidade	fator ad. Sname	Norrbín	Norrbín Bis
massa	$\rho / 2 * L^3$	$\rho / 2 * L^2 * H$	deslocam/g
comprimento	L	L	L
tempo	L/V	L/V	$\sqrt{L/g}$
velocidade linear	V	V	$\sqrt{g*L}$
aceleração linear	V ² /L	V ² /L	g
velocidade ang.	V/L	V/L	$\sqrt{g/L}$
aceleração ang.	(V/L) ²	(V/L) ²	g/L
força	$\rho / 2 * (V*L)^2$	$\rho / 2 * V^2 * L * H$	deslocam.
momento	$\rho / 2 * V^2 * L^3$	$\rho / 2 * (V*L)^2 * H$	desloc*L

Tabela 4.1. Sistemas para Adimensionalização

Assim tem-se:

$$\begin{aligned} m' &= \frac{m}{\rho / 2 * L^3} & v' &= \frac{v}{V} & \dot{v}' &= \frac{\dot{v} * L}{V^2} & I_z' &= \frac{I_z}{\rho / 2 * L^5} \\ r' &= \frac{r * L}{v} & \dot{r}' &= \frac{\dot{r} * L^2}{V^2} & Y_v' &= \frac{Y_v}{\rho / 2 * L^2 * V} & Y_r' &= \frac{Y_r}{\rho / 2 * L^3 * V} \\ N_v' &= \frac{N_v}{\rho / 2 * L^3 * V} & N_r' &= \frac{N_r}{\rho / 2 * L^4 * V} & Y\dot{v}' &= \frac{Y\dot{v}}{\rho / 2 * L^3} & Y\dot{r}' &= \frac{Y\dot{r}}{\rho / 2 * L^4} \end{aligned}$$

$$N\dot{v}' = \frac{N\dot{v}}{\rho / 2 * L^4}$$

$$u' = \frac{u}{V}$$

$$\frac{u1}{V} = 1$$

$$X\dot{u}' = \frac{X\dot{u}}{\rho / 2 * L^3}$$

$$Xu' = \frac{Xu}{\rho / 2 * L^2 * V}$$

$$t' = t$$

$$X\delta' = \frac{X\delta}{\rho / 2 * L^2 * V^2}$$

$$Y\delta' = \frac{Y\delta}{\rho / 2 * L^2 * V^2}$$

$$\delta' = \delta$$

$$N\delta' = \frac{N\delta}{\rho / 2 * L^3 * V^2}$$

$$x_g' = x_g / L$$

$$\dot{u}' = \frac{\dot{u} * L}{V^2}$$

$$F_{exc}' = \frac{F_{exc}}{\rho / 2 * (L * V)^2}$$

$$T_o' = \frac{T_o}{\rho / 2 * (L * V)^2}$$

$$N_r' = \frac{N_r}{\rho / 2 * L^2 * V^2}$$

$$Tempo = L / V$$

Em forma adimensional tem-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} -Xu'(u'-1) + (m' - X\dot{u}') * \dot{u}' - T_o'(1-t) - X\delta' * \delta' - F_{exc}' &= 0 \\ -Yv' * v' + (m' - Y\dot{v}') * \dot{v}' - (Yr' - m') * r' - (Y\dot{r}' - m' * x_g') * \dot{r}' - Y\delta' * \delta' - &F_{exc2}' = 0 \\ -Nv' * v' - (N\dot{v}' - m' * x_g') * \dot{v}' - (Nr' - m' * x_g') * r' + (Iz' - N\dot{r}') * \dot{r}' - &N\delta' * \delta' - F_{exc6}' = 0 \end{aligned}$$

(4.40)

definindo-se os coeficientes a_i :

$$\begin{aligned} a_2 &= Xu' \\ a_3 &= T_o'(1-t) \\ a_4 &= X\delta' \\ a_5 &= (m' - X\dot{u}') \\ a_6 &= Yv' \\ a_7 &= Yr' - m' \\ a_8 &= Y\dot{r}' - m' * x_g' \\ a_9 &= Y\delta' \\ a_{10} &= m' - Y\dot{v}' \\ a_{11} &= Nv' \\ a_{12} &= N\dot{v}' - m' * x_g' \\ a_{13} &= Nr' - m' * x_g' \\ a_{14} &= N\delta' \\ a_{15} &= Iz' - N\dot{r}' \\ a_{16} &= (a_{15} * a_6 + a_8 * a_{11}) / (a_{10} * a_{15} - a_8 * a_{12}) \\ a_{17} &= (a_7 * a_{15} + a_8 * a_{13}) / (a_{10} * a_{15} - a_8 * a_{12}) \\ a_{18} &= (a_8 * a_{14} + a_9 * a_{15}) / (a_{10} * a_{15} - a_8 * a_{12}) \\ a_{19} &= (a_{11} * a_{10} + a_{12} * a_6) / (a_{10} * a_{15} - a_8 * a_{12}) \\ a_{20} &= (a_{12} * a_7 + a_{13} * a_{10}) / (a_{10} * a_{15} - a_8 * a_{12}) \\ a_{21} &= (a_9 * a_{12} + a_{14} * a_{10}) / (a_{10} * a_{15} - a_8 * a_{12}) \end{aligned}$$

(4.41)

e acrescentando-se coeficientes relativos as forças externas:

$$\begin{aligned}af_1 &= a_{15}/(a_{10} \cdot a_{15} - a_8 \cdot a_{12}) \\af_2 &= a_8/(a_{10} \cdot a_{15} - a_8 \cdot a_{12}) \\af_3 &= a_{12}/(a_{10} \cdot a_{15} - a_8 \cdot a_{12}) \\af_4 &= a_{10}/(a_{10} \cdot a_{15} - a_8 \cdot a_{12})\end{aligned}\tag{4.42}$$

resulta:

$$\begin{aligned}\dot{u}' &= [a_2 \cdot (u' - 1) + a_3 + a_4 \cdot \delta'] \cdot 1/a_5 + F_{ext1}'/a_5 \\ \dot{v}' &= a_{16} \cdot v' + a_{17} \cdot r' + a_{18} \cdot \delta' + af_1 \cdot F_{ext2}' + af_2 \cdot F_{ext6}' \\ \dot{r}' &= a_{19} \cdot v' + a_{20} \cdot r' + a_{21} \cdot \delta' + af_3 \cdot F_{ext2}' + af_4 \cdot F_{ext6}'\end{aligned}\tag{4.43}$$

Pode-se perceber que a primeira dessas equações-o movimento de avanço- é desacoplada das demais-deriva e guinada.

Para completar o modelo de movimento é necessário incluir uma representação da dinâmica da máquina do leme. Foi adotado um modelo linear [7 a 19] descrito por:

$$\dot{\delta} = 1/\tau \cdot (\delta_c(t) - \delta(t))\tag{4.44}$$

onde δ é o ângulo do leme;
 δ_c é o ângulo de comando para o leme;
 τ é a constante de tempo (aprox. 3 seg).

Com a equação da dinâmica do leme pode-se escrever as equações de estado necessárias para o sistema:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}' \\ \dot{r}' \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{19} & a_{20} & a_{21} \\ 0 & 0 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v' \\ r' \\ \delta' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_1 \end{bmatrix} \cdot \delta_c + \begin{bmatrix} af_1 & af_2 & 0 \\ af_3 & af_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ F_6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{u}' = a_2/a_5 \cdot u' + a_4/a_5 \cdot \delta' - (a_2 - a_3)/a_5 - F_1/a_5\tag{4.45}$$

onde $a_1 = -1/\tau$ da equação (4.42).

4.4.2. O Modelo Matemático de Avaliação

Analogamente ao modelo linear de movimento da embarcação, um modelo não linear pode ser obtido incluindo os termos de ordem superior na expansão de Taylor para forças e momentos. Costuma-se considerar em um modelo não linear termos até terceira ordem, visto que segundo a literatura [68], termos de ordem superior não aumentam significativamente a precisão do modelo.

Substituindo-se os esforços que atuam sobre o veículo, de origem hidrodinâmica devido ao casco, leme, propulsão, até terceira

ordem e as forças de excitação (4.16), (4.17), (4.18), (4.19) e (4.28) nas equações de movimento (4.7) obtêm-se:

$$(m-X_{\dot{u}}) * \dot{u} = f_1(u, v, r, \delta) \quad (4.46)$$

$$(m-Y_{\dot{v}}) * \dot{v} + (m * X_g - Y_{\dot{r}}) * \dot{r} = f_2(u, v, r, \delta)$$

$$(m * X_g - N_{\dot{v}}) * \dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}}) * \dot{r} = f_3(u, v, r, \delta)$$

Onde:

$$f_1(u, v, r, \delta) = X^* + X_u * \Delta u + 1/2 * X_{uu} * \Delta u^2 + 1/6 * X_{uuu} * \Delta u^3 + 1/2 * X_{vv} * v^2 + (1/2 * X_{rr} + m * X_g) * r^2 + 1/2 * X_{\delta \delta} * \delta^2 + 1/2 * X_{vuu} * v^2 * \Delta u + 1/2 * X_{rru} * r^2 * \Delta u + 1/2 * X_{\delta \delta u} * \delta^2 * \Delta u + (X_{vr} + m) * v * r + X_{v\delta} * v * \delta + X_{r\delta} * r * \delta + X_{vru} * v * r * \Delta u + X_{v\delta u} * v * \delta * \Delta u + X_{r\delta u} * r * \delta * \Delta u \quad (4.47)$$

$$f_2(u, v, r, \delta) = Y^* + Y_u * \Delta u + Y_{uu} * \Delta u^2 + Y_v * v + 1/6 * Y_{vvv} * v^3 + 1/2 * Y_{vrr} * v * r^2 + 1/2 * Y_{v\delta \delta} * v * \delta^2 + Y_{vu} * v * \Delta u + 1/2 * Y_{vuu} * v * \Delta u^2 + (Y_r - m * u) * r + 1/6 * Y_{rrr} * r^3 + 1/2 * Y_{rvv} * r * v^2 + 1/2 * Y_{r\delta \delta} * r * \delta^2 + Y_{ru} * r * \Delta u + 1/2 * Y_{ruu} * r * \Delta u^2 + Y_{\delta \delta} * \delta + 1/6 * Y_{\delta \delta \delta} * \delta^3 + 1/2 * Y_{\delta vv} * \delta * v^2 + 1/2 * Y_{\delta rr} * \delta * r^2 + Y_{\delta u} * \delta * \Delta u + 1/2 * Y_{\delta uu} * \delta * \Delta u^2 + Y_{\delta vr} * v * r * \delta \quad (4.48)$$

$$f_3(u, v, r, \delta) = N^* + N_u * \Delta u + N_{uu} * \Delta u^2 + N_v * v + 1/6 * N_{vvv} * v^3 + 1/2 * N_{vrr} * v * r^2 + 1/2 * N_{v\delta \delta} * v * \delta^2 + N_{vu} * v * \Delta u + 1/2 * N_{vuu} * v * \Delta u^2 + (N_r - m * X_g * u) * r + 1/6 * N_{rrr} * r^3 + 1/2 * N_{rvv} * r * v^2 + 1/2 * N_{r\delta \delta} * r * \delta^2 + N_{ru} * r * \Delta u + 1/2 * N_{ruu} * r * \Delta u^2 + N_{\delta \delta} * \delta + 1/6 * N_{\delta \delta \delta} * \delta^3 + 1/2 * N_{\delta vv} * \delta * v^2 + 1/2 * N_{\delta rr} * \delta * r^2 + N_{\delta u} * \delta * \Delta u + 1/2 * N_{\delta uu} * \delta * \Delta u^2 + N_{vr\delta} * v * r * \delta \quad (4.49)$$

Exprimindo-se o modelo em termos de equação de estado, tem-se:

$$\dot{u} = \frac{f_1(u, v, r, \delta)}{(m - X_{\dot{u}})} \quad (4.50)$$

$$\dot{v} = \frac{(I_z - N_{\dot{r}}) * f_2(u, v, r, \delta) - (m * X_g - Y_{\dot{r}}) * f_3(u, v, r, \delta)}{(m - Y_{\dot{v}}) * (I_z - N_{\dot{r}}) - (m * X_g - N_{\dot{v}}) * (m * X_g - Y_{\dot{r}})}$$

$$\dot{r} = \frac{(m - Y_{\dot{v}}) * f_3(u, v, r, \delta) - (m * X_g - N_{\dot{v}}) * f_2(u, v, r, \delta)}{(m - Y_{\dot{v}}) * (I_z - N_{\dot{r}}) - (m * X_g - N_{\dot{v}}) * (m * X_g - Y_{\dot{r}})}$$

onde os termos X^*, Y^*, N^* representam os esforços externos:

$$\begin{aligned} X^* &= \Delta T_o * (1 - t) + \Delta F_{exc1} \\ Y^* &= \Delta F_{exc2} \\ N^* &= \Delta F_{exc6} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Para completar o modelo são incluídas as equações para a dinâmica da máquina do leme, a trajetória e o rumo do navio:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= a_1 \delta - a_1 \delta_c \\ \dot{x}_{og} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_{og} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \tag{4.52}$$

5. Sensores

5.1. Introdução

Conforme mencionado na introdução do capítulo II, admite-se que as medidas das variáveis de estado e de entrada tenham erro nulo ou conhecido. Adicionalmente foi mencionado que quando a dinâmica dos sensores for significativa ela deve ser incorporada à dinâmica do sistema. Neste trabalho a dinâmica dos sensores não será incorporada ao sistema.

Ao se utilizar o modelo de trabalho (linear) do movimento da embarcação considerou-se como mensuráveis as seguintes entradas e estados:

$\psi, r, \delta, u, v.$

Deve-se pois analisar se esta hipótese é fisicamente realizável e quais os instrumentos disponíveis para tal. Agrupou-se as entradas e os estados como se segue:

- sensor do ângulo de rumo e taxa de variação do mesmo (ψ, r);
- sensor do ângulo do leme (δ);
- sensor da velocidade de avanço da embarcação (u);
- sensor da velocidade de deriva da embarcação (v).

Além disso considerou-se como mensuráveis os seguintes agentes ambientais:

- altura de onda;
- direção e intensidade de vento;
- direção e intensidade de corrente.

Convém observar que na formulação do índice de desempenho são incluídas as seguintes variáveis: taxa de variação do ângulo de rumo, ângulo do leme e velocidade de deriva da embarcação.

5.2. Sensores do Ângulo de Rumo e de sua Taxa de Variação

Para a medição do ângulo de rumo e de sua taxa de variação há um consenso quanto a utilização de dois sensores usualmente conhecidos como Giroscópio (ψ) e "Rate-Gyro" (r) [69,70,71,72].

O giroscópio cujo princípio de funcionamento é atribuído a Foucault (1851); teve aplicação prática a partir de Sperry e Anschultz. Consiste basicamente em um disco em rotação suspenso como um pêndulo; a rotação da Terra faz com que o disco em rotação tenha um movimento de precessão de forma a alinhar seu eixo de rotação com o meridiano da Terra. Desta forma o ângulo entre a referência da caixa do giroscópio e o eixo do disco fornece o ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o meridiano Norte-Sul geográfico da Terra, como representado no esquema da FIG. 5.1.

O giroscópio instalado no navio, está sujeito a distúrbios causados pelos movimentos de jogo e arfagem, além de outros devido a sua forma construtiva. As compensações introduzidas pelos fabricantes foram de tal forma eficazes, que os giroscópios atuais tais como os fornecidos pela Sperry e pela Litton [69,72] apresen-

tam uma margem de erro inferior a 2 graus, quando a embarcação navega em águas agitadas.

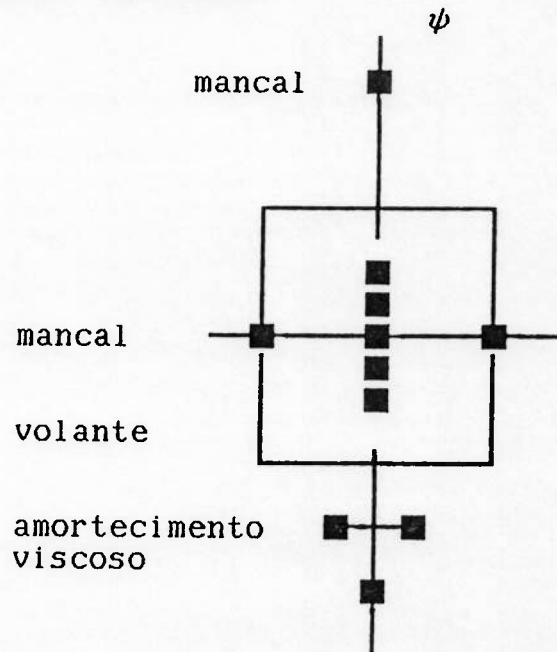


FIG.5.1. Giroscópio - Configuração Básica

A velocidade do movimento de precessão do giroscópio é função de um conjunto de variáveis que incluye o torque externo. Assim, adicionando-se a um giroscópio de eixo simples uma restrição adicional como a mola mostrada na FIG.5.2. pode-se obter a taxa de variação de rumo. Esta configuração é conhecida por "Rate-Gyro".

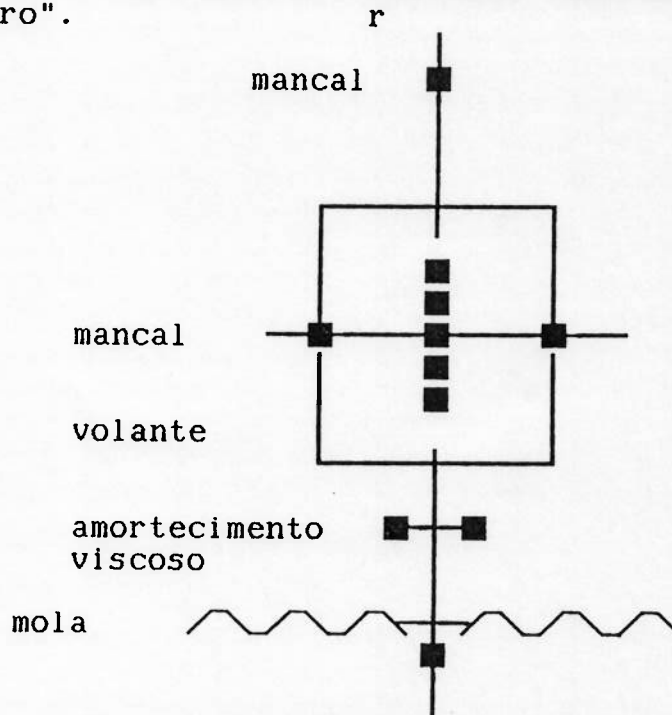


FIG.5.2. Rate-Gyro - Configuração Básica

5.3. Sensores do Ângulo de Leme

O sensor comumente utilizado para a medição do ângulo do leme devido a sua simplicidade e precisão é o potenciômetro [79]. O princípio fundamental do potenciômetro foi desenvolvido em torno de 1800 por Poggendorff, sendo que nos anos subsequentes com o desenvolvimento de resistências de Manganin e baterias com potencial constante, o potenciômetro tornou-se um dos instrumentos de precisão largamente utilizados em laboratórios e indústrias. Essencialmente, o potenciômetro efetua uma comparação de uma voltagem conhecida com uma desconhecida.

Para a determinação do ângulo de leme se utiliza um potenciômetro resistivo, constituído de um elemento resistivo com um contato móvel, cuja resistência elétrica é proporcional ao ângulo do leme como é mostrado na FIG. 5.3.

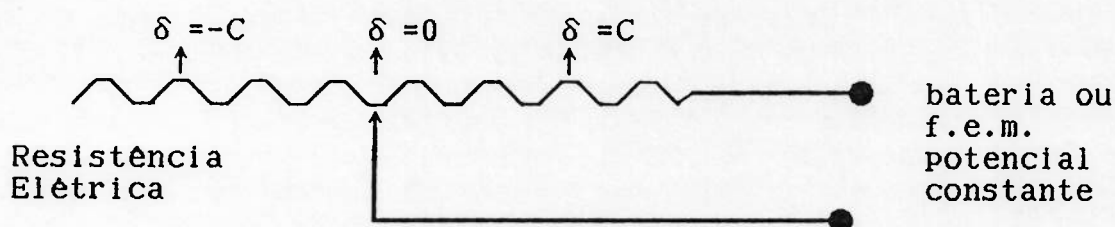


FIG. 5.3. Potenciômetro Resistivo

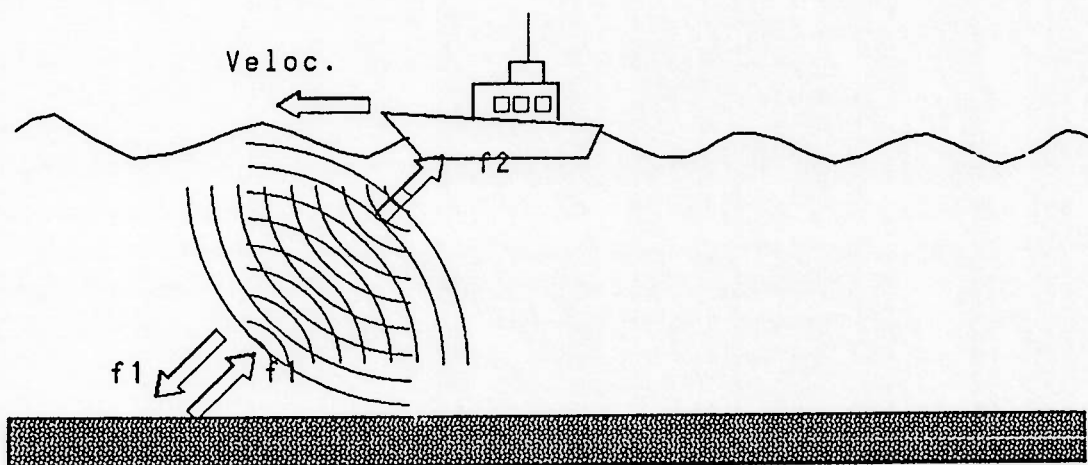
5.4. Sensores da Velocidade de Avanço da Embarcação

A medição da velocidade, tanto de avanço como de deriva apresenta de imediato o problema de precisão. De fato, a medida da velocidade de escoamento do fluido em torno da embarcação apresenta uma indicação de velocidade relativa do navio; assim por exemplo, na hipótese do navio estar sendo levado pela corrente, a velocidade indicada difere substancialmente da velocidade do navio. Sensores como o tubo de Pitot, desenvolvido por Henry Pitot em 1732, ou o propulsor LOG podem apenas fornecer uma estimativa da velocidade. Mesmo durante a realização da prova de mar, com mar de Almirante, a incerteza ao se utilizar o tubo de Pitot é de aproximadamente 0,5 nós.

Uma outra opção para a medição da velocidade de avanço, quando ela é muito maior que a de deriva ($u \gg v$) e portanto é aproximadamente igual a velocidade da embarcação, é a utilização de um equipamento conhecido por Doppler-Sonar [73, 74, 75].

O princípio de funcionamento do Doppler-Sonar se baseia na diferença de frequências de um pulso acústico gerado no navio e da medição de sua reflexão no fundo do mar (Efeito Doppler). Na FIG. 5.4. apresenta-se um esquema de operação do Doppler-

Sonar, indicando as frequências do pulso emitido e refletido, f_1 , e da medição do pulso refletido, f_2 . Um equipamento típico é constituído por um gerador de sinais, um transdutor que emite e capta os pulsos refletidos e finalmente um processador, que mede a frequência dos pulsos refletidos, calculando a velocidade e posição da embarcação, como indicado na FIG.5.5.



fundo do mar

FIG.5.4. Doppler-Sonar - Princípio Básico

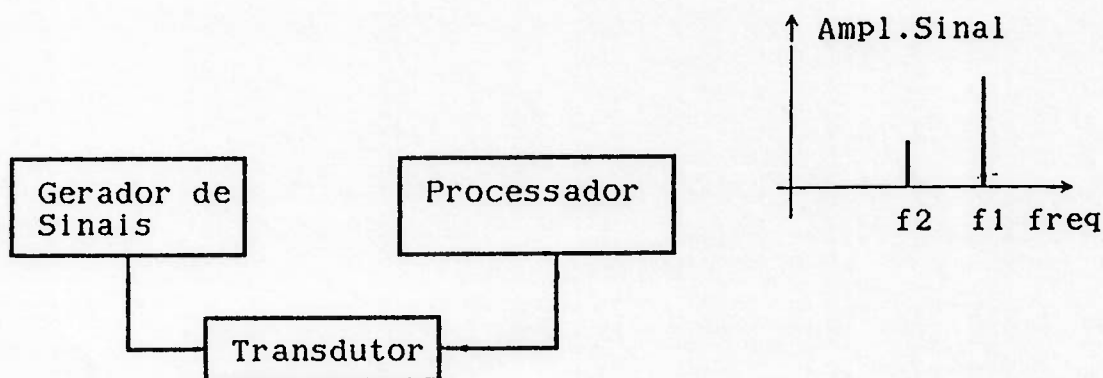


FIG.5.5. Doppler-Sonar -Configuração Básica

O equipamento Doppler-Sonar está sujeito a distúrbios gerados pelas velocidades do veículo no plano vertical (arfagem, caturro, jogo). Porém, as compensações introduzidas pelos fabricantes, tais como o transdutor tipo Janus, que é um cabeçote

com quatro transdutores, ou seja emite sinais acústicos em quatro diferentes direções, praticamente cancelam os efeitos das velocidades do plano vertical. Assim os catálogos de equipamento fornecem uma precisão para a medição de distância e velocidade como indicada na TAB.5.1.

Fabricante	Precisão Distância	Prec.Veloc.
Sperry	10 m	0,02 m/s
Furuno Electric CI-20 CI-30	-	-
Ametek Straza MRQ 4015	5 pés	Desvio Padrão $\sigma = 0,04 + 0,03 * \text{Veloc.}$

TAB.5.1. Precisão do Equipamento Doppler-Sonar

Note-se que esta precisão é para a velocidade da embarcação e não para a velocidade de avanço.

5.5. Sensores da Velocidade de Deriva da Embarcação

No caso da medição da velocidade de avanço, uma boa aproximação é obtida através da utilização de um sensor tipo Doppler-Sonar. Porém, no caso da velocidade de deriva, cujo valor é de pequena grandeza e significativamente influenciado pelos agentes externos, não há um equipamento em estágio comercial com precisão adequada. Cite-se como exemplo que o catálogo do Doppler-Sonar CI-20 & CI-30 da Furuno Electric fornece o seguinte exemplo de indicações:

- Velocidade da embarcação 7,5 nós;
- Velocidade de avanço 7,5 nós;
- Velocidade de deriva 0,5 nós;

evidenciando a falta de precisão da medida da velocidade de deriva.

Há algumas opções aplicáveis ao problema, como as soluções adotadas para o posicionamento dinâmico de plataformas de petróleo. Neste caso são utilizados sinais de satélites geo-estacionários, sinais de instalações radiofônicas. Além disso, há a possibilidade do aperfeiçoamento do Doppler-Sonar.

Todos os autores mencionados no capítulo III adotaram na análise do piloto automático uma aproximação para a velocidade de deriva, expressando-a como:

$$v = k * r \quad (5.1)$$

Acredita-se, que ao se efetuar o mapeamento do I.D., este trabalho estará contribuindo principalmente para uma melhor

compreensão da influência da velocidade de deriva da embarcação no consumo de combustível. Nos testes de simulação pretende-se avaliar o grau de imprecisão incorrido ao se efetuar esta aproximação.

5.6. Sensores dos Agentes Ambientais

Para a se estimar as forças externas pode-se utilizar um procedimento similar ao utilizado para o posicionamento dinâmico de plataformas de petróleo. Assim, utiliza-se um tacogerador e catavento para a determinação da direção e velocidade do vento, radar ou transdutores de pressão para determinar a altura e direção preferencial de ondas, Doppler Sonar e tubo de Pitot ou sensor eletromagnético para determinação da corrente, como representado na FIG.5.6. [69]

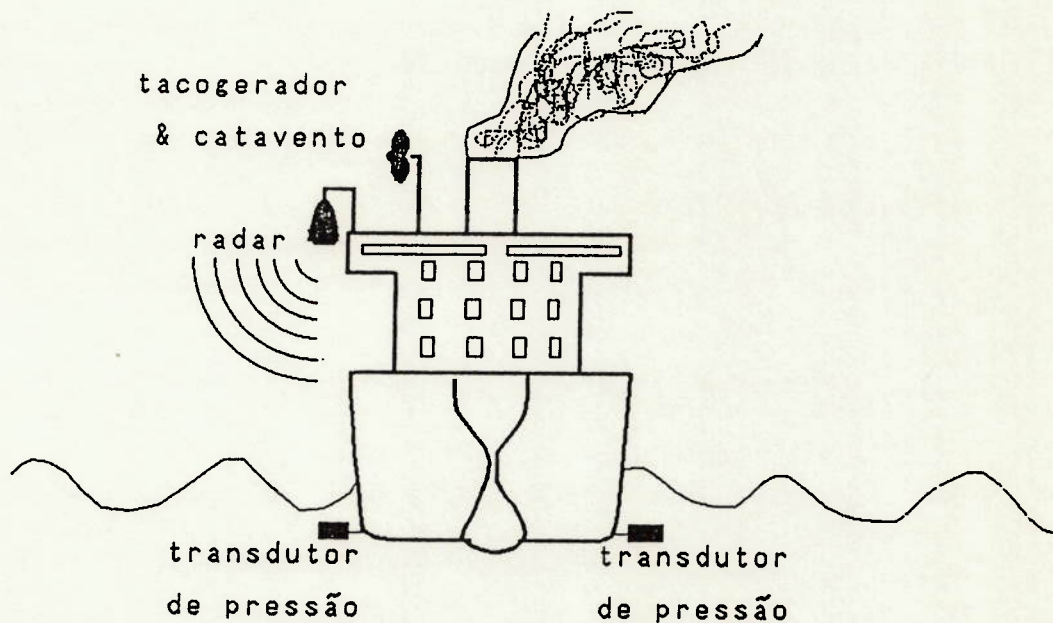


FIG.5.6. Sensores para Forças Externas

CAPITULO VI -IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO

6.1. Introdução

Nos capitulos anteriores apresentou-se uma descrição do problema de pilotagem automática de uma embarcação e da escolha do índice de desempenho, os fundamentos teóricos necessários para o projeto do piloto e os modelos matemáticos utilizados para representar o movimento do navio. Neste capítulo se descreve como foi implementada a solução.

Houve um Filósofo que em uma frase de efeito afirmou: "Se a Teoria não esta de acordo com a Prática, dane-se a prática". E bem verdade que a referência definiu o autor desta frase como filósofo. No caso do problema em análise não há melhor comprovação do que a Prática. Ocorre que o custo da determinação da solução através de ensaios em escala real é extremamente alta, assim costuma-se realizar etapas intermediárias de análise e simulação de forma a reduzir o custo. Neste trabalho, a implementação da solução do problema de pilotagem automática foi realizada somente a nível de programas computacionais e o alcance dos resultados é consequentemente limitado pelos modelos e aproximações realizadas.

6.2. Procedimentos e Algoritmos

Antes de se efetuar a descrição do programa computacional, convém mencionar que os mesmos foram desenvolvidos durante a permanência do autor deste trabalho na Universidade Nacional de Yokohama-Departamento de Engenharia Oceânica, onde utilizou-se de subrotinas disponíveis em pacotes comerciais para o manuseio de matrizes. No caso um pacote denominado de MSLII -Mathematical Sub-program LibraryII -Hitachi. As subrotinas utilizadas foram:

- DVMFM: multiplicação de matrizes;
- DVAFM: soma de matrizes;
- DVAHM: soma de vetores;
- DIF1M: inversão de matrizes;
- DNSBM: resolução de um sistema algébrico não linear-
método de Brent;
- DLF1M: resolução de um sistema algébrico linear-
método de Gauss.

O programa computacional foi desenvolvido em duas etapas, que diferem quanto à técnica de solução do problema de controle, especificamente a solução da equação algébrica de Riccati.

Na primeira considerou-se um vetor de estados composto por tres estados $[v, r, \delta]$, conforme a equação (4.45). Na segunda considerou-se um vetor de estado composto por quatro estados $[v, r, \delta, \psi]$. A segunda etapa foi desenvolvida devido a algumas limitações, que surgiram durante a utilização das subrotinas até então existentes. Ambas etapas constam deste capítulo; as limitações observadas, quando da utilização das subrotinas desen-

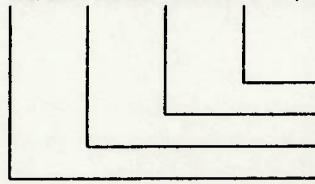
volvidas na primeira e segunda etapas, estão expostas no capítulo VII.

6.2.1.0 Corpo Principal do Programa

O programa computacional foi essencialmente organizado como indicado anteriormente na FIG.3.4. que é repetida abaixo na FIG.6.1..Note-se que na listagem a varredura do índice de desempenho permite a alteração de todos itens de uma matriz quadrada simétrica Q_0 de dimensão $n \times n$, porém só se variou os termos da diagonal principal, sendo que os demais termos são considerados nulos. A varredura do índice de desempenho foi organizada de forma a poder-se ajustar a localização da faixa pesquisada, bem como a abertura da malha de busca como mostra a FIG.6.2. Foi necessário obedecer a limitação imposta pela máquina utilizada; quanto ao número máximo de elementos de um vetor-3120 elementos. Como saída tem-se os índices de desempenho que são identificados pelo código QR(I):

vetor de estado $[v, r, \delta]$

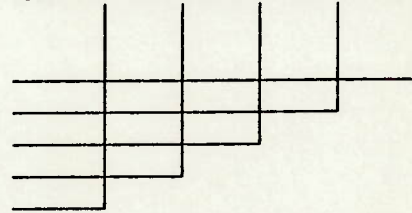
QR(I) = xxx.xxx.xxx.xx,x



vetor de estado $[v, r, \delta, \psi]$

QR(I) = xxx.xxx.xxx.xxx.xx,x

Q11
R0
Q22
Q33
Q44



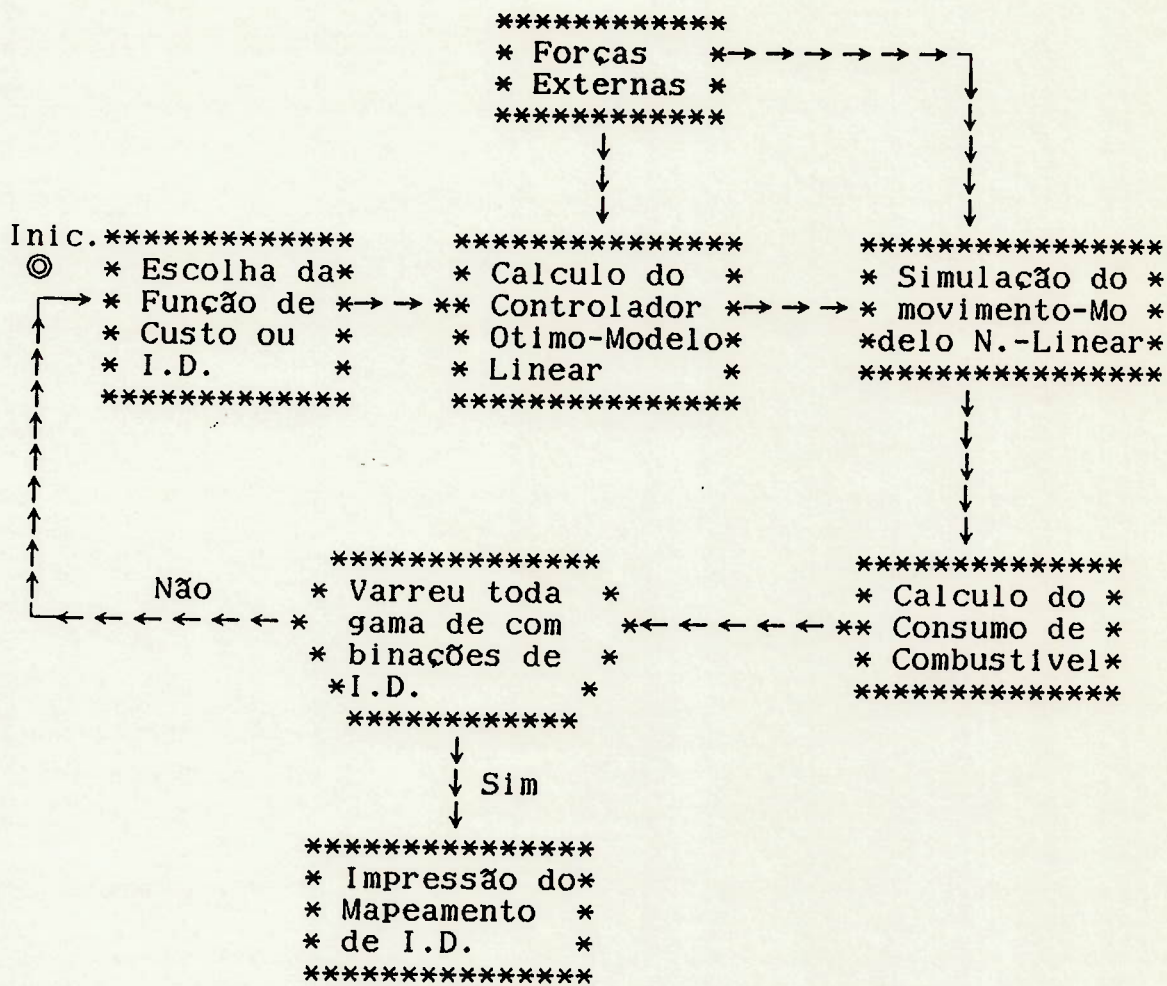


FIG.6.2.Mapeamento do Indice de Desempenho com relação ao Consumo

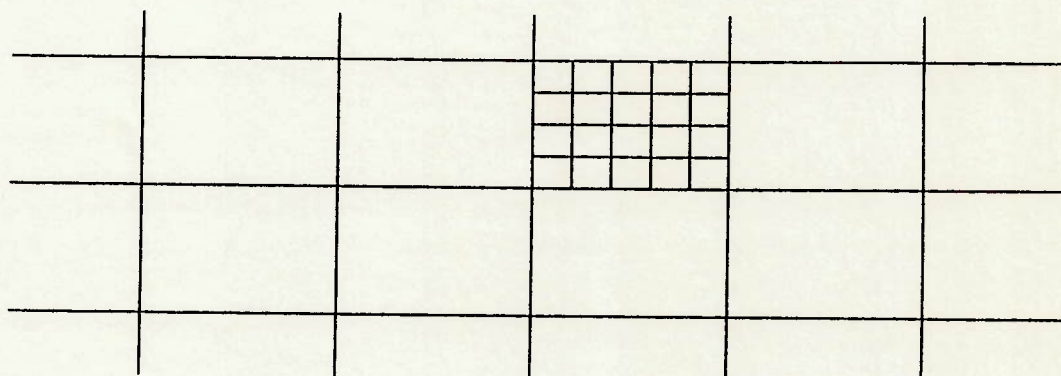


FIG.6.1.Abertura da Malha de Busca

A linguagem utilizada é o FORTRAN-77 e a listagem do programa consta do apêndice A.

