

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia de Campinas
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

LOPES

CONTROLE DE DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DE
UM NAVIO-SONDA DE POSICIONAMENTO DINÂMICO
DURANTE MUDANÇA DE APROAMENTO

*Este exemplar corresponde à versão final de Tese
defendida pelo Eng. Clovis Antonio Lopes e aprovada
pela comissão julgadora em 30/04/90. Celso K. M.
Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka*

Autor : Clovis Antonio Lopes
Orientador : Celso Kazuyuki Morooka
Coorientador : Wagner C. Amaral

21/90

Caraceni

Abril de 1990

PC. 910.7851

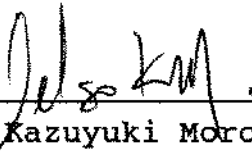
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO


A dissertação "Controle de Deslocamentos Horizontais de um Navio-Sonda de Posicionamento Dinâmico durante mudança de Aproamento" elaborada por Clovis Antonio Lopes e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 30 de abril de 1990

Banca Examinadora :



Celso Kazuyuki Morooka, Ph. D.



Wagner Caradori do Amaral, Ph. D.



Eric Edgar Maidla, Ph. D.

AGRADECIMENTOS

À Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRÁS, pela oportunidade fornecida de realizar o curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo e pelo apoio prestado ao longo do mesmo.

Aos prof. Dr. Celso Morooka e prof. Dr. Wagner Amaral, pela orientação dedicada e incentivo na elaboração deste trabalho.

Aos professores, funcionários e colegas da UNICAMP, em especial Shiniti Ohara, pela ajuda inestimável prestada em todos os momentos de dúvida, durante todas as fases de realização desta tese.

Ao Engenheiro da SEDCO-FOREX Schlumberger Rec Stanbery, pelo fornecimento generoso de dados e material de consulta, além de conselhos oportunos e esclarecedores.

Aos colegas da Divisão de Perfuração - DIPER/DPSE, da PETROBRÁS, especialmente ao Engenheiro Virmondes Alves Pereira, pelo incentivo e contínua fonte de motivação para prosseguir nestes estudos.

Aos Engenheiros da PETROBRÁS Roberto Resende e José Ricardo de Toledo Montesanti, pelo apoio e incentivo recebidos.

À minha esposa Ângela e minhas
filhas Bruna e Luiza por todos
os sorrisos que me dedicaram.

Aos meus pais Clowis e Gisela
pelos exemplos silenciosos e
aprovações entusiasmadas.

SUMÁRIO

Em uma embarcação tipo navio, dotada de Posicionamento Dinâmico, é necessário que as mudanças de aproamento sejam rápidas, para mantê-la em constante alinhamento com as forças ambientais, especialmente as de vento, buscando opor-lhes a menor superfície de ataque possível.

Este trabalho, assim, estuda o comportamento do navio-sonda SEDCO-472 durante manobras de giro, buscando melhorar seu desempenho através do desenvolvimento de um algoritmo de ajuste dos parâmetros de controle, que possua implementação simples e que não introduza modificações no controlador existente.

Para tanto, foram analisadas as respostas no domínio da frequência e do tempo, e o Lugar das Raízes das funções de transferência dos sistemas Existente e o aqui Proposto. Além disso, simulou-se o comportamento da embarcação em diferentes condições de mar e sistemas de controle.

Observou-se que, com o sistema Proposto, melhora-se os tempos necessários à mudanças de aproamento, em todas as condições de mar verificadas, mantendo-se as premissas de simplicidade de implementação e ausência de modificações no sistema Existente.

Conclui-se, por fim, que o sistema, ora em uso, possui resposta excessivamente lenta à mudanças de aproamento, permitindo, no entanto, significativo aumento dos valores de seus parâmetros de controle, sem que isto acarrete a instabilidade do sistema.