6.2.2.2. Subrotinas para Projeto do Controlador-1ª Etapa

Quatro subrotinas e uma função externa foram utilizadas; subrotinas {PORTA2, PORTA, EST, ZKK}, função externa {FUN}.

6.2.2.1. Subrotina PORTA2

Esta subrotina calcula a parcela que independente das forças externas; correspondente a matriz P do controlador ótimo indicado em (2.23); utilizando a primeira das equações (2.22) no caso invariante no tempo, conhecida por equação algébrica de Riccati.

$$P \cdot A_0 - P \cdot B_0 \cdot (R_0)^{-1} \cdot B_0^T \cdot P + Q_0^T + A_0^T \cdot P = 0 \quad (6.1)$$

Do modelo matemático linear de movimento (4.45) tem-se

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{19} & a_{20} & a_{21} \\ 0 & 0 & a_1 \end{bmatrix} \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Considerando-se o item 3.3. "Mapeamento do I.D." e o Teorema de Silvester (item 2.2.1) tem-se a forma geral de Q_0 & R_0 :

$$R_0 = \lambda \quad \text{com } \lambda > 0$$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \quad \text{com } \begin{matrix} Q_{11} \geq 0 \\ Q_{22} \geq 0 \\ Q_{33} \geq 0 \end{matrix} \quad (6.3)$$

Além disso como mencionado no item 2.3. P é uma matriz simétrica e definida positiva. Algumas técnicas iterativas para a solução geral das equações de Riccati constam das referências [81, 82, 83]. Adotou-se a técnica iterativa sugerida por Kleinman [81], aplicável a um sistema da forma:

$$\dot{x}(t) = A_0 \cdot x(t) + B_0 \cdot u(t) \quad , \quad x(0) = x_0 \quad (6.4)$$

com índice de desempenho quadrático do tipo:

$$I.D. = \int_0^{\infty} [x^T(t) \cdot Q_0 \cdot x(t) + u^T(t) \cdot R_0 \cdot u(t)] dt \quad (6.5)$$

onde, $R_0 > 0$ e $[A_0, C]$ é completamente observável com $Q_0 = C^T \cdot C$.

Neste caso, o algoritmo sugerido por Kleinman pode ser expresso considerando V_k , $k=0,1,\dots$ a única solução definida positiva da equação algébrica linear:

$$BA_k^T * V_k + V_k * BA_k + Q_0 + L_k^T * R_0 * L_k = 0 \quad (6.6)$$

onde recursivamente,

$$L_k = R^{-1} * B_0^T * V_{k-1}, \quad k=1,2,\dots \quad (6.7)$$

$$BA_k = A_0 - B_0 * L_k \quad (6.8)$$

e L_0 é escolhido, de forma que a matriz $BA_0 = A_0 - B_0 * L_0$ tenha autovalores com parte real negativa. Neste caso:

$$P \leq V_{k+1} \leq V_k \leq \dots, \quad k=0,1,2,\dots$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} V_k = P \quad (6.9)$$

e

$\lim_{k \rightarrow \infty} L_k = R_0^{-1} * B^T * P$ é o ganho ótimo do controlador.

A convergência de V_k para P é monotônica e quadrática. A referência [81] obteve uma convergência satisfatória em 10 iterações para sistemas de até 10 variáveis de estado. Na subrotina PORTA2 efetua-se 15 iterações como indicado na FIG.6.3.

Durante a fase de teste desta subrotina, o resultado obtido em PORTA2 foi utilizado como ponto inicial de busca para a subrotina PORTA, que obtém a solução de um sistema algébrico não linear. A solução obtida através da subrotina PORTA, pode ou não ser definida positiva, dependendo do ponto inicial de busca. Além disso, a subrotina PORTA melhora a convergência da solução obtida através da subrotina PORTA2.

Como última verificação do resultado obtido na subrotina PORTA2, verificou-se através da subrotina EST, se a solução obtida é definida positiva, com indicado na FIG.6.4.

A subrotina PORTA2 foi implementada para um micro-computador em linguagem C. A listagem do programa para o micro-computador consta do apêndice E.

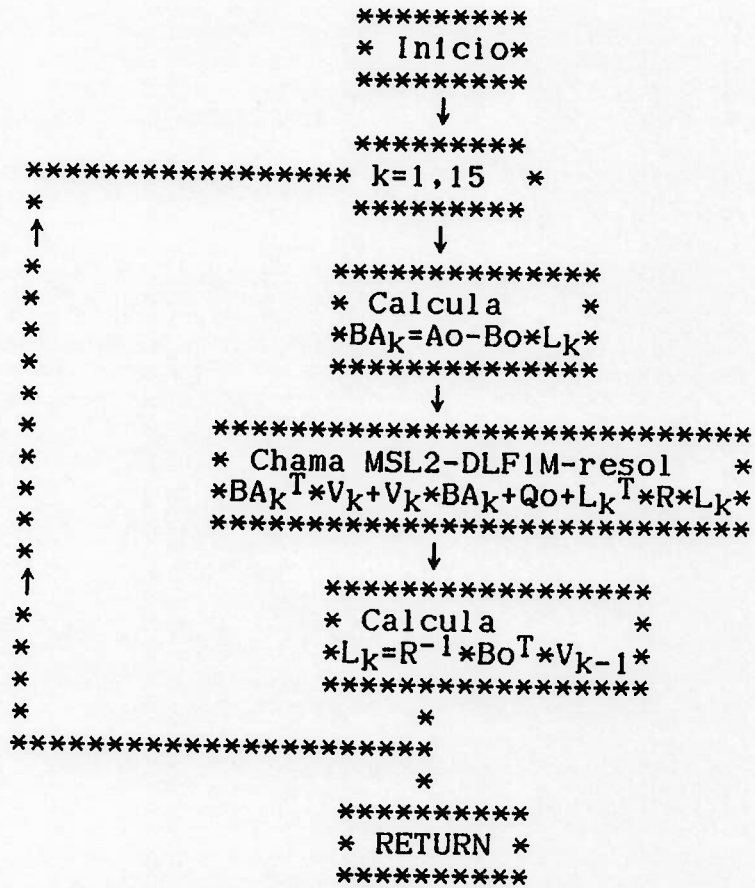


FIG.6.3.Diagrama de Blocos da Subrotina PORTA2

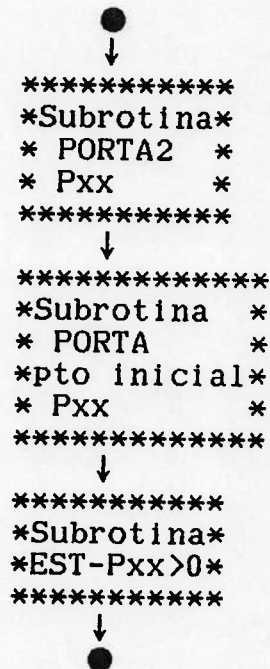


FIG.6.4.Diagrama de Blocos Utilizado para a Solução da Equação de Riccati

6.2.2.2.Subrotina PORTA

Esta subrotina calcula uma das soluções de um sistema algébrico de equações não lineares.

A equação algébrica de Riccati (6.1) para o sistema mencionado em (6.2) e (6.3) é :

$$-a1^2*p13^2/\lambda +Q11+2*p11*a16+2*p12*a19=0 \quad (6.10)$$

$$-a1^2*p13*p23/\lambda +a17*p11+p12*a20+p12*a16+a19*p22=0$$

$$-a1^2*p33*p13/\lambda +p13*a16+p23*a19+p11*a18+p12*a21+p13*a1=0$$

$$-a1^2*p23^2/\lambda +Q22+2*p12*a17+2*a20*p22=0$$

$$-a1^2*p33*p23/\lambda +a17*p13+p23*a20+a18*p12+a21*p22+a1*p23=0$$

$$-a1^2*p33^2/\lambda +Q33+2*p13*a18+2*a21*p23+2*a1*p33=0$$

Dependendo do ponto inicial de busca, a subrotina pode ou não fornecer a única solução definida positiva. Donde utilizou-se a solução obtida em PORTA2 como ponto inicial de busca.

A subrotina foi organizada como mostra o diagrama de blocos da FIG.6.5..

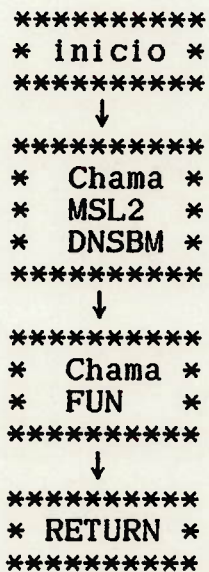


FIG.6.5.Diagrama de Blocos da Subrotina PORTA

6.2.2.3.Funcção FUN:

Descreve o sistema de equações algébricas de Riccati.

6.2.2.4.Subrotina EST:

Verifica se a parcela do controlador resultante da solução

da equação algébrica de Riccati, é Liapunov estável; ou seja verifica se a matriz solução P é definida positiva, como mencionado na seção 2.3. Segue-se diagrama de blocos.

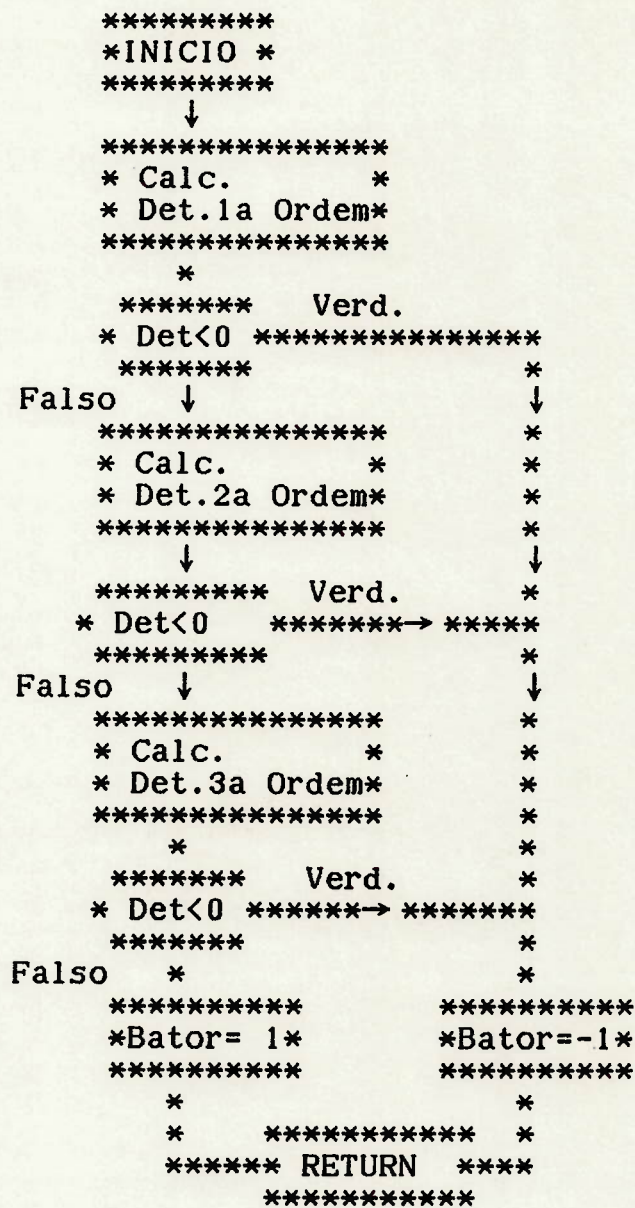


FIG.6.6.Diagrama de Blocos da Subrotina EST

6.2.2.5.Subrotina Zxk

Esta subrotina efetua o cálculo da parcela dependente das forças externas, correspondente ao vetor K do controlador ótimo em (2.23), utilizando a segunda das equações (2.22):

$$\dot{K} - P * B_o * (R_o^T)^{-1} * B_o^T * K + P * F + A_o^T * K = 0 \quad (6.11)$$

Resultam as seguintes equações:

$$\begin{bmatrix} \dot{K} 1 \\ \dot{K} 2 \\ \dot{K} 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a16 & -a19 & p13*a1^2/\lambda \\ -a17 & -a20 & p23*a1^2/\lambda \\ -a18 & -a21 & -a1+p33*a1^2/\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K1 \\ K2 \\ K3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -p11*c1-p12*c2 \\ -p12*c1-p22*c2 \\ -p13*c1-p23*c2 \end{bmatrix}$$

(6.12)

Onde $c1 = af1*F2 + af2*F6$
 $c2 = af3*F2 + af4*F6$

Para sistemas invariantes no tempo tem-se $\dot{K} = 0$, donde a solução deste sistema de equações é dado por:

$$K = (AE)^{-1} * PF \quad (6.13)$$

onde:

$$AE = \begin{bmatrix} -a16 & -a19 & p13*a1^2/\lambda \\ -a17 & -a20 & p23*a1^2/\lambda \\ -a18 & -a21 & -a1+p33*a1^2/\lambda \end{bmatrix}$$

(6.14)

O diagrama de blocos consta da FIG.6.7.

```

*****
*Início*
*****
*
*****
*Condições *
* Iniciais *
*****
↓
*****
* Chama *
*MSL2-DIF1M*
* AE-1 *
*****
*
*****
* Calcula *
* AE-1*PF *
*****
↓
*****
*RETURN*
*****

```

FIG.6.7. Diagrama de Blocos da Subrotina Zxk

6.2.3. Subrotinas para Projeto do Controlador-2ª Etapa

Quatro subrotinas e uma função externa foram utilizadas, subrotinas {BARUD2, BARUD, EST4, ZXK4} e função externa {FUN4}.

6.2.3.1. Subrotina BARUD2

Esta subrotina calcula a parcela que independente das forças externas; correspondente a matriz P do controlador ótimo indicado em (2.23.); utilizando a primeira das equações (2.22.) no caso invariante no tempo, conhecida por equação algébrica de Riccati.

$$P \cdot A_0 - P \cdot B_0 \cdot (R_0)^{-1} \cdot B_0^T \cdot P + Q_0 + A_0^T \cdot P = 0 \quad (6.15)$$

A subrotina BARUD2 difere da subrotina PORTA2 no que se refere a técnica iterativa de solução da equação algébrica de Riccati. Enquanto a subrotina PORTA2 utiliza o algoritmo sugerido por Kleinman[81], a subrotina BARUD2 utiliza o algoritmo da Matriz de Sinal sugerido por Barraud[82].

Considere-se um modelo de trabalho (4.45) ampliado, introduzindo-se um estado correspondente ao rumo (ψ). Neste caso o modelo matemático linear de movimento expandido será:

$$x^T = [v \ r \ \delta \ \psi]$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_{16} & a_{17} & a_{18} & 0 \\ a_{19} & a_{20} & a_{21} & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(6.16)

Considerando a forma geral de Q_0 & R_0 :

$$R_0 = \lambda \quad \text{com } \lambda > 0$$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix} \quad \text{com } \begin{matrix} Q_{11} \geq 0 \\ Q_{22} \geq 0 \\ Q_{33} \geq 0 \\ Q_{44} \geq 0 \end{matrix}$$

(6.17)

A técnica iterativa sugerida por Barraud[82] é aplicável a um sistema da forma:

$$\dot{x}(t) = A_0 \cdot x(t) + B_0 \cdot u(t) \quad , \quad x(0) = x_0 \quad (6.18)$$

com índice de desempenho quadrático do tipo:

$$I.D. = \int_0^{\infty} [x^T(t) \cdot Q_0 \cdot x(t) + u^T(t) \cdot R_0 \cdot u(t)] dt \quad (6.19)$$

onde: $R_0 > 0$;
 $[A_0, C]$ é completamente observável com $Q_0 = C^T * C > 0$;
 $[A_0, B_0]$ é estabilizável.

Neste caso, o algoritmo da Matriz de Sinal é expresso considerando P a única solução definida positiva da equação algébrica de Riccati. Constrói-se a matriz Hamiltoniana de dimensão $2n \times 2n$:

$$H = \begin{bmatrix} A_0 & -B_0 * R_0^{-1} * B_0^T \\ -Q_0 & -A_0^T \end{bmatrix} \quad 2n \times 2n \quad (6.20)$$

Na forma canônica de Jordan:

$$H = \begin{bmatrix} W_1 & W_{12} \\ W_{21} & W_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -J & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} W_1 & W_{12} \\ W_{21} & W_2 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

onde: W_1, W_2, W_{12}, W_{21} são matrizes de dimensão $n \times n$;
 J é uma matriz $n \times n$ composta de blocos de Jordan.

Prova-se que:

$$P = W_{21} * W_1^{-1} \quad (6.22)$$

A matriz W é obtida através da matriz de sinal S segundo o seguinte procedimento:

$$S_0 = H \quad (6.23)$$

$$S_{k+1} = 1/2 * (S_k + S_k^{-1}) \quad (6.24)$$

$$S = \lim_{k \rightarrow \infty} S_k \quad (6.25)$$

$$W = S + \begin{bmatrix} -I_n & 0 \\ 0 & I_n \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

onde: S é a matriz de sinal da Hamiltoniana;
 I_n é a matriz identidade de ordem n .

O processo iterativo é truncado quando:

$$| S_{ij}^{k+1} - S_{ij}^k | \leq \epsilon \quad \text{para qualquer } ij=1, \dots, 2n \quad (6.27)$$

onde: S_{ij}^k é o elemento da linha i , coluna j da matriz S na iteração k ;
 ϵt é a precisão de truncamento desejada.

P é obtido através de (6.18).

O algoritmo descrito representa o método de Newton na forma matricial. Segundo a referência, o algoritmo foi implementado para sistemas de dimensão variando de 2 a 25.

Durante a fase de teste desta subrotina, o resultado obtido em BARUD2 foi utilizado como ponto inicial de busca para a subrotina BARUD, que obtém a solução de um sistema algébrico não linear. A solução obtida através da subrotina BARUD pode ou não ser definida positiva, dependendo do ponto inicial de busca.

Como última verificação do resultado obtido na subrotina BARUD2, verificou-se através da subrotina EST4, se a solução obtida é definida positiva.

A subrotina BARUD2 foi implementada para um micro-computador em linguagem C. A listagem consta do apêndice J.

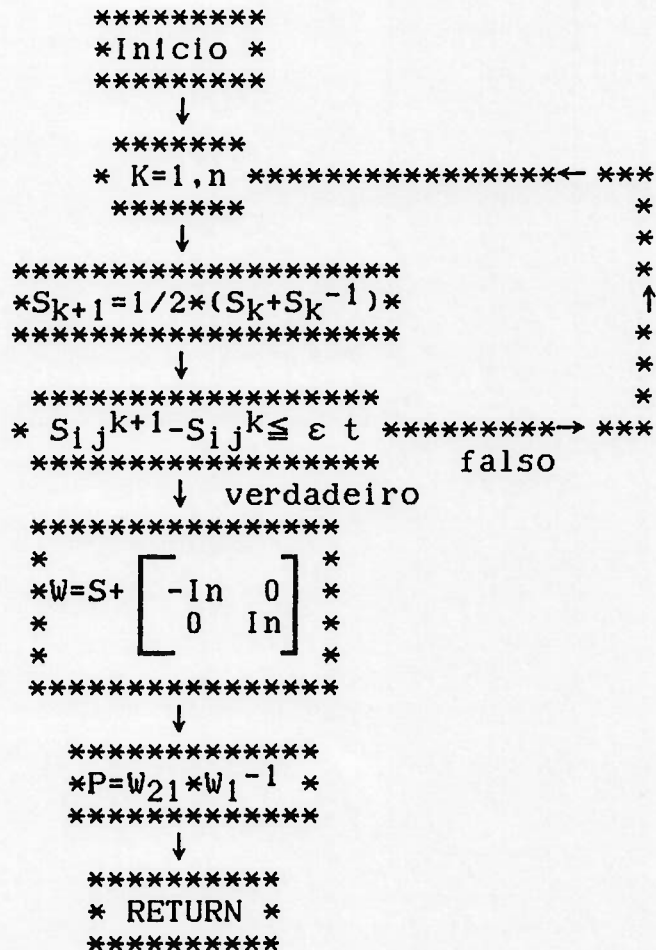


FIG.6.8.Diagrama de Blocos da Subrotina BARUD2

6.2.3.2.Subrotina BARUD

Esta subrotina calcula uma das soluções de um sistema algébrico de equações não lineares.

A equação algébrica de Riccati (6.15) para o sistema mencionado em (6.16) e (6.17) é :

$$\begin{aligned} & -a_1^2 * p_{13}^2 / \lambda + Q_{11} + 2 * p_{11} * a_{16} + 2 * p_{12} * a_{19} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{13} * p_{23} / \lambda + p_{41} + a_{17} * p_{11} + p_{12} * a_{20} + p_{12} * a_{16} + a_{19} * p_{22} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{33} * p_{13} / \lambda + p_{13} * a_{16} + p_{23} * a_{19} + p_{11} * a_{18} + p_{12} * a_{21} + p_{13} * a_1 = 0 \\ & -a_1^2 * p_{23}^2 / \lambda + Q_{22} + 2 * p_{42} + 2 * p_{12} * a_{17} + 2 * a_{20} * p_{22} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{33} * p_{23} / \lambda + p_{43} + a_{17} * p_{13} + p_{23} * a_{20} + a_{18} * p_{12} + a_{21} * p_{22} + a_1 * p_{23} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{33}^2 / \lambda + Q_{33} + 2 * p_{13} * a_{18} + 2 * a_{21} * p_{23} + 2 * a_1 * p_{33} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{43}^2 / \lambda + Q_{44} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{13} * p_{43} / \lambda + p_{41} * a_{16} + a_{19} * p_{42} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{23} * p_{43} / \lambda + p_{44} + p_{41} * a_{17} + a_{20} * p_{42} = 0 \\ & -a_1^2 * p_{43} * p_{33} / \lambda + a_{18} * p_{41} + a_{21} * p_{42} + a_1 * p_{43} = 0 \end{aligned} \tag{6.28}$$

Dependendo do ponto inicial de busca, a subrotina pode ou não fornecer a única solução definida positiva; utilizou-se a solução obtida em BARUD2 como ponto inicial de busca. A subrotina BARUD é uma extensão para uma dimensão 4 x 4 da subrotina PORTA, sendo organizada da mesma forma.

6.2.3.3.Funcção FUN4

Descreve o sistema de equações algébricas de Riccati de dimensão 4 x 4.

6.2.3.4.Subrotina EST4

Verifica se a parcela do controlador resultante da solução da subrotina BARUD é Liapunov estável; ou seja verifica se a matriz solução P é definida positiva, como mencionado na seção 2.3. A subrotina EST4 é uma extensão para uma dimensão 4 x 4 da subrotina EST, sendo organizada similarmente.

6.2.3.5.Subrotina Zxk4

Esta subrotina efetua o calculo da parcela dependente das forças externas correspondentes ao vetor K do controlador ótimo em (2.23), utilizando a segunda das equações (2.22):

$$\dot{K} - P*Bo*(Ro^T)^{-1}*Bo^T*K + P*F + Ao^T*K = 0 \quad (6.29)$$

Resultam as seguintes equações:

$$\begin{bmatrix} \dot{K} 1 \\ \dot{K} 2 \\ \dot{K} 3 \\ \dot{K} 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a16 & -a19 & p13*a1^2/\lambda & 0 \\ -a17 & -a20 & p23*a1^2/\lambda & -1 \\ -a18 & -a21 & -a1+p33*a1^2/\lambda & 0 \\ 0 & 0 & p43*a1^2/\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K1 \\ K2 \\ K3 \\ K4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -p11*c1-p12*c2 \\ -p12*c1-p22*c2 \\ -p13*c1-p23*c2 \\ -p41*c1-p42*c2 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

$$\text{Onde } c1 = af1*F2 + af2*F6 \\ c2 = af3*F2 + af4*F6$$

Para sistemas invariantes no tempo tem-se $\dot{K} = 0$, donde a solução deste sistema de equações é dado por:

$$K = (AE)^{-1} * PF \quad (6.31)$$

onde:

$$AE = \begin{bmatrix} -a16 & -a19 & p13*a1^2/\lambda & 0 \\ -a17 & -a20 & p23*a1^2/\lambda & -1 \\ -a18 & -a21 & -a1+p33*a1^2/\lambda & 0 \\ 0 & 0 & p43*a1^2/\lambda & 0 \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

A subrotina Zxk4 é uma extensão para dimensão 4 x 4 da subrotina Zxk, sendo organizada similarmente.

6.2.3. Subrotina FOR20N

Efetua uma aproximação das forças de ondas de 2ª ordem como mencionado na seção 4.3.4.4.6., utilizando dados obtidos para um navio tanque ancorado; a frequência de encontro e o deslocamento do navio são dados de entrada para a subrotina. Os resultados obtidos para alguns ângulos de encontro são expandidos para todos ângulos de encontro, considerando uma variação linear das forças como mostra a FIG.6.9.

Bombordo	Mar Proa	Popa	Bochecha	Aleta	Través
F1	mínimo	máximo	variando	variando	nula
F2	nula	nula	variando	variando	máximo
F6	nula	nula	máximo	mínimo	nula

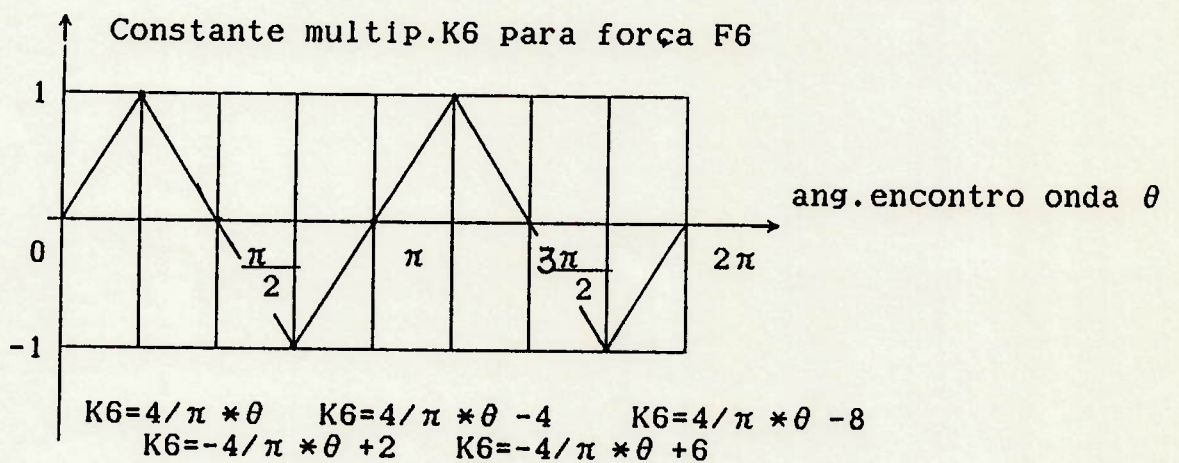
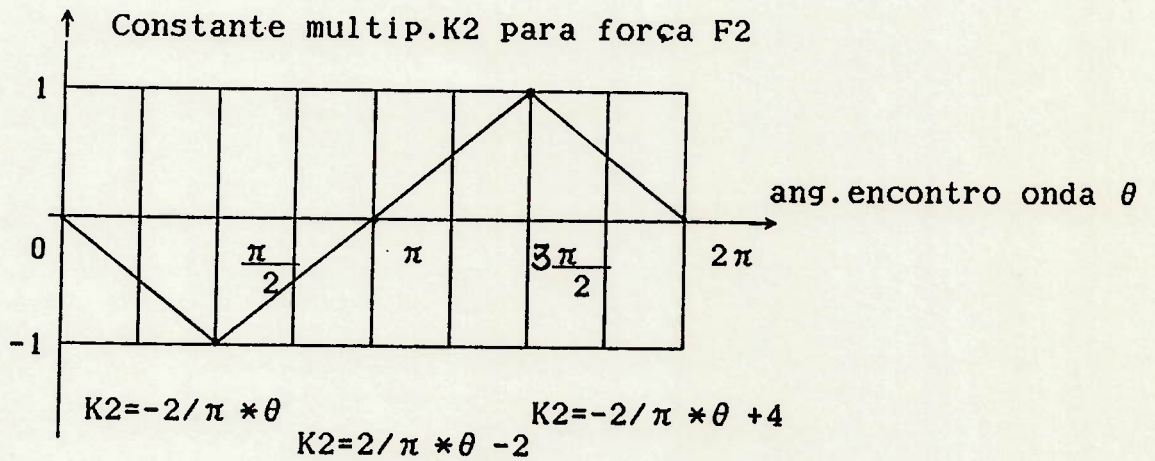
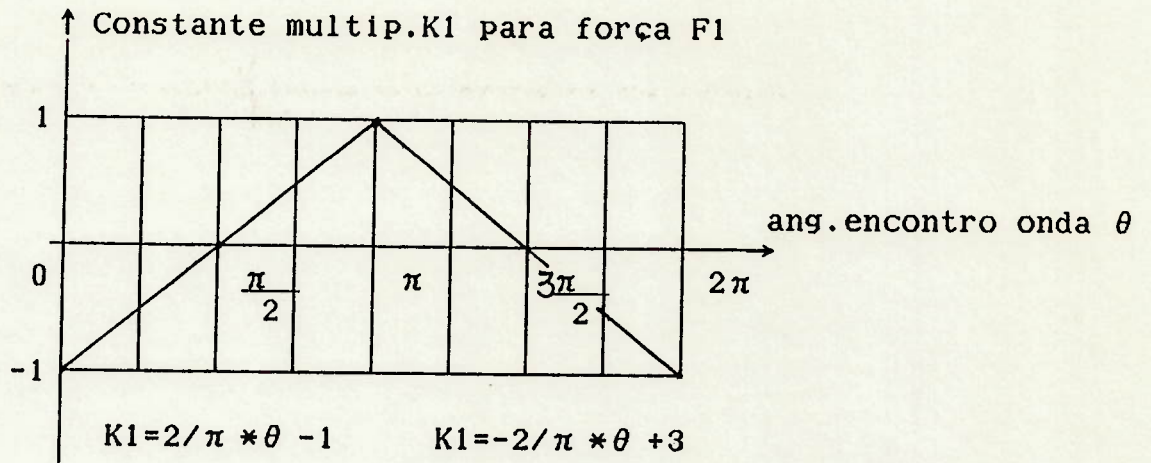


FIG.6.9. Expansão dos Resultados para Qualquer Ângulo de Encontro

Os resultados da FIG.4.9. obtidos para o navio ancorado foram aproximados pelas seguintes retas:

Fwe	F1
0 a 0,8	0
0,8 a 1,5	$5/8 * Fwe - 3,5/8$
1,5 a 1,8	$-Fwe + 2$
1,8 a 2,2	0,25
2,2 a ∞	0

Fwe	F2
0 a 1	0
1 a 2,2	$-3,1 * Fwe + 10,6$
2,2 a ∞	0

Fwe	F6
0 a 0,8	0
0,8 a 1,2	$-3,33 * Fwe + 3,33$
1,2 a 1,35	$15 * Fwe - 19$
1,35 a 1,7	$-5 * Fwe + 8$
1,7 a 2,2	$2,1 * Fwe - 4,2$
2,2 a ∞	0

Tabela 6.1. Resultados Aproximados do Navio Ancorado

Considerou-se como representativa a onda descrita em (4.38). O diagrama de blocos da subrotina encontra-se na FIG.6.10.



FIG.6.10. Diagrama de Blocos da Subrotina FOR20N

6.2.4. Subrotina FORION

Efetua o cálculo da componente de 1ª Ordem da força de ondas, utilizando a hipótese de Froude-Krylov e a Teoria de Faixas como expresso em 4.3.4.4.2.; considerou-se o navio dividido em 20 seções (faixas) e o potencial da onda foi expresso através de (4.27) e a força expressa por (4.28):

$$\phi_i = \frac{e^{kz}}{\omega} * \frac{1}{\omega} * g * A * e^{-i*k*(x*\cos\theta - y*\sen\theta)} \quad (6.33)$$

$$F_j^i = -i * \rho * \omega * \iint_S n_j * \phi_i \, ds \quad (6.34)$$

donde obtem-se:

$$\begin{aligned} \text{Re } F1 &= \frac{\rho * g * A}{k} * (e^{k*h} - 1) * \left\{ \sum_{i=1,20} \tan(\text{casco}) * [\cos(k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) + \cos(-k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta)] \right\} * \text{del } x \\ \text{Im } F1 &= \frac{\rho * g * A}{k} * (e^{k*h} - 1) * \left\{ \sum_{i=1,20} \tan(\text{casco}) * [\sen(k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) - \sen(-k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta)] \right\} * \text{del } x \end{aligned} \quad (6.35)$$

$$\begin{aligned} \text{Re } F2 &= \frac{\rho * g * A}{k} * (e^{k*h} - 1) * \left\{ \sum_{i=1,20} \cos(k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) - \cos(-k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) \right\} * \text{del } x \\ \text{Im } F2 &= \frac{\rho * g * A}{k} * (e^{k*h} - 1) * \left\{ \sum_{i=1,20} \sen(k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) - \sen(-k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) \right\} * \text{del } x \end{aligned} \quad (6.36)$$

Admitindo-se o navio com formas finas tem-se:

$$\cos(\eta, x6) = x * \cos(\eta, x2) \quad (6.37)$$

$$\begin{aligned} \text{Re } F6 &= \frac{\rho * g * A}{k} * (e^{k*h} - 1) * \left\{ \sum_{i=1,20} x * \cos(k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) - x * \cos(-k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) \right\} * \text{del } x \\ \text{Im } F6 &= \frac{\rho * g * A}{k} * (e^{k*h} - 1) * \left\{ \sum_{i=1,20} x * \sen(k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) - x * \sen(-k*y_m * \sen\theta - k*x * \cos\theta) \right\} * \text{del } x \end{aligned} \quad (6.38)$$

O diagrama de blocos da subrotina é mostrado na FIG.6.11.



FIG.6.11.Diagrama de Blocos da Subrotina FOR10N

6.2.5.Subrotina FORVEN

Efetua uma estimativa das forças geradas pela ação do vento,utilizando-se os resultados obtidos para diversos tipos de embarcações mencionado no item 4.3.4.2.Os resultados foram linearizados como se segue:

FI		CXA, CYA, XA
0	a 40	$XA = -0,2/40 * FI + 0,3$ $CYA = 0,6/40 * FI * (-1)^N$ $CXA = 0,1/40 * FI - 0,9$
40	a 90	$XA = -0,1/50 * FI + 0,9/5$ $CYA = (0,25/50 * FI + 0,4) * (-1)^N$ $CXA = 0,8/50 * FI - 7,2/5$
90	a 140	$XA = -0,1/50 * FI + 0,9/5$ $CYA = (-0,25/50 * FI + 1,3) * (-1)^N$ $CXA = 0,6/50 * FI - 5,4/5$
140	a 180	$XA = -0,2/40 * FI + 0,6$ $CYA = (-0,6/40 * FI + 2,7) * (-1)^N$ $CXA = 0,1/40 * FI + 0,25$

Tabela 6.2. Linearização da FORVEN

Note-se que o sistema de coordenadas utilizado pela referência não é normalizado e tal que:

$$\psi_{\text{vento norm.}} = -\psi_{\text{vento ref.}} \quad (6.39)$$

```

*****
*Inicio*
*****
*
*****
* IF *****→ *****N=1 *
*FI:180 * *FI=360-FI*
*****
↓ > *
***** *
*N=2 * *
***** *
* * *
*****← *****
*
***** Verd. *****
* IF *****→ *****CYA,CXA,XA*****
*FI ≤ 40 * ***** *
***** ↓
* Falso *
***** Verd. *****
* IF *****→ *****CYA,CXA,XA*****
*FI ≤ 90 * ***** *
***** ↓
↓ Falso ↓
***** Verd. *****
* IF *****→ *****CYA,CXA,XA*****
*FI ≤ 140* ***** *
***** *
* Falso *
*****← *****
↓
*****
*Calc.F1V*
*F2V,F6V *
*****
*
*****
*RETURN*
*****

```

FIG.6.12.Diagrama de Blocos da Subrotina FORVEN

6.2.6.Subrotina Geometria

Efetua o cálculo da tangente ao casco, considerou-se o navio com forma U, ou seja a tangente na linha d'água é igual em toda faixa. A embarcação foi dividida em 20 seções e os resultados são utilizados para o cálculo da Força de 1ª Ordem conforme o item (4.3.4.4.2.).

6.2.7.Subrotina FORCOR

Efetua o cálculo da força gerada por corrente conforme o item (4.3.3.).

6.2.8.Subrotina SOMFOR

Efetua a somatória das forças externas de média nula,ou seja,forças causadas por corrente,vento e onda de 2ª ordem.

6.2.9.Subrotina MOVSH

Efetua a simulação do movimento da embarcação,utilizando o modelo não linear expresso no item 4.4.2. Os valores no instante $t+\Delta t$ são obtidos utilizando-se a expansão de 1ª ordem da Série de Taylor.Esta metodologia tem oferecido boa precisão[68], visto que as acelerações \ddot{u} , \ddot{v} , \ddot{r} variam lentamente com o tempo devido a grande massa e inércia do navio,quando comparadas com as forças externas e de controle.

$$\begin{aligned} u(t+\Delta t) &= u(t) + \Delta t \cdot \dot{u}(t) \\ v(t+\Delta t) &= v(t) + \Delta t \cdot \dot{v}(t) \\ r(t+\Delta t) &= r(t) + \Delta t \cdot \dot{r}(t) \\ \delta(t+\Delta t) &= \delta(t) + \Delta t \cdot \dot{\delta}(t) \end{aligned} \quad (6.40)$$

Esta subrotina também efetua o cálculo da parcela de avaliação do índice de desempenho correspondente a componente da velocidade na direção do rumo desejado,como expresso nas equações (3.16) & (3.17).

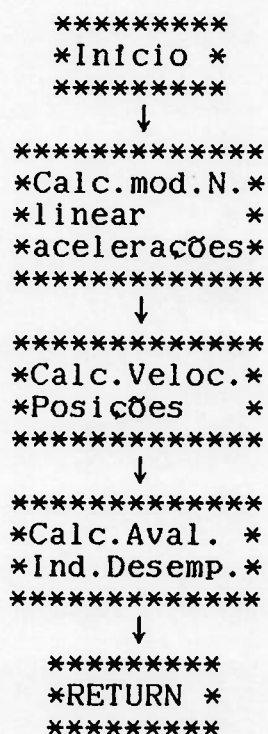


FIG.6.13.Diagrama de Blocos da Subrotina MOVSH

CAPITULO VII -Análise de Resultados

7.1.Introdução

Os resultados podem ser divididos em dois grupos:

- determinação do controlador ótimo para um índice de desempenho quadrático.
- mapeamento deste índice de desempenho quadrático com relação ao consumo de combustível,utilizando o avaliador proposto em (3.20).

7.2.Determinação do Controlador Ótimo:

Na determinação do controlador ótimo foram utilizados os algoritmos de Kleinman [81] e da Matriz de Sinal [82],obtendo-se dois tipos de resultados;o primeiro válido para um vetor de estado composto por $[v,r,\delta]$ e o segundo válido para um vetor de estado composto por $[v,r,\delta,\psi]$.

7.2.1.Controlador Ótimo L.Q.-Algoritmo de Kleinman [81]

Uma amostra dos resultados obtidos consta nas tabelas 7.1. e 7.2..Os resultados das tabelas 7.1. foram obtidos utilizando um microcomputador(apêndice E) e aplicam-se a um navio tipo Mariner com uma constante de tempo igual a 62,5 seg.Já os resultados das tabelas 7.2. foram obtidos utilizando-se um computador Hitachi (apêndice H).Estes resultados também são válidos para um navio tipo Mariner,porém com uma constante de tempo de 3 segundos para a máquina do leme.

Na FIG.7.1. são mostrados os ganhos do controlador ótimo L.Q., quando se varia a relação R/Q_{22} ,penalizando-se ou não todos os termos da matriz Q_0 .A variação dos ganhos é pequena,quando da inclusão dos fatores de penalização Q_{11} e Q_{33} (velocidade de deriva e ângulo do leme respectivamente);porém não se pode tirar conclusões com relação ao peso relativo dos estados na composição dos ganhos,pois a máquina do leme com uma constante de tempo de 62,5 seg atua como um filtro passa-baixa.

Analisando-se os resultados obtidos,verifica-se o aspecto relativo à seletividade dos ganhos.Por exemplo,na FIG.7.2. mostra-se os ganhos para uma faixa de ajuste de 0,1 à 0,2 de R/Q_{22} ;os ganhos ótimos apresentam uma variação pequena.Do ponto de vista prático,é improvável que se faça manualmente os ajustes dos ganhos,para cada condição de estado de mar e carregamento,com a precisão requerida.

Na formulação do problema de controle,considerou-se a máquina do leme como não limitada.Esta hipótese merece uma análise cuidadosa.Na FIG.7.3. mostra-se os ganhos de pré-alimentação,de forma a compensar-se uma força externa gerada pela ação de ventos de bochecha de 3,6,9 e 12m/s ;estas velocidades de vento correspondem ao vento formador de um estado de mar Beaufort 2,5,7 e 8 respectivamente.

Para ventos de 12m/s,correspondentes a um vento formador de

um estado de mar Beaufort 8, o ângulo de leme máximo requerido para se compensar os esforços gerados pela ação deste vento é de aproximadamente 20° . Note-se que, para um estado de mar Beaufort 8, os aspectos relativos à economia de combustível são superados pelos aspectos relativos à segurança. Para ventos inferiores a 6 m/s , o ângulo requerido é inferior a 6° . Isto indica, que para a situação de um navio navegando em linha reta, em águas correspondentes a um estado de mar Beaufort 6, ou inferior; a hipótese relativa a uma máquina do leme não ser limitada, é aceitável.

Na FIG.7.4. mostra-se os ganhos ótimos de realimentação e pré-alimentação para uma máquina do leme com constante de tempo de 3 seg e ventos de 6 m/s ; enquanto que na FIG.7.5. mostra-se os ganhos de realimentação, penalizando-se ou não, todos os termos da matriz Q_0 . Uma observação imediata é que a influência do termo correspondente a velocidade de deriva é pequena, só tendo alguma influência no ganho da mesma; não exercendo nenhuma influência nos ganhos da taxa de variação do ângulo de guinada e no ângulo do leme.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
10	10	10	10	1.0	53.42	2.79	-13.18	2.49	39.08	5.17	5.39	1.32	-9.64	4.56	46.35	5.99
10	10	10	9	0.9	51.97	3.09	-12.86	2.72	37.16	5.78	5.32	1.33	-9.22	5.01	43.73	6.74
10	10	10	8	0.8	50.41	3.49	-12.52	3.05	35.13	6.65	5.25	1.74	-8.78	5.78	40.97	7.70
10	10	10	7	0.7	48.71	3.99	-12.15	3.58	32.94	7.75	5.16	1.78	-8.30	6.55	38.04	9.00
10	10	10	6	0.6	46.84	4.65	-11.73	4.08	30.57	9.33	5.07	2.01	-7.79	8.04	34.90	10.76
10	10	10	5	0.5	44.76	5.64	-11.27	5.03	27.96	11.62	4.97	2.47	-7.21	9.74	31.51	13.39
10	10	10	4	0.4	42.37	7.08	-10.73	6.24	25.05	15.44	4.85	3.19	-6.57	12.89	27.79	17.70
10	10	10	3	0.3	39.57	9.64	-10.10	8.60	21.70	22.67	4.70	4.21	-5.82	18.53	23.61	25.85
10	10	10	2	0.2	36.09	15.38	-9.30	14.11	17.69	42.89	4.51	6.37	-4.91	33.79	18.76	48.42
10	10	10	1	0.1	31.28		-8.15		12.38		4.24		-3.67		12.64	
10	10	10	0	0												

TABELA 7.1.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati Constante de Tempo 62.5 seg-Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA
10	10	10	10	1.0	1.30	-0.32	1.54
10	10	10	9	0.9	1.38	-0.34	1.62
10	10	10	8	0.8	1.46	-0.37	1.71
10	10	10	7	0.7	1.57	-0.40	1.81
10	10	10	6	0.6	1.70	-0.43	1.94
10	10	10	5	0.5	1.86	-0.48	2.10
10	10	10	4	0.4	2.09	-0.55	2.32
10	10	10	3	0.3	2.41	-0.65	2.62
10	10	10	2	0.2	2.95	-0.82	3.13
10	10	10	1	0.1	4.13	-1.22	4.21

TABELA 7.1.B. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de Tempo 62.5 seg-Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
10	10	0	10	1.0	49.23	3.38	-12.29	2.93	39.58	5.10	5.20	1.36	-9.77	4.38	40.60	6.48
10	10	0	9	0.9	47.62	3.79	-11.94	3.29	37.66	5.76	5.13	1.79	-9.36	5.05	38.13	7.32
10	10	0	8	0.8	45.88	4.32	-11.56	3.77	35.61	6.62	5.04	1.82	-8.91	5.57	35.53	8.39
10	10	0	7	0.7	43.98	5.04	-11.14	4.31	33.40	7.71	4.95	2.06	-8.44	6.57	32.78	9.82
10	10	0	6	0.6	41.87	6.03	-10.68	2.20	31.01	9.27	4.85	2.54	-7.92	7.90	29.85	11.84
10	10	0	5	0.5	39.49	7.46	-10.45	9.65	28.38	11.60	4.73	3.05	-7.34	9.72	26.69	14.80
10	10	0	4	0.4	36.75	9.80	-9.53	8.42	25.43	15.33	4.59	3.85	-6.69	12.44	23.25	19.72
10	10	0	3	0.3	33.47	14.23	-8.79	12.12	22.05	22.70	4.42	5.24	-5.95	18.29	19.42	29.29
10	10	0	2	0.2	29.30	25.75	-7.84	22.31	17.97	43.07	4.20	9.09	-5.03	32.72	15.02	56.30
10	10	0	1	0.1	23.30		-6.41		12.56		3.85		-3.79		9.61	
10	10	0	0	0												

TABELA 7.1.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati Constante de Tempo 62,5 seg-Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA
10	10	0	10	1.0	1.32	-0.33	1.35
10	10	0	9	0.9	1.39	-0.35	1.41
10	10	0	8	0.8	1.48	-0.37	1.48
10	10	0	7	0.7	1.59	-0.40	1.56
10	10	0	6	0.6	1.72	-0.44	1.66
10	10	0	5	0.5	1.89	-0.49	1.78
10	10	0	4	0.4	2.12	-0.56	1.94
10	10	0	3	0.3	2.45	-0.66	2.16
10	10	0	2	0.2	2.99	-0.84	2.50
10	10	0	1	0.1	4.19	-1.26	3.20

TABELA 7.1.B. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de Tempo 62,5 seg-Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
0	10	0	10	1.0	37.35	3.84	-10.55	2.93	35.39	5.14	4.90	1.24	-8.98	4.30	37.99	6.35
0	10	0	9	0.9	35.97	4.38	-10.25	3.33	33.66	5.75	4.84	1.68	-8.61	4.87	35.72	7.20
0	10	0	8	0.8	34.46	5.00	-9.92	3.87	31.83	6.63	4.76	1.71	-8.21	5.53	33.32	8.25
0	10	0	7	0.7	32.82	5.87	-9.55	4.37	29.85	7.76	4.68	1.96	-7.78	6.43	30.78	9.69
0	10	0	6	0.6	31.00	7.04	-9.15	5.29	27.70	9.31	4.59	2.23	-7.31	7.66	28.06	11.66
0	10	0	5	0.5	28.96	8.87	-8.69	6.50	25.34	11.68	4.49	2.75	-6.79	9.34	25.13	14.59
0	10	0	4	0.4	26.60	11.81	-8.16	8.51	22.69	15.47	4.37	3.55	-6.21	12.30	21.93	19.44
0	10	0	3	0.3	23.79	17.60	-7.52	12.24	19.65	22.97	4.22	4.98	-5.53	17.66	18.36	28.84
0	10	0	2	0.2	20.23	33.80	-6.70	22.49	15.98	43.83	4.02	8.06	-4.70	31.65	14.25	55.57
0	10	0	1	0.1	15.12	36.22	-5.47	23.20	11.11	45.42	3.72	8.14	-3.57	31.25	9.16	56.85
0	10	0	0	0.05	11.10		-4.44		7.64		3.44		-2.72		5.84	

TABELA 7.1.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 62,5 seg-Algoritmo de
Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA
0	10	0	10	1.0	1.18	-0.30	1.27
0	10	0	9	0.9	1.25	-0.32	1.32
0	10	0	8	0.8	1.33	-0.34	1.39
0	10	0	7	0.7	1.42	-0.37	1.47
0	10	0	6	0.6	1.54	-0.41	1.56
0	10	0	5	0.5	1.69	-0.45	1.68
0	10	0	4	0.4	1.89	-0.52	1.83
0	10	0	3	0.3	2.18	-0.61	2.04
0	10	0	2	0.2	2.66	-0.78	2.37
0	10	0	1	0.1	3.70	-1.19	3.05

TABELA 7.1.B. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de
Tempo 62.5 seg-Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
0	10	10	10	1	41.20	3.10	-11.37	2.43	34.88	5.16	5.08	1.20	-8.84	4.37	43.94	5.85
0	10	10	9	0.9	39.96	3.44	-11.10	2.78	33.17	5.84	5.02	1.41	-8.47	4.96	41.51	6.60
0	10	10	8	0.8	38.63	3.90	-10.80	3.05	31.34	6.67	4.95	1.43	-8.07	5.63	38.94	7.54
0	10	10	7	0.7	37.18	4.50	-10.48	3.46	29.38	7.78	4.88	1.67	-7.64	6.56	36.21	8.80
0	10	10	6	0.6	35.58	5.24	-10.13	4.11	27.26	9.39	4.80	1.91	-7.17	7.66	33.28	10.53
0	10	10	5	0.5	33.81	6.39	-9.73	4.96	24.92	11.70	4.71	2.39	-6.66	9.72	30.11	13.15
0	10	10	4	0.4	31.78	8.06	-9.27	6.19	22.31	15.60	4.60	2.68	-6.07	12.41	26.61	17.28
0	10	10	3	0.3	29.41	11.06	-8.73	8.58	19.30	22.93	4.48	3.70	-5.40	18.16	22.69	25.43
0	10	10	2	0.2	26.48	17.95	-8.04	13.72	15.70	43.51	4.32	6.14	-4.57	32.85	18.09	47.31
0	10	10	1	0.1	22.45		-7.07		10.94		4.07		-3.44		12.28	
0	10	10	0	0												

TABELA 7.1.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 62,5 seg- Algoritmo de
Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA
0	10	10	10	1.0	1.16	-0.29	1.46
0	10	10	9	0.9	1.23	-0.31	1.54
0	10	10	8	0.8	1.31	-0.34	1.62
0	10	10	7	0.7	1.40	-0.36	1.72
0	10	10	6	0.6	1.51	-0.40	1.85
0	10	10	5	0.5	1.66	-0.44	2.01
0	10	10	4	0.4	1.86	-0.51	2.22
0	10	10	3	0.3	2.14	-0.60	2.52
0	10	10	2	0.2	2.62	-0.76	3.01
0	10	10	1	0.1	3.65	-1.15	4.09

TABELA 7.1.B. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de
Tempo 62,5 seg- Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
0	10	0	1.0	0.1	15.12		-5.47		11.11		3.72		-3.57		9.16	
0	10	0	1.1	0.11	15.76	4.23	-5.62	2.74	11.69	5.22	3.76	1.08	-3.71	3.83	9.74	6.33
0	10	0	1.2	0.12	16.35	3.74	-5.77	2.67	12.24	4.70	3.79	0.99	-3.83	3.50	10.30	5.75
0	10	0	1.3	0.13	16.92	3.49	-5.91	2.43	12.77	4.33	3.83	0.91	-3.96	3.22	10.84	5.24
0	10	0	1.4	0.14	17.45	3.13	-6.04	2.20	13.28	3.99	3.86	0.85	-4.08	2.98	11.36	4.80
0	10	0	1.5	0.15	17.96	2.92	-6.16	1.99	13.76	3.61	3.89	0.79	-4.19	2.78	11.87	4.49
0	10	0	1.6	0.16	18.45	2.73	-6.28	1.95	14.23	3.42	3.92	0.74	-4.30	2.60	12.37	4.21
0	10	0	1.7	0.17	18.92	2.55	-6.39	1.75	14.69	3.23	3.95	0.70	-4.40	2.44	12.86	3.96
0	10	0	1.8	0.18	19.37	2.38	-6.49	1.56	15.13	2.99	3.97	0.66	-4.51	2.30	13.33	3.65
0	10	0	1.9	0.19	19.81	2.27	-6.60	1.69	15.56	2.84	4.00	0.63	-4.60	2.18	13.79	3.45
0	10	0	2.0	0.2	20.23	2.12	-6.70	1.52	15.98	2.70	4.02	0.59	-4.70	2.07	14.25	3.34

TABELA 7.1.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 62,5 seg-Algoritmo de
Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA
0	10	0	1.1	0.11	3.54	-1.12	2.95
0	10	0	1.2	0.12	3.40	-1.06	2.86
0	10	0	1.3	0.13	3.27	-1.01	2.78
0	10	0	1.4	0.14	3.16	-0.97	2.70
0	10	0	1.5	0.15	3.05	-0.93	2.63
0	10	0	1.6	0.16	2.96	-0.89	2.57
0	10	0	1.7	0.17	2.88	-0.86	2.52
0	10	0	1.8	0.18	2.80	-0.83	2.46
0	10	0	1.9	0.19	2.73	-0.81	2.41
0	10	0	2.0	0.20	2.66	-0.78	2.37

TABELA 7.1.B. Ganhos do Controlador L.Q.- Constante de
Tempo 62.5 seg-Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
10	10	10	10		29.15		-7.17		1.68		3.84		-0.66		0.73	
10	10	9	9		27.52		-6.78		1.59		3.74		-0.64		0.67	
10	10	8	8		25.81		-6.36		1.49		3.64		-0.61		0.60	
10	10	7	7		23.99		-5.92		1.38		3.52		-0.59		0.53	
10	10	6	6		22.05		-5.44		1.26		3.38		-0.56		0.47	
10	10	5	5		19.95		-4.91		1.14		3.24		-0.52		0.40	
10	10	4	4		17.67		-4.32		1.00		3.06		-0.48		0.33	
10	10	3	3		15.16		-3.65		0.84		2.85		-0.43		0.26	
10	10	2	2		12.31		-2.86		0.66		2.59		-0.38		0.19	
10	10	1	1		8.94		-1.84		0.42		2.18		-0.29		0.11	

TABELA 7.2.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati Constante de Tempo 3 seg-Algoritmo de Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA	Zkm/s ³	Zkm/s ⁶	Zkm/s ⁹	Zkm/s ¹²
10	10	10	10		1.17	-0.46	0.51	-0.016	-0.066	-0.15	-0.26
10	10	9	9		1.23	-0.49	0.51	-0.017	-0.067	-0.15	-0.27
10	10	8	8		1.29	-0.53	0.52	-0.017	-0.068	-0.15	-0.27
10	10	7	7		1.37	-0.58	0.53	-0.017	-0.069	-0.16	-0.28
10	10	6	6		1.46	-0.64	0.54	-0.018	-0.070	-0.16	-0.28
10	10	5	5		1.58	-0.72	0.55	-0.018	-0.072	-0.16	-0.29
10	10	4	4		1.73	-0.84	0.57	-0.019	-0.074	-0.17	-0.30
10	10	3	3		1.95	-1.01	0.60	-0.019	-0.077	-0.17	-0.31
10	10	2	2		2.28	-1.30	0.65	-0.020	-0.081	-0.18	-0.33
10	10	1	1		2.94	-2.01	0.76	-0.022	-0.090	-0.20	-0.36

TABELA 7.2.B. Ganhos do Controlador L.Q.- Constante de Tempo 3 seg-Algoritmo de Kleinman-Força de Vento 3.6.9.12m/s.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
10	0	10	10		17.96		-3.05		0.79		0.58		-0.15		0.63	
10	0	9	9		17.37		-2.93		0.76		0.56		-0.14		0.57	
10	0	8	8		16.73		-2.80		0.73		0.53		-0.14		0.51	
10	0	7	7		16.02		-2.65		0.69		0.50		-0.13		0.45	
10	0	6	6		15.24		-2.49		0.65		0.47		-0.12		0.39	
10	0	5	5		14.36		-2.31		0.61		0.43		-0.12		0.33	
10	0	4	4		13.34		-2.10		0.55		0.39		-0.10		0.26	
10	0	3	3		12.13		-1.86		0.49		0.34		-0.09		0.20	
10	0	2	2		10.62		-1.55		0.41		0.28		-0.07		0.14	
10	0	1	1		8.48		-1.13		0.31		0.19		-0.05		0.07	

TABELA 7.2.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3 seg- Algoritmo de
Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA	Zk
10	0	10	10		0.55	-0.10	0.44	-0.042
10	0	9	9		0.59	-0.11	0.44	-0.043
10	0	8	8		0.63	-0.12	0.44	-0.043
10	0	7	7		0.69	-0.13	0.45	-0.044
10	0	6	6		0.76	-0.14	0.45	-0.045
10	0	5	5		0.84	-0.15	0.45	-0.045
10	0	4	4		0.96	-0.17	0.46	-0.046
10	0	3	3		1.14	-0.20	0.47	-0.047
10	0	2	2		1.44	-0.25	0.48	-0.048
10	0	1	1		2.14	-0.35	0.51	-0.048

TABELA 7.2.B. Ganhos do Controlador L.Q.- Constante de
Tempo 3 seg- Algoritmo de Kleinman-Força
de Vento 6 m/s.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	P11	$\Delta P11\%$	P12	$\Delta P12\%$	P13	$\Delta P13\%$	P22	$\Delta P22\%$	P23	$\Delta P23\%$	P33	$\Delta P33\%$
0	10	10	10		21.43		-6.36		1.44		3.74		-0.63		0.72	
0	10	9	9		20.00		-6.01		1.36		3.65		-0.61		0.66	
0	10	8	8		18.49		-5.65		1.27		3.55		-0.59		0.59	
0	10	7	7		16.89		-5.25		1.18		3.44		-0.56		0.53	
0	10	6	6		15.18		-4.82		1.07		3.32		-0.54		0.46	
0	10	5	5		13.34		-4.35		0.96		3.18		-0.50		0.39	
0	10	4	4		11.34		-3.83		0.84		3.02		-0.47		0.33	
0	10	3	3		9.14		-3.24		0.70		2.82		-0.42		0.26	
0	10	2	2		6.66		-2.54		0.54		2.56		-0.37		0.18	
0	10	1	1		3.77		-1.66		0.33		2.18		-0.29		0.11	

TABELA 7.2.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3 seg- Algoritmo de
Kleinman.

Q11	Q22	Q33	R	$\frac{R}{Q22}$	V	Γ	DELTA	Zk
0	10	10	10		1.00	-0.44	0.50	-0.068
0	10	9	9		1.05	-0.47	0.51	-0.069
0	10	8	8		1.10	-0.51	0.51	-0.070
0	10	7	7		1.17	-0.56	0.52	-0.071
0	10	6	6		1.24	-0.62	0.53	-0.073
0	10	5	5		1.34	-0.70	0.55	-0.075
0	10	4	4		1.46	-0.81	0.57	-0.077
0	10	3	3		1.62	-0.98	0.59	-0.081
0	10	2	2		1.86	-1.28	0.64	-0.086
0	10	1	1		2.32	-1.99	0.75	-0.096

TABELA 7.2.B. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de
Tempo 3 seg- Algoritmo de Kleinman-Força
de Vento 6 m/s.

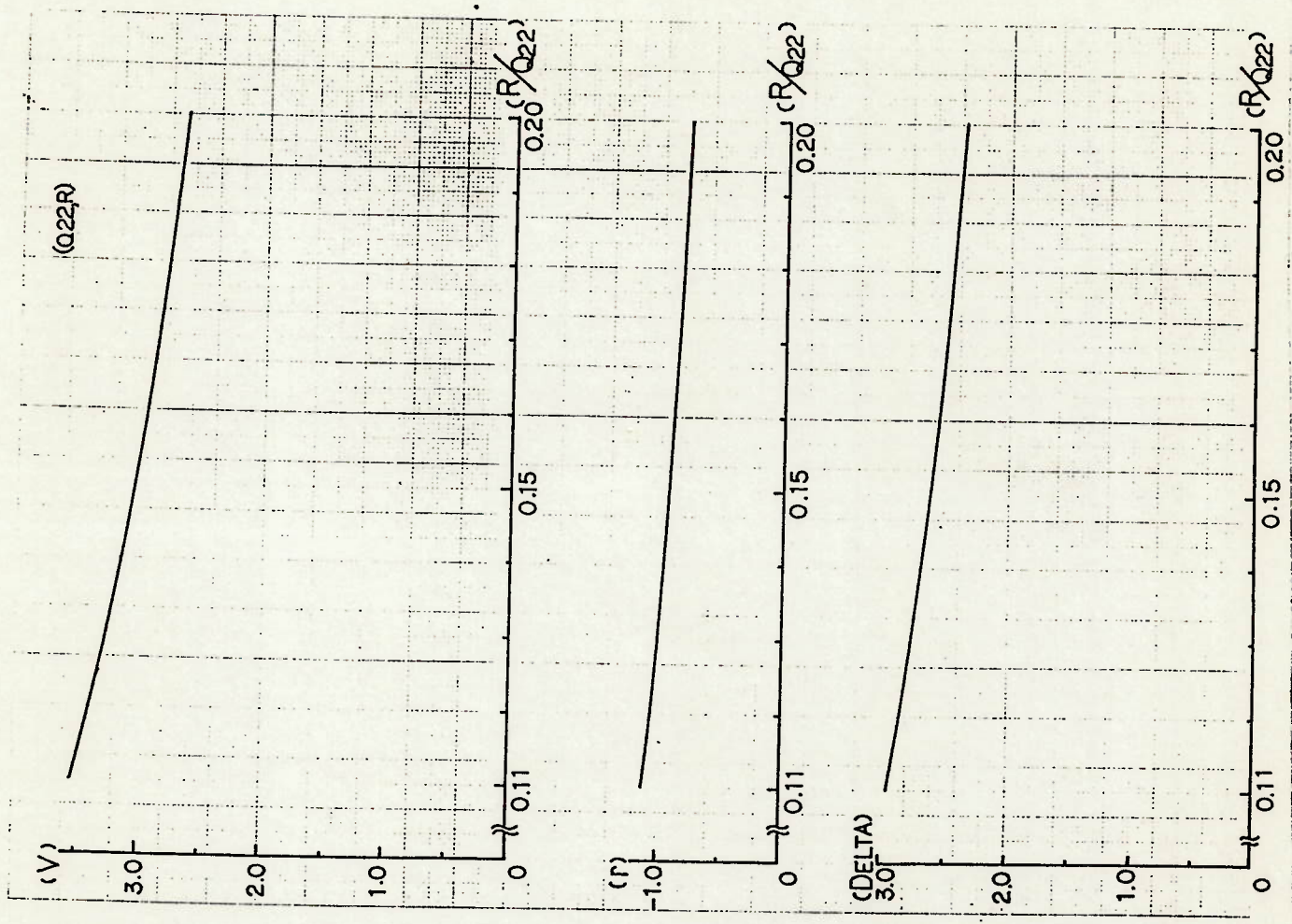


FIG. 7.2. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de Tempo 62.5 seg-Algoritmo de Kleinman-Faixa 0.1 a 0.2

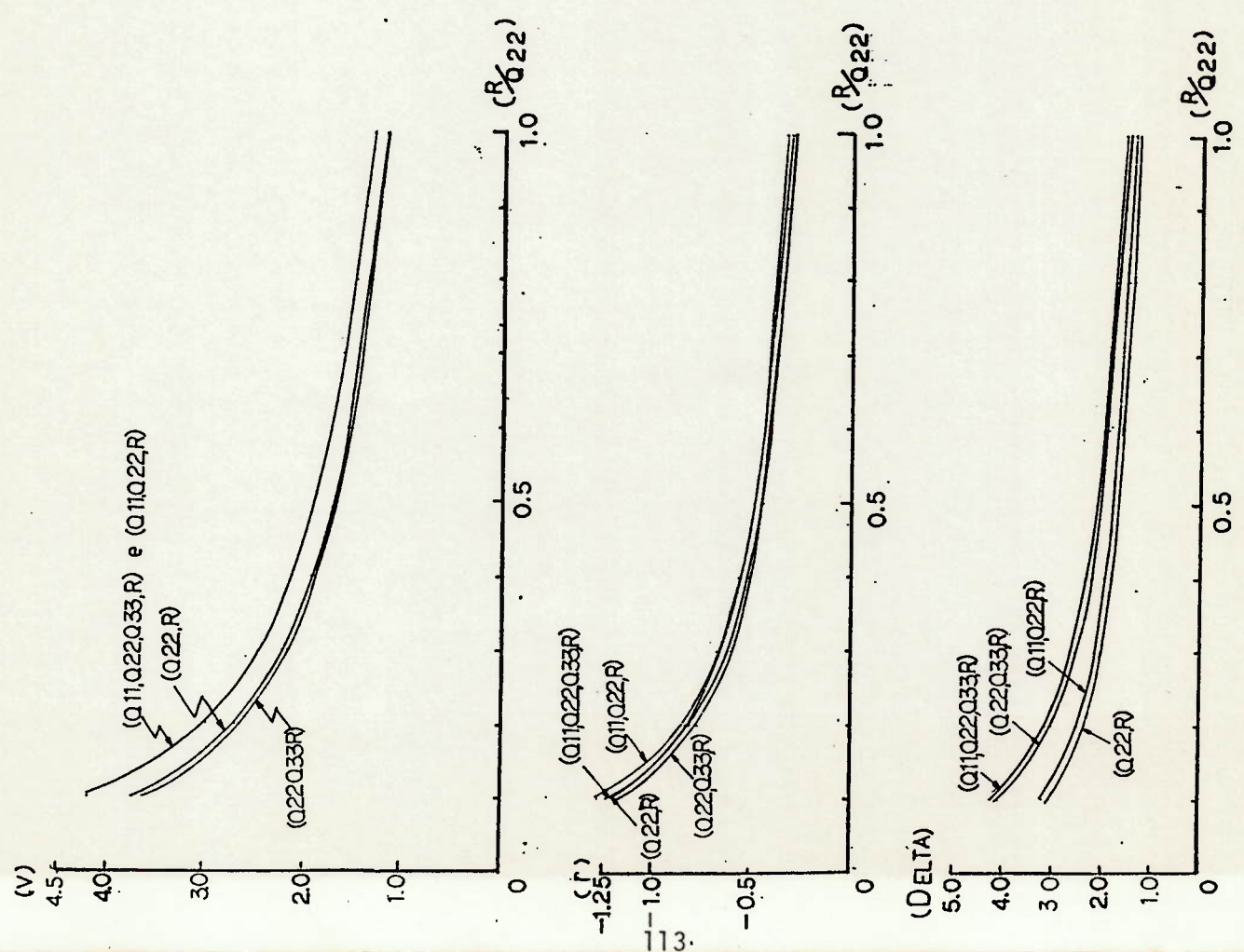


FIG. 7.1. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de Tempo 62.5 seg-Algoritmo de Kleinman-Faixa 0.1 A 1.0

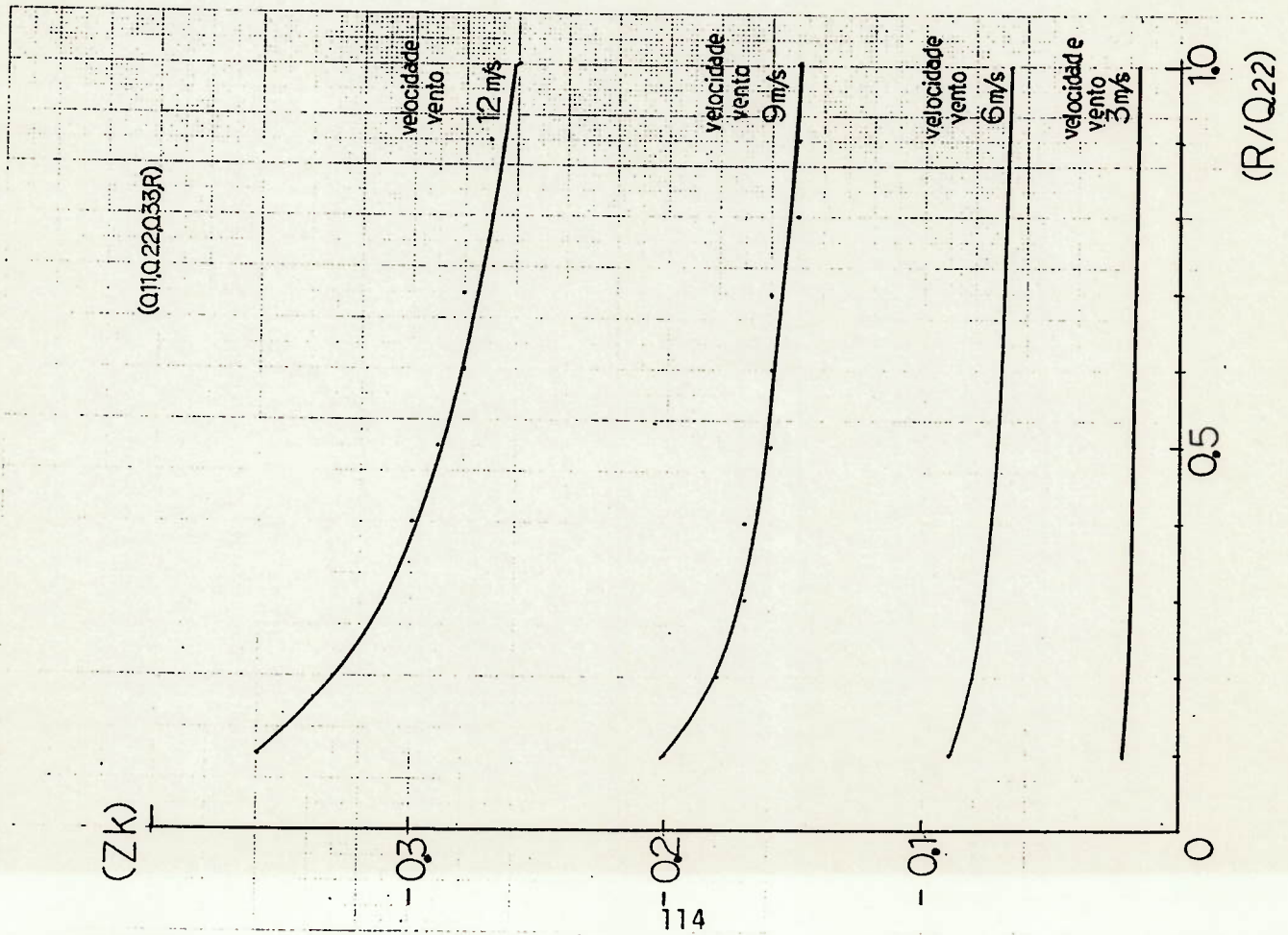


FIG. 7.3. Ganhos de Pré-Alimentação para Forças de Vento Constante de Tempo 3seg- Algoritmo de Kleinman.

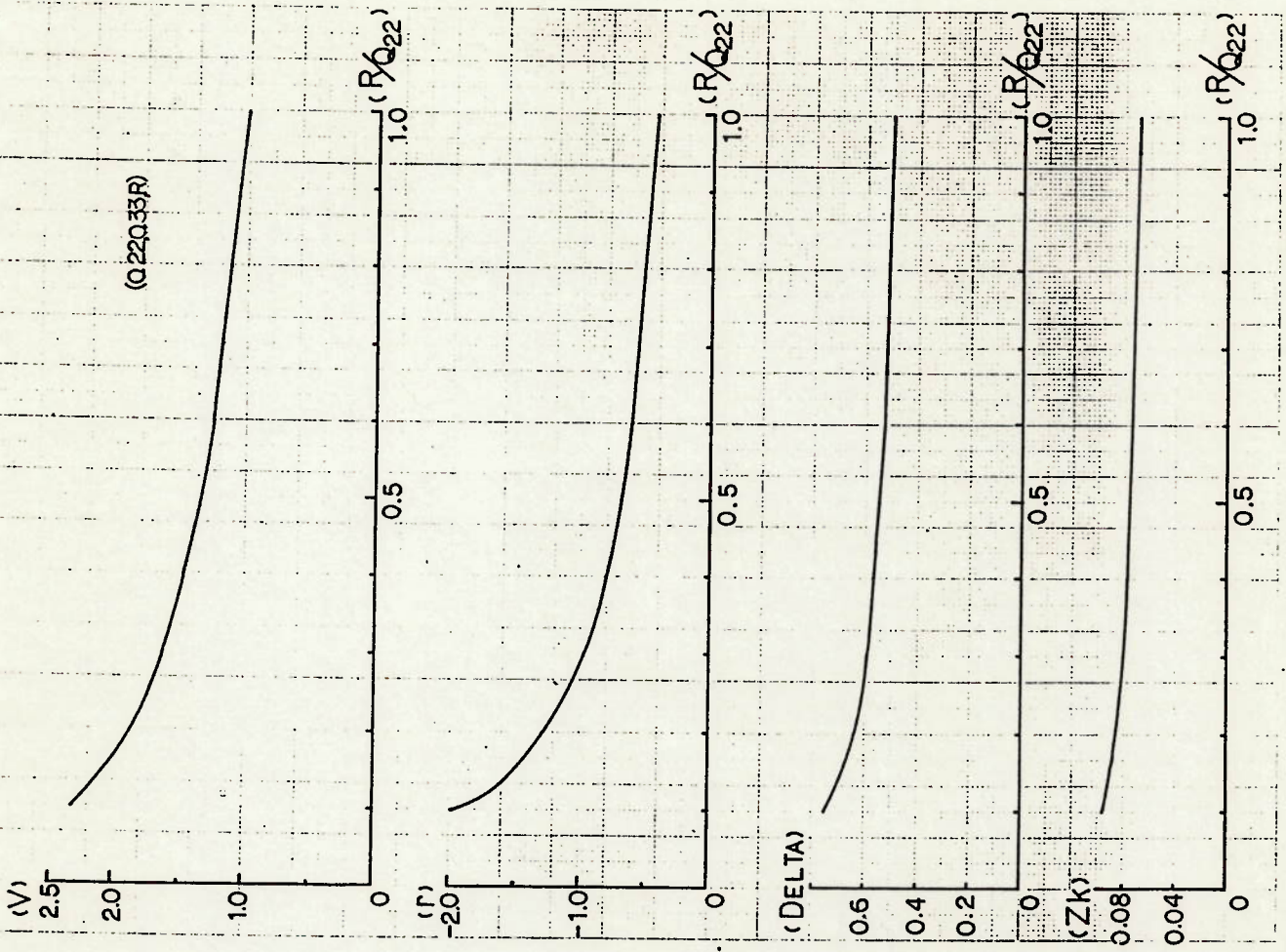


FIG. 7.4. Ganhos do Controlador L.Q. - Constante de Tempo 3 seg-vento 6m/s- Algoritmo de Kleinman.

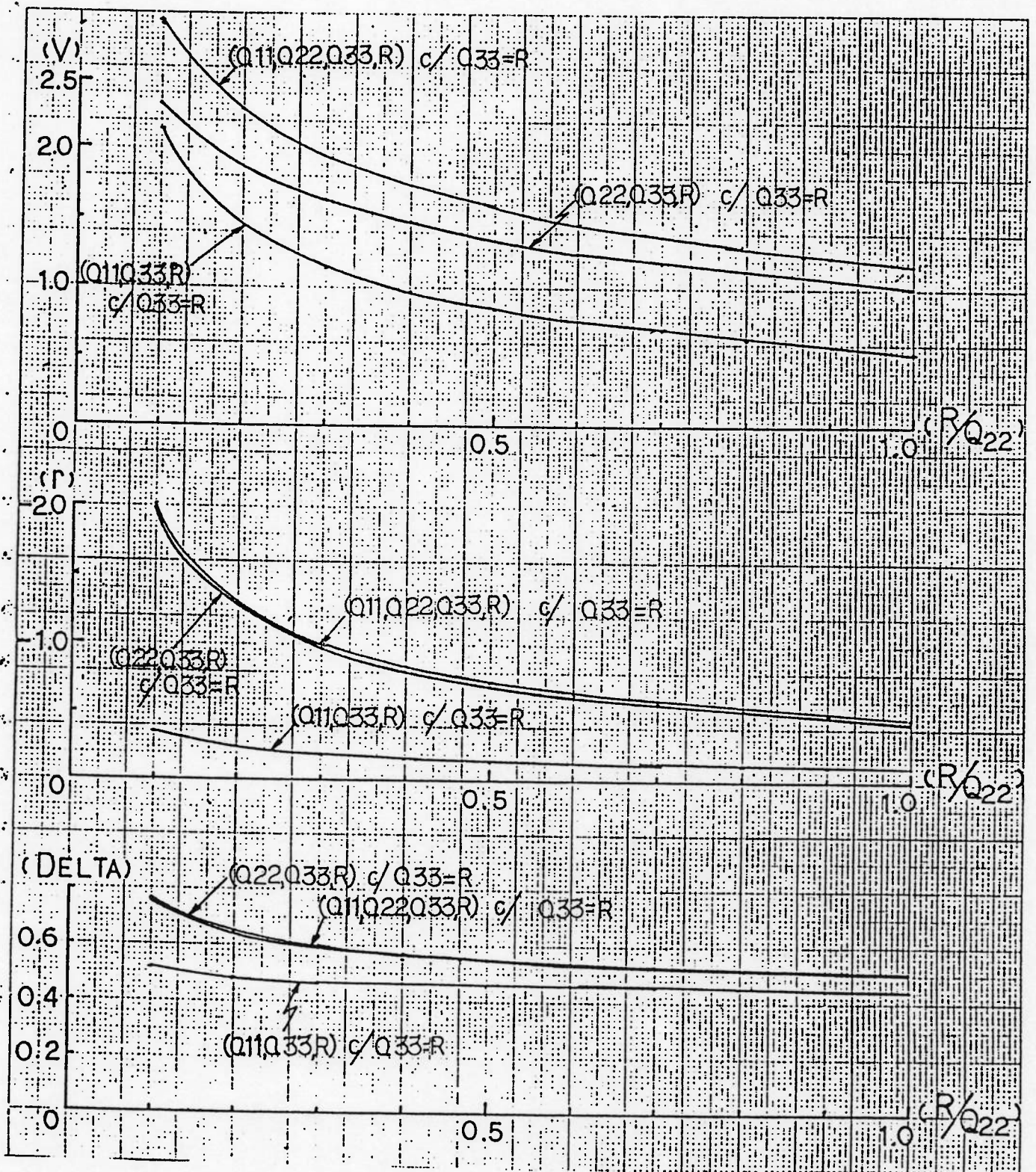


FIG.7.5. Ganhos do Controlador L.Q.- Constante de Tempo 3 seg- Algoritmo de Kleinman.