CONTROLE DE DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DE UM
NAVIO SONDA DE POSICIONAMENTO DINÂMICO
DURANTE MUDANÇAS DE APROAMENTO

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMENTOS.....	ii
SUMÁRIO.....	iv
NOMENCLATURA.....	vi
LISTA DE ANEXOS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii

Capítulo I – O Problema Proposto

1.1 - Introdução.....	1
1.2 - O problema.....	2
1.3 - Fatores que ocasionam o problema.....	2
1.4 - Exemplos.....	5
1.5 - Sinopse do Trabalho de Tese.....	7
1.5 - Resumo.....	9

Capítulo II - Histórico dos sistemas de
Posicionamento Dinâmico

2.1 - Introdução.....	10
2.2 - Primórdios.....	10
2.3 - Primeira Geração PD.....	13
2.4 - Segunda Geração PD.....	16
2.5 - Terceira Geração PD.....	18
2.6 - Resumo.....	20

Capítulo III - O Simulador de
Posicionamento Dinâmico

3.1 - Introdução.....	21
3.2 - Descrição do Sistema PD.....	23
3.3 - Estrutura do Simulador	
3.3.1 - Diagrama de Blocos.....	28
3.3.2 - O Controlador.....	32
3.3.3 - Modelagem de Ondas, Vento e Correnteza...	34
3.3.4 - Modelagem da Dinâmica do Navio.....	38
3.3.5 - Modelagem dos Propulsores.....	40
3.3.6 - Rede de Filtragem dos Sinais.....	44
3.3.7 - Modelagem dos Sensores.....	50
3.4 - Programa Simulador.....	51
3.5 - Análise de desempenho do Simulador.....	54
3.6 - Complementos ao Programa Simulador	

	Página
3.6.1 - Onda Variável.....	57
3.6.2 - Modelo de Referência.....	58
3.7 - Modelagens Propostas.....	59
3.7.1 - Dinâmica da Embarcação.....	59
3.7.2 - Propulsores.....	60
3.7.3 - Sensores.....	60
3.8 - Resumo.....	62

Capítulo IV - Análise dos Sistemas
Existente e Proposto

4.1 - Introdução.....	63
4.2 - Descrição dos Sistemas Estudados	
4.2.1 - Descrição do Sistema Existente.....	64
4.2.2 - Descrição do Sistema Modificado.....	69
4.2.3 - Descrição do Modelo Proposto.....	71
4.3 - Análise Segundo o Lugar das Raízes.....	74
4.3.1 - Lugar das Raízes do Sist. Existente.....	75
4.3.2 - Lugar das Raízes do Sistema Modificado.....	78
4.3.3 - Lugar das Raízes do Sist. Proposto.....	81
4.4 - Análise de Estabilidade dos sistemas apresentados	
4.4.1 - Estabilidade do Sistema Existente.....	84
4.4.2 - Estabilidade do Sistema Modificado.....	86
4.4.3 - Estabilidade do Sistema Proposto.....	86

4.5 - Análise no Domínio do Tempo	
4.5.1 - Resposta do Sistema Existente.....	90
4.5.2 - Resposta do Sistema Modificado.....	90
4.5.3 - Resposta do Sistema Proposto.....	93
4.6 - Comparação entre os sistemas.....	95
4.7 - Resumo.....	95

Capítulo V - Análise e Resultados
das Simulações Realizadas

5.1 - Introdução.....	97
5.2 - Escolha das Condições de Mar.....	98
5.3 - Resultados das Simulações.....	102
5.4 - Modulação dos Propulsores.....	147
5.5 - Resumo.....	151

Capítulo VI - Conclusões

6.1 - Introdução.....	152
6.2 - Estudos Iniciais.....	153
6.3 - O Controlador Proposto.....	154
6.4 - Conclusões.....	156
6.5 - Implementação do Algoritmo Proposto.....	158
Referências Bibliográficas.....	160

NOMENCLATURA

Alfabeto Romano

- A_{ij} - Matriz de massa adicional (Kg)
- b - Largura de banda à -3 dB de um filtro Notch (rd/s)
- B_{ij} - Matriz de coeficientes de amortecimento viscoso
[N/(m/s²)]
- C_{cx} - Coeficiente de arrasto hidrodinâmico devido à correnteza em relação ao eixo X [N/(m/s)²]
- C_{cy} - Coeficiente de arrasto hidrodinâmico devido à correnteza em relação ao eixo Y [N/(m/s)²]
- C_{cz} - Coeficiente de arrasto hidrodinâmico devido à correnteza em relação ao eixo Z [Nm/(m/s)²]
- Cl_{ox} - Coeficiente de deriva constante para as forças de onda no eixo X (N/m)
- Cl_{oy} - Coeficiente de deriva constante para as forças de onda no eixo Y (N/m)
- Cl_{oz} - Coeficiente de deriva constante para as forças de onda no eixo Z (Nm/m)
- Cq_{oy} - Coeficiente quadrático de deriva para as forças de onda no eixo Y (N/m²)
- Cq_{oz} - Coeficiente quadrático de deriva para as forças de onda no eixo Z (Nm/m²)
- Cq_{ox} - Coeficiente quadrático de deriva para as forças de onda no eixo X (N/m²)
- C_{wx} - Coeficiente de arrasto em relação ao eixo X do navio [N/(m/s)²]