7.2.2. Controlador Ótimo L.Q.-Algoritmo da Matriz de Sinal

Algumas limitações foram observadas durante a utilização do algoritmo de solução da equação algébrica de Riccati, sugerido por Kleinman[81].

No caso de uma embarcação estável em linha reta, a origem sempre pode ser assumida como ponto inicial de busca do algoritmo, como é mostrado no Apêndice D. Já no caso de uma embarcação instável em linha reta, a determinação do ponto inicial de busca envolve o cálculo dos autovalores do sistema em malha fechada, de forma que necessariamente o sistema em malha fechada seja assintoticamente estável. Isto envolve um cálculo preliminar trabalhoso e não trivial através da equação (6.8).

A pilotagem de embarcações fora dos limites costeiros é tradicionalmente realizada em duas etapas, como foi mostrado na FIG.1.1. No que se refere a manutenção de um rumo ideal reto, um controlador baseado nas variáveis de estado $[v, r, \delta]$ é indicado. Porém, analisando-se a necessidade de se alterar o rumo da embarcação, ou seja, manobrar; torna-se interessante incluir uma variável redundante, qual seja o rumo (ψ). A inclusão de uma variável de estado redundante, correspondente ao rumo (ψ), implica em um sistema em malha aberta e fechada com um polo em zero.

Qualquer sistema com redundância não é controlável. De fato, o par $[A_0, B_0]$ do sistema expandido tem posto igual a 3 e portanto não é possível escolher um L_0 (equação 6.8.), tal que os autovalores do sistema em malha fechada tenham parte real negativa.

Inicialmente não se analisou a possibilidade de se estender o algoritmo de Kleinman[81] para o caso de um sistema estabilizável. Neste caso, os autovalores do sistema em malha fechada devem estar localizados no semi-plano não positivo. Preferiu-se optar em uma segunda etapa, pela utilização do algoritmo da Matriz de Sinal[82], que não requer nenhum cálculo preliminar para navios instáveis, além de somente requerer que $[A_0, B_0]$ seja estabilizável.

Uma amostra dos resultados obtidos utilizando o algoritmo da Matriz de Sinal consta nas tabelas 7.3 à 7.7.. Estes resultados foram obtidos através de um programa para micro-computador (apêndice J). Os resultados foram levantados para navios estáveis e instáveis em linha reta.

Estáveis:

- Navio Cargueiro, tipo Mariner;
- Navio Cargueiro, Série 60, coeficiente de bloco 0,70;
- Navio Tanque, 356.000 t dwt, condição lastrada;
- Mineraleiro-Petroleiro, 282.000 t dwt, condição lastrada.

Instáveis:

- Navio Tanque, 190.000 t dwt, condição carregada;
- Navio Tanque, 356.000 t dwt, condição carregada;
- Mineraleiro-Petroleiro, 282.000 t dwt, condição carregada.

Nas tabelas 7.3. a 7.7. e FIG.7.6. obteve-se valores descontínuos de ganhos, dependendo dos valores das matrizes de penalização Q_0 e R_0 . Por exemplo, no caso do navio Mariner (tabela 7.3.), os ganhos variam descontínuamente. Além disso, a solução obtida para a equação algébrica de Riccati não é simétrica para ganhos nulos do ângulo de rumo, como é mostrado na listagem 7.1. A matriz menor de ordem 3×3 é aproximadamente simétrica e tende para os resultados obtidos para um vetor de estado $[v, r, \delta]$ conforme foi mostrado na tabela 7.2.A.. Já no caso de navios instáveis em linha reta obteve-se ganhos em módulo ou sinal descontínuos (tabela 7.5., 7.6.A. e 7.7.A.).

```

B>
B>^L^L   IGO2
Qual o valor de q11 ?10
Qual o valor de q22 ?10
Qual o valor de q33 ?8
Qual o valor de q44 ?10
Qual o valor de r   ?8
+ uma iteracao. Delta = 0.50000000
+ uma iteracao. Delta = 0.08188588
+ uma iteracao. Delta = 0.00000001
34.66 -11.60  2.60 -10.00
-11.67  7.31 -1.35  7.85
 2.49 -1.24  0.84 -1.33
-10.01  7.82 -1.39 19.23
g1 = -2.16668
g2 =  1.07627
g3 = -0.73046
g4 =  1.15247

B>IGO2
Qual o valor de q11 ?10
Qual o valor de q22 ?10
Qual o valor de q33 ?7
Qual o valor de q44 ?10
Qual o valor de r   ?7
+ uma iteracao. Delta = 0.50000000
+ uma iteracao. Delta = 0.08797508
+ uma iteracao. Delta = 0.00000004
26.39 -7.34  1.76  0.00
-6.48  4.31 -0.78  0.00
 1.56 -0.71  0.67  0.00
 1.19  0.92 -0.11  0.00
g1 = -1.55268
g2 =  0.71011
g3 = -0.66274
g4 =  0.00000

B>IGO2
Qual o valor de q11 ?10
Qual o valor de q22 ?10
Qual o valor de q33 ?6
Qual o valor de q44 ?10
Qual o valor de r   ?6
+ uma iteracao. Delta = 0.50000000
+ uma iteracao. Delta = 0.00000006
23.57 -6.26  1.67  0.00
-6.02  4.13 -0.82  0.00
 1.38 -0.56  0.69  0.00
 1.10  0.77 -0.12  0.00
g1 = -1.59763
g2 =  0.64489
g3 = -0.80307
g4 =  0.00000

B>

```

LISTAGEM 7.1. Exemplo de Saída-Solução Eq. Riccati
Programa para Microcomputador

O mesmo algoritmo da Matriz de Sinal foi também implementado em dupla precisão no computador da Hitachi (apêndice K), não apresentando discontinuidades e com uma solução da equação de Riccati sempre simétrica, como é mostrado nas tabelas 7.8.. A verificação dos resultados através da resolução da equação não-linear (Subrotina BARUD) e da estabilidade (Subrotina EST4), apresentou problemas de convergência na subrotina BARUD; indicando erro tipo 3300-falta de bom progresso (apêndice F) e a solução alternando-se entre instável e estável, devido a aproximações no cálculo da solução obtida. Isto era esperado, pois o sistema realimentado é estável, porém não assintoticamente estável, devido ao polo nulo correspondente ao ângulo de rumo.

Observando-se a variação dos resultados obtidos em diferentes computadores, operando com diferentes precisões, concluiu-se pela necessidade de se alterar o procedimento de cálculo da solução da equação de Riccati. Adotou-se o seguinte procedimento:

$$\dot{x}(t) = A * x(t) + B * u(t) \quad (7.1.)$$

com

$$A_0 = \begin{bmatrix} a_{16} & a_{17} & a_{18} & 0 \\ a_{19} & a_{20} & a_{21} & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a\# \end{bmatrix} \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

onde $a\#$ é um número real positivo, da ordem de grandeza da precisão da máquina. Por exemplo, utilizando-se $a\#=1.0 \times 10^{-10}$ para uma máquina operando com precisão simples, instabiliza-se a solução para qualquer combinação das matrizes de penalização Q_0 e R_0 .

O procedimento mencionado implica em uma equação diferencial de 1ª ordem para o ângulo de rumo dada por:

$$\dot{\psi}(t) = r + a\# * \psi(t) \quad (7.2.)$$

As tabelas 7.9. a 7.13. foram obtidas através do programa para microcomputador (apêndice J) para $a\#=0,001$ e os ganhos estão apresentados nas FIGs. 7.7. Analisando-se as FIGs. 7.7., verifica-se que os ganhos ótimos para a deriva e para taxa de variação do ângulo de rumo para os navios na condição instável são maiores que para navios na condição estável. Já no caso dos ganhos do ângulo do leme e de rumo não se observou nenhuma peculiaridade, exceto que os ganhos do ângulo de rumo independem do tipo de embarcação.

O procedimento adotado ($a\#$) também pode ser estendido para a solução via algoritmo de Kleinman [81], garantindo a controlabilidade do sistema. Desta forma, a única desvantagem da utilização do algoritmo de Kleinman em relação ao algoritmo da Matriz de Sinal [82] é a necessidade de se calcular o ponto inicial de busca para sistemas instáveis em malha aberta (equação 6.8.). Não se comparou a velocidade de convergência dos algoritmos.

Q11	Q22	Q33	Q44	R	$\frac{R}{Q44}$	V	r	DELTA	F1
10	10	10	10	10	1.0	-2.08	0.99	-0.71	1.04
10	10	9	10	9	0.9	-2.12	1.03	-0.72	1.09
10	10	8	10	8	0.8	-2.17	1.07	-0.73	1.15
10	10	7	10	7	0.7	-1.55	0.71	-0.66	0.00
10	10	6	10	6	0.6	-1.60	0.64	-0.80	0.00
10	10	5	10	5	0.5	-1.66	0.68	-0.81	0.00
10	10	4	10	4	0.4	-1.73	0.73	-0.82	0.00
10	10	3	10	3	0.3	-2.35	1.22	-0.92	1.52
10	10	2	10	2	0.2	-1.90	0.85	-0.85	0.00
10	10	1	10	1	0.1	-2.01	0.93	-0.86	0.00

TABELA 7.3. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de
Sinal-Navio Mariner.

Q11	Q22	Q33	Q44	R	$\frac{R}{Q44}$	V	r	DELTA	F1
10	10	10	10	10	1.0	-2.17	0.65	-0.52	1.01
10	10	9	10	9	0.9	-0.23	0.00	-0.42	0.00
10	10	8	10	8	0.8	-2.34	0.72	-0.52	1.13
10	10	7	10	7	0.7	-2.45	0.77	-0.53	1.21
10	10	6	10	6	0.6	-2.69	0.84	-0.62	1.37
10	10	5	10	5	0.5	-1.84	0.47	-0.72	0.00
10	10	4	10	4	0.4	-3.04	0.94	-0.78	1.63
10	10	3	10	3	0.3	-3.32	1.16	-0.66	1.92
10	10	2	10	2	0.2	-3.71	1.26	-0.82	2.26
10	10	1	10	1	0.1	-4.46	1.91	-0.74	3.17

TABELA 7.4. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de
Sinal-Navio Série 60.

Q11	Q22	Q33	Q44	R	$\frac{R}{Q44}$	V	r	DELTA	F1
10	10	10	10	10	1.0	-0.61	0.00	-0.42	49976.32
10	10	9	10	9	0.9	-4.20	1.34	-0.72	1.20
10	10	8	10	8	0.8	-0.64	0.00	-0.42	204541.78
10	10	7	10	7	0.7	-4.36	1.45	-0.72	1.35
10	10	6	10	6	0.6	-0.67	0.00	-0.42	-1.33
10	10	5	10	5	0.5	-4.28	1.54	-0.59	1.48
10	10	4	10	4	0.4	-0.71	0.00	-0.42	-1.35
10	10	3	10	3	0.3	-4.92	1.90	-0.75	2.00
10	10	2	10	2	0.2	-5.21	2.18	-0.77	2.40
10	10	1	10	1	0.1	-5.70	2.77	-0.80	3.24

TABELA 7.5. Solução da Equação Algébrica de Riccati
 Constante de Tempo 3seg- Algoritmo Matriz de
 Sinal-Navio Tanque 190.000 t dwt carregado.

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	R/Q ₄₄	V	r	DELTA	F _i
10	10	10	10	10	1.0	-1.03	0.00	-0.42	97159.61
10	10	9	10	9	0.9	-6.64	1.55	-0.75	1.17
10	10	8	10	8	0.8	-5.99	1.45	-0.53	1.13
10	10	7	10	7	0.7	-5.65	1.29	-0.88	0.95
10	10	6	10	6	0.6	-5.86	1.37	-0.88	1.06
10	10	5	10	5	0.5	-1.20	0.00	-0.42	145752.81
10	10	4	10	4	0.4	-6.14	-0.68	-0.74	-3.46
10	10	3	10	3	0.3	-6.70	1.79	-0.91	1.64
10	10	2	10	2	0.2	-1.39	0.00	-0.42	-1.19
10	10	1	10	1	0.1	-7.24	2.35	-0.94	2.60

TABELA 7.6.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz
de Sinal-Mineralheiro-Petroleiro carregado.

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	R/Q ₄₄	V	r	DELTA	F _i
10	10	10	10	10	1.0	-2.04	0.60	-0.82	0.00
10	10	9	10	9	0.9	-2.93	1.04	-0.86	0.95
10	10	8	10	8	0.8	-3.38	1.30	-0.74	1.24
10	10	7	10	7	0.7	-3.11	1.15	-0.87	1.10
10	10	6	10	6	0.6	-3.22	1.22	-0.88	1.20
10	10	5	10	5	0.5	-3.34	1.31	-0.88	1.33
10	10	4	10	4	0.4	-3.47	1.42	-0.89	1.50
10	10	3	10	3	0.3	-2.62	0.94	-0.85	0.00
10	10	2	10	2	0.2	-3.75	1.73	-0.92	2.02
10	10	1	10	1	0.1	-3.83	1.95	-0.93	2.45

TABELA 7.6.B. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz
de Sinal-Mineralheiro-Petroleiro lastro.

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	F _I
10	10	10	10	10	1.0	-5.50	1.58	-0.61	1.06
10	10	9	10	9	0.9	-5.91	1.70	-0.76	1.17
10	10	8	10	8	0.8	-0.82	0.00	-0.42	456651.06
10	10	7	10	7	0.7	-6.04	1.80	-0.77	1.33
10	10	6	10	6	0.6	-5.48	1.72	-0.53	1.31
10	10	5	10	5	0.5	-5.84	1.88	-0.62	1.49
10	10	4	10	4	0.4	-5.51	1.69	-0.90	1.34
10	10	3	10	3	0.3	-5.81	1.86	-0.91	1.59
10	10	2	10	2	0.2	-1.06	0.00	-0.42	-1.46
10	10	1	10	1	0.1	-6.93	3.01	-0.83	3.17

TABELA 7.7.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg- Algoritmo Matriz
de Sinal-Tanque 356.000t dwt carregado.

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	F _I
10	10	10	10	10	1.0	-0.30	0.00	-0.42	-0.98
10	10	9	10	9	0.9	-0.30	0.00	-0.42	-0.98
10	10	8	10	8	0.8	-1.95	1.02	-0.86	1.10
10	10	7	10	7	0.7	-2.18	1.25	-0.74	1.34
10	10	6	10	6	0.6	-2.07	1.14	-0.87	1.28
10	10	5	10	5	0.5	-2.29	1.41	-0.75	1.56
10	10	4	10	4	0.4	-1.65	0.95	-0.72	0.00
10	10	3	10	3	0.3	-2.32	1.44	-0.90	1.76
10	10	2	10	2	0.2	-2.54	2.04	-0.65	2.32
10	10	1	10	1	0.1	-2.02	1.18	-0.88	0.00

TABELA 7.7.B. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg- Algoritmo Matriz
de Sinal-Tanque 356.000t dwt lastro.

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	41.02	-13.77	2.88	-11.73	8.13	-1.41	8.58	0.86	-1.44	20.01
10	10	9	10	9	37.82	-12.70	2.65	-10.86	7.73	-1.33	8.21	0.79	-1.36	19.62
10	10	8	10	8	34.57	-11.61	-2.42	-9.95	7.31	-1.24	7.82	0.71	-1.29	19.20
10	10	7	10	7	31.25	-10.48	2.18	-9.00	6.87	-1.15	7.40	0.63	-1.20	18.75
10	10	6	10	6	27.86	-9.31	1.93	-8.00	6.41	-1.06	6.95	0.55	-1.11	18.26
10	10	5	10	5	24.39	-8.09	1.68	-6.94	5.91	-0.96	6.45	0.47	-1.02	17.71
10	10	4	10	4	20.81	-6.80	1.41	-5.80	5.36	-0.85	5.90	0.39	-0.91	17.09
10	10	3	10	3	17.12	-5.44	1.13	-4.56	4.75	-0.73	5.26	0.31	-0.79	16.37
10	10	2	10	2	13.26	-3.95	0.82	-3.17	4.03	-0.59	4.50	0.22	-0.64	15.48
10	10	1	10	1	9.15	-2.26	-0.48	-1.52	3.10	-0.41	3.48	0.13	-0.45	14.29

TABELA 7.8.A. Solução da Equação de Riccati, Navio Mariner, Computador Hitachi com Dupla Precisão.

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	41.16	-13.79	3.09	-11.81	8.14	-1.53	8.26	1.03	-1.49	20.05
10	10	9	10	9	37.94	-12.71	2.85	-10.94	7.74	-1.44	8.25	0.93	-1.41	19.65
10	10	8	10	8	34.66	-11.60	-2.60	-10.00	7.31	-1.35	7.85	0.84	-1.33	19.23
10	10	7	10	7	26.39	-7.34	1.76	0.00	4.31	-0.78	0.00	0.67	0.00	0.00 (*)
10	10	6	10	6	23.57	-6.26	1.67	0.00	4.13	-0.82	0.00	0.69	0.00	0.00 (*)
10	10	5	10	5	20.97	-5.50	1.47	0.00	3.88	-0.76	0.00	0.58	0.00	0.00 (*)
10	10	4	10	4	18.21	-4.67	1.25	0.00	3.62	-0.70	0.00	0.47	0.00	0.00 (*)
10	10	3	10	3	16.80	-4.99	1.24	-4.28	4.83	-0.90	5.21	0.40	-0.66	16.30
10	10	2	10	2	12.07	-2.71	0.74	0.00	2.96	-0.54	0.00	0.24	0.00	0.00 (*)
10	10	1	10	1	8.58	-1.51	0.44	0.00	2.55	-0.44	0.00	0.12	0.00	0.00 (*)

TABELA 7.8.B. Solução da Equação de Riccati, Navio Mariner, Micro-Computador com Precisão Simples, Linhas com (*) Solução Não-Simétrica.

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	41.07	-13.79	2.92	-11.77	-8.14	-1.43	8.61	0.89	-1.45	20.06
10	10	9	10	9	37.95	-12.72	2.85	-10.95	7.74	-1.44	8.26	0.94	-1.42	19.69
10	10	8	10	8	34.67	-11.61	2.60	-10.02	7.32	-1.35	7.87	0.84	-1.33	19.27
10	10	7	10	7	31.33	-10.46	2.34	-9.06	6.88	-1.25	7.44	0.75	-1.24	18.81
10	10	6	10	6	27.91	-9.28	2.07	-8.04	6.40	-1.15	5.98	0.65	-1.14	18.31
10	10	5	10	5	24.41	-8.04	1.79	-5.96	5.89	-1.04	6.47	0.55	-1.03	17.75
10	10	4	10	4	20.81	-6.73	1.50	-5.80	5.33	-0.92	5.91	0.45	-0.91	17.11
10	10	3	10	3	17.08	-5.34	1.20	-4.53	4.70	-0.79	5.25	0.35	-0.77	16.37
10	10	2	10	2	13.18	-3.81	0.85	-3.09	3.96	-0.63	4.45	0.24	-0.60	15.45
10	10	1	10	1	9.02	-2.06	0.49	-1.37	3.00	-0.44	3.38	0.13	-0.38	14.19

TABELA 7.9. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de
Sinal-Navio Mariner-Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	F _i
10	10	10	10	10	1.0	-2.02	0.99	-0.62	1.01
10	10	9	10	9	0.9	-2.12	1.03	-0.72	1.09
10	10	8	10	8	0.8	-2.17	1.08	-0.73	1.15
10	10	7	10	7	0.7	-2.22	1.13	-0.74	1.23
10	10	6	10	6	0.6	-2.29	1.20	-0.75	1.32
10	10	5	10	5	0.5	-2.36	1.29	-0.77	1.43
10	10	4	10	4	0.4	-2.45	1.40	-0.79	1.57
10	10	3	10	3	0.3	-2.56	1.55	-0.81	1.78
10	10	2	10	2	0.2	-2.71	1.78	-0.85	2.08
10	10	1	10	1	0.1	-2.92	2.17	-0.91	2.61

TABELA 7.9. Solução da Equação Algébrica de Riccati
(cont.) Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de
Sinal-Navio Mariner-Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	92.30	-23.05	3.15	-35.71	8.01	-0.94	12.24	0.73	-1.47	29.50
10	10	9	10	9	85.86	-21.56	2.94	-33.46	7.66	-0.89	11.70	0.66	-1.39	28.66
10	10	8	10	8	79.17	-20.00	2.72	-31.10	7.28	-0.84	11.13	0.59	-1.31	27.76
10	10	7	10	7	72.19	-18.36	2.49	-28.60	6.89	-0.87	10.51	0.52	-1.23	26.80
10	10	6	10	6	64.88	-16.63	2.25	-25.94	6.46	-0.72	9.85	0.45	-1.14	25.75
10	10	5	10	5	57.15	-14.78	1.99	-23.08	6.00	-0.66	9.13	0.39	-1.04	24.60
10	10	4	10	4	48.93	-12.78	1.71	-19.96	5.50	-0.59	8.32	0.31	-0.93	23.30
10	10	3	10	3	40.05	-10.58	1.41	-16.49	4.92	-0.51	7.40	0.24	-0.80	21.80
10	10	2	10	2	30.29	-8.03	1.14	-12.55	4.25	-0.46	6.31	0.20	-0.68	20.00
10	10	1	10	1	18.96	-5.03	0.67	-7.57	3.34	-0.31	4.81	0.10	-0.47	17.49

TABELA 7.10. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de
Sinal-Navio Série 60-Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	F _i
10	10	10	10	10	1.0	-2.15	0.64	-0.50	1.00
10	10	9	10	9	0.9	-2.23	0.68	-0.50	1.06
10	10	8	10	8	0.8	-2.32	0.72	-0.51	1.12
10	10	7	10	7	0.7	-2.43	0.76	-0.51	1.20
10	10	6	10	6	0.6	-2.56	0.82	-0.52	1.29
10	10	5	10	5	0.5	-2.72	0.90	-0.53	1.42
10	10	4	10	4	0.4	-2.92	1.01	-0.54	1.58
10	10	3	10	3	0.3	-3.20	1.17	-0.55	1.83
10	10	2	10	2	0.2	-3.73	1.40	-0.69	2.32
10	10	1	10	1	0.1	-4.49	2.06	-0.66	3.18

TABELA 7.10. Solução da Equação Algébrica de Riccati
(cont.) Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz de
Sinal-Navio Série 60-Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	168.10	-44.04	2.96	-30.29	15.81	-0.95	14.88	0.41	-0.82	28.16
10	10	9	10	9	153.43	-40.43	2.69	-28.22	14.85	-0.87	14.20	0.36	-0.77	27.46
10	10	8	10	8	138.67	-35.79	2.46	-26.08	13.87	-0.82	13.49	0.33	-0.73	26.72
10	10	7	10	7	123.58	-33.07	2.19	-23.81	12.84	-0.74	12.72	0.28	-0.68	25.90
10	10	6	10	6	108.28	-29.15	1.92	-21.49	11.77	-0.67	11.90	0.24	-0.63	25.00
10	10	5	10	5	92.67	-25.16	1.65	-18.85	10.64	-0.60	10.99	0.20	-0.57	24.00
10	10	4	10	4	76.71	-21.02	1.39	-16.09	9.44	-0.53	9.99	0.17	-0.52	22.86
10	10	3	10	3	60.24	-16.55	1.10	-13.02	8.12	-0.44	8.83	0.13	-0.45	21.51
10	10	2	10	2	43.22	-11.99	0.82	-9.58	6.64	-0.37	7.45	0.10	-0.38	19.85
10	10	1	10	1	25.11	-6.72	0.51	-5.35	4.81	-0.27	5.59	0.06	-0.26	17.53

TABELA 7.11. Solução da Equação Algébrica de Riccati
 Constante de Tempo 3seg- Algoritmo Matriz de
 Sinal-Navio Tanque 190.000 t dwt carregado-
 Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	F _i
10	10	10	10	10	1.0	-3.65	1.17	-0.59	1.01
10	10	9	10	9	0.9	-3.69	1.20	-0.49	1.06
10	10	8	10	8	0.8	-3.80	1.26	-0.50	1.13
10	10	7	10	7	0.7	-3.85	1.31	-0.49	1.20
10	10	6	10	6	0.6	-3.96	1.38	-0.50	1.29
10	10	5	10	5	0.5	-4.08	1.48	-0.50	1.42
10	10	4	10	4	0.4	-4.28	1.62	-0.52	1.60
10	10	3	10	3	0.3	-4.50	1.81	-0.53	1.84
10	10	2	10	2	0.2	-4.99	2.18	-0.62	2.33
10	10	1	10	1	0.1	-5.70	2.77	-0.80	3.25

TABELA 7.11. Solução da Equação Algébrica de Riccati
 (cont.) Constante de Tempo 3seg- Algoritmo Matriz de
 Sinal-Navio Tanque 190.000 t dwt carregado-
 Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	328.09	-59.90	4.51	-28.47	17.02	-1.05	15.28	0.40	-0.78	30.64
10	10	9	10	9	297.21	-54.62	4.10	-26.54	15.95	-0.98	14.59	0.36	-0.74	29.73
10	10	8	10	8	266.18	-49.27	3.69	-24.52	14.85	-0.90	13.86	0.32	-0.70	28.77
10	10	7	10	7	234.84	-43.82	3.23	-22.37	13.70	-0.81	13.07	0.28	-0.64	27.73
10	10	6	10	6	203.54	-38.34	2.85	-20.13	12.53	-0.73	12.22	0.25	-0.60	26.60
10	10	5	10	5	171.87	-32.71	2.42	-17.71	11.30	-0.65	11.30	0.21	-0.55	25.36
10	10	4	10	4	139.89	-26.94	1.98	-15.09	9.98	-0.56	10.26	0.17	-0.49	23.97
10	10	3	10	3	107.53	-20.99	1.53	-12.20	8.57	-0.46	9.08	0.13	-0.42	22.35
10	10	2	10	2	74.60	-14.74	1.05	-8.99	6.98	-0.35	7.65	0.08	-0.34	20.39
10	10	1	10	1	41.03	-7.98	0.66	-4.90	5.05	-0.28	5.75	0.06	-0.24	17.76

TABELA 7.12.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz Sinal-Mineralheiro-Petroleiro carregado- Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	F _i
10	10	10	10	10	1.0	-5.87	1.37	-0.52	1.01
10	10	9	10	9	0.9	-5.93	1.41	-0.52	1.07
10	10	8	10	8	0.8	-5.99	1.46	-0.53	1.13
10	10	7	10	7	0.7	-6.01	1.50	-0.51	1.20
10	10	6	10	6	0.6	-6.16	1.59	-0.53	1.31
10	10	5	10	5	0.5	-6.28	1.68	-0.54	1.43
10	10	4	10	4	0.4	-6.42	1.81	-0.54	1.60
10	10	3	10	3	0.3	-6.62	2.00	-0.55	1.84
10	10	2	10	2	0.2	-6.87	2.31	-0.55	2.24
10	10	1	10	1	0.1	-7.80	2.96	-0.83	3.17

TABELA 7.12.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati (cont.) Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz Sinal-Mineralheiro-Petroleiro carregado- Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	100.88	-27.26	2.40	-17.42	12.38	-0.91	12.42	0.41	-0.82	26.00
10	10	9	10	9	92.09	-24.96	2.21	-15.13	11.68	-0.86	11.87	0.38	-0.79	25.37
10	10	8	10	8	83.17	-22.61	2.00	-14.76	10.95	-0.79	11.28	0.34	-0.74	24.68
10	10	7	10	7	74.16	-20.21	1.79	-13.32	10.19	-0.73	10.66	0.30	-0.69	23.94
10	10	6	10	6	65.04	-17.74	1.57	-11.81	9.39	-0.66	9.98	0.26	-0.64	23.13
10	10	5	10	5	55.79	-15.21	1.34	-10.20	8.55	-0.59	9.24	0.22	-0.59	22.23
10	10	4	10	4	46.38	-12.59	1.10	-8.46	7.64	-0.51	8.40	0.17	-0.52	21.21
10	10	3	10	3	36.82	-9.84	0.87	-6.57	6.64	-0.44	7.46	0.14	-0.45	20.03
10	10	2	10	2	27.03	-6.93	0.65	-4.47	5.51	-0.37	6.32	0.11	-0.38	18.59
10	10	1	10	1	16.78	-3.65	0.39	-1.88	4.06	-0.28	4.77	0.07	-0.25	16.59

TABELA 7.12.B.Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz
de Sinal-Mineralheiro-Petroleiro lastro-
Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	R/Q ₄₄	V	r	DELTA	FI
10	10	10	10	10	1.0	-2.93	1.11	-0.50	1.00
10	10	9	10	9	0.9	-3.00	1.16	-0.52	1.06
10	10	8	10	8	0.8	-3.05	1.21	-0.52	1.13
10	10	7	10	7	0.7	-3.11	1.27	-0.52	1.21
10	10	6	10	6	0.6	-3.18	1.34	-0.53	1.30
10	10	5	10	5	0.5	-3.27	1.44	-0.53	1.43
10	10	4	10	4	0.4	-3.36	1.56	-0.53	1.58
10	10	3	10	3	0.3	-3.53	1.77	-0.55	1.84
10	10	2	10	2	0.2	-3.87	2.13	-0.65	2.31
10	10	1	10	1	0.1	-4.24	2.61	-0.83	3.07

TABELA 7.12.B.Solução da Equação Algébrica de Riccati
(cont.)
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz.
de Sinal-Mineralheiro-Petroleiro lastro-
Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	262.14	-61.86	3.88	-24.59	19.97	-1.12	15.74	0.43	-0.74	32.98
10	10	9	10	9	237.48	-56.29	3.53	-22.92	18.56	-1.04	15.00	0.38	-0.70	31.95
10	10	8	10	8	212.71	-50.65	3.17	-21.17	17.13	-0.95	14.21	0.34	-0.66	30.85
10	10	7	10	7	187.81	-44.96	2.81	-19.32	15.66	-0.86	13.37	0.30	-0.62	29.67
10	10	6	10	6	162.36	-39.07	2.30	-17.26	14.11	-0.72	12.44	0.22	-0.55	28.37
10	10	5	10	5	137.11	-33.20	1.92	-15.14	12.54	-0.62	11.45	0.18	-0.49	26.96
10	10	4	10	4	111.84	-27.25	1.59	-12.89	10.92	-0.54	10.37	0.15	-0.45	25.40
10	10	3	10	3	81.49	-19.31	1.42	-8.54	8.59	-0.52	8.14	0.19	-0.33	21.63
10	10	2	10	2	60.12	-14.75	0.95	-7.46	7.28	-0.33	7.63	0.07	-0.31	21.40
10	10	1	10	1	33.60	-7.94	0.54	-3.94	5.08	-0.26	5.68	0.06	-0.22	18.50

TABELA 7.13.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg- Algoritmo Matriz
de Sinal-Tanque 356.000t dwt carregado-
Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	FI
10	10	10	10	10	1.0	-5.51	1.58	-0.61	1.06
10	10	9	10	9	0.9	-5.55	1.62	-0.61	1.12
10	10	8	10	8	0.8	-5.51	1.67	-0.62	1.19
10	10	7	10	7	0.7	-5.67	1.72	-0.62	1.27
10	10	6	10	6	0.6	-5.48	1.72	-0.53	1.31
10	10	5	10	5	0.5	-5.51	1.79	-0.51	1.42
10	10	4	10	4	0.4	-5.70	1.93	-0.54	1.60
10	10	3	10	3	0.3	-5.81	1.86	-0.91	1.59
10	10	2	10	2	0.2	-6.07	2.40	-0.53	2.24
10	10	1	10	1	0.1	-6.93	3.01	-0.83	3.17

TABELA 7.13.A. Solução da Equação Algébrica de Riccati
(cont.)
Constante de Tempo 3seg- Algoritmo Matriz
de Sinal-Tanque 356.000t dwt carregado-
Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₃₃	P ₃₄	P ₄₄
10	10	10	10	10	50.46	-16.92	1.41	-11.11	10.94	-0.77	11.68	0.38	-0.77	25.59
10	10	9	10	9	46.47	-15.48	1.28	-10.13	10.33	-0.72	11.14	0.34	-0.72	24.99
10	10	8	10	8	42.45	-14.02	1.16	-9.11	9.71	-0.67	10.58	0.30	-0.58	24.34
10	10	7	10	7	38.39	-12.53	1.05	-8.05	9.05	-0.62	9.99	0.27	-0.64	23.65
10	10	6	10	6	34.25	-10.99	0.91	-5.93	8.36	-0.56	9.34	0.23	-0.59	22.88
10	10	5	10	5	30.06	-9.40	0.79	-5.74	7.63	-0.51	8.63	0.19	-0.54	22.03
10	10	4	10	4	25.80	-7.75	0.55	-4.48	6.84	-0.45	7.85	0.16	-0.48	21.08
10	10	3	10	3	21.44	-6.03	0.52	-3.10	5.96	-0.38	6.95	0.12	-0.42	19.97
10	10	2	10	2	17.00	-4.17	0.43	-1.59	4.95	-0.36	5.89	0.12	-0.36	18.63
10	10	1	10	1	12.31	-2.14	0.23	0.23	3.67	-0.23	4.45	0.05	-0.24	16.79

TABELA 7.13.B. Solução da Equação Algébrica de Riccati
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz
de Sinal-Tanque 356.000t dwt lastro-
Procedimento (a#).

Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₃₃	Q ₄₄	R	$\frac{R}{Q_{44}}$	V	r	DELTA	F _i
10	10	10	10	10	1.0	-1.85	1.01	-0.50	1.01
10	10	9	10	9	0.9	-1.87	1.05	-0.49	1.06
10	10	8	10	8	0.8	-1.90	1.10	-0.49	1.12
10	10	7	10	7	0.7	-1.97	1.17	-0.51	1.21
10	10	6	10	6	0.6	-2.00	1.23	-0.50	1.29
10	10	5	10	5	0.5	-2.07	1.33	-0.51	1.42
10	10	4	10	4	0.4	-2.15	1.47	-0.52	1.58
10	10	3	10	3	0.3	-2.27	1.67	-0.53	1.83
10	10	2	10	2	0.2	-2.60	1.96	-0.79	2.34
10	10	1	10	1	0.1	-2.87	2.77	-0.79	3.21

TABELA 7.13.B. Solução da Equação Algébrica de Riccati
(cont.)
Constante de Tempo 3seg-Algoritmo Matriz
de Sinal-Tanque 356.000t dwt lastro-
Procedimento (a#).

Navio 1-Mariner

Navio 3-Tanque.190.000 t

Navio 5-Mineral/Petrol.lastro

Navio 7-Tanque.356.000 t.lastro

2-Série 60

4-Mineral/Petrol.carreg

6-Tanque.356.000 t.carreg

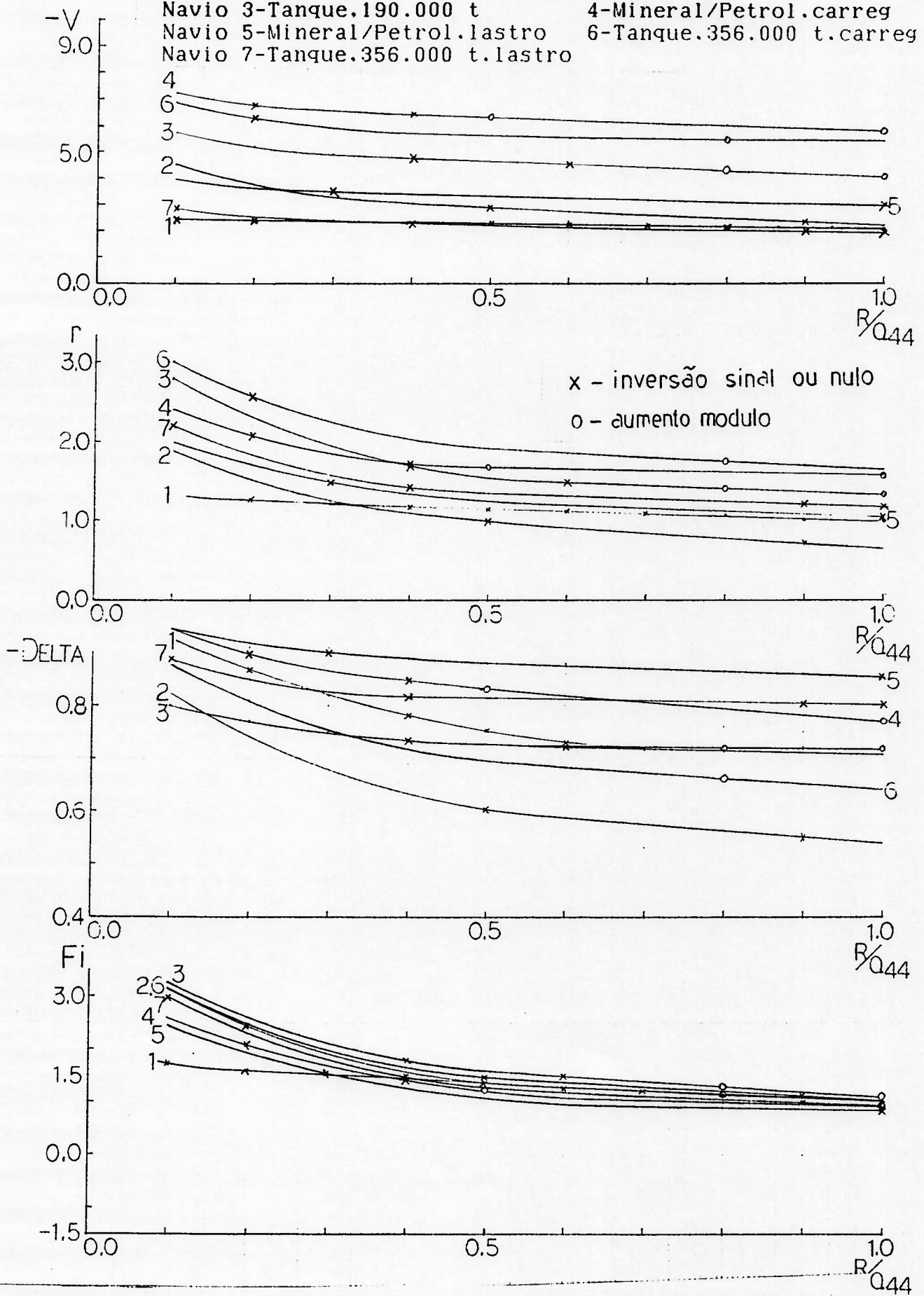


FIG.7.6.Ganhos Comparativos

10 (-V)

Navio 1-Mariner	2-Série 60
Navio 3-Tanque, 190.000 t	4-Mineral/Petrol, carreg
Navio 5-Mineral/Petrol, lastro	6-Tanque, 356.000 t, carreg
Navio 7-Tanque, 356.000 t, lastro	

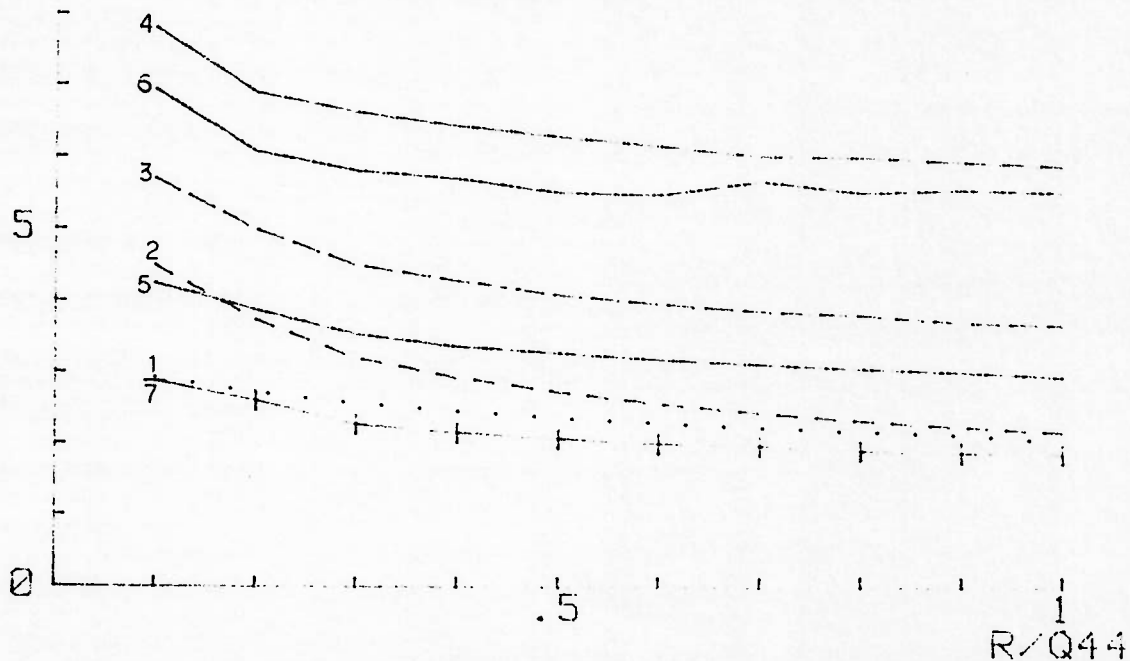


FIG.7.7.A.Ganhos Comparativos de Deriva-Navios Estáveis e Instáveis-Procedimento (a#).