- C_{wy} - Coeficiente de arrasto em relação ao eixo Y do navio [$N/(m/s)^2$]
- C_{wz} - Coeficiente de arrasto em relação ao eixo Z do navio [$Nm/(m/s)^2$]
- d - Razão de atenuação na frequência de centro do filtro Notch
- e_x - Erro de posição no eixo X (m)
- \dot{e}_x - Derivada do sinal de erro de posição em X (m/s)
- \ddot{e}_x - Segunda derivada do erro de posição em X (m/s^2)
- e_y - Erro de posição no eixo Y (m)
- \dot{e}_y - Derivada do sinal de erro de posição em Y (m/s)
- \ddot{e}_y - Segunda derivada do erro de posição em Y (m/s^2)
- e_z - Erro de aproamento no eixo Z (grs)
- \dot{e}_z - Derivada do sinal de erro de aproam. em Z (grs/s)
- \ddot{e}_z - Segunda derivada do erro de aproam. em Z (grs/s^2)
- $E(s)$ - Função de transferência dos propulsores
- E_c - Empuxo comandado pelo controlador (N)
- F_x - Força atuante sobre o navio segundo o eixo X (N)
- F_y - Força atuante sobre o navio segundo o eixo Y (N)
- F_{cx} - Força gerada pela correnteza sobre o eixo X (N)
- F_{cy} - Força gerada pela correnteza sobre o eixo Y (N)
- F_{wx} - Força de vento segundo o eixo X do navio (N)
- F_{wy} - Força de vento segundo o eixo Y do navio (N)
- $G(s)$ - Função de transferência de um filtro Notch
- GD_x - Ganho derivativo do controlador no eixo X
- GD_y - Ganho derivativo do controlador no eixo Y
- GD_z - Ganho derivativo do controlador no eixo Z
- GI_x - Ganho integral do controlador no eixo X
- GI_y - Ganho integral do controlador no eixo Y
- GI_z - Ganho integral do controlador no eixo Z
- GP_x - Ganho proporcional do controlador no eixo X
- GP_y - Ganho proporcional do controlador no eixo Y

GP_z	- Ganho proporcional do controlador no eixo Z
H_o	- Altura significativa de onda (m)
J_x	- Índice de desempenho para o eixo X (m s)
J_y	- Índice de desempenho para o eixo Y (m s)
J_z	- Índice de desempenho para o eixo Z (grs s)
J_{polar}	- Índice de desempenho para afastamentos radiais (m s)
k_z	- Raio de giração em torno do eixo de aproamento (m)
M_z	- Momento atuante sobre o navio segundo o eixo Z (Nm)
M_{cz}	- Momento gerado pela correnteza sobre o eixo Z (Nm)
Mt_x	- Massa total da embarcação em X (Kg)
Mt_y	- Massa total da embarcação em Y (Kg)
Mt_z	- Momento de inércia total da embarcação em Z (Kg m ²)
M_{wz}	- Momento gerado pelo vento no eixo Z (Nm)
$Plt(s)$	- Função de transferência da planta (navio)
$P_{1...i}$	- Pólos (de 1 à i) das funções de transferência dos sistemas de controle
s	- Operador Laplaciano
t	- Tempo de simulação (s)
T	- Tempo final do intervalo de simulação (s)
u	- Componente da velocidade do navio em X (m/s)
\dot{u}	- Componente da aceleração da embarcação em X (m/s ²)
u_c	- Componente da velocidade da correnteza em X (m/s)
v	- Componente da velocidade do navio em Y (m/s)
\dot{v}	- Componente da aceleração da embarcação em Y (m/s ²)
v_c	- Componente da velocidade da correnteza em Y (m/s)
V_{rel}	- Velocidade relativa entre o navio e a correnteza (m/s)
V_w	- Velocidade de vento (m/s)
w	- Componente da velocidade da embarcação em Z (grs/s)
\dot{w}	- Componente da aceleração da embarcação em Z (grs/s ²)
w_o	- Frequência de centro do filtro Notch (rd/s)
$Z_{1...i}$	- Zeros (1 à i) das funções de transferência dos sistemas de controle