(r)

Navio 1-Mariner	2-Série 60
Navio 3-Tanque, 190.000 t	4-Mineral/Petrol, carreg
Navio 5-Mineral/Petrol, lastro	6-Tanque, 356.000 t, carreg
Navio 7-Tanque, 356.000 t, lastro	

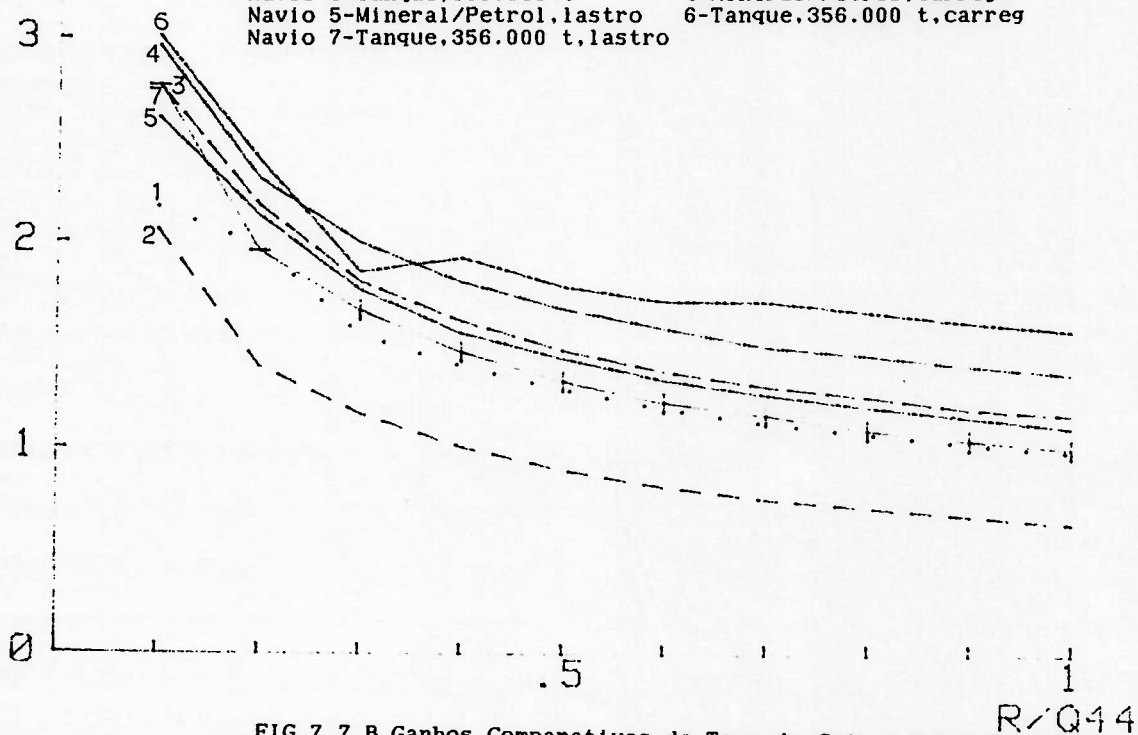


FIG.7.7.B.Ganhos Comparativos de Taxa de Guinada-Navios Estáveis e Instáveis-Procedimento (a#).

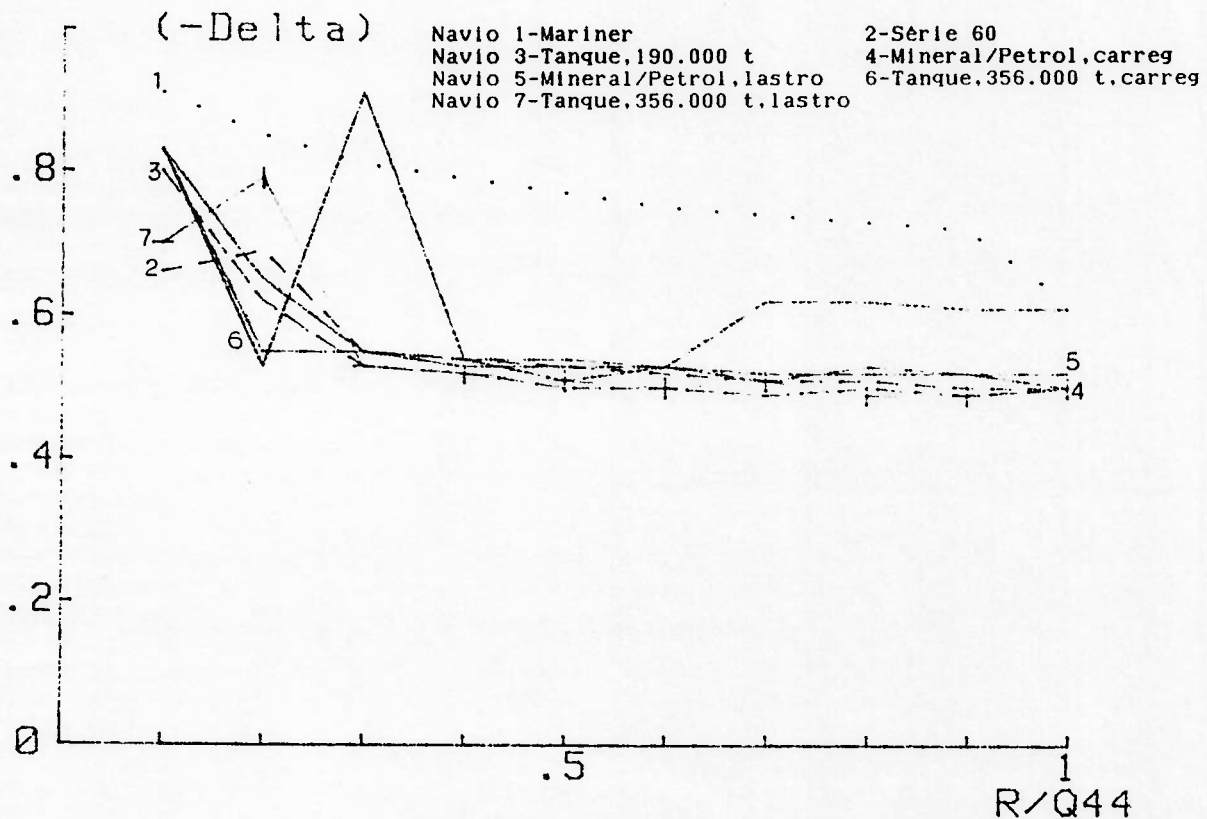


FIG. 7.7.C.Ganhos Comparativos de Angulo de Leme-Navios Estáveis e Instáveis-Procedimento (a#).

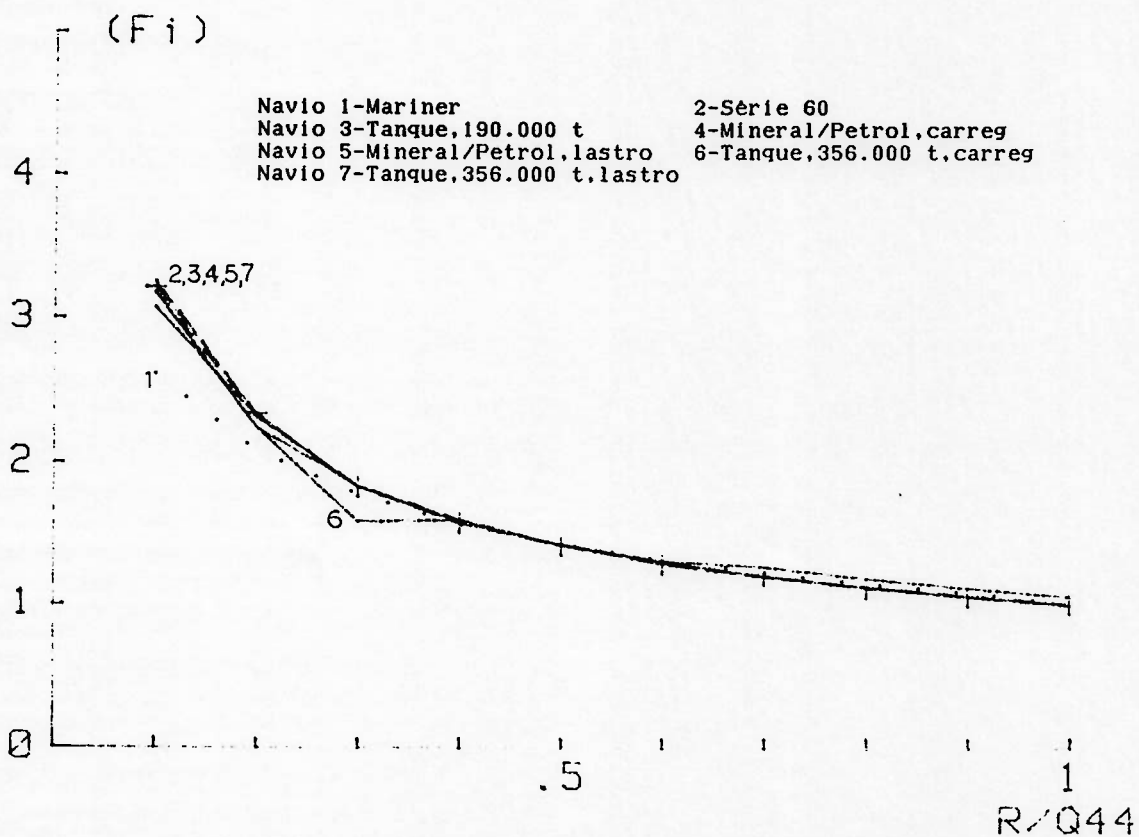


FIG. 7.7.D.Ganhos Comparativos de Angulo de Rumo-Navios Estáveis e Instáveis-Procedimento (a#).

7.3.0 Mapeamento do Índice de Desempenho

O mapeamento do índice de desempenho foi efetuado utilizando o controlador para um vetor de estado composto por 3 elementos $[v, r, \delta]$, como mencionado na seção 7.2.1. e com o avaliador mencionado em 3.3.

Na simulação verificou-se que o modelo para forças de 2ª ordem é inadequado, pois para algumas condições de agentes externos a faixa de forças de 2ª ordem esta próxima da discontinuidade da frequência de encontro da onda de $2,2\{w_e \sqrt{(\nabla^{1/3}/g)}\}$. Desta forma, alterou-se a definição das forças de 2ª ordem, tal que eliminou-se o degrau.

Simulou-se um intervalo de tempo de 418 segundos de navegação, o que corresponde a um avanço da embarcação de aproximadamente 20 vezes o comprimento da mesma.

Alterou-se as forças externas e os fatores de penalização Q_0 e R_0 , sendo que uma amostra dos resultados obtidos é mostrado na FIG.7.8.. Verificou-se que o controlador L.Q. é operacional para uma faixa da relação entre o custo de controle (R) e da taxa de variação do ângulo do leme (Q_{22}) inferior a 0,2, para as condições ensaiadas. Fora desta faixa o controlador não é operacional.

A influência da velocidade de deriva no avaliador do índice de desempenho é mínima, sendo que é desprezível para valores de R/Q_{22} inferiores a 1,5. A penalização da velocidade de deriva resultou em um aumento da faixa operacional do controlador, porém não alterou a posição do máximo.

Observou-se na comparação do avaliador do índice de desempenho (equação 3.19.) com o proposto por Tiano [33] (equação 3.19.), que o "máximo" é deslocado para valores de R/Q_{22} inferiores. Assim na FIG.7.8. o "máximo" esta localizado próximo a $R/Q_{22}=0,05$, enquanto que para o avaliador proposto por Tiano obteve-se $R/Q_{22}=0,15$.

As características da FIG.7.8. também foram observadas para outras combinações de agentes externos, porém a faixa de operação do controlador diminui com o aumento das forças externas.

Na comparação dos avaliadores obtidos com o índice de desempenho proposto por Reid [12] para um navio porta-contentor a 16 nós, verificou-se uma concordância com relação a faixa do controlador L.Q.. Reid obteve um valor de $R/Q_{22}=0,1488$ ($R/Q_{22}=1/6,72$) para o máximo, como foi mostrado na tabela 3.1.

Nas simulações realizadas não se observou variações do avaliador do índice de desempenho superiores a 0,2%, dentro da faixa operacional do controlador.

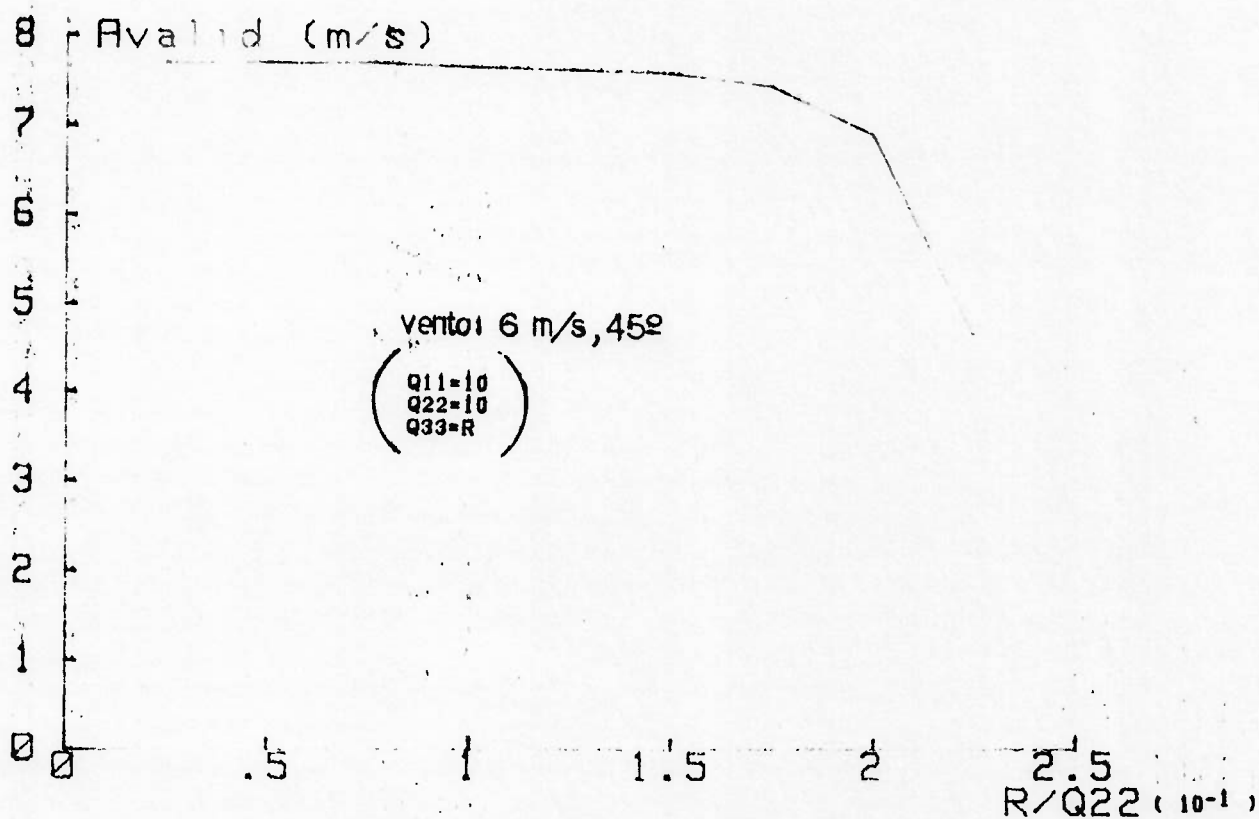


FIG. 7.8.B. Avaliador do Índice de Desempenho

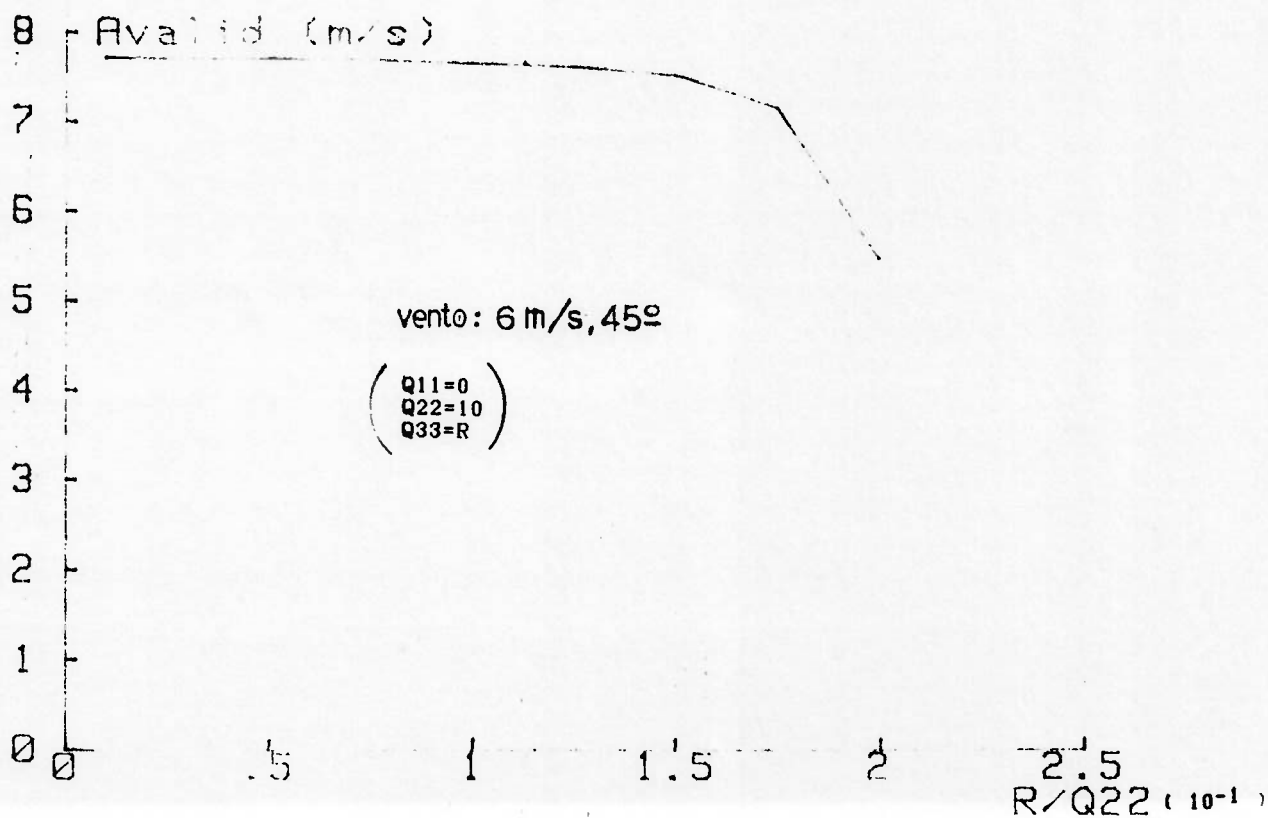


FIG. 7.8.A. Avaliador do Índice de Desempenho

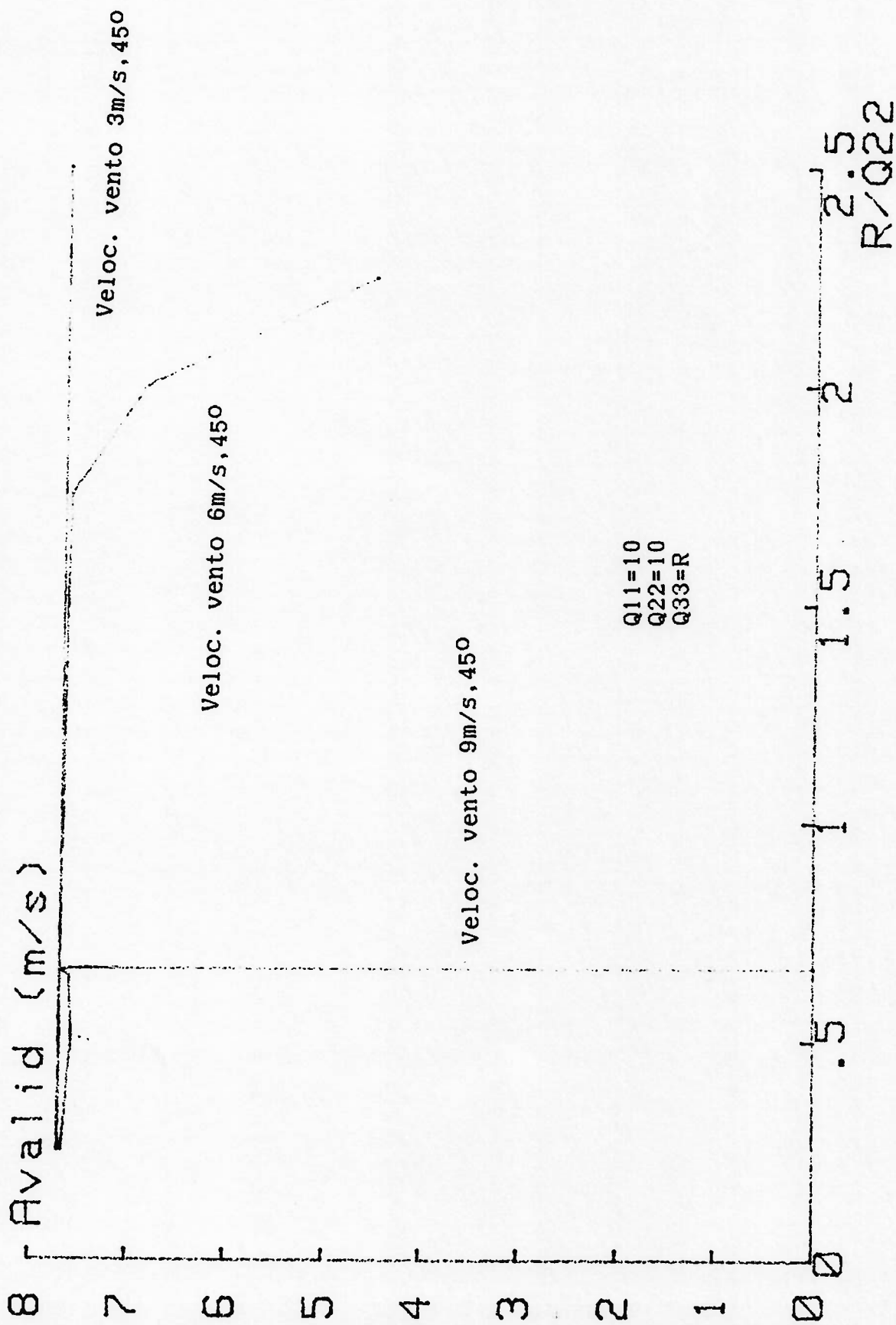


FIG.7.8.C.Avaliador do Índice de Desempenho

CAPITULO VII - Conclusões e Sugestões

Os objetivos expressos na seção 1.3. podem ser resumidos como: a compreensão do problema, a revisão bibliográfica, o projeto de um controlador ótimo L.Q., simulação do movimento da embarcação e mapeamento dos índices de desempenho, delimitando uma região de índices otimizados com relação ao consumo de combustível.

Acredita-se que a revisão bibliográfica é representativa das diversas tendências sobre o assunto.

O projeto do controlador ótimo L.Q. foi obtido através de dois diferentes procedimentos; o algoritmo de Kleinman[81] e da Matriz de Sinal[82], obtendo-se bons resultados. O Procedimento a# foi desenvolvido para se eliminar os inconvenientes causados no cálculo do controlador para um sistema com um estado redundante.

O modelo para simulação (modelo de avaliação) é suficientemente conveniente e preciso; necessitando de ajustes nos modelos das forças externas. O procedimento de mapeamento do índice de desempenho via avaliador também é considerado conveniente.

Duas conclusões básicas referem-se a velocidade de deriva e ao índice de desempenho. A aproximação da velocidade de deriva por uma função da taxa de variação do ângulo de rumo é aceitável, tendo em vista a pouca influência da mesma nos ganhos e no avaliador do índice de desempenho. O avaliador do índice de desempenho é praticamente constante para um faixa de valores ótima. A variação do avaliador dentro desta faixa é não significativa. Uma baixa seletividade do controlador próximo à região ótima era de se esperar, visto que um índice de desempenho quadrático penaliza fortemente os grandes desvios e fracamente os ligeiros desvios.

A próxima etapa é a melhoria do modelo das forças externas e a simulação da embarcação com um controlador que inclua as variáveis de estado $[v, r, \delta, \psi]$ e a comparação entre embarcações estáveis e instáveis.

É opinião do autor deste trabalho, que a diferença dos resultados obtidos pelos diversos pesquisadores reside no ponto mais delicado do piloto automático, qual seja, a precisa definição do seu objetivo.

APENDICES:

APENDICE A-Faixa de aplicação da hipótese de Froude-Krylov

A hipótese de Froude-Krylov é válida para:

$$K * Bn \ll 1,0 \quad (a.1)$$

onde K é o número de onda definido no item 4.3.4.4.1.
 Bn é a boca do navio.

Para águas profundas tem-se:

$$\frac{w^2}{g} * Bn \ll 1,0 \quad (a.2)$$

Para o navio Mariner tem-se:

$$w < 0,652 \text{ Hz} \quad (a.3)$$

ou seja ondas com período:

$$T > 9.63 \text{ seg} \quad (a.4)$$

APENDICE B-Controlabilidade do Sistema Navio

"Um sistema é dito controlável, se e somente se, for possível através da atuação da entrada, transferi-lo de um estado inicial qualquer $x(t_0)=x_0$ para um estado qualquer $x(t_f)=x_f$ em um intervalo finito de tempo T."

Para um sistema estacionário um critério de controlabilidade requer que a matriz:

$$[B_0 \mid A_0 * B_0 \mid \dots \mid A_0^{n-1} * B_0] \quad (b.1)$$

tenha posto igual a n [57].

Para o navio Mariner tem-se:

$$\begin{bmatrix} 0 & -a_{18} * a_1 & -a_{16} * a_{18} * a_1 - a_{17} * a_{21} * a_1 - a_{18} * a_1^2 \\ 0 & -a_{21} * a_1 & -a_{19} * a_{18} * a_1 - a_{20} * a_{21} * a_1 - a_{21} * a_1^2 \\ -a_1 & -a_1^2 & -a_1^3 \end{bmatrix}$$

para uma constante de tempo de 62,5 seg. tem-se:

$$= \begin{bmatrix} 0 & -0,17072 & -0,3528 \\ 0 & 1,63013 & -2,6438 \\ -1 & 0,3333 & -0,1111 \end{bmatrix} * a_1$$

$$= -1,4779$$

Posto igual a 3.

APENDICE C- Observabilidade do Par $[A_0 \ C]$

"Um sistema não forçado é dito observável, se e somente se, for possível determinar um estado inicial qualquer $x(t_0)=x_0$, utilizando-se de um registro finito da saída $y(t_f)=y_f$."

Para um sistema estacionário um critério de observabilidade requer que a matriz:

$$[C^T \mid A_0 * C^T \mid \dots \mid A_0^{n-1} * C^T] \quad (c.1)$$

tenha posto igual a n [57].

Para o sistema navio tem-se:

$$\begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & a_{16} * c_1 & a_{17} * c_2 & a_{18} * c_3 & (a_{16}^2 + a_{17} * a_{19}) * c_1 \\ 0 & c_2 & 0 & a_{19} * c_1 & a_{20} * c_2 & a_{21} * c_3 & (a_{19} * a_{16} + a_{20} * a_{19}) * c_1 \\ 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & a_1 * c_3 & 0 \\ & & & (a_{16} * a_{17} + a_{17} * a_{20}) * c_2 & (a_{16} * a_{18} + a_{17} * a_{21} + a_{18} * a_1) * c_3 & & \\ & & & (a_{19} * a_{17} + a_{17} * a_{19}) * c_2 & (a_{19} * a_{18} + a_{20} * a_{21} + a_{21} * a_1) * c_3 & & \\ & & & 0 & a_1^2 * c_3 & & \end{bmatrix} \quad (c.2)$$

para $c_i > 0$, $i=1,2,3$ o posto é igual a 3.

APENDICE D -Ponto Inicial de Busca para o Algoritmo de Solução da Equação Algébrica de Riccati

O algoritmo sugerido por Kleinman[81] requer que BA_0 tenha todos os autovalores com parte real negativa; onde:

$$BA_0 = A_0 - B_0 * L_0 \quad (d.1)$$

Se $L_0=0$, então BA_0 terá os mesmos autovalores do navio.

Para o navio Mariner tem-se:

$$A_0 = \begin{bmatrix} a16 & a17 & a18 \\ a19 & a20 & a21 \\ 0 & 0 & a1 \end{bmatrix}$$

Para o cálculo dos autovalores do sistema A_0 resolve-se a equação:

$$\det (s*I - A_0) = 0 \quad (d.2)$$

donde, para uma constante de tempo da máquina do leme de 62,5s, os autovalores de A_0 podem ser determinados resolvendo-se:

$$s^3 + 2,74531*s^2 + 0,9449*s + 0,046978 = 0 \quad (d.3)$$

Aplicando o critério de estabilidade de Routh[51], tem-se:

- todos os coeficientes da equação característica de A_0 tem o mesmo sinal.

- não há troca de sinal na coluna R.

	R	
s^3	1	0,9449
s^2	2,7453	0,0469
s^1	0,9280	0
s^0	0,0469	

Donde se conclui que A_0 tem todos os autovalores no semi-plano real negativo.

Este ponto inicial de busca independe da constante de tempo da máquina do leme, desde que a mesma não seja nula, pois a equação característica para o Mariner pode ser expressa por:

$$(s^2 + 2,412s + 0,1409)(s - a1) = 0 \quad (d.4)$$

Este procedimento para a escolha do ponto inicial de busca do algoritmo de Kleinman pode ser extendido para qualquer navio estável em linha reta.

APENDICE E-Implementação da Solução da Equação Algébrica de Riccati em um Micro-Computador:

```

/* PROGRAMA DE TESTES PARA A EQUACAO DE RICCATI-algorit. KLEINMAN */
#include "stdio.h"

double getnum(message)
char *message ;
(
    extern char *fgets() ;
    char buffer[128] ;
    double number ;

    fputs(message, stderr) ;
    if (fgets(buffer, 128, stdin) == NULL) return 0.0 ;
    if (sscanf(buffer, "%lf", &number) != 1) {
        fputs("Invalid input, please enter a number\n", stderr) ;
        return getnum(message) ;
    }
    return number ;
)

main()
(
    double getnum() ;
    float a16, a17, a18, a19, a20, a21, a1, q11, q22, q33, r ;
    float a[3][3], s[6][7], x[6], zz1, zz2, zz3 ;
    float v1, v12, v13, v22, v23, v33, z1, z2, z3 ;
    int i ;
    int gausei() ;
/*
    a[0][0] = a16 = (float)getnum(" Entre a16 :") ;
    a[0][1] = a17 = (float)getnum(" Entre a17 :") ;
    a[0][2] = a18 = (float)getnum(" Entre a18 :") ;
    a[1][0] = a19 = (float)getnum(" Entre a19 :") ;
    a[1][1] = a20 = (float)getnum(" Entre a20 :") ;
    a[1][2] = a21 = (float)getnum(" Entre a21 :") ;
        a1 = (float)getnum(" Entre a1 :") ;
    zz1 = (float)getnum(" Entre z1(0) :") ;
    zz2 = (float)getnum(" Entre z2(0) :") ;
    zz3 = (float)getnum(" Entre z3(0) :") ;
*/
    a[0][0] = a16 = -0.7691824544 ;
    a[0][1] = a17 = -0.3319281668 ;
    a[0][2] = a18 = 0.1707297843 ;
    a[1][0] = a19 = -3.3823752366 ;
    a[1][1] = a20 = -1.6428011475 ;
    a[1][2] = a21 = -1.6301338031 ;
        a1 = -6.9524099900 ;

    zz1 = 0 ;
    zz2 = 0 ;
    zz3 = 0 ;

    q11 = (float)getnum(" Entre q11 :") ;
    q22 = (float)getnum(" Entre q22 :") ;
    q33 = (float)getnum(" Entre q33 :") ;

    do {
        r = (float)getnum(" Entre r :") ;
        z1 = zz1 ; z2 = zz2 ; z3 = zz3 ;

        for (i = 1 ; i <= 15 ; i++) {

```



```

printf("Iteracao numero %d\n", i) ;

a[2][0] = a1 * z1 ;
a[2][1] = a1 * z2 ;
a[2][2] = a1 * (1.0 + z3) ;

s[0][0] = 2 * a[0][0] ; s[0][1] = 2 * a[1][0] ;
s[0][2] = 2 * a[2][0] ; s[0][3] = 0 ;
s[0][4] = 0 ; s[0][5] = 0 ;
s[1][0] = a[0][1] ; s[1][1] = a[0][0] + a[1][1] ;
s[1][2] = a[2][1] ; s[1][3] = a[1][0] ;
s[1][4] = a[2][0] ; s[1][5] = 0 ;
s[2][0] = a[0][2] ; s[2][1] = a[1][2] ;
s[2][2] = a[0][0] + a[2][2] ; s[2][3] = 0 ;
s[2][4] = a[1][0] ; s[2][5] = a[2][0] ;
s[3][0] = 0 ; s[3][1] = 2 * a[0][1] ;
s[3][2] = 0 ; s[3][3] = 2 * a[1][1] ;
s[3][4] = 2 * a[2][1] ; s[3][5] = 0 ;
s[4][0] = 0 ; s[4][1] = a[0][2] ;
s[4][2] = a[0][1] ; s[4][3] = a[1][2] ;
s[4][4] = a[1][1] + a[2][2] ; s[4][5] = a[2][1] ;
s[5][0] = 0 ; s[5][1] = 0 ;
s[5][2] = 2 * a[0][2] ; s[5][3] = 0 ;
s[5][4] = 2 * a[1][2] ; s[5][5] = 2 * a[2][2] ;

s[0][6] = - q11 - r * z1*z1 ; s[1][6] = - r * z1*z2 ;
s[2][6] = - r * z1*z3 ; s[3][6] = - q22 - r * z2*z2 ;
s[4][6] = - r * z2*z3 ; s[5][6] = - q33 - r * z3*z3 ;

if (gausel(s, 7, 6, 20, 1.0e-5, x) == 1)
printf(" Nao convergiu. \n") ;

v11 = x[0] ; v12 = x[1] ; v13 = x[2] ;
v22 = x[3] ; v23 = x[4] ; v33 = x[5] ;

z1 = - a1 * v13 / r ;
z2 = - a1 * v23 / r ;
z3 = - a1 * v33 / r ;
}

printf(" v11 = %f \n", v11) ;
printf(" v12 = %f \n", v12) ;
printf(" v13 = %f \n", v13) ;
printf(" v22 = %f \n", v22) ;
printf(" v23 = %f \n", v23) ;
printf(" v33 = %f \n", v33) ;

i = (int)getnum(" Deseja com outro valor de r ? (0 = s) ") ;
while (i == 0) ;
}

/* simultaneous linear equations by Gauss-Seidel method */
int gausel(a, l, m, nr, eps, x)
float a[], x[], eps ;
int l, m, nr ;
{
int i, j, k, s, t ;
double def, sum, w, y, ay ;

extern double fabs() ;

for (i = 0 ; i < m ; i++) x[i] = 0.0 ;
k = 1 ;
while (1) {
def = 0.0 ;
for (i = 0 ; i < m ; i++) {
sum = 0.0 ;
s = i * l ;
w = a[s + i] ;
for (j = 0 ; j < m ; j++)
if (i != j) sum += a[s+j] * x[j] ;
t = s + m ;
y = (a[t] - sum) / w ;
ay = fabs(y - x[i]) ;
if (ay > def) def = ay ;
x[i] = y ;
}
if (def <= eps) return (0) ;
if (k >= nr) return (1) ;
k++ ;
}
}