Alfabeto Grego

α_o	- Ângulo entre o azimute do navio e a direção das ondas (graus)
α_{rel}	- Ângulo entre as direções do navio e da correnteza (graus)
α_w	- Ângulo entre o azimute do navio e a direção do vento (graus)
∇	- Deslocamento da embarcação (m^3)
ψ	- Aproximado do navio (graus)
ψ_c	- Ângulo de incidência da correnteza em relação ao norte (graus)
ψ_o	- Direção de onde vêm as ondas (graus)
ψ_w	- Direção de onde vem o vento (graus)
ρ	- Peso específico da água do mar (N/m^3)
Σ	- Somatório
τ	- Constante de tempo dos propulsores (s)

Lista de Anexos

	Página
ANEXO A - O Analisador de Espectro HONEYWELL.....	163
ANEXO B - O Programa de Simulação empregado.....	166
ANEXO C - Funções de Transferência do Sistema de Posicionamento Dinâmico Existente.....	204

Lista de Tabelas

Tabela	página
3.1 - Valores dos coeficientes de arrasto utilizados.....	38
4.1 - Comparação entre os sistemas analisados.....	95
5.1 - Condições de mar escolhidas para as simulações.....	102
5.2 - Resultados obtidos nas simulações realizadas.....	103

Lista de Figuras

Figura	página
3.1 - Esquema do sistema de Posicionamento Dinâmico.....	25
3.2 - Sensores do sistema de Posicionam. Dinâmico.....	26
3.3 - Diagrama de Blocos do Simulador.....	29
3.4 - Curva de aumento de empuxo dos propulsores.....	42
3.5 - Resposta típica de um filtro Notch.....	46
3.6 - Densidade Espectral dos movimentos filtrados com filtros Notch.....	48
3.7 - Comparação entre dados reais e simulados do navio SEDCO-472.....	55
4.1 - Diagrama de Blocos simplificado do sistema Existente.....	65
4.2 - Modelagem do sistema Existente.....	67
4.3 - Modelagem do sistema Proposto.....	72
4.4 - Lugar das Raízes do sistema Existente.....	76
4.5 - Lugar das Raízes do sistema Modificado.....	79
4.6 - Lugar das Raízes do sistema Proposto.....	83
4.7 - Gráfico de estabilidade do sistema Existente.....	85
4.8 - Gráfico de estabilidade do sistema Modificado.....	87
4.9 - Gráfico de estabilidade do sistema Proposto.....	88
4.10 - Resposta à uma entrada em rampa unitária do sistema Existente.....	91

Figura	página
4.11 - Resposta à uma entrada em rampa unitária do sistema Modificado.....	92
4.12 - Resposta à uma entrada em rampa unitária do sistema Proposto.....	94
oSimulações Realizadas	
5.1 - Ambiente 1. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau.....	105
5.2 - Ambiente 1. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa.....	108
5.3 - Ambiente 1. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau.....	110
5.4 - Ambiente 1. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa.....	111
5.5 - Ambiente 2. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau.....	113
5.6 - Ambiente 2. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa.....	115
5.7 - Ambiente 2. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau.....	116
5.8 - Ambiente 2. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa.....	117
5.9 - Ambiente 3. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau.....	119