```

APENDICE F:Subrotinas HITACHI-MSL2

Um exemplo de aplicação das subrotinas HITACHI-MSL2 e o cabeçario das mesmas estão anexas. As subrotinas apesar de poderem ser acessadas não foram reproduzidas neste apêndice, visto que os direitos de reprodução pertencem a Hitachi.

```

00200 C
00300 C
00400 C
00500 C
00600 C
00700 C
00800 C
00900 C
01000 C
01100 C
01200 C
01300 C
01400 C
01500 C
01600 C
01700 C
01800 C
01900 C
02000 C
02100 C
02200 C
02300 C
02400 C
02500 C
02600 C
02700 C
02800 C
02900 C
03000 C
03100 C
03200 C
03300 C
03400 C
03500 C
03600 C
03700 C
03800 C
03900 C
04000 C
04100 C
04200 C
04300 C
04400 C
-----
S-1511-1 COPYRIGHT HITACHI, LTD. 1980
NAME          - *DIFIM : DOUBLE PRECISION
USAGE         - CALL *DIFIM(A,N,NA,EPS,RDET,IDET,WK,IWK,IER)
FUNCTION      - BY THE GAUSS-JORDAN METHOD, WE OBTAIN THE
                INVERSE MATRIX OF A REAL SQUARE MATRIX.
ARGUMENTS    A(NA,N)  - INPUT, REAL GENERAL MATRIX.
                N      - OUTPUT, INVERSE MATRIX IN (N,N).
                NA     - INPUT, ORDER N OF THE MATRIX (0<N<=NA).
                EPS    - INPUT, NUMBER OF ROWS OF THE MATRIX A IN THE
                DIMENSION STATEMENT OF THE MAIN PROGRAM.
                EPS    - INPUT, TOLERANCE FOR THE SINGULARITY
                (EPS)>=0.0).
                WHEN EPS<0.0 IS GIVEN, STANDARD VALUE IS
                ASSUMED.
RDET,IDET    - OUTPUT, DETERMINANT IS EXPRESSED AS
                RDET*2**IDET.
WK(N)        - WORK AREA
IWK(N)       - WORK AREA.
IER          - ERROR INDICATOR.
                IER= 0, NO ERROR WAS DETECTED.
                IER=2000, NS=0 OR N>NA.
                IER=3000, THE MATRIX IS NEARLY SINGULAR.
REQD, SUBPROGRAM - *SUERM, *SURTM
STATUS       - S-1511-1 04-02
HISTORY      - DATE.      1979.12
                1980. 7
                1980.11
                1982. 4
                1982. 9
                1983.12
-----

```

```

00100 C
00200 EXAMPLE *DIFIM
00300 IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
00400 DIMENSION A(10,10),IWK(10),WK(10)
00500 NA=10
00600 WRITE(6,200) N,EPS
00700 NM = N
00800 DO 20 I=1,N
00900 20 READ(5,300) (A(I,J),J=1,NM)
01000 DO 30 I=1,N
01100 30 WRITE(6,400)(A(I,J),J=1,NM)
01200 CALL *DIFIM(A,N,NA,EPS,RDET,IDET,WK,IWK,IER)
01300 DET = RDET*2**IDET
01400 WRITE(6,500) IER,DET,RDET,IDET
01500 DO 40 I=1,N
01600 40 WRITE(6,600) (A(I,J),J=1,N)
01700 GO TO 10
01800 99 STOP
01900 100 FORMAT( I10,D15.8 )
02000 200 FORMAT(1H1//1H ,5X,5HINPUT/1H ,8X,6HN      =,15
02100 *      /1H ,8X,6HEPS  =,D15.5
02200 *      /1H ,8X,6HA(N,N) )
02300 300 FORMAT(4D15.7)
02400 400 FORMAT(8X,7D15.5)
02500 500 FORMAT(1H0,5X,6HOUTPUT
02600 *      /1H ,8X,6HIER  =,15
02700 *      /1H ,8X,6HDET  =,D25.15
02800 *      /1H ,8X,6HDET  =,D25.15/1H ,8X,6HIDET =,15
02900 *      /1H ,8X,6HA(N,N) )
03000 600 FORMAT(8X,4D24.15)
03100 END

```



```

00200 C
00300 C
00400 C
00500 C
00600 C
00700 C
00800 C
00900 C
01000 C
01100 C
01200 C
01300 C
01400 C
01500 C
01600 C
01700 C
01800 C
01900 C
02000 C
02100 C
02200 C
02300 C
02400 C
02500 C
02600 C
02700 C
02800 C
02900 C
03000 C
03100 C
03200 C
03300 C
03400 C
03500 C
03600 C
03700 C
03800 C
03900 C
04000 C
04100 C
04200 C
04300 C
04400 C
04500 C
04600 C
04700 C
04800 C
04900 C
05000 C
05100 C
05200 C
05300 C
05400 C
05500 C

-----
S-1511-1 COPYRIGHT HITACHI, LTD. 1980

NAME          - *DNSBM ; DOUBLE PRECISION
USAGE         - CALL *DNSBM (FUNC,X,N,XEPS,FEPS,ITMAX,
                FNORM,WK1,WK2,IER)
FUNCTION      - BY THE BRENT METHOD, WE OBTAIN THE NUMERICAL
                SOLUTION OF NONLINEAR EQUATIONS.
ARGUMENTS    - FUNCTION NAME.
                FUNC MUST BE DEFINED AS A FUNCTION SUBPROG-
                RAM THAT REQUIRES THE EXTERNAL DECLARATION
                IN THE MAIN PROGRAM.
                X(N)  - INPUT, THE STARTING VECTOR.
                N     - OUTPUT, THE SOLUTION VECTOR.
                XEPS - INPUT, NUMBER OF VARIABLES AND EQUATIONS.
                XEPS - INPUT, CRITERION FOR CONVERGENCE OF VARIABLES
                (XEPS>=0.0).
                FEPS - INPUT, CRITERION FOR CONVERGENCE OF FUNCTION
                VALUE (FEPS>=0.0).
                ITMAX - INPUT ALLOWABLE NUMBER OF ITERATIONS
                (ITMAX>=1).
                FNORM - OUTPUT, NUMBER OF ITERATIONS PRACTICALLY CAR-
                RIED OUT.
                FNORM - OUTPUT, NORM OF FUNCTION VALUES WITH SOLUTION
                VECTOR.
                WK1(N,N) - WORK AREA.
                WK2(N,5) - WORK AREA.
                IER   - ERROR INDICATOR.
                IER= 0; NO ERROR WAS DETECTED.
                IER=1000; XEPS IS TOO SMALL.
                IER=2000; N<1, XEPS<0, FEPS<0 OR ITMAX<1.
                IER=3000; NOT CONVERGED DESPITE THE SPECIF-
                IED NUMBER OF ITERATIONS.
                IER=3100; JACOBIAN IS NEARLY SINGULAR.
                IER=3200; THE ITERATION IS DIVERGING.
                IER=3300; LACK OF GOOD PROGRESS.
                THE ARGUMENTS ARE
                X(N) ; VECTOR OF VARIABLES.
                N   ; NUMBER OF VARIABLES.
                K   ; FUNCTION NUMBER (1<=K<=N).
REQD. USER SUBPROG. - FUNC(X,N,K) ; DOUBLE PRECISION
                THE ARGUMENTS ARE
                X(N) ; VECTOR OF VARIABLES.
                N   ; NUMBER OF VARIABLES.
                K   ; FUNCTION NUMBER (1<=K<=N).
REQD. MSLI1 SUBPROG.- *SUERM, *SURTM
STATUS          - S-1511-1 02-00
HISTORY        - DATE. 1980.11
-----

```

```

00100 C
00200 C
00300 C
00400 C
00500 C
00600 C
00700 C
00800 C
00900 C
01000 C
01100 C
01200 C
01300 C
01400 C
01500 C
01600 C
01700 C
01800 C
01900 C
02000 C
02100 C
02200 C
02300 C
02400 C
02500 C
02600 C
02700 C
02800 C
02900 C
03000 C

EXAMPLE *DNSBM
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
EXTERNAL FUNC
DIMENSION X(2),WK1(2,2),WK2(2,5)
READ(5,1000) N,ITMAX,XEPS,FEPS
READ(5,1100) (X(I),I=1,N)
WRITE(6,1200) N,ITMAX,XEPS,FEPS
WRITE(6,1300) (X(I),I=1,N)
CALL *DNSBM (FUNC,X,N,XEPS,FEPS,ITMAX,FNORM,WK1,WK2,IER)
WRITE(6,1400) IER,ITMAX,FNORM
WRITE(6,1500) (X(I),I=1,N)
STOP
1000 FORMAT(2I5,2D15.5)
1100 FORMAT(4D15.5)
1200 FORMAT(1H1//1H,5X,'INPUT',1H,8X,'N',15/
        * 1H,8X,'ITMAX=',15/1H,8X,'XEPS',15/
        * 1H,8X,'FEPS',15/1H,8X,'D26.15')
1300 FORMAT(1H,8X,'X(N)'/1H,10X,4D26.15))
1400 FORMAT(1H,5X,'OUTPUT',1H,8X,'IER',15/
        * 1H,8X,'ITMAX',15/1H,8X,'FNORM',15/
        * 15/1H,8X,'D26.15')
1500 FORMAT(1H,8X,'D26.15')
END
REAL FUNCTION FUNC*8 (X,N,K)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION X(N)
GO TO (10,20),K
10 FUNC=X(1)**3-3.0D0*X(1)*X(2)+X(2)**3
GO TO 99
20 FUNC=X(1)**2+X(2)**2+DSIN(X(1))-2.0D0
99 RETURN
END

```



```

00200 C
00300 C
00400 C
00500 C
00600 C
00700 C
00800 C
00900 C
01000 C
01100 C
01200 C
01300 C
01400 C
01500 C
01600 C
01700 C
01800 C
01900 C
02000 C
02100 C
02200 C
02300 C
02400 C
02500 C
02600 C
02700 C
02800 C
02900 C
03000 C
03100 C
03200 C
03300 C
03400 C
03500 C
03600 C
03700 C
03800 C
03900 C
04000 C
04100 C
04200 C
04300 C
04400 C
04500 C
04600 C
04700 C
04800 C
04900 C
05000 C
05100 C
-----
S-1511-1 COPYRIGHT HITACHI, LTD. 1980
NAME          - %DVAHM : DOUBLE PRECISION
USAGE         - CALL %DVAHM (A,N,NA,8,IOPT,R,IER)
FUNCTION      - PERFORM THE FOLLOWING ADDITION OR SUBTRACTION
                OF REAL SYMMETRIC MATRICES A AND B GIVEN IN
                THE FORM OF COMPRESSED-FORM ONE-DIMENSIONAL
                ARRAYS, THAT IS,
                R = A + B
                R = A - B .
ARGUMENTS A(NA)
              INPUT, REAL SYMMETRIC MATRIX. GIVE ONLY LOWER
              TRIANGULAR MATRIX ELEMENTS IN ORDER OF
              A11, A21, A22, A31, A32 A33, ... ,
              AN1, ... , ANN.
N            - INPUT, ORDER N OF AN INPUT MATRIX (N>=1).
NA          - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF A, B AND R IN
              THE DIMENSION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM
              (NA>=N(N+1)/2).
B(NA)       - INPUT, REAL SYMMETRIC MATRIX. GIVE ONLY LOWER
              TRIANGULAR MATRIX ELEMENTS IN ORDER OF
              B11, B21, B22, B31, B32, B33, ... ,
              BN1, ... , BNN.
IOPT        - INPUT, EITHER ADDITION OR SUBTRACTION IS
              INDICATED.
              IOPT=1, (R=A-B)
              IOPT=2, (R=A+B)
R(NA)       - OUTPUT, THE RESULT OF ADDITION OR SUBTRACTION
              IS OBTAINED, LOWER TRIANGULAR MATRIX
              ELEMENTS ARE OBTAINED CONTINUOUSLY IN ORDER
              OF R11, R21, R22, R31, R32, R33, ... ,
              RN1, ... , RNN.
IER         - ERROR INDICATOR.
              IER= 0, NO ERROR WAS DETECTED.
              IER=2000, N<1, NA<N(N+1)/2, IOPT<1 OR
              IOPT>2.
REGD, MSLII SUBPROG, - %SUERM, %SURTM
STATUS      - S-1511-1 02-00
HISTORY     - DATE.   1979.12
              1980.11
-----
00100 C
00200 C
00300 C
00400 C
00500 C
00600 C
00700 C
00800 C
00900 C
01000 C
01100 C
01200 C
01300 C
01400 C
01500 C
01600 C
01700 C
01800 C
01900 C
02000 C
02100 C
02150 C
02200 C
02300 C
02400 C
02500 C
EXAMPLE %DVAHM
IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
DIMENSION A(1250),B(1250),R(1250)
10 READ (5,100,END=90) N,IOPT
WRITE(6,200) N,IOPT
NN = (N*N+N)/2
READ(5,110) (A(I),I=1,NN)
WRITE(6,210) (A(I),I=1,NN)
READ(5,110) (B(I),I=1,NN)
WRITE(6,220)
WRITE(6,210) (B(I),I=1,NN)
NA = 1250
CALL %DVAHM(A,N,NA,8,IOPT,R,IER)
WRITE(6,230) IER
IF (IER.EQ.2000) GO TO 10
WRITE(6,210) (R(I),I=1,NN)
GO TO 10
90 STOP
100 FORMAT(2I5)
110 FORMAT(30I5,7)
200 FORMAT(1H1///1H ,5X,5HINPUT/9X,6HN
           /9X,13HA( N(N+1)/2 ))
*
210 FORMAT(1H ,7X,3D24,15)
220 FORMAT(9X,13HB( N(N+1)/2 ))
230 FORMAT(1H0,5X,6HOUTPUT/9X,6HIER =,15/9X,13HR( N(N+1)/2 ))
END

```

```

00200 C
00300 C
00400 C
00500 C
00600 C
00700 C
00800 C
00900 C
01000 C
01100 C
01200 C
01300 C
01400 C
01500 C
01600 C
01700 C
01800 C
01900 C
02000 C
02100 C
02200 C
02300 C
02400 C
02500 C
02600 C
02700 C
02800 C
02900 C
03000 C
03100 C
03200 C
03300 C
03400 C
03500 C
03600 C
03700 C
03800 C
03900 C
04000 C
04100 C
04200 C
04300 C
04400 C
04500 C
04600 C
04700 C
04800 C
04900 C
05000 C
05100 C
-----
S-1511-1 COPYRIGHT HITACHI,LTD. 1980
NAME - %DVAFM : DOUBLE PRECISION
USAGE - CALL %DVAFM (A,N,M,NA,B,NB,IOPT,R,NR,IER)
FUNCTION - PERFORM THE FOLLOWING ADDITION OR SUBTRACTION
          OF REAL MATRICES A AND B GIVEN IN THE FORM
          OF GENERAL TWO-DIMENSIONAL ARRAYS.
          R = A + B
          R = A - B
ARGUMENTS A(NA,M) - INPUT, REAL MATRIX,
            N - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF INPUT MATRICES
            A AND B (N>=1),
            M - INPUT, NUMBER OF THE COLUMNS OF INPUT MATRICES
            A AND B (M>=1),
            NA - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF A IN THE
            DIMENSION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM
            (NA>=N),
            B(NB,M) - INPUT, REAL MATRIX,
            NB - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF B IN THE
            DIMENSION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM
            (NB>=N),
            IOPT - INPUT, EITHER ADDITION OR SUBTRACTION IS
            INDICATED,
            IOPT=1, (R=A-B)
            IOPT=2, (R=A+B)
R(NR,M) - OUTPUT, THE RESULT OF ADDITION OR SUBTRACTION
          IS OBTAINED,
NR - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF R IN THE
     DIMENSION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM
     (NR>=N),
IER - ERROR INDICATOR,
     IER= 0, NO ERROR WAS DETECTED,
     IER=2000, N<1, M>NA, NB, NR, M<1, IOPT<1
          OR IOPT>2.
REGD. MSLII SUBPROG.- %SUERM, %SURTM
STATUS - S-1511-1 02-00
HISTORY - DATE. 1979.12
          1980.11
-----

```

```

00100 C
00200 C
00300 C
00400 C
00500 C
00600 C
00700 C
00800 C
00900 C
01000 C
01100 C
01200 C
01300 C
01400 C
01500 C
01600 C
01700 C
01800 C
01900 C
02000 C
02100 C
02200 C
02300 C
02400 C
02500 C
02600 C
02700 C
02800 C
02900 C
03000 C
03100 C
03200 C
-----
EXAMPLE %DVAFM
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION A(10,10),B(10,10),R(10,10)
NA = 10
NB = 10
NR = 10
10 READ (5,100,END=90) N,M,IOPT
   WRITE(6,200) N,M,IOPT
20 READ(5,110) (A(I,J),J=1,M)
   DO 30 I=1,N
30 READ(5,110) (B(I,J),J=1,M)
   DO 40 I=1,N
40 WRITE(6,210) (A(I,J),J=1,M)
   WRITE(6,220)
   DO 50 I=1,N
50 WRITE(6,210) (B(I,J),J=1,M)
   CALL %DVAFM(A,N,M,NA,B,NB,IOPT,R,NR,IER)
   WRITE(6,230) IER
   IF (IER.EQ.2000) GO TO 10
   DO 60 I=1,N
60 WRITE(6,210) (R(I,J),J=1,M)
   GO TO 10
90 STOP
100 FORMAT(3I5)
110 FORMAT(30I5.7)
200 FORMAT(1H1//1H,5X,5HINPUT/9X,6HN =,15/9X,6HM =,15
      * /9X,6HIOPT =,15/9X,6HA(N,M))
210 FORMAT(8X,4024.15)
220 FORMAT(9X,6HB(N,M))
230 FORMAT(1H0,5X,6HOUTPUT/9X,6HIER =,15/9X,6HR(N,M))
      END

```

00200 C
 00300 C
 00400 C
 00500 C
 00600 C
 00700 C
 00800 C
 00900 C
 01000 C
 01100 C
 01200 C
 01300 C
 01400 C
 01500 C
 01600 C
 01700 C
 01800 C
 01900 C
 02000 C
 02100 C
 02200 C
 02300 C
 02400 C
 02500 C
 02600 C
 02700 C
 02800 C
 02900 C
 03000 C
 03100 C
 03200 C
 03300 C
 03400 C
 03500 C
 03600 C
 03700 C
 03800 C
 03900 C
 04000 C
 04100 C
 04200 C

 S-1511-1 COPYRIGHT HITACHI, LTD. 1980
 NAME - %DVMFM : DOUBLE PRECISION
 USAGE - CALL %DVMFM (A,N,M,NA,B,L,NB,R,NR,IER)
 FUNCTION - PERFORM MULTIPLICATION R=A*B OF REAL MATRICES
 A AND B GIVEN IN THE FORM OF GENERAL TWO-
 DIMENSIONAL ARRAYS.
 ARGUMENTS A(N,M) - INPUT, REAL MATRIX,
 N - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF A AND R (N>=1),
 M - INPUT, NUMBER OF THE COLUMNS OF A AND NUMBER
 OF THE ROWS OF B (M>=1),
 NA - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF A IN THE DIMENS-
 ION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM (NA>=N),
 B(NB,L) - INPUT, REAL MATRIX,
 L - INPUT, NUMBER OF THE COLUMNS OF B AND R(L>=1),
 NB - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF B IN THE DIMENS-
 ION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM (NB>=M),
 R(NR,L) - OUTPUT, THE RESULT OF MULTIPLICATION IS OBTAIN-
 ED.
 NR - INPUT, NUMBER OF THE ROWS OF R IN THE DIMENS-
 ION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM (NR>=N).
 IER - ERROR INDICATOR.
 IER= 0, NO ERROR WAS DETECTED,
 IER=2000, N<1, L<1, M<1, N>NA, M>NB, OR
 N>NR.
 REQD. MSLII SUBPROG.- %SUERM, %SURTM
 STATUS - S-1511-1 02-00
 HISTORY - DATE. 1979.12
 1980.11

00100 C

EXAMPLE %DVMFM
 IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
 DIMENSION A(10,10),B(10,10),R(10,10)
 NA = 10
 NB = 10
 NR = 10
 10 READ (5,100,END=90) N,M,L
 WRITE(6,200) N,M,L
 DO 20 I=1,N
 DO 30 J=1,M
 DO 40 I=1,N
 DO 50 I=1,M
 CALL %DVMFM(A,N,M,NA,B,L,NB,R,NR,IER)
 IF (IER.EQ.2000) GO TO 10
 DO 60 I=1,N
 DO 60 J=1,M
 GO TO 10
 90 STOP
 100 FORMAT(3I5)
 110 FORMAT(30I5.7)
 200 FORMAT(1H1//1H,5X,5HINPUT/9X,5HN =,15
 /9X,5HM =,15/9X,5HL =,15/9X,6HA(N,M))
 210 FORMAT(1H,7X,4D24.15)
 220 FORMAT(1M,8X,6H8(M,L))
 230 FORMAT(1H0,5X,6HOUTPUT/9X,5HIER =,15/9X,6HR(N,L))
 END

00200
 00300
 00400
 00500
 00600
 00700
 00800
 00900
 01000
 01100
 01200
 01300
 01400
 01500
 01600
 01700
 01800
 01900
 02000
 02100
 02200
 02300
 02400
 02500
 02600
 02700
 02800
 02900
 03000
 03100
 03200

SURROUTINE *DLF1M (A,N,NA,B,EPS,I0PT,IP,WK,IER)

S-1511-1 COPYRIGHT HITACHI, LTD. 1980

NAME - *DLF1M : DOUBLE PRECISION
 USAGE - CALL *DLF1M(A,N,NA,B,EPS,I0PT,IP,WK,IER)
 FUNCTION - BY GAUSS'S METHOD (LU-DECOMPOSITION), WE SOLVE THE SYSTEM OF REAL LINEAR EQUATIONS IN N UNKNOWNMS.
 ARGUMENTS A(N,N) - INPUT. MATRIX FORMED BY THE LEFT-SIDE COEFFICIENTS OF THE EQUATIONS.
 I0PT - INPUT. MATRIX WHOSE LU-DECOMPOSITION HAS BEEN COMPLETED.
 N - INPUT. NUMBER OF UNKNOWNMS (0<N<=NA).
 NA - INPUT. NUMBER OF ROWS OF THE MATRIX A IN THE DIMENSION STATEMENT OF A MAIN PROGRAM.
 B(N) - INPUT. RIGHT-SIDE VECTOR.
 EPS - INPUT. TOLERANCE FOR THE SINGULARITY (EPS>=0.,0).
 WHEN EPS<0.0 IS GIVEN, STANDARD VALUE IS ASSUMED.
 I0PT - INPUT.
 I0PT=1, LU-DECOMPOSITION AND SOLUTION OF THE EQUATION.
 I0PT=2, LU-DECOMPOSITION ONLY.
 I0PT=3, SOLUTION OF THE EQUATION ONLY.
 IP(N) - OUTPUT. THE ROW NUMBER WHICH WAS SELECTED AS A PIVOT ROW IN THE K-TH FACTORIZATION PROCESS IS GIVEN TO IP(K) (K=1,...,N).
 WK(N) - WORK AREA.
 IER - ERROR INDICATOR.
 IER= 0, NO ERROR WAS DETECTED.
 IER=2000, N<=0, N>NA, I0PT<1 OR I0PT>3.
 IER=3000+L, THE MATRIX IS NEARLY SINGULAR.

REQD. SUBPROGRAM - *SUERM, *SURTM
 STATUS - S-1511-1 04-00-7A
 HISTORY - DATE. 1979.12
 1980. 7
 1980.11
 1982. 4
 1982. 9

```

00100 C
00200 EXAMPLE *DLF1M
00300 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
00400 DIMENSION A(10,10),B(10),WK(10),IP(10)
00500 NA=10
00600 I0PT = 1
00700 READ(5,100,END=99) N,EPS
00800 WRITE(6,200) N,EPS,I0PT
00900 DO 20 I=1,N
01000 READ(5,300) (A(I,J),J=1,N),B(I)
01100 DO 30 I=1,N
01200 WRITE(6,400) (A(I,J),J=1,N)
01300 DO 35 I=1,N
01400 WRITE(6,400) B(I)
01500 CALL *DLF1M(A,N,NA,B,EPS,I0PT,IP,WK,IER)
01600 WRITE(6,500) IER
01700 DO 40 I=1,N
01800 WRITE(6,400) (A(I,J),J=1,N)
01900 WRITE(6,800)
02000 DO 45 I=1,N
02100 WRITE(6,400) B(I)
02200 DO 50 I=1,N
02300 WRITE(6,600)
02400 DO 50 I=1,N
02500 WRITE(6,700) IP(I)
02600 GO TO 10
02700 STOP
02800 100 FORMAT(15,010.3)
02900 200 FORMAT(11H//1H,5X,5HINPUT/9X,6HN =,15
03000 * /9X,6HEPS =,024.15/9X,6HI0PT =,15
03100 * /9X,6HA(N,N) )
03200 300 FORMAT(4D10.3)
03300 400 FORMAT(8X,4D24.15)
03500 500 FORMAT(1H0,5X,6HOUTPUT/9X,6HIER =,15
03600 * /9X,6HA(N,N) )
03700 600 FORMAT(9X,5HIP(N) )
03800 700 FORMAT(9X,15)
03900 800 FORMAT(9X,4HB(N) )
04000 END
  
```


APENDICE G- Características do Navio

Estão listadas as características dos seguintes navios:

1. Navio Cargueiro, Série 60;
2. Navio Tanque, 190.000 t dwt, condição carregado;
3. Mineraleiro-Petroleiro, 282.000 t dwt, cond. carregado e em lastro;
4. Navio Tanque, 356.000 t dwt, cond. carregado e em lastro;
5. Navio Cargueiro, Tipo Mariner.

As características listadas dos quatros primeiros navios preenchem os requisitos do modelo de trabalho. Já as características listadas do Mariner permitem a utilização do modelo de trabalho e de avaliação.

1. Navio Cargueiro, Série 60

As características principais do Cargueiro-Série 60 são as seguintes [41]:

Lpp	=	160,0	m	;
Boca	=	22,9	m	;
Calado Vante	=	9,14	m	;
Calado Ré	=	9,14	m	;
Deslocamento	=	23400,0	m ³	;
Veloc. Proj.	=	15,18	nós	;
Coeficiente de Bloco	=	0,70		;
Rotação Nominal do Hélice	=	74,4	rpm	.

Derivadas Hidrodinâmicas (valores adimensionais-Sistema SNAME):

m-Yvp	=	0,0229	;
m*xg-Yrp	=	0,00039	;
m*xg-Nvp	=	0,00048	;
IZ-Nrp	=	0,0012	;
Yv	=	-0,0222	;
Yr-m	=	-0,0076	;
Nv	=	-0,00567	;
Nr-m*xg	=	-0,0034	;
Yd	=	0,00211	;
Nd	=	-0,00105	.

2.Navio Tanque,190.000 t dwt,Cond.Carregado

As características principais do Tanque,190.000 t dwt são as seguintes [41]:

Lpp	=	304,8	m ;
Boca	=	47,17	m ;
Calado Vante	=	18,46	m ;
Calado Rê	=	18,46	m ;
Deslocamento	=	220.000,0	m ³ ;
Veloc.Proj.	=	16,0	nós;
Rotação Nominal do Hélice	=	80,0	rpm.

Derivadas Hidrodinâmicas(valores adimensionais-Sist.SNAME):

m-Yvp	=	0,03139;
m*xg-Yrp	=	0,0 ;
m*xg-Nvp	=	0,0 ;
Iz-Nrp	=	0,00192;
Yv	=	-0,01873;
Yr-m	=	-0,01169;
Nv	=	-0,00701;
Nr-m*xg	=	-0,00359;
Yd	=	0,00323;
Nd	=	-0,00152.

3.Mineraleiro-Petroleiro,282.000 t dwt

As características principais do Mineraleiro-Petroleiro, 282.000 t dwt são as seguintes [41]:

Lpp	=	321,56	m ;
Boca	=	54,56	m ;
		<u>Carregado</u>	<u>Lastro</u>
Calado Vante	=	21,67	12,25 m ;
Calado Rê	=	21,67	14,91 m ;
Deslocamento	=	312.200	188.900 m ³ ;
Veloc.Proj.	=	16,0	17,09 nós;
Rotação Nominal do Hélice	=	100,8	98,4 rpm.

Derivadas Hidrodinâmicas(valores adimensionais-Sist.SNAME):

<u>Condição</u>	<u>Carregada</u>	<u>Lastro</u>
m-Yvp	= 0,03705	0,01899;
m*xg-Yrp	= 0,00152	0,00057;
m*xg-Nvp	= 0,00115	0,00048;
Iz-Nrp	= 0,00205	0,00112;
Yv	= -0,01767	-0,00982;
Yr-m	= -0,01284	-0,00779;
Nv	= -0,00930	-0,00352;
Nr-m*xg	= -0,00368	-0,00209;
Yd	= 0,00314	0,00227;
Nd	= -0,00145	-0,00106.

4. Navio Tanque, 356.000 t dwt

As características principais do Tanque, 356.000 t dwt são as seguintes [41]:

Lpp	=	350	m	;
Boca	=	60	m	;
		<u>Carregado</u>	<u>Lastro</u>	<u>.</u>
Calado Vante	=	22,3	9,0	m ;
Calado Rê	=	22,3	12,0	m ;
Deslocamento	=	389.100,0	172.400,0	m ³ ;
Veloc. Proj.	=	15,8	17,25	nós;
Rotação Nominal do Hélice	=	87,6	87,6	rpm.

Derivadas Hidrodinâmicas (valores adimensionais-Sist.SNAME):

<u>Condição</u>	<u>Carregada</u>	<u>Lastro</u>	<u>.</u>
m-Yvp	= 0,03303	0,01407	;
m*xg-Yrp	= 0,0	0,0	;
m*xg-Nvp	= 0,0	0,0	;
Iz-Nrp	= 0,00187	0,00083	;
Yv	= -0,01500	-0,00607	;
Yr-m	= -0,01429	-0,00631	;
Nv	= -0,00749	-0,00164	;
Nr-m*xg	= -0,00340	-0,00145	;
Yd	= 0,00319	0,00203	;
Nd	= -0,00151	-0,00095	.

5. Navio Cargueiro, Tipo Mariner

As características principais do Mariner são as seguintes [68]:

Lpp	=	160,93	m;
Boca	=	23,17	m;
Calado Vante	=	6,85	m;
Calado Rê	=	7,83	m;
LCG	=	-3,70	m;
Raio de Giro	=	35,94	m;
Deslocamento	=	16005,0	ton;
Veloc. Proj.	=	15,0	nós;
Veloc. Giro	=	3,0	graus/seg;
do leme			
Rotação Nominal do Hélice	=	68,6	rpm.

Derivadas Hidrodinâmicas (valores adimensionais-Sist.SNAME):

m = 0,00800 ;
 xg = -0,02299 ;
 In = 0,22333 ;

 Xu = -0,00120 ;
 Xuu = 0,00090 ;
 Xuuu = -0,00062 ;
 Xvv = -0,01797 ;
 Xrr = 0,00072 ;
 Xdd = -0,00189 ;
 Xvuu = 0,0 ;
 Xrru = 0,0 ;
 Xddu = 0,0 ;
 Xvr = -0,00002 ;
 Xvd = 0,00093 ;
 Xrd = 0,0 ;
 Xvru = 0,0 ;
 Xvdu = 0,0 ;
 Xrdu = 0,0 ;
 Xup = -0,00040 ;

 Yv = -0,01160 ;
 Yvvv = -0,48469 ;
 Yvrr = 0,0 ;
 Yvdd = -0,00007 ;
 Yvu = 0,0 ;
 Yvuu = 0,0 ;
 Yr = 0,00301 ;
 Yrrr = 0,0 ;
 Yrvv = 0,30712 ;
 Yrdd = 0,0 ;
 Yru = 0,0 ;
 Yruu = 0,0 ;
 Yd = 0,00278 ;
 Yddd = -0,00540 ;
 Ydvv = 0,02379 ;
 Ydrr = 0,0 ;
 Ydu = 0,0 ;
 Yduu = 0,0 ;
 Yvrd = 0,0 ;
 Yvp = -0,00746 ;
 Yrp = -0,000097 ;

Nv = -0,00263 ;
Nvvv = 0,09816 ;
Nvrr = 0,0 ;
Nvdd = 0,00025 ;
Nvu = 0,0 ;
Nvuu = 0,0 ;
Nr = -0,00147 ;
Nrvv = 0,0 ;
Nrdd = 0,0 ;
Nru = 0,0 ;
Nruu = 0,0 ;
Nd = -0,00139 ;
Nddd = 0,00270 ;
Ndvv = -0,00978 ;
Ndr = 0,0 ;
Ndu = 0,0 ;
Nduu = 0,0 ;
Nvrd = 0,0 ;
Nvp = 0,000043 ;
Nrp = 0,22251 .

As características geométricas da linha d'água à altura do calado de projeto constam da listagem de computador anexa.

APENDICE H:0 Programa de Computador-Vetor 3 Variav.Estado

O programa de computador foi desenvolvido em linguagem Fortran-77. Na listagem anexa constam as ordens de impressão utilizadas durante a última fase de teste.


```

*****
* USLPIID = 0340400
* PROCEDURE = LOGONU
*****

```

```

*****
TSLOG STARTED TIME=14:10:02 DATE=87-06-25
*****
READY
FE

```

```

*****
** S = KREBS
EDIT
L
00010 IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
00020 DIMENSION VAR(7),FI(060),AVALID(625)
00030 DIMENSION AE2(3,3),AE3(3,3),AE4(3,3),AE5(3,3)
00040 *
00050 *
00060 *
00070 *

```

```

*****
COMMON/GEOM/CASCO(20),YM(20),DELX,X(21),Y(21)
COMMON/VENT/ALA,ATA,ZLOA,F,VK,FIV,F2V,F6V
COMMON/COR/VC,ZMASS,GAMA,XG,F1C,F2C,F6C
COMMON/F1A/VK1,VN,ZMUF1,ZMUF2,ZMUF6
COMMON/F2A/DEL,F120,F220,F620
COMMON/SFOR/F1T(060),F2T(060),F6T(060),I,J,ADF
COMMON/MOV/DIC(060),UI(060),VI(060),RI(060),DI(060),ZH
COMMON/MOV2/FIN(060),XOG(060),YOG(060),DELT,AVAIPT(625)
COMMON/CFHDP/A16,A17,A18,A19,A20,A21,A1,AF1,AF2,AF3,AF4
COMMON/CA/A2,A3,A4,A5,A6,A7,AM,A9,A10,A11,A12,A13,A14,A15
COMMON/P0/Q11,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,7AMB
COMMON/P1/P11,P12,P22,P13,P23,P33,PPP
COMMON/ZK0/DEI,TH,ZK(3)
COMMON/CF1/ X1,XUU,XUUU,XVV,XRR,XD0,XVU,XRRU,XRD0,XVR,XVD,XRD
COMMON/CF2/ X2RU,XVUU,XRD0,YEU,YEUU,YVU,YVRR,YVDD,YVU,YVUU,YR
COMMON/CF3/ YR6,K,YRV,YRDU,YRU,YRUU,YD,YDD,YDVR,YDU,YDUU,YDR
COMMON/CF4/ Z1U,ZEUU,ZV,ZVV,ZVRR,/VDD,ZVU,ZVUU,ZR,ZRRR,ZRVV,ZRD
COMMON/CF5/ ZRU,ZRUU,ZD,ZDG,ZDV,ZDRR,ZDUU,ZV2D,ZUP,YVP,YRP
COMMON/MTRX/AF(3,3),GR(625),AFI(3,3),PF(3),WK(3),WK(3),WK(3)
COMMON/P2/ PX(6),WK1(6,6),WK2(6,5)
COMMON/ESTAB/HATOK
COMMON/TA1/AL(3,3),R(3,1),B1(1,5),Q(3,3),AK(3,3)
COMMON/TA2/SOF2(6,6),SOF3(6),IP(6),SOF5(3,3)
COMMON/TA3/SOF(3,3),SOF1(3,3),ZLK(1,3),ZLK(1,3),ZLK(3,1),VTK(3,3)

```

```

*****
ESTE PROGRAMA TEM POR FINALIDADE MAPFAR AS ALTERACOES GERADAS
POR UM CONTROLADOR C/ IND. DESEMPENHO LINEAR QUADRATICO DURANTE
A PILOTAGEM AUTOMATICA DE UMA EMBARCACAO COM CURSO DESEJADO
RETO.O ORGANOGRA-MA DO PROGRAMA ESTA MOSTRADO ABAIXO:

```

```

*****
* LEITURA DE DADOS *
* VETOR ESTADO INICIAL *
* CARACT. DO NAVIO *
* CARACT. EST. MAR *
*****

```

```

00570 *
00580 *
00590 *
00600 *
00610 *
00620 *
00630 *
00640 *
00650 *
00660 *
00670 *
00680 *
00690 *
00700 *
00710 *
00720 *
00730 *
00740 *
00750 *
00760 *
00770 *
00780 *
00790 *
00800 *
00810 *
00820 *
00830 *
00840 *
00850 *
00860 *
00870 *
00880 *
00890 *
00900 *
00910 *
00920 *
00930 *
00940 *
00950 *
00960 *
00970 *
00980 *
00990 *
01000 *
01010 *
01020 *
01030 *
01040 *
01050 *
01060 *
01070 *
01080 *
01090 *
01100 *
01110 *
01120 *
01130 *
01140 *
01150 *
01160 *
01170 *
01180 *
01190 *
01200 *
01210 *

```


02600 *
 02610 *
 02620 *
 02630 *
 02640 *
 02650 *
 02660 *
 02670
 02680
 02690
 02700
 02710
 02720
 02730
 02740
 02750
 02760
 02770
 02780
 02790
 02800
 02810
 02820
 02830
 02840
 02850
 02860
 02870
 02880
 02890
 02900
 02910
 02920 *
 02930 *
 02940 *
 02950 *
 02960 *
 02970 *
 02980 *
 02990
 3000
 3010
 3020
 3030
 3040
 3050
 3060
 3070
 3080
 3090
 3100
 3110
 3120
 3130
 3140
 3150
 3160
 3161
 3162
 3164
 3165
 3166
 3170
 3180
 3190

CALCULO DE CONSTANTES DO MODELO LINEAR DE MOVIMENTO DO NAVIO

ADF=1.026.5/2*ZL(CARZLOAR*VNRV
 A2=XU
 A3=TO*(1-IP)
 A4=XD
 A5=ZMASS-XUP
 A6=YV
 A7=YR-ZMASS
 A8=YRP-ZMASS*XG
 A9=YD
 A10=ZMASS-YVP
 A11=ZV
 A12=ZVP-ZMASS*XG
 A13=ZR-ZMASS*XG
 A14=ZD
 A15=ZIN-ZRP
 A16=(A15*A6+A8*A11)/(A10*A15-A8*A12)
 A17=(A7*A15+A4*A13)/(A10*A15-A8*A12)
 A18=(A8*A14+A9*A15)/(A10*A15-A8*A12)
 A19=(A11*A10+A12*A6)/(A10*A15-A8*A12)
 A20=(A12*A7+A13*A10)/(A10*A15-A8*A12)
 A21=(A9*A12+A4*A11)/(A10*A15-A8*A12)
 A1=A15/(A10*A15-A8*A12)
 A2=A8/(A10*A15-A8*A12)
 A3=A12/(A10*A15-A8*A12)
 A4=A10/(A10*A15-A8*A12)

LOOP DA VARREDURA DO INDICE DE DESEMPENHO

CALL GEOMET

I=0
 DO 200 I7=1,1
 Q12=(17-1)*VARR(7)+Q121
 DO 200 I6=1,1
 Q13=(16-1)*VARR(6)+Q131
 DO 200 I5=1,1
 Q23=(15-1)*VARR(5)+Q231
 DO 200 I4=1,5
 Q33=(14-1)*VARR(4)+Q331
 DO 200 I3=1,5
 Q22=(13-1)*VARR(3)+Q221
 DO 200 I2=1,5
 ZAMB=(12-1)*VARR(2)+ZAMB1
 DO 200 I1=1,5
 Q11=(11-1)*VARR(1)+Q111
 I=I+1
 WRITE(6,*) Q3, Q11, ZAMB, Q22
 Q11=0.0
 Q22=10.0
 Q33=1.0
 ZAMB=1.0
 WRITE(6,*) Q11, Q22, Q33, ZAMB
 QR(1)=Q33*Q11.5*Q9+Q22*Q10.4*Q6+ZAMB*Q10.4*Q3+Q11
 WRITE(6,13#) QR(1)
 13# FORMAT(1H1, QR=, F13.1)

03200 *
 03210 * O INDICE DE DESEMPENHO PASSA A SER IDENTIFICADO PELO (ODIGU) QR
 03220 *
 03230
 03240
 03250
 03260
 03270
 03280
 03290
 03300
 03310
 03320
 03330 *
 03340 *
 03350 *
 03360 *
 03370 *
 03380 *
 03390 *
 03400 *
 03410
 03420
 03430
 03440
 03450
 03460
 03470
 03480
 03490
 03500
 03510
 03520
 03530
 03540
 03550
 03560
 03570
 03580
 03590
 03600
 03610
 03620
 03630
 03640
 03650
 03660
 03670
 03680
 03690
 03700 *
 03800 *
 03900 *
 04340 *
 04341 *
 04350
 04360 *
 04370 *
 04380 *
 04390
 04400
 04410

CAL PORTA2
 CALL PORTA
 WRITE(6,*) CONFIRMA PAX', P11, P12, P13, P22, P23, P*3
 CALL EST
 IF(BATOR) 130, 130, 131
 130 WRITE(6,135) QR(1)
 135 FORMAT(1H1, CONTROLADOR INSTAVEL QR=, F13.1)
 GO TO 137
 131 WRITE(6,136) QR(1)
 136 FORMAT(1H1, CONTROLADOR ESTAVEL QR=, F13.1)

A SUBROTINA PORTA2 FORNECE A SOLUCAO DA MATRIZ DE RICCATI PARA
 O INDICE DE DESEMPENHO QR-AS SUBROTINAS PORTA E EST FURAM UTILIZADAS.