5.10 - Ambiente 3. Sistema Existente em giro segundo	
entrada em rampa.....	121
5.11 - Ambiente 3. Sistema Modificado em giro segundo	
entrada em degrau.....	122
5.12 - Ambiente 3. Sistema Proposto em giro segundo	
entrada em rampa.....	123
5.13 - Ambiente 4. Sistema Existente em giro segundo	
entrada em degrau.....	125
5.14 - Ambiente 4. Sistema Existente em giro segundo	
entrada em rampa.....	127
5.15 - Ambiente 4. Sistema Modificado em giro segundo	
entrada em degrau.....	128
5.16 - Ambiente 4. Sistema Proposto em giro segundo	
entrada em rampa.....	129
5.17 - Ambiente 5. Sistema Existente em giro segundo	
entrada em degrau.....	131
5.18 - Ambiente 5. Sistema Existente em giro segundo	
entrada em rampa.....	132
5.19 - Ambiente 5. Sistema Modificado em giro segundo	
entrada em degrau.....	134
5.20 - Ambiente 5. Sistema Proposto em giro segundo	
entrada em rampa.....	135
5.21 - Ambiente 6. Sistema Existente em giro segundo	
entrada em degrau.....	137

Figura	página
5.22 - Ambiente 6. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa.....	139
5.23 - Ambiente 6. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau.....	141
5.24 - Ambiente 6. Sistema Proposto em giro segundo entrada em degrau.....	142
5.25 - Ambiente 7. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau.....	143
5.26 - Ambiente 7. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa.....	145
5.27 - Ambiente 7. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau.....	146
5.28 - Ambiente 7. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa.....	148
5.29 - Propulsor de proa submetido ao Ambiente 2.....	150

CAPÍTULO I

O PROBLEMA PROPOSTO

1.1 - Introdução

Quando se trata de embarcações de posicionamento dinâmico, a possibilidade de afastamentos excessivos da locação constitui-se como o maior problema. As circunstâncias que podem levar a isso são, geralmente, insuficiente empuxo disponível em relação às forças ambientais ou perda dos sinais dos sensores de posição.

O tema deste trabalho, todavia, enfoca os distúrbios gerados por uma mudança de aproamento no desempenho da tarefa de controle da embarcação. As dificuldades daí advindas também podem, principalmente em situações de mau tempo, levar à afastamentos excessivos da locação desejada.

Dentre as unidades flutuantes de prospecção de petróleo, semi-submersíveis e navios, são estes últimos os mais susceptíveis de perda de posição durante uma mudança de aproamento, já que as primeiras, devido à sua forma, apresentam praticamente a mesma reação às forças externas em

Este capítulo, assim, visa explicitar o problema proposto e suas causas, situando-o dentro das limitações impostas pelo equipamento de controle disponível e pelo tipo de embarcação mais sujeita ao problema de aproamento, ou seja: os navios. Apresenta-se também, exemplos de casos ocorridos na Bacia de Campos, onde se concentra o maior esforço de exploração de petróleo com unidades de posicionamento dinâmico no Brasil.

1.2 - O Problema

O problema aqui proposto, consiste em analisar e obter um mecanismo que, incorporado ao sistema de controle de posicionamento dinâmico de uma embarcação tipo navio, permita uma mudança de aproamento em espaços de tempo menores que os atuais. Além disso, a ação do controlador não deve produzir um afastamento da posição desejada, além do especificado, para não causar riscos de dano ao equipamento de ligação navio-poço.

1.3 - Fatores que ocasionam o problema

Para se ter uma idéia mais clara do problema, analisa-se a situação em que a embarcação encontra-se em um dado aproamento, sobre a locação especificada. As condições

ambientais são bem definidas, ou seja: vento, ondas e correnteza com intensidades significativas e apresentando variações pequenas de direção.

Existe, assim, uma resultante de forças ambientais atuando sobre a embarcação. Esta resultante possui intensidade variável, devido ao caráter aleatório das forças de onda e das rajadas de vento, principalmente. O vento, no entanto, é medido e esta informação é fornecida ao controlador para que ocorra uma correção antecipativa e o sistema mantenha sua posição.

O navio, portanto, oscila em torno da posição de referência, com afastamentos máximos que dependem da intensidade da resultante ambiental, mas que são razoavelmente pequenos, em condições normais (menores que 2% da lâmina d'água).