CONDICOES INICIAIS DA EMBARCACAO

137 ZK(1)=0.0
 ZK(2)=0.0
 ZK(3)=0.0
 PF(1)=0.0
 PF(2)=0.0
 PF(3)=0.0
 DIC(1)=0.0
 UI(1)=1.0
 VI(1)=0.0
 RI(1)=0.0
 DI(1)=0.0
 XOG(1)=0.0
 YOG(1)=0.0
 FIN(1)=0.0
 RACALF
 AVALPT(1)=0.0
 AVALID(1)=0.0
 CAL FORLUN
 ZMDF1=0.0
 ZMDF2=0.0
 ZMDF6=0.0
 TT=-0.001*VVK0*VK0*VK0+0.042*VVK0*VK0+5.6
 PI=3.1416
 G=9.8066
 W=2.0*PI/TT
 WE=*W*VNRV*DCOS(PI-F*PI/180.)/G
 DELT=PI*VNRV/WE/ZLOA
 DELTH=PI/WE
 WRITE(6,*) DELT, DELTH

LOOP DE TEMPO DA SIMULACAO DO MOVIMENTO DO NAVIO

DO 180 J=1,60
 CALCULO DAS FORÇAS EXTERNAS DE MEDIA AAO NULA

F1V=0.0
 F2V=0.0
 F6V=0.0

```

411 #
412 # TRANSFORMAÇÃO DE GRAUS PARA RADIANTES E VICE-VERSA
413 #
414 # F=F-FIN(J)*180./3.1416
415 # VK=VK0
416 # FI(I)=F
417 # CALL FORVEN
418 # WRITE(6,*) 'VELOC N',VI(J),UI(J)
419 # F=DATAN(VI(J),UI(J))*180./3.1416
420 # VK=DSQRT(UI(J)*UI(J)+VI(J)*VI(J))*180
421 # WRITE(6,*) 'VK',VK
422 # CALL FORVEN
423 # GAMA=GAMA-FIN(J)
424 # CALI FORCOR
425 # F=FI(I)
426 # CALL FORZON
427 # F120=0.0
428 # F220=0.0
429 # F620=0.0
430 # CALL SOMFOR
431 #
432 # SIMULACAO DO MOVIMENTO DA EMBARCAÇÃO
433 #
434 # CALL MOVSH
435 #
436 # CALCULO DA PARCELA DO CONTROLADOR DEPENDENTE DAS FORÇAS EXTERNAS
437 #
438 # IF(J-1) 258,256,259
439 # 258 GO TO 260
440 # 258 CALL ZKK
441 #
442 # CALCULO DO ANGULO DE COMANDO PARA O LEME
443 #
444 # 259 TES1=A1/ZAMB*13*VI(J+1)
445 # WRITE(6,*) 'TES1',TES1
446 # TES2=A1/ZAMB*23*DI(J+1)
447 # WRITE(6,*) 'TES2',TES2
448 # TES3=A1/ZAMB*33*DI(J+1)
449 # WRITE(6,*) 'TES3',TES3
450 # TES4=A1/ZAMB*43*DI(J+1)
451 # WRITE(6,*) 'TES4',TES4
452 # DIC(J+1)=A1/ZAMB*(PI3*VI(J)+P23*RI(J)+P33*DI(J)+ZK(3))
453 # 260 WRITE(6,*) 'A:G COMANDO',DIC(J+1)
454 # 180 CONTINUE
455 #
456 # RESTAURA O EXATIVALOR DO ANGULO DE INCIDENCIA DOS AGENTES EXTERNOS
457 # PARA A PROXIMA VARREDURA DO I.D.
458 #
459 # F=RACAI
460 # WRITE(6,*) 'RACAI',RACAI
461 #
462 # CALCULO DO AVALIADOR DO INDICE DE DESFEMPENHO
463 #
464 # WRITE(6,*) 'AVALPT,YOG,ZL0A,DELTH',AVALPT(I),YOG(0:0),ZL0A,DELTH
465 # DS=DABS(YOG(0:0))
466 # AVALID(I)=(AVALPT(I)-DS*ZL0A/DELTH)/60.
467 # WRITE(6,*) 'AVALID',AVALID(I),QR(I)
468 # 200 CONTINUE
469 #
470 #
471 # WRITE(6,110) (I,AVALID(I),AVALPT(I),QR(I),I=1,625)
472 # FORMAT(1H1,'NUMERO',I3,'AVALID',F10.3,'AVALPT',F10.3,'QR',F16.1)
473 #
474 #
475 #
476 #
477 #
478 #
479 #
480 #
481 #
482 #
483 #
484 #
485 #
486 #
487 #
488 #
489 #
490 #
491 #
492 #
493 #
494 #
495 #
496 #
497 #
498 #
499 #
500 #
501 #
502 #
503 #
504 #
505 #
506 #
507 #
508 #
509 #
510 #
511 #
512 #
513 #
514 #
515 #
516 #
517 #
518 #
519 #
520 #
521 #
522 #
523 #
524 #
525 #
526 #
527 #
528 #
529 #
530 #
531 #
532 #
533 #
534 #
535 #
536 #
537 #
538 #
539 #
540 #
541 #
542 #
543 #
544 #
545 #
546 #
547 #
548 #
549 #
550 #
551 #
552 #
553 #
554 #
555 #
556 #
557 #
558 #
559 #
560 #
561 #
562 #
563 #
564 #
565 #
566 #
567 #
568 #
569 #
570 #
571 #
572 #
573 #
574 #
575 #
576 #
577 #
578 #
579 #
580 #
581 #
582 #
583 #
584 #
585 #
586 #
587 #
588 #
589 #
590 #
591 #
592 #
593 #
594 #
595 #
596 #
597 #
598 #
599 #
600 #
601 #
602 #
603 #
604 #
605 #
606 #
607 #
608 #
609 #
610 #
611 #
612 #
613 #
614 #
615 #
616 #
617 #
618 #
619 #
620 #
621 #
622 #
623 #
624 #
625 #
626 #
627 #
628 #
629 #
630 #
631 #
632 #
633 #
634 #
635 #
636 #
637 #
638 #
639 #
640 #
641 #
642 #
643 #
644 #
645 #
646 #
647 #
648 #
649 #
650 #
651 #
652 #
653 #
654 #
655 #
656 #
657 #
658 #
659 #
660 #
661 #
662 #
663 #
664 #
665 #
666 #
667 #
668 #
669 #
670 #
671 #
672 #
673 #
674 #
675 #
676 #
677 #
678 #
679 #
680 #
681 #
682 #
683 #
684 #
685 #
686 #
687 #
688 #
689 #
690 #
691 #
692 #
693 #
694 #
695 #
696 #
697 #
698 #
699 #
700 #
701 #
702 #
703 #
704 #
705 #
706 #
707 #
708 #
709 #
710 #
711 #
712 #
713 #
714 #
715 #
716 #
717 #
718 #
719 #
720 #
721 #
722 #
723 #
724 #
725 #
726 #
727 #
728 #
729 #
730 #
731 #
732 #
733 #
734 #
735 #
736 #
737 #
738 #
739 #
740 #
741 #
742 #
743 #
744 #
745 #
746 #
747 #
748 #
749 #
750 #
751 #
752 #
753 #
754 #
755 #
756 #
757 #
758 #
759 #
760 #
761 #
762 #
763 #
764 #
765 #
766 #
767 #
768 #
769 #
770 #
771 #
772 #
773 #
774 #
775 #
776 #
777 #
778 #
779 #
780 #
781 #
782 #
783 #
784 #
785 #
786 #
787 #
788 #
789 #
790 #
791 #
792 #
793 #
794 #
795 #
796 #
797 #
798 #
799 #
800 #
801 #
802 #
803 #
804 #
805 #
806 #
807 #
808 #
809 #
810 #
811 #
812 #
813 #
814 #
815 #
816 #
817 #
818 #
819 #
820 #
821 #
822 #
823 #
824 #
825 #
826 #
827 #
828 #
829 #
830 #
831 #
832 #
833 #
834 #
835 #
836 #
837 #
838 #
839 #
840 #
841 #
842 #
843 #
844 #
845 #
846 #
847 #
848 #
849 #
850 #
851 #
852 #
853 #
854 #
855 #
856 #
857 #
858 #
859 #
860 #
861 #
862 #
863 #
864 #
865 #
866 #
867 #
868 #
869 #
870 #
871 #
872 #
873 #
874 #
875 #
876 #
877 #
878 #
879 #
880 #
881 #
882 #
883 #
884 #
885 #
886 #
887 #
888 #
889 #
890 #
891 #
892 #
893 #
894 #
895 #
896 #
897 #
898 #
899 #
900 #
901 #
902 #
903 #
904 #
905 #
906 #
907 #
908 #
909 #
910 #
911 #
912 #
913 #
914 #
915 #
916 #
917 #
918 #
919 #
920 #
921 #
922 #
923 #
924 #
925 #
926 #
927 #
928 #
929 #
930 #
931 #
932 #
933 #
934 #
935 #
936 #
937 #
938 #
939 #
940 #
941 #
942 #
943 #
944 #
945 #
946 #
947 #
948 #
949 #
950 #
951 #
952 #
953 #
954 #
955 #
956 #
957 #
958 #
959 #
960 #
961 #
962 #
963 #
964 #
965 #
966 #
967 #
968 #
969 #
970 #
971 #
972 #
973 #
974 #
975 #
976 #
977 #
978 #
979 #
980 #
981 #
982 #
983 #
984 #
985 #
986 #
987 #
988 #
989 #
990 #
991 #
992 #
993 #
994 #
995 #
996 #
997 #
998 #
999 #
1000 #

```

```

SUBROUTINE GEJMET
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
COMMON/GEOM/CASCO(20),YM(20),DELX,X(21),Y(21)

ESTA SUBROTINA (ALCUI) DADOS OS PONTOS DA SECCAO DA LINHA
DAGUA NO CALADO DESEJADO, A TANGENTE AO CASCO, SUPONDO QUE O CASCO
SEJA RETO ENTRE DOIS PONTOS DE CORRFINADAS, A SUBROTINA TAMBEM
CALCULA O YMEDIO DA FAIXA, NOTE QUE O NAVIO FOI SUPOSTO SEM TRIM
E SEM BANDA, ALEM DISSO CONSIDEROU-SE O NAVIO COM FORMA U, OU SEJA
A TANGENTE NA LINHA DAGUA E IGUAL EM TODA FAIXA.

DELX=X(2)-X(1)
DO 300 M=1,20
CASCO(M)=DATAN((Y(M+1)-Y(M))/DELX)
YM(M)=(Y(M+1)+Y(M))/2.
300 CONTINUE
WRITE(6,*) 'CASCO', (CASCO(M), M=1,20)
WRITE(6,*) 'YM', (YM(M), M=1,20)
RETURN
END

SUBROUTINE FORJON
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
COMMON/FIA/VK0,VN,ZMOF1,ZMOF2,ZMOF3
COMMON/GEOM/CASCO(20),YM(20),DELX,X(21),Y(21)
COMMON/VENT/ALA,ATA,ZLOA,F81,VK,F1V,F2V,F6V
COMMON/SFOR/FIT(060),F2T(060),FAT(.60),I,J,ADF
COMMON/MOV2/FIN(060),XOG(060),YOG(060),ZIN,DELTA,AVALPT(625)
COMMON/MOV/DIC(060),UI(060),VI(060),RI(060),DI(060),ZH

ESTA SUBROTINA EFETUA O CALCULO DA FORÇA OSCILATORIA DE 1ª ORDEM
GERADA POR UMA ONDA REGULAR MEDIA NA MESMA DIRECCAO DO VENTO FOR
MADOR, ESTA SUBROTINA PODE SER USADA DIVERSAS VEZES DE FORMA A
SIMULAR UM MAR PSEUDO IRREGULAR FORMADO POR DIVERSAS ONDAS REGULARES

CALCULO DAS CARACTERISTICAS DA ONDA REPRESENTATIVA DE UM ESTADO
DE MAR GERADO POR UM VENTO COM VELOC.VK0

A=0.015*VK0*VK0+1.5
WRITE(6,*) 'AMPL',A
T=-0.0014*VK0*VK0*VK0+0.042*VK0*VK0+5.6
WRITE(6,*) 'PERIODO',T
PI=3.1416
W=2.0*PI/T
G=9.8066
RF1=0.0
RF2=0.0
RF6=0.0
ZIF1=0.0
ZIF2=0.0
ZIF3=0.0
RO=1026.3
BF=PI-FR3.1416/180.
WE=W-W*W*VN*DCOS(BF)/G
WRITE(6,*) 'FREQ ENCONTRO',WE
ZK=W*W/G
CTE3=RO*G*W*(DEXP(ZK*ZH)-1)/ZK
WRITE(6,*) 'CTE3',CTE3

```

05700 *
 05710 *
 05720 *
 05730 *
 05740 *
 05750 *
 05760 *
 05770 *
 05780 *
 05790 *
 05800 *
 05810 *
 05820 *
 05830 *
 05840 *
 05850 *
 05860 *
 05870 *
 05880 *
 05890 *
 05900 *
 05910 *

CALCULO DAS FORÇAS NAS FAIXAS

```

DO 35) M=1,20
BX=MMDELX-DELX*2.-710A/2.
CTE1=ZK*Y(M)*DSIN(DF)
WRITE(6,*) 'CTE1',CTE1
CTE2=ZK*DCOS(DF)*BX
WRITE(6,*) 'CTE2',CTE2
RF1=RF1+DTAN(CASCO(M))*DCOS(CTE1-(TE2))+DCOS(-CTE1-CTE2))
WRITE(6,*) 'R1',RF1
ZIF1=ZIF1+DTAN(CASCO(M))*DSIN(CTE1-CTE2)+DSIN(-CTE1-CTE2))
WRITE(6,*) 'ZIF1',ZIF1
RF2=RF2+(DCOS(CTE1-CTE2)-DCOS(-CTE1-CTE2))
WRITE(6,*) 'RF2',RF2
ZIF2=ZIF2+(DSIN(CTE1-CTE2)-DSIN(-CTE1-CTE2))
WRITE(6,*) 'ZIF2',ZIF2
RF6=RF6+BX*(DCOS(CTE1-CTE2)-DCOS(-CTE1-CTE2))
WRITE(6,*) 'RF6',RF6
ZIF6=ZIF6+BX*(DSIN(CTE1-CTE2)-DSIN(-CTE1-CTE2))
WRITE(6,*) 'ZIF6',ZIF6
350 CONTINUE
ZM0=1-CTE3*DE. X*DSQRT(RF1*RF1+ZIF1*ZIF1)/ADF
TATU1=DSQRT(RF1*RF1+ZIF1*ZIF1)
FASF1=DASIN(ZIF1/TATU1)
ZM0=2-CTE3*DE. X*DSQRT(RF2*RF2+ZIF2*ZIF2)/ADF
TATU2=DSQRT(RF2*RF2+ZIF2*ZIF2)
FASF2=DASIN(ZIF2/TATU2)
ZM0=6-CTE*DE. X*DSQRT(RF6*RF6+ZIF6*ZIF6)/ADF
TATU6=DSQRT(RF6*RF6+ZIF6*ZIF6)
FASF6=DASIN(ZIF6/TATU6)
WRITE(6,*) 'M(DELTA)',ZM0F1,ZM0F2,ZM0F6
WRITE(6,*) 'F-SEIOR',FASF1,FASF2,FASF6
RETURN
END
SUBROUTINE FO=2UN
IMPLICIT REAL*8(A-H,I,O-Z)
COMMON/F2A/DESL,F120,F220,F620
COMMON/VENT/ATA,ATA,ZLOA,F,VK,F1V,F2V,F6V
COMMON/FIAZ/VK,VN,F110,F210,F610
COMMON/SFOR/F11060,F21060,F61060),I,J,ADF

```

06170 *
 06180 *
 06190 *
 06200 *
 06210 *
 06220 *
 06230 *
 06240 *
 06250 *
 06260 *
 06270 *
 06280 *
 06290 *
 06300 *
 06310 *
 06320 *
 06330 *
 06340 *
 06350 *
 06360 *
 06370 *
 06380 *
 06390 *
 06400 *
 06410 *
 06420 *
 06430 *
 06440 *
 06450 *
 06460 *
 06470 *
 06480 *
 06490 *
 06500 *
 06510 *
 06520 *
 06530 *
 06540 *
 06550 *
 06560 *
 06570 *
 06580 *
 06590 *
 06600 *
 06610 *
 06620 *
 06630 *
 06640 *
 06650 *
 06660 *
 06670 *
 06680 *
 06690 *
 06700 *
 06710 *
 06720 *
 06730 *
 06740 *
 06750 *
 06760 *
 06770 *
 06780 *
 06790 *
 06800 *
 06810 *

```

RO=1026.3
A=0.015*VK0*VK0+1.5
T=-0.0014*VK0*VK0+0.042*VK0*VK0+5.6
PI=3.1416
W=2.0*PI/T
G=9.8066
WE=W-WE*VNR*DCOS(F)/G
FWE=WE*DSQRT(DESLE*(1./3.)/G)
RV=F*3.1416/150.
IF(BV.LE.(PI/4.))THEN
CT1=2.*BV/PI-1.
CT2=-2.*BV/PI
CT6=4.*BV/PI
ELSE IF(BV.LE.(PI/2.)) THEN
CT1=2.*BV/PI
CT2=-2.*BV/PI
CT6=-4.*BV/PI+2.
ELSE IF(BV.LE.(3.*PI/4.)) THEN
CT1=2.*BV/PI-1.
CT2=2.*BV/PI-2.
CT6=-4.*BV/PI+2.
ELSE IF(BV.LE.(PI)) THEN
CT1=2.*BV/PI-1.
CT2=2.*BV/PI-2.
CT6=4.*BV/PI-4.
ELSE IF(BV.LE.(5.*PI/4.)) THEN
CT1=-2.*BV/PI+3.
CT2=2.*BV/PI-2.
CT6=4.*BV/PI-4.
ELSE IF(BV.LE.(3.*PI/4.)) THEN
CT1=-2.*BV/PI+3.
CT2=2.*BV/PI-2.
CT6=-4.*BV/PI+6.
ELSE IF(BV.LE.(7.*PI/4.)) THEN
CT1=-2.*BV/PI+4.
CT2=-4.*BV/PI+6.
ELSF
CT1=-2.*BV/PI+3.
CT2=-2.*BV/PI+4.
CT6=4.*BV/PI-8.
END IF
IF(FWE.LE.0.8) THEN
AF120=0.0
AF220=0.0
AF620=0.0
ELSE IF(FWE.LE.1.0) THEN
AF120=5./8.*FWE-3.5/8.
AF220=0.0
AF620=-3.33*FWE+3.33
ELSE IF(FWE.LE.1.2) THEN
AF120=5./8.*FWE-3.5/8.
AF220=-3.1*FWE+10.6
AF620=-3.33*FWE+3.33
ELSE IF(FWE.LE.1.35) THEN
AF120=5./8.*FWE-3.5/8.
AF220=-3.1*FWE+10.6
AF620=15.*FWE-19.

```



```

ELSE IF(FWE.LF.1.3) THEN
AF120=5.78.*FWE-3.578.
AF220=-3.1.*FWE+10.6
AF620=-5.1.*FWE+8.
ELSE IF(FWE.LF.1.8) THEN
AF120=-FWE+2.
AF220=-3.1.*FWE+10.6
AF620=-5.1.*FWE+8.
ELSE IF(FWE.LF.2.2) THEN
AF120=0.25
AF220=-3.1.*FWE+10.6
AF620=2.1.*FWE-4.2
ELSE
AF120=0.0
AF220=0.0
AF620=0.0
END IF
F120=CT1#AF120*0.5#ROK#DESL**((1./3.)*X#A/A#DF
F220=CT2#AF220*0.5#ROK#DESL**((1./3.)*X#A/A#DF
F620=CT6#AF620*0.5#ROK#DESL**((2./3.)*X#A/A#DF
WRITE(6,*) 'FUR20R',F120,F220,F620
RETURN
END
7040 *
7050 *
7060 *
7070 *
7080 *
7090 *
7100 *
7110 *
7120 *
7130 *
7140 *
7150 *
7160 *
7170 *
7180 *
7190 *
7200 *
7210 *
7220 *
7230 *
7240 *
7250 *
7260 *
7270 *
7280 *
7290 *
7300 *
7310 *
7320 *
7330 *
7340 *
7350 *
7360 *
7370 *
7380 *
7390 *
7400 *
7410 *
7420 *
7430 *
7440 *
7450 *
7460 *
7470 *
7480 *

```

```

SUBROUTINE FORVEN
IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
COMMON/VENT/AL,A,ATA,ZLOA,F,VK,F1V,F2V,F6V
COMMON/SFOR/FIT(060),F2T(060),F6T(060),I,J,ADF
END
7050 *
7060 *
7070 *
7080 *
7090 *
7100 *
7110 *
7120 *
7130 *
7140 *
7150 *
7160 *
7170 *
7180 *
7190 *
7200 *
7210 *
7220 *
7230 *
7240 *
7250 *
7260 *
7270 *
7280 *
7290 *
7300 *
7310 *
7320 *
7330 *
7340 *
7350 *
7360 *
7370 *
7380 *
7390 *
7400 *
7410 *
7420 *
7430 *
7440 *
7450 *
7460 *
7470 *
7480 *

```

```

PI=3.1416
RJ=PI-GAMA
FIC=0.0
F2C=0.0
F6C=0.0
FIC=ZMASS*VC#DSIN(RJ)*RI(J)
F2C=-ZMASS*VC#DCOS(RJ)*RI(J)
F6C=-ZMASS*XC#VC#DCOS(RJ)*RI(J)
WRITE(6,*) 'FCOR',FIC,F2C,F6C
RETURN
END
7050 *
7060 *
7070 *
7080 *
7090 *
7100 *
7110 *
7120 *
7130 *
7140 *
7150 *
7160 *
7170 *
7180 *
7190 *
7200 *
7210 *
7220 *
7230 *
7240 *
7250 *
7260 *
7270 *
7280 *
7290 *
7300 *
7310 *
7320 *
7330 *
7340 *
7350 *
7360 *
7370 *
7380 *
7390 *
7400 *
7410 *
7420 *
7430 *
7440 *
7450 *
7460 *
7470 *
7480 *

```

```

SUBROUTINE SOMFOR
IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
COMMON/F2A/DESL,F120,F220,F620
COMMON/SFOR/FIT(060),F2T(060),F6T(060),I,J,ADF
COMMON/F1A/VK0,VN,ZMOF1,ZMOF2,ZMOF6
COMMON/COR/VC,ZMASS,GAMA,XG,FIC,F2C,F6C
COMMON/VENT/ALA,ATA,ZLOA,F,VK,F1V,F2V,F6V
END
7050 *
7060 *
7070 *
7080 *
7090 *
7100 *
7110 *
7120 *
7130 *
7140 *
7150 *
7160 *
7170 *
7180 *
7190 *
7200 *
7210 *
7220 *
7230 *
7240 *
7250 *
7260 *
7270 *
7280 *
7290 *
7300 *
7310 *
7320 *
7330 *
7340 *
7350 *
7360 *
7370 *
7380 *
7390 *
7400 *
7410 *
7420 *
7430 *
7440 *
7450 *
7460 *
7470 *
7480 *

```


09774 * SUBROTINA DE PACOTE COMERCIAL HITACHI-MSL2;
 09775 * DNSBM SOLUCAO EQUACOES ALGEBRICAS NAO LINEARES-METODO BRENT
 09776 *

09777 PX(1)=P11
 09778 PX(2)=P12
 09779 PX(3)=P13
 09780 PX(4)=P22
 09781 PX(5)=P23
 09782 PX(6)=P33
 09783 ITMAX=PPP
 09784 XEPS=0.01
 09785 FEPS=0.01
 09786 REAL#R FUN
 09787 CALL #DNSBM(FUN,PX,6,XEPS,FEPS,ITMAX,FNORM,WK1,WK2,IER)

09788 IF(ITER)250,250,251
 09789 251 WRITE(6,252) IER
 09790 252 FORMAT(1H1,'SUBROTINA NAO CONVERGE ERRO TIPO=',I4)
 09791 250 P11=PX(1)
 09792 P12=PX(2)
 09793 P13=PX(3)
 09794 P22=PX(4)
 09795 P23=PX(5)
 09796 P33=PX(6)
 09797 RETURN
 09798 END

09800 *
 09801 *
 09802 REAL FUNCTION FUN#8(PX,N,K)
 09803 IMPLICIT REAL#8(A-H,O-Z)
 09804 DIMENSION PX(6)
 09805 COMMON/P0/Q11,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,ZAMB
 09806 COMMON/CFHDR/A16,A17,A18,A19,A20,A21,A1,A1,AF1,AF2,AF3,AF4
 09807 *
 09808 * FUNCAO EXTERNA UTILIZADA PELA SUBROTINA PORTA,DESCREVE O SISTEMA.
 09809 *

09810 N=6
 09811 IF (K-1) 209,209,210
 09812 209 FUN=-A1#A1#PX(3)*PX(3)/ZAMB+Q11+2#PX(1)*A16+2#PX(2)*A19
 09813 GO TO 219
 09814 210 IF (K-2) 211,211,212
 09815 211 FUN=-A1#A1#PX(3)*PX(5)/ZAMB+A17#PX(1)+PX(2)*A20+PX(2)*A16+A19*
 09816 *PX(4)
 09817 GO TO 219
 09818 212 IF (K-3) 213,213,214
 09820 213 FUN=-A1#A1#PX(6)*PX(3)/ZAMB+PX(3)*A16+PX(5)*A19+PX(1)*A18+PX(2)*
 09820 *A21+PX(3)*A1
 09840 GO TO 219
 09850 214 IF (K-4) 215,215,216
 09860 215 FUN=-A1#A1#PX(5)*PX(5)/ZAMB+Q22+2#PX(2)*A17+2#A20*PX(4)
 09870 GO TO 219
 09880 216 IF (K-5) 217,217,218
 09890 217 FUN=-A1#A1#PX(6)*PX(5)/ZAMB+A17#PX(3)+PX(5)*A20+A18#PX(2)+A21*
 09900 *PX(4)+A18#PX(5)
 09910 GO TO 219
 09920 218 FUN=-A1#A1#PX(6)*PX(6)/ZAMB+Q33+2#PX(3)*A18+2#A21*PX(5)+2#A1*
 09930 *PX(6)
 09940 219 RETURN
 09950 END
 09960 *

09050 *
 09040 *
 09050 #

09060 *
 09070 *
 09080 *
 09130 *
 09140 *
 09150 *
 09160 *
 09170 *
 09180 *
 09190 *
 09200 *
 09210 *
 09220 *
 09230 *
 09240 *
 09250 *
 09260 *
 09270 *
 09280 *
 09630 *
 09640 *
 09650 *
 09660 *
 09670 *
 09680 *
 09690 *
 09710 *
 09730 *
 09750 *
 09751 *
 09752 *
 09753 *
 09754 *
 09755 *
 09756 *
 09757 *

09758 *
 09759 *
 09760 *
 09762 *
 09763 *
 09764 *
 09765 *
 09766 *
 09767 *
 09768 *
 09769 *
 09770 *
 09771 *
 09772 *
 09773 *

09050 * ESTA SUBROTINA EFETUA O CALCULO DA COMPONENTE ZK DO CONTROLADOR
 09040 * UTIMO,FSTA PARCELA E DEVIDA AS FORÇAS EXTERNAS DE MEDIA NAO NULA.
 09050 #

09060 * SUBROTINAS DE PACOTE COMERCIAL HITACHI-MSL2:
 09070 * DVAFM SOMA DE MATRIZES, DVAFM SOMA DE VETORES
 09080 * DVMFM MULTIPLICAO DE MATRIZES
 09130 * DIFM INVERSAO DE MATRIZES

09150 * AE(1,1)=A16
 09160 * AE(1,2)=A19
 09170 * AE(1,3)=-P13#A1#A17ZAMB
 09180 * AE(2,1)=A17
 09190 * AE(2,2)=A20
 09200 * AE(2,3)=-P23#A1#A17ZAMB
 09210 * AE(3,1)=A18
 09220 * AE(3,2)=A21
 09230 * AE(3,3)=A1-P33#A1#A17ZAMB
 09240 * DU 158 J1=1,3
 09250 * DO 158 J2=1,3
 09260 * AEI(J1,J2)=AEI(J1,J2)
 09270 * WRITE(6,#) AEI(J1,J2),J1,J2
 09280 *
 09630 * 158 CONTINUE
 09640 * EPS=0.0001
 09650 * CALL #DIFM(AE1,3,XEPS,RDFT,IDET,WK,IER)
 09660 * WRITE(6,#) 'AEI INV',((AEI(J1,J2),J1=1,3),J2=1,3)
 09670 * IF(ITER) 255,255,256
 09680 * 256 WRITE(6,257) GR(1)
 09690 * 257 FORMAT(1H1,'MATRIZ NAO INVERSIVEL DF=',F16.1)
 09710 * 255 PF(1)=-P11*(AF1#F2T(J)+AF2#F6T(J))-P12*(AF3#F2T(J)+AF4#F6T(J))
 09730 * PF(2)=-P12*(AF1#F2T(J)+AF2#F6T(J))-P22*(AF3#F2T(J)+AF4#F6T(J))
 09750 * PF(3)=-P13*(AF1#F2T(J)+AF2#F6T(J))-P23*(AF3#F2T(J)+AF4#F6T(J))
 09751 * WRITE(6,#) 'PF',PF(J1),J1=1,3
 09752 * CALL #DVMFM(AE1,3,3,PF,1,3,ZK,3,IER)
 09753 * WRITE(6,#) 'ZK=',ZK(1),ZK(2),ZK(3)
 09754 * RETURN
 09755 * END

09756 * SUBROUTINE PORTA
 09757 * IMPLICIT REAL#8(A-H,O-Z)
 09758 * EXTERNAL FUN
 09759 * COMMON/P0/Q11,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,ZAMB
 09760 * COMMON/P1/P11,P12,P22,P13,P23,P33,PPP
 09762 * COMMON/CFHDR/A16,A17,A18,A19,A20,A21,A1,A1,AF1,AF2,AF3,AF4
 09763 * COMMON/P2/PX(6),WK1(6,6),WK2(6,5)
 09764 *
 09765 *
 09766 *
 09767 *
 09768 *
 09769 *
 09770 *
 09771 *
 09772 *
 09773 *

09774 * ESTA SUBROTINA CALCULA A SOLUCAO DE EQUACOES ALGEBRICAS NAO LINEA-
 09775 * RES-ESTACOMPONENTE CONTROLA OS ERROS,INCERTEZAS DO MODELO,SENSORESE
 09776 * FORÇAS EXTERNAS DE MEDIA NULA.
 09777 * CORRIGE A PRECISAO DOS RESULTADOS UTILIZANDO PORTA2 COMO PONTO
 09778 * INICIAL DE BUSCA.. PRECISAO DE PORTA 2 MOSTROU-SE BOA.

```

09970 *
09980 *
09990 *
10000 *
10010 *
10020 *
10030 *
10040 *
10050 *
10060 *
10070 *
10080 *
10090 *
10100 *
10110 *
10120 *
10130 *
10140 *
10150 *
10160 *
10170 *
10180 *
10190 *
10200 *
10210 *
10220 *
10230 *
10240 *
10250 *
10260 *
10270 *
10280 *
10290 *
10300 *
10310 *
10320 *
10330 *
10340 *
10350 *
10360 *
10370 *
10380 *
10390 *
10400 *
10410 *
10420 *
10430 *
10440 *
10450 *
10460 *
10470 *
10480 *
10490 *
10500 *
10510 *
10520 *
10530 *
10540 *
10560 *
10570 *

SUBROUTINE EST
IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
COMMON/PI/P11,P12,P22,P13,P23,P33,PPP
COMMON/ESTAB/RATOR

ESTA SUBROTINA EFETUA A VERIFICACAO DA ESTABILIDADE DA SOLUCAO
DAEQUACAO ALGEBRICA DE RICCATI.

      IF (P11) 120,121,121
121  IF (HAR) 120,122,122
122  IF (BAT) 120,123,123
123  RATOR=1.0
124  GO TO 124
124  RETURN
      END

SUBROUTINE POKTA2
IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
COMMON/TA1/A(3,3),R(3,1),BT(1,3),Q(3,3),AK(3,3)
COMMON/TA2/SOF2(6,6),SOF3(6),WK3(6),IP(6),SOF5(3,3)
COMMON/TA3/SOF(3,3),SOF1(3,3),ZLK(1,3),ZLKT(3,1),VTK(3,3)
COMMON/CF/HDR/AL6,AL7,AL8,AL9,A20,A21,A1,AF1,AF2,AF3,AF4
COMMON/PO/UL1,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,ZAMB
COMMON/PI/P11,P12,P22,P13,P23,P33,PPP

ESTA SUBROTINA EFETUA O CALCULO DA COMPONENTE P DO CONTROLADOR.
ESTA COMPONENTE DEPENDE DO ESTADO E CONTROLA OS ERROS, INCERTEZAS
DO MODELO, SENSORES, ATUADORES E FORÇAS DE MEDIA NULA. O CALCULO E
REALIZADO UTILIZANDO A TECNICA SUGERIDA POR KLEINMAN-IEEE TRANSACT.
ON AUTOMATIC CONTROL-FEV.1968.

      A(1,1)=A16
      A(1,2)=A17
      A(1,3)=A18
      A(2,1)=A19
      A(2,2)=A20
      A(2,3)=A21
      A(3,1)=0.0
      A(3,2)=0.0
      A(3,3)=A1
      R(1,1)=0.0
      B(2,1)=0.0
      B(3,1)=-A1
      BT(1,1)=0.0
      BT(1,2)=0.0
      BT(1,3)=-A1/ZAMB
      DO 850 J1=1,3
      DO 850 J2=1,3
      QO(1,1),J2)=0.0

```

850 CONTINUE

```

10580 *
10590 *
10600 *
10610 *
10620 *
10630 *
10640 *
10650 *
10660 *
10670 *
10680 *
10690 *
10700 *
10710 *
10720 *
10730 *
10740 *
10750 *
10760 *
10770 *
10780 *
10790 *
10800 *
10810 *
10820 *
10830 *
10840 *
10850 *
10860 *
10870 *
10880 *
10890 *
10900 *
10910 *
10920 *
10930 *
10940 *
10950 *
10960 *
10970 *
10980 *
10990 *
11000 *
11010 *
11020 *
11030 *
11040 *
11050 *
11060 *
11070 *
11080 *
11090 *
11100 *
11110 *
11120 *
11130 *
11140 *
11150 *

```

286 CONTINUE

```

CALL *DVMFM(R,3,1,3,ZLK,3,1,SOF5,3,IER)
CALL *DVAFM(A,3,3,SOF5,3,1,AK,3,IER)
CALL *DVMFM(ZLKT,3,1,3,ZLK,3,1,SOF,3,IER)
CALL *DVAFM(Q,3,3,SOF,3,2,SOF1,3,IER)
SOF3(1)=-SOF1(1,1)
SOF3(2)=-SOF1(1,2)
SOF3(3)=-SOF1(1,3)
SOF3(4)=-SOF1(2,2)
SOF3(5)=-SOF1(2,3)
SOF3(6)=-SOF1(3,3)
EPS=0.0001
SOF2(1,1)=2.*AK(1,1)
SOF2(1,2)=2.*AK(2,1)
SOF2(1,3)=2.*AK(3,1)
SOF2(1,4)=0.0
SOF2(1,5)=0.0
SOF2(1,6)=0.0
SOF2(2,1)=AK(1,2)
SOF2(2,2)=AK(1,1)+AK(2,2)
SOF2(2,3)=AK(3,2)
SOF2(2,4)=AK(2,1)
SOF2(2,5)=AK(3,1)
SOF2(2,6)=0.0
SOF2(3,1)=AK(1,3)
SOF2(3,2)=AK(2,3)
SOF2(3,3)=AK(3,3)+AK(1,1)
SOF2(3,4)=0.0
SOF2(3,5)=AK(2,1)
SOF2(3,6)=AK(3,1)
SOF2(4,1)=0.0
SOF2(4,2)=2.*AK(1,2)
SOF2(4,3)=0.0
SOF2(4,4)=2.*AK(2,2)
SOF2(4,5)=2.*AK(3,2)
SOF2(4,6)=0.0
SOF2(5,1)=0.0
SOF2(5,2)=AK(1,3)
SOF2(5,3)=AK(1,2)
SOF2(5,4)=AK(2,3)
SOF2(5,5)=AK(2,2)+AK(3,3)
SOF2(5,6)=AK(3,2)
SOF2(6,1)=0.0
SOF2(6,2)=0.0
SOF2(6,3)=2.*AK(1,3)
SOF2(6,4)=0.0
SOF2(6,5)=2.*AK(2,3)
SOF2(6,6)=2.*AK(3,3)

```



```

11160 CALL #DLFIM(SOF2,6,6,SOF3,PPS,1,IP,WK3,IER)
11170 WRITE(6,*) 'ERR0=',IER
11180 VTK(1,1)=SOF3(1)
11190 VTK(1,2)=SOF3(2)
11200 VTK(2,1)=SOF3(2)
11210 VTK(1,3)=SOF3(3)
11220 VTK(3,1)=SOF3(3)
11230 VTK(2,2)=SOF3(4)
11240 VTK(2,3)=SOF3(5)
11250 VTK(3,2)=SOF3(5)
11260 VTK(3,3)=SOF3(6)
11270 CALL #DVMFM(B,1,3,1,VTK,3,3,ZLK,1,IER)
11280 CONTINUE
285
11290 WRITE(6,*) 'PXX',SOF3(1),SOF3(2),SOF3(3)
11300 WRITE(6,*) 'PXX',SOF3(4),SOF3(5),SOF3(6)
11310 WRITE(6,*) 'GANHO=',(ZLK(1,15),15=1,3)
11320 P11=VTK(1,1)
11330 P12=VTK(1,2)
11340 P13=VTK(1,3)
11350 P22=VTK(2,2)
11360 P23=VTK(2,3)
11370 P33=VTK(3,3)
11380 RETURN
11390 END
END OF DATA
END

```

```

READY
TSLOG END
*****
* USERID = 0340400
* PROCEDURE = LOGONU
*
*****
TSLOG ENDED TIME=14:16:22 DATE=87-06-25
*****

```

APENDICE I: Passo de Integração e Intervalo de Simulação

O passo de integração foi escolhido como sendo aproximadamente igual a $1/4$ do menor valor entre a constante de tempo da máquina do leme e o período de encontro da onda representativa do estado de mar. Nas condições analisadas, a constante de tempo da máquina do leme sempre apresentou o menor valor.