Nestas condições, com o sistema estabilizado, o termo proporcional do controlador gera uma demanda de propulsão pequena, já que os afastamentos são pequenos. O mesmo, geralmente, acontece com o termo derivativo, uma vez que as velocidades estão, normalmente, próximas de zero. Apenas o termo integral é responsável por uma demanda de empuxo que se iguale, em intensidade e direção, à resultante das forças ambientais. Desta forma, o termo integral do eixo X (proa-pôpa) somado à componente de esforço do vento, registrada pelos anemômetros, na mesma direção, equilibra a componente correspondente das forças ambientais. O mesmo acontece com os outros eixos de controle.

Os esforços do ambiente são forças ligadas ao sistema de coordenadas fixo (ou terrestre). O sistema de propulsão, por outro lado, exerce empuxos em um sistema de coordenadas móvel (ou de navio). É necessário, todavia, que o somatório dos empuxos e forças ambientais seja nulo, ou próximo disso, para que seja possível a manutenção de posição.

Assim, ao proceder-se à uma mudança de aproamento, é preciso que se altere os empuxos fornecidos pelos propulsores, à medida que se afasta o navio de seu azimute inicial, visando manter o equilíbrio de forças.

Cabe ao controlador substituir, passo a passo, o valor do termo integral de cada eixo, por outro que represente o mesmo esforço dispendido anteriormente, nas diferentes posições relativas dos eixos coordenados, terrestre e de navio.

Para evitar que a ação integral seja demasiada e acarrete oscilações excessivas na posição do navio, os valores de ganho atribuídos aos termos integrais de cada eixo são pequenos, decorrendo daí uma ação de ajuste lenta. Essa demora ocasiona perda de posição durante a mudança de aproamento.

Exemplificando, suponhamos que a resultante das forças agindo sobre o navio seja coincidente com o eixo longitudinal do mesmo (eixo X). O termo integral em X — estando o navio sobre a locação desejada — somado ao esforço de vento medido pelos anemômetros, tem valor igual à resultante ambiental, sendo negligenciáveis todos os demais termos, de todos os eixos. Durante um giro da embarcação, o

carregamento atuante apresentará componente sobre o eixo Y do navio, cujos propulsores laterais não sofriam solicitação alguma, anteriormente. Isso acarretará perda de posição, segundo o eixo Y do sistema coordenado móvel. Por outro lado, haverá um alívio das forças inicialmente atuantes sobre a proa da embarcação e a conseqüente necessidade de diminuição do empuxo desenvolvido pelas hélices principais (direção longitudinal). Devido à ação lenta do termo integral em X, o navio será impulsionado para vante durante a mudança de aproamento, descrevendo uma trajetória em espiral no plano X-Y de coordenadas fixas, até que o controlador consiga reestabelecer o equilíbrio de forças.

Em um caso real, ciente de que um afastamento excessivo da posição desejada pode ocasionar severos danos ao equipamento que liga o navio ao poço de petróleo, o operador realiza a operação de giro em pequenos passos, ou de forma contínua, porém muito lentamente, de modo a não permitir excursões excessivas da posição desejada. O processo torna-se tão mais lento quanto maiores forem as forças ambientais atuantes, fazendo com que as mudanças de aproamento sejam mais lentas quando é maior a necessidade de que sejam rápidas.

1.4 - Exemplos

Uma mudança nas condições de mar pode-se dar rapidamente, como ocorreu no dia 08/março/1987 na Bacia de

Campos/RJ. Às 17:22 hrs o vento apresentava velocidade média de 11.32 m/s (22 nós), vindo de 353°. No entanto, às 17:24 a velocidade havia aumentado para 15.43 m/s (30 nós), com direção de 288°. Neste tipo de situação, o operador geralmente teme que a tendência de aumento da velocidade do vento mantenha-se, ultrapassando a capacidade de manutenção de posição do navio, que se encontra aproado segundo a direção inicial do vento, e busca alinhar-se o mais rapidamente possível [1,3,8].

Outro exemplo de mudanças rápidas nas condições de vento, ocorreu com o navio PACNORSE I no dia 12/06/89, quando este encontrava-se operando segundo um aproamento de 035°, também na Baía de Campos, contra ventos de velocidade em torno de 15.43 m/s (30 nós) provenientes da mesma direção, ondas de altura significativa em torno de 2.7 metros e correnteza estimada em 0.77 m/s (1.5 nós). As condições de mar pioraram, com a intensidade de vento aumentando para 25.72 m/s (50 nós), mantendo-se, no entanto, a sua direção.

Este aumento deu-se em um período de uma hora, ocorrendo depois uma calmaria súbita do vento, com duração aproximada de dois minutos, seguida de uma mudança de direção para 195°.

Com a nova direção do vento, os anemômetros, situados na proa da embarcação, passaram a sofrer a interferência da torre de perfuração, que encontra-se à meia-nau. Assim, as medidas de intensidade de vento, fornecidas ao controlador, não mais apresentavam coerência,

não se dispondo de compensação ativa para estas forças.

O navio começou a perder posição e os operadores de PD iniciaram uma mudança de aproamento, na tentativa de manter-se sobre a locação. Com uma lenta taxa de giro, em torno de 7 graus/minuto, em cerca de três minutos o afastamento superou 5% da lâmina d'água, o que obrigou a que se desconectasse o equipamento de ligação entre o navio e o poço.

Os prejuízos, nestas desconexões, dependem basicamente do tempo envolvido até que se retorne a operar novamente, uma vez que os custos diários de qualquer unidade de exploração situam-se na ordem de dezenas de milhares de dólares, podendo ser maior se houver danos aos equipamentos envolvidos. Em casos de desconexão provocada por mau tempo, geralmente, torna-se necessário aguardar que o mar se acalme para que se possa realizar a reconexão. No primeiro caso citado, o navio SEDCO-472 foi obrigado a desconectar-se do poço que estava perfurando e o tempo de paralização foi de 14 dias, enquanto que para o PACNORSE I, este tempo foi de 10 dias.

1.5 - Sinopse do trabalho de tese

Além deste capítulo introdutório, onde o objetivo principal foi o de descrever e situar o problema de perda de posição de um navio-sonda de posicionamento dinâmico, devido às perturbações introduzidas ao mudar-se o seu aproamento,

esta dissertação procura traçar, em seu segundo capítulo, uma breve retrospectiva histórica do desenvolvimento de sistemas de posicionamento dinâmico, descrevendo as principais características daquelas embarcações que, ao incorporar e testar com êxito avanços tecnológicos significativos, estenderam estes equipamentos e técnicas à outras embarcações, estabelecendo o conceito de gerações de sistemas de posicionamento dinâmico.

O terceiro capítulo descreve o simulador utilizado neste trabalho, abordando as modelagens matemáticas feitas para a dinâmica do navio, para o controlador, para a geração das forças de vento, ondas e correnteza e para os propulsores, além de discutir aspectos referentes ao sistema de filtragem dos movimentos da embarcação, gerados pelas forças de alta frequência de onda e sugerir modificações que permitam melhor aproximação das simulações aos casos reais.

O capítulo a seguir, o de número quatro, trata da descrição, análise por meio de técnicas da teoria de controle e comparação entre o sistema controlador existente na maioria dos navios-sonda dotados de posicionamento dinâmico em atividade entre nós e o controlador aqui proposto.

O capítulo cinco reúne as simulações realizadas, apresentando os critérios de escolha das condições de mar para o teste dos diferentes sistemas de posicionamento dinâmico discutidos, descrevendo o comportamento da embarcação e do seu sistema de controle em cada uma das simulações apresentadas e abordando os níveis de potência consumidos pelos propulsores

em cada um dos sistemas tratados.

O último capítulo reúne as conclusões obtidas com o trabalho exposto e apresenta sugestões para possíveis pesquisas em temas que envolvam sistemas de controle de posicionamento dinâmico de embarcações.

1.6 - Resumo

Este capítulo, de caráter introdutório, tratou do problema enfocado neste trabalho e buscou explicitar os fatores de influência no seu surgimento. Além disso, apresentou-se exemplos de situações onde a necessidade de maiores velocidades de giro da embarcação revelou-se crítica, chamando-se atenção para os possíveis custos envolvidos quando, em razão de lentas taxas de mudança de aproamento, torna-se obrigatória a operação de desconexão dos equipamentos e tubulações que interligam o navio ao poço, permitindo acesso a este.

CAPÍTULO II

HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DINÂMICO

2.1 - Introdução

Os sistemas de posicionamento dinâmico são fruto do esforço de busca de novas fontes de petróleo no mar, em profundidades cada vez maiores. Em paralelo