Já o intervalo de simulação foi escolhido como sendo aproximadamente igual a 400 seg. Nas simulações realizadas a embarcação avançou em torno de 20 vezes o seu comprimento.

APENDICE J: Implementação da Solução de Riccati-Matriz de Sinal

```

/* programa RICCATI algort. MATRIZ DE SINAL */

#include "stdio.h"

double getnum() ;
int minver() ;
#define abs(x)          x > 0 ? x : -(x)

main()
(
    float a16, a17, a18, a19, a20, a21, a1 ;
    float q11, q22, q33, q44, r ;
    float h[8][8], sk[8][8], skinv[8][8], w1[4][4], p[4][4] ;
    float eps, aux, delta, det, g1, g2, g3, g4 ;
    int i, j, k;

    q11 = (float)getnum("Qual o valor de q11 ?") ;
    q22 = (float)getnum("Qual o valor de q22 ?") ;
    q33 = (float)getnum("Qual o valor de q33 ?") ;
    q44 = (float)getnum("Qual o valor de q44 ?") ;
    r = (float)getnum("Qual o valor de r ?") ;

    eps = 1.0e-5 ;

    a16 = -0.4310344000 ;
    a17 = -0.4482758000 ;
    a18 = 0.1379310000 ;
    a19 = -1.9827586000 ;
    a20 = -1.7586206000 ;
    a21 = -1.1465517000 ;
    a1 = -13.1467850000 ;

    h[0][0] = a16 ; h[0][1] = a17 ; h[0][2] = a18 ; h[0][3] = 0.0 ;
    h[1][0] = a19 ; h[1][1] = a20 ; h[1][2] = a21 ; h[1][3] = 0.0 ;
    h[2][0] = 0.0 ; h[2][1] = 0.0 ; h[2][2] = a1 ; h[2][3] = 0.0 ;
    h[3][0] = 0.0 ; h[3][1] = 1.0 ; h[3][2] = 0.0 ; h[3][3] = 1.0e-3 ;
    h[4][0] = -q11 ; h[4][1] = 0.0 ; h[4][2] = 0.0 ; h[4][3] = 0.0 ;
    h[5][0] = 0.0 ; h[5][1] = -q22 ; h[5][2] = 0.0 ; h[5][3] = 0.0 ;
    h[6][0] = 0.0 ; h[6][1] = 0.0 ; h[6][2] = -q33 ; h[6][3] = 0.0 ;
    h[7][0] = 0.0 ; h[7][1] = 0.0 ; h[7][2] = 0.0 ; h[7][3] = -q44 ;

    aux = a1 * a1 / r ;

    h[0][4] = 0.0 ; h[0][5] = 0.0 ; h[0][6] = 0.0 ; h[0][7] = 0.0 ;
    h[1][4] = 0.0 ; h[1][5] = 0.0 ; h[1][6] = 0.0 ; h[1][7] = 0.0 ;
    h[2][4] = 0.0 ; h[2][5] = 0.0 ; h[2][6] = -aux ; h[2][7] = 0.0 ;
    h[3][4] = 0.0 ; h[3][5] = 0.0 ; h[3][6] = 0.0 ; h[3][7] = 0.0 ;
    h[4][4] = -a16 ; h[4][5] = -a19 ; h[4][6] = 0.0 ; h[4][7] = 0.0 ;
    h[5][4] = -a17 ; h[5][5] = -a20 ; h[5][6] = 0.0 ; h[5][7] = -1.0 ;
    h[6][4] = -a18 ; h[6][5] = -a21 ; h[6][6] = -a1 ; h[6][7] = 0.0 ;
    h[7][4] = 0.0 ; h[7][5] = 0.0 ; h[7][6] = 0.0 ; h[7][7] = -1.0e-3 ;

    delta = eps + 1.0 ;

    for (i = 0 ; i < 8 ; i++)
        for (j = 0 ; j < 8 ; j++)
            sk[i][j] = h[i][j] ;

    while (delta >= eps) (
        for (i = 0 ; i < 8 ; i++)
            for (j = 0 ; j < 8 ; j++)

```

```

        skinv[i][j] = sk[i][j] ;
if (minver(skinv, 8, 8, eps, &det) != 0)
    printf(" Matriz sk nao tem inversa %n" ) ;

delta = 0 ;
for (i = 0 ; i < 8 ; i++)
    for (j = 0 ; j < 8 ; j++) {
        aux = (skinv[i][j] + sk[i][j]) / 2 ;
        if (abs(sk[i][j] - aux) > delta)
            delta = abs(sk[i][j] - aux) ;
        sk[i][j] = aux ;
    }
    printf(" + uma iteracao. Delta = %10.8f %n", delta) ;
}
/*
printf("matriz Sk= %n") ;
for (i = 0 ; i < 8 ; i++)
    printf("%10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %n",
        sk[i][0],sk[i][1],sk[i][2],sk[i][3],sk[i][4],sk[i][5],sk[i][6],
        sk[i][7] ) ;
*/
for (i = 0 ; i < 4 ; i++) {
    sk[i][i] -= 1.0 ;
    sk[i+4][i+4] += 1.0 ;
}
/*
printf("matriz Sk= %n") ;
for (i = 0 ; i < 8 ; i++)
    printf("%10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f %n",
        sk[i][0],sk[i][1],sk[i][2],sk[i][3],sk[i][4],sk[i][5],sk[i][6],
        sk[i][7] ) ;
*/
for (i = 0 ; i < 4 ; i++)
    for (j = 0 ; j < 4 ; j++)
        w[i][j] = sk[i][j] ;

if (minver(w1, 4, 4, eps, &det) != 0)
    printf(" Matriz w1 nao tem inversa. %n" ) ;

for (i = 0 ; i < 4 ; i++)
    for (j = 0 ; j < 4 ; j++) {
        p[i][j] = 0 ;
        for (k = 0 ; k < 4 ; k++)
            p[i][j] += sk[i+4][k]*w1[k][j] ;
    }

for (i = 0 ; i < 4 ; i++)
    printf("%5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %n",
        p[i][0], p[i][1], p[i][2], p[i][3]) ;

g1 = p[2][0] * a1 / r ;
g2 = p[2][1] * a1 / r ;
g3 = p[2][2] * a1 / r ;
g4 = p[2][3] * a1 / r ;

printf(" g1 = %10.5f %n", g1) ;
printf(" g2 = %10.5f %n", g2) ;
printf(" g3 = %10.5f %n", g3) ;
printf(" g4 = %10.5f %n", g4) ;
}

```



```

/* matrix inversion and determinant */
minver(a, l, m, eps, det)
float a[], eps, *det ;
int l, m ;
{
    int work[500], i, j, k, r, iw, s, t, u, v ;
    double w, wmax, pivot, api, w1 ;
    extern double fabs() ;

    if (m < 2 || m > 500 || eps <= 0.0) return(999) ;
    w1 = 1.0 ;
    for (i = 0 ; i < m ; i++)
        work[i] = i ;
    for (k = 0 ; k < m ; k++) {
        wmax = 0.0 ;
        for (i = k ; i < m ; i++) {
            w = fabs(a[i*l+k]) ;
            if (w > wmax) {
                wmax = w ;
                r = i ;
            }
        }
        pivot = a[r*l+k] ;
        api = fabs(pivot) ;
        if (api <= eps) {
            *det = w1 ;
            return(l) ;
        }
        w1 *= pivot ;
        u = k*l ;
        v = r*l ;
        if (r != k) {
            w1 = -w1 ;
            iw = work[k] ;
            work[k] = work[r] ;
            work[r] = iw ;
            for (j = 0 ; j < m ; j++) {
                s = u + j ;
                t = v + j ;
                w = a[s] ;
                a[s] = a[t] ;
                a[t] = w ;
            }
        }
        for (i = 0 ; i < m ; i++)
            a[u+i] /= pivot ;
        for (i = 0 ; i < m ; i++) {
            if (i != k) {
                v = i*l ;
                s = v + k ;
                w = a[s] ;
                if (w != 0.0) {
                    for (j = 0 ; j < m ; j++)
                        if (j != k)
                            a[v+j] -= w*a[u+j] ;
                    a[s] = -w / pivot ;
                }
            }
        }
        a[u+k] = 1.0 / pivot ;
    }
}

```

```

    for (i = 0 ; i < m ; i++) {
        while (1) {
            k = work[i] ;
            if (k == i) break ;
            iw = work[k] ;
            work[k] = work[i] ;
            work[i] = iw ;
            for (j = 0 ; j < m ; j++) {
                u = j * i ;
                s = u + i ;
                t = u + k ;
                w = a[s] ;
                a[s] = a[t] ;
                a[t] = w ;
            }
        }
        *det = w1 ;
        return(0) ;
    }
}
double getnum(message)
char *message ;
{
    extern char *fgets() ;
    char buffer[128] ;
    double number ;

    fputs(message, stderr) ;
    if (fgets(buffer, 128, stdin) == NULL) return 0.0 ;
    if (sscanf(buffer, "%lf", &number) != 1) {
        fputs("Invalid input, please enter an number\n", stderr) ;
        return getnum(message) ;
    }
    return number ;
}

```

APENDICE K:0 Programa de Computador-Vetor 4 Variav.Estado

Nesta listagem constam as subrotinas que foram desenvolvidas para a solução da Matriz de Sinal.0 programa básico é uma extensão do Apêndice H.

```

SUBROUTINE ZKK4
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
COMMON/ZK0/DELTH,ZK(4)
COMMON/SFOR/FIT(060),F2T(060),F6T(060),I,J,ADF
COMMON/CFHDR/A16,A17,A18,A19,A20,A21,A1,AF1,AF2,AF3,AF4
COMMON/PI/P11,P12,P22,P13,P23,P33,P14,P24,P34,P44,PPP
COMMON/PO/Q11,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,Q14,Q24,Q34,Q44,ZAMB
COMMON/MTRX/AE(4,4),QR(2500),AEI(4,4),PF(4),WK(4),IWK(4)
8770 *
8780 *
8790 *
8800 *
8810 *
8820 *
8830 *
8840 *
8850 *
8860 *
8870 *
8880 *
8890 *
8900 *
8910 *
8920 *
8930 *
8940 *
8950 *
8960 *
8970 *
8980 *
8990 *
9000 *
9010 *
9020 *
9030 *
9040 *
9050 *
9060 *
9070 *
9080 *
9090 *
9100 *
9110 *
9120 *
9130 *
9140 *
9150 *
9160 *
9170 *
9180 *
9190 *
9200 *
9210 *
9220 *
9230 *
9240 *
9250 *
9260 *
9270 *
9280 *
9290 *
9300 *
9310 *
9320 *
9330 *
9340 *

```

ESTA SUBROTINA EFETUA O CALCULO DA COMPONENTE ZK DO CONTROLADOR
 OTIMO. ESTA PARCELA E DEVIDA AS FORÇAS EXTERNAS DE MEDIA NAO NULA.

SUBROTINAS DE PACOTE COMERCIAL HITACHI-MSL2:
 DVMF - MULTIPLICACAO DE MATRIZES
 DIFM - INVERSAO DE MATRIZES

```

AF(1,1)=A16
AE(1,2)=A19
AF(1,3)=-P13*A1/A1/ZAMB
AE(1,4)=0.0
AE(2,1)=A17
AE(2,2)=A20
AE(2,3)=-P23*A1/A1/ZAMB
AF(3,1)=A18
AE(3,2)=A21
AE(3,3)=A1-P33*A1/A1/ZAMB
AE(3,4)=0.0
AE(4,2)=0.0
AE(4,3)=-P34*A1/A1/ZAMB
AE(4,4)=0.0
DO 159 J1=1,4
DO 158 J2=1,4
AEI(J1,J2)=AE(J1,J2)
WRITE(6,*) AEI(J1,J2),J1,J2
159 CONTINUE
EPS=0.0001
CALL *DIFM(AEI,4,4,EPS,RDET,*,WK,IWK,IER)
WRITE(6,*) AEI INV,((AEI(J1,J2),J1=1,4),J2=1,4)
IF(IER) 255,255,QR(1)
256 WRITE(6,257) QR(1)
257 FORMAT(IH1,'MATRIZ NAO INVERSIVEL QR=',F16.1)
255 PF(1)=-P11*(AF1*F2T(J)+AF2*F6T(J))-P12*(AF3*F2T(J)+AF4*F6T(J))
PF(2)=-P12*(AF1*F2T(J)+AF2*F6T(J))-P22*(AF3*F2T(J)+AF4*F6T(J))
PF(3)=-P13*(AF1*F2T(J)+AF2*F6T(J))-P23*(AF3*F2T(J)+AF4*F6T(J))
PF(4)=-P14*(AF1*F2T(J)+AF2*F6T(J))-P24*(AF3*F2T(J)+AF4*F6T(J))
WRITE(6,*) PF,((PF(J1),J1=1,4)
CALL *DVMF(AEI,4,4,4,PF,1,4,ZK,4,IER)
WRITE(6,*) ZK=,ZK(1),ZK(2),ZK(3),ZK(4)
RETURN
END

```

SUBROUTINE BARUD
 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
 EXTERNAL FUN4
 COMMON/PO/Q11,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,Q14,Q24,Q34,Q44,ZAMB
 COMMON/CFHDR/A16,A17,A18,A19,A20,A21,A1,AF1,AF2,AF3,AF4
 COMMON/P2/PX(10),WK1(10,10),WK2(10,5)

SUBROTINA DE PACOTE COMERCIAL HITACHI-MSL2:
 DMSBM SOLUCAO EQUACOES ALGEBRICAS NAO LINEARES-METODO BRENT

```

PX(1)=P11
PX(2)=P12
PX(3)=P13
PX(4)=P14
PX(5)=P22
PX(6)=P23
PX(7)=P24
PX(8)=P33
PX(9)=P34
PX(10)=P44
IT*AX=PPP
XEPS=0.10001
FEPS=0.00001
REAL*8 FUN4
CALL *DMSBM(FUN4,PX,10,XEPS,FEPS,IT*AX,FUNPM,WK1,WK2,IER)
IF(IER)250,250,251
251 WRITE(6,252) IER
252 FORMAT(IH1,'SUBROTINA NAO CONVERGE ERRO TIPO=',I4)
250 P1=PX(1)
P12=PX(2)
P13=PX(3)
P14=PX(4)
P22=PX(5)
P23=PX(6)
P24=PX(7)
P33=PX(8)
P34=PX(9)
P44=PX(10)
RETURN
END

```

REAL FUNCTION FUN4*(PX,N,K)
 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
 DIMENSION PX(10)
 COMMON/PO/Q11,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,Q14,Q24,Q34,Q44,ZAMB
 COMMON/CFHDR/A16,A17,A18,A19,A20,A21,A1,AF1,AF2,AF3,AF4

FUNCAO EXTERNA UTILIZADA PELA SUBROTINA BARUD, DESCREVE O SISTEMA.

```

N=10
IF (K-1) 201,201,202
201 FUN4=-A1*A1*PX(3)*PX(3)/ZAMB+Q11+2*PX(1)*A16+2*PX(2)*A19
GO TO 219
202 IF (K-2) 203,203,204
203 FUN4=-A1*A1*PX(3)*PX(6)/ZAMB+A17*PX(1)+PX(2)*A20+PX(2)*A16+A19*
*PX(5)+PX(4)
GO TO 219
204 IF (K-3) 205,205,206
205 FUN4=-A1*A1*PX(8)*PX(3)/ZAMB+PX(3)*A16+PX(6)*A19+PX(1)*A18+PX(2)*
*A21+PX(3)*A1
GO TO 219

```



```

0000 205 IF (K-4) 207,207,208
0010 207 FU:4=-A1*A1*PX(6)*PX(6)/ZAMB+Q22+2*PX(2)*A17+2*A20*PX(5)+2*PX(7)
0020 GO TO 219
0030 208 IF (K-5) 209,209,210
0040 209 FU:4=-A1*A1*PX(8)*PX(6)/ZAMB+A17*PX(3)+PX(6)*A20+A18*PX(2)+A21*
0050 *PX(5)+A1*PX(6)+PX(9)
0060 GO TO 219
0070 210 IF (K-6) 211,211,212
0080 211 FU:4=-A1*A1*PX(8)*PX(8)/ZAMB+Q33+2*PX(3)*A16+2*A21*PX(6)+2*A1*
0090 *PX(8)
0100 GO TO 219
0110 212 IF (K-7) 213,213,214
0120 213 FU:4=-A1*A1*PX(9)*PX(9)/ZAMB+Q44
0130 GO TO 219
0140 214 IF (K-8) 215,215,216
0150 215 FU:4=-A1*A1*PX(5)*PX(9)/ZAMB+PX(4)*A16+A19*PX(7)
0160 GO TO 219
0170 216 IF (K-9) 217,217,218
0180 217 FU:4=-A1*A1*PX(6)*PX(9)/ZAMB+PX(4)*A17+A20*PX(7)+PX(10)
0190 GO TO 219
0200 218 FU:4=-A1*A1*PX(9)*PX(8)/ZAMB+PX(4)*A19+A21*PX(7)+PX(9)*A1
0210 *RETURN
0220 *
0230 *
0240 *
0250 *
0260 *
0270 *
0280 *
0290 *
0300 *
0310 *
0320 *
0330 *
0340 *
0350 *
0360 *
0370 *
0380 *
0390 *
0400 *
0410 *
0420 *
0430 *
0440 *
0450 *
0460 *
0470 *
0480 *
0490 *
0500 *
0510 *
0520 *
0530 *
0540 *
0550 *
SUBROUTINE BAKUD2
IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z)
COMMON/TAL/A(4,4),Q0(4,4)
COMMON/TA4/ZIZ(4,4),RRR(4,4),HA(R,A)
COMMON/TA5/SOL2(B,A),SOLU(B,A),SULT(8,8),PSB(4,4)
COMMON/TA6/WK4(8),IWK4(3),WK5(4),IWK5(4)
COMMON/TA7/WZ1(4,4),WZ1T(4,4),WZ12(4,4),WZ21(4,4),WZ2(4,4)
COMMON/PO/Q11,Q12,Q22,Q13,Q23,Q33,Q14,Q24,Q34,Q44,ZAMB
COMMON/P1/P11,P12,P13,P14,P22,P23,P24,P33,P34,P44,PPP
COMMON/CFHR/A16,A17,A18,A19,A20,A21,A1,AF1,AF2,AF3,AF4
*
* ESTA SUBROTINA EFETUA O CALCULO DA COMPONENTE P DO CONTROLADOR.
* ESTA COMPONENTE DEPENDE DO ESTADO E CONTROLA OS ERROS, INCERTEZAS
* DO MODELO, SENSORES, ATUADORES E FORÇAS DE MEDIA NULA O CALCULO E
* REALIZADO UTILIZANDO O ALGORITMO SUGERIDO POR HARRAUD-IFAC COMPUTER
* AIUED DESIGN OF CONTROL SYSTEMS, 1980.
*
SUBROUTINE OF PACOTE COMERCIAL MSL2;
DWARF; MULTPLIC. DE MATRIZES; GEFIM INVERSAU DE MATRIZES
*
* DEFINE AS MATRIZES Q0, I, P, RR(R)-IR(8), A
A(1,1)=A16
A(1,2)=A17
A(1,3)=A18
A(1,4)=0.0
A(2,1)=A19
A(2,2)=A20
A(2,3)=A21
A(2,4)=0.0
A(3,1)=0.0
A(3,2)=0.0
A(3,3)=A1
A(3,4)=1.0
A(4,1)=0.0
A(4,2)=1.0
A(4,3)=0.0
A(4,4)=0.0
DO B=0 B1=1,4
DO B=0 B2=1,4
Q0(J1,J2)=0.0
ZIZ(J1,J2)=0.0
BRB(J1,J2)=0.0
880 CONTINUE
Q0(1,1)=Q11
Q0(2,2)=Q22
Q0(3,3)=Q33
Q0(4,4)=Q44
BRB(3,3)=A1*HA/ZAMB
ZIZ(1,1)=1.0
ZIZ(2,2)=1.0
ZIZ(3,3)=1.0
ZIZ(4,4)=1.0
1150 *
1160 *
1170 *
DEFINE A MATRIZ HAMILTONIANA

```

```

11790 EPS=0.0001
11800 CALL WDF1M(WZ1T,4,4,EP5,RCDET,IDE1,WK5,IER)
11810 CALL WDFMFM(WZ21,4,4,4,WZ1T,4,4,PSR,4,IER)
11820 P11=PSR(1,1)
11830 P12=PSR(1,2)
11840 P13=PSR(1,3)
11850 P14=PSR(1,4)
11860 P22=PSR(2,2)
11870 P23=PSR(2,3)
11880 P24=PSR(2,4)
11890 P33=PSR(3,3)
11900 P34=PSR(3,4)
11910 P44=PSR(4,4)
11920 P21=PSR(2,1)
11930 P31=PSR(3,1)
11940 P42=PSR(4,2)
11950 P41=PSR(4,1)
11960 P42=PSR(4,2)
11970 P43=PSR(4,3)
11980 WRITE(*,*) 'PXX',P11,P12,P13,P14
11990 WRITE(*,*) 'PXX',P21,P22,P23,P24
12000 WRITE(*,*) 'PXX',P31,P32,P33,P34
12010 WRITE(*,*) 'PXY',P41,P42,P43,P44
12020 RETURN
12030 END

```

```

11790
11800
11810
11820
11830
11840
11850
11860
11870
11880
11890
11900
11910
11920
11930
11940
11950
11960
11970
11980
11990
12000
12010
12020
12030
END OF DATA
END
READY
TSLOG END

```

```

1180 DO 881 J1=1,4
1190 DO 881 J2=1,4
1200 HA(J1,J2)=A(J1,J2)
1210 J3=J1+4
1220 HA(J3,J2)=-00(J1,J2)
1230 J4=J2+4
1240 HA(J1,J4)=-BRR(J1,J2)
1250 HA(J3,J4)=-A(J2,J1)
1260
1270 * CONTINUE
1280 *
1290 *
1300 DO 889 J1=1,3
1310 DO 889 J2=1,4
1320 SOL2(J1,J2)=HA(J1,J2)
1330
1340 * CONTINUE
1350 *
1360 *
1370 DO 882 J1=1,4
1380 DO 882 J2=1,4
1390 SOLU(J1,J2)=SOL2(J1,J2)
1400 SOLT(J1,J2)=SOL2(J1,J2)
1410
1420 * CONTINUE
1430 *
1440 *
1450 EPS=0.0001
1460 CALL WDF1M(SOL1,8,8,EP5,RCDET,IDE1,WK4,IER)
1470 *
1480 *
1490 *
1500 DO 883 J1=1,8
1510 DO 883 J2=1,4
1520 SOL2(J1,J2)=0.5*(SOLU(J1,J2)+SOLT(J1,J2))
1530
1540 * CONTINUE
1550 *
1560 *
1570 EPS=0.0001
1580 DO 884 J1=1,8
1590 DO 884 J2=1,4
1600 SOL3=0ARS(SOL2(J1,J2)-SOLU(J1,J2))
1610 IF(SOL3-EP5) 884,884,885
1620
1630 * CONTINUE
1640 *
1650 *
1660 DO 887 J1=1,4
1670 DO 887 J2=1,4
1680 WZ1(J1,J2)=SOL2(J1,J2)-ZIZ(J1,J2)
1690 WZ1T(J1,J2)=WZ1(J1,J2)
1700 J4=J2+4
1710 WZ12(J1,J2)=SOL2(J1,J4)
1720 J3=J1+4
1730 WZ21(J1,J2)=SOL2(J3,J2)
1740 WZ2(J1,J2)=SOL2(J3,J4)+ZIZ(J1,J2)
1750
1760 * CONTINUE
1770 *
1780 *
CALCULA P-SOLUCAO DA EQUACAO ALGEBRICA DE RICCATI

```

BIBLIOGRAFIA:

1. MINORSKY,N.;Directional Stability of Automatically Steered Bodies;Journal American Society of Naval Engineers,vol.34; 1922.
2. SCHIFF,L.&GIMPRICH,M.;Automatic Control of Ships by Proportional Control;Transaction SNAME;1949.
3. RYDILL,L.J.;A Linear Theory for the Steered Motion of Ships in Waves;Transaction RINA;1959.
4. NOMOTO,K.;Loss of Propulsive Power Caused by Yawing with Particular Reference to Automatic Steering;Journal Society of Naval Architects of Japan,vol.120;Dez.1966.
5. KOYAMA,T.;On the Optimum Automatic Steering System of Ships at Sea;Journal SNAJ,vol 122;Dez.1967.
- 5a. MOTORA,S. & KOYAMA,T.;Some Aspects of Automatic Steering of Ships;Japan Shipbuilding and Marine Engineering,vol.3,n.4; Jul.1968.
6. NORRBIN,N.H.;On the Added Resistance due to Steering on a Straight Course;13th.Int.Towing Tank Conference Berlin/ Hamburg, vol1;1972.
7. REID,R.E.&WILLIAMS,V.E.;A New Ship Control Design Criterium for Improving Heavy Weather Steering;Proc.5th.Ship Control System Symposium;Annapolis,U.S.A;1978.
8. REID,R.E. & et.all.;A Proposal for Performance Criteria for Propulsion Losses Due to Ship Steering;Journal of Dynamic System Measurement and Control;1980.
9. REID,R.E. & MOORE,J.W.;Optimal Steering Control of High-Speed Containerships-Part I -System Dynamics;Proc.J.A.C.C.;Agosto 1980.
10. MOORE,J.W. & REID,R.E.;Optimal Steering Control of High-Speed Containerships-Part II -Controller Design;Proc.J.A.C.C;Agosto 1980.
11. REID,R.E.,GRIFFIN,D.E. & et.all.;Comparison of Automatic Steering Performance of a VLCC in a Seaway Resulting from Application of LQG and Classical Control System Design Techniques; Proc. 6th Ship Control Systems Symposium;Ottawa, Canada;Out.1981.
- 11a. REID,R.E.,GRIFFIN,D.E. & et.all.;Comparison of Automatic Steering Performance of a VLCC in a Seaway Resulting from Application of LQG and Classical Control System Design Techniques;Paper ed.A.SG.Hartmann;1981.

12. REID,R.E.;A Proposal for Performance Criteria for Propulsion Losses Due to Ship Steering;Transaction SNAME,vol.104;Jun. 1982.
13. REID,R.E. & YOUHANAIE,M.;Energy Losses Due to Limit Cycle Behaviour of a Large Tanker Under Automatic Steering Control. Part I The Problems and Method of Analysis;Proc.1st.OMAE;Mar. 1982.
14. YOUHANAIE,M. & REID,R.E.;Energy Losses Due to Limit Cycle Behaviour of a Large Tanker Under Automatic Steering Control. Part II Evaluation of Losses of a 250.000 dwt Tanker in Calm Water; Proc.1st.OMAE;Mar.1982.
15. REID,R.E. & GRIFFIN,D.E.;Stability Consideration for Existing Conventional Autopilots on Modern Ship Types;Transaction of the ASME,vol.106;Mar.1984.
16. REID,R.E.,MEARS,B.C. & GRIFFIN,D.E.;Energy Losses Related to Automatic Steering of Ships in Waves-Part I :Losses Under Conventional Autopilot Control;Transaction of the ASME,vol.105; Set 1983.
17. MEARS,B.C.,GRIFFIN,D.E.&REID,R.E.;Energy Losses Related to Automatic Steering of Ships in Waves-Part II :Performance of Controllers Designed to a New Criterion;Transaction of the ASME,vol.105;Set.1983.
18. GRIFFIN,D.E.&REID,R.E.;A Method to Optimize Steering Performance of Conventional Ship Autopilots;Proc.3rd.OMAE,vol II ; 1984.
19. GRIFFIN,D.E.&REID,R.E.;A Method to Optimize Steering Performance of Conventional Ship Autopilots;Journal of Energy Resources Technology,vol.106;Dez.1984.
20. CLARKE,D.;Development of a Cost Function for Autopilot Optimization; Proc.Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova,Italia;1980.
21. CLARKE,D.;Do Autopilots Save Fuel;Conference on Priorities for Reducing the Fuel Bill;The Institute of Marine Engineers; 1982.
22. BROOME,D.R. & LAMBERT,T.H.;An Optimizing Function for Adaptive Ships Autopilots;Proc.5th Ship Control Systems Symposium; Annapolis,U.S.A.;1978.
23. BROOME,D.R. & et.all.;The Effect of Variations in Ship Operating Conditions on an Adaptive Autopilot Optimising Function; Proc.Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova,Italia ;1980.

24. BROOME, D.R. & RUSH, J.B.D.; Statistical Analysis of Autopilot Performance; Proc. 7th Ship Control Systems Symposium; Bath, Grã-Bretanha; Set. 1984.
25. AMERONGEN, J.VAN & NAUTA LEMKE, H.R.VAN; Optimum Steering of Ships with an Adaptive Autopilot; Proc. 5th Ship Control Systems Symposium; Annapolis, U.S.A.; 1978.
26. AMERONGEN, J.VAN; Model Reference Adaptive Control Applied to Steering of Ships; Lectures Notes in Control and Information Sciences; ed. A.V. Balakrishnan & M. Thomas, n24; 1980.
27. AMERONGEN, J.VAN; Criteria for Optimum Steering of Ships; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia; 1980.
28. AMERONGEN, J.VAN & et.all.; Measuring the Steering Performance of Ships During Full Scale Trials and Model Tests; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia; 1980.
29. AMERONGEN, J.VAN & et.all.; Measuring the Steering Performance of Ships During Full Scale Trials and Model Tests; Ship Operation Automation III, North Holland Publishing Company; 1980.
30. AMERONGEN, J.VAN; Adaptive Steering of Ships-A Model Reference Approach; Automatica, vol. 20, n. 1; 1984.
31. TIANO, A.; Identification and Control of the Ship Steering Process; Proc. 2nd. Symposium on Ship Operational Automation; Washington, U.S.A.; 1976.
32. BRINK, A.W., BAAS, G., TIANO, A. & VOLTA, E.; Adaptive Automatic Course-Keeping Control of a Supertanker and a Container-ship-A Simulation Study; Intern. Shipbuilding Progress, vol. 26, n. 301; 1979.
33. TIANO, A., VOLTA, E. & et.all.; Adaptive Control of Large Ships in Non-Stationary Conditions-A Simulation Study; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia; 1980.
34. AYZA, J., TIANO, A. & et.all.; Modal Control Approach to Ship's Autopilot Design; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia; 1980.
35. BRINK, A.W. & TIANO, A.; Self-Tuning Adaptive Control of Large Ships in Non-Stationary Conditions; International Shipbuilding Progress, vol 28, n. 323; 1981.
36. TIANO, A. & VOLTA, E.; Comparison of Various Adaptive Control Techniques Applied to Autopilot Design; Proc. 6th Ship Control Systems Symposium; Ottawa, Canada; 1981.
37. KALLSTROM, C.G., ASTROM, K.J. & et.all.; Adaptive Autopilots for Tankers; Automatica, 15, n. 3; 1979.

38. ASTROM, K.J.; Design of Fixed Gain and Adaptive Ship Steering Autopilots based on Nomoto's Model; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia ;1980.
39. KALLSTRÖM, C.G. & NORRBIN, N.H.; Performance Criteria for Ship Autopilots-An Analysis of Shipboard Experiments; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia ;1980.
40. KALLSTRÖM, C.G. & ASTROM, K.J.; Experiences of System Identification Applied to Ship Steering; Automatica, 17, n.1; 1981.
41. KALLSTRÖM, C.G.; Identification and Adaptive Control Applied to Ship Steering; SSPA Publ.93; 1982.
42. KALLSTRÖM, C.G. & NORRBIN, N.H.; Performance Criteria for Ship Autopilots-An Analysis of Shipboard Experiments; SSPA Publ.98, 1984.
43. MORT, N. & LINKENS, D.A.; Self-Tuning Controllers for Surface Ship Course and Track-Keeping; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia ;1980.
44. MORT, N. & LINKENS, D.A.; Self-Tuning Controllers for Surface Ships Course -Keeping and Manoeuvring; Self-Tuning and Adaptive Control: Theory and Applications-ed. Harris, C.J. & Billing 1981.
45. RACCAL-DECCA; Pilot 780; Catálogo do Fabricante; 1981.
46. HASHIGUCHI, S.; Integrated Automatic Navigation System-Hitachi Transoline; 3rd. Intern. Symposium ISSOA-79; Tokyo, Japan; 1979.
47. ONO, SEGAWA, KANAMARU, NAKAGAWA; Mitsubishi Optimum Navigation Planning System TONAC-N2; Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol.22, n.1; 1985.
48. KANAMARU, H. & SATO, T.; Adaptive Autopilot System with Minimum Propulsive Energy Consumption; Proc. 5th. Intern. Symposium ISSOA-79; Tokyo, Japan; 1979.
49. COLEMAN & WANG; Developments in Automatic Control of Ship Steering; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia ;1980.
50. BECH, M.I. & CHISLETT, M.S.; Statistical Investigation of the Invariant Coefficients of the Ships' Equation of Response to Steering ; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia ;1980.
51. GARCIA, V.C. & THALER, C.J.; Comparison of Steering Control Algorithms for Optimized Autopilots; Proc. 7th Ship Control System Symposium, vol.4; Bath, Grã-Bretanhã; 1984.
52. ZWIDWEG; Course Keeping as a Special Case of Track-Keeping; Ship Operation Automation ISSOA-82; 1982.

53. MAJOHR, BECKERER, BOGDANOV; Scientific and Methodological Seminar on Ship Hydrodynamics; 12th Seagoing Qualities of Ships and Marine Structures; Bulgaria; 1983.
54. HASEGAWA, K.; On a Performance Criterion of Autopilot Navigation; Journal Kansai SNAJ, 178; Set. 1980.
55. KASAHARA, K. & NISHIMURA, Y.; Overview of Optimum Navigation Systems; Proc. Symposium Ship Steering Automatic Control; Genova, Italia; 1980.
56. ATHANS, M.; The Role and Use of Stochastic Linear-Quadratic-Gaussian Problem in Control System Design; IEEE Transaction on Automatic Control, vol AC-16, n. 6; Dez. 1971.
57. OGATA, K.; Modern Control Engineering; ed. Prentice Hall; 1970.
58. TAKAHASHI, Y., RABINS, M., AUSLANDER, D.M.; Control and Dynamic Systems; ed. Addison-Wesley; 1970.
59. KREBS, H.I.; Uma Introdução ao Segundo Método de Liapunov Aplicado à Estabilidade de Navios de Superfície; Seminário de Área-ETCN-20-Estudo Técnico 394/1982.
60. COMSTOCK, J.P.; Principles of Naval Architecture; Sname; 1967.
61. MARTIN, L.L.; Ship Maneuvering and Control in Wind; Transaction Sname, vol. 88; 1980.
62. SALVENSEN, N., TUCK, E.O. & FALTINSEN, O.; Ship Motions and Sea Loads; Trans. Sname, vol. 78; 1970.
63. PINSKER, J.A.; Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures; Netherlands Ship Model Basin-Wageningen, publ. 650.
64. HOOFF, J.P.; A Mathematical Method of Determining Hydrodynamically Induced Forces on a Semisubmersible; Transaction Sname; 1971.
65. ARANHA, J.A.P., PESCE, C.P.; Effect of the Second-Order Potential in the Slow-Drift Oscillation of a Floating Structure in Irregular Waves; Journal of Ship Research, vol. 30, n. 2; Jun. 1986.
66. EDA, H. & CRANE, C.L.; Steering Characteristics of Ships in Calm Water and Waves; Transaction Sname, vol. 73; 1965.
67. NORRBIN, N.H.; Ship Maneuvering in Deep and Confined Waters; SSPA publ. 68; 1971.
68. STROM-TEJSEN, J.; A Digital Computer Technique for Prediction of Standard Maneuvers of Surface Ships; Dept. of the U.S. Navy, r. 2130; Dez. 1965.

69. MORGAN, M. J.; Dynamic Positioning of Offshore Vessels; PPC Books; 1978.
70. LEE, K., SEIREG, A.; Optimum Design of Elastically Supported Gyroscope for Ship Stabilization; Journal of Energy Resources Technology, vol. 106; Dez. 1984.
71. YU, CHANGYOU; Application of the Reliability Technique in Frequency Conversion Power of Gyrocompass; Proc. Marintec China 83, vol. 1; Shanghai; Out. 1983.
72. ANTHOLD, R. C.; Marine Gyrocompass to Navigator Commonality is the Key to an Effective Design; Proc. National Technical Meeting Institute of Navigation; San Diego; 1984.
73. JOURDAN, D. W.; Doppler Sonar Navigator Error Propagation and Correction; Navigator-Journal of the Institute of Navigation, vol. 32, n. 1; Spr. 1985.
74. TUCKER, C. P.; A Multi Sensor Approach to Underwater Navigation; Proc. Subtech-83, The Design and Operation of Underwater Vehicles; Londres; Nov. 1983.
75. JAPAN MARINE MACHINERY DEVELOPMENT ASSOCIATION; Meeting US-Japan Marine Facilities Panel, 12th; US-Japan Cooperative Program in Natural Resources; Ag. 1983.
76. MARUO, H.; The Drift of a Body Floating on Waves; Journal of Ship Research; Dez. 1960.
77. NEWMAN, J. N.; The Drift Force and Moment on Ship in Waves; Journal of Ship Research; Mar. 1967.
78. KIM, C. H., CHOU, F. S. & TIEN, D.; Motions and Hydrodynamic Loads of a Ship Advancing in Oblique Waves; Transaction Sname, vol. 88; 1980.
79. CONSIDINE, D. M.; Process Instruments and Control Handbook; McGraw Hill, 2a. edição; 1974.
80. HOGBEN, N. & LUMB, F. E.; Ocean Statistics; H. M. S. O., Londres.
81. KLEINMAN, D. L.; On an Iterative Technique for Riccati Equation Computations; IEEE Transaction on Automatic Control; Fev. 1968.
82. BARRAUD, A. Y.; An Accelerated Newton Process to Solve Riccati Equation Via Matrix Sign Function; IFAC-Computer Aided Design of Control Systems, Pergamon Press, New York, 1980.
83. GOODWIN, G. C. & SIN, K. S.; Adaptive Filtering Prediction and Control; Prentice-Hall; 1984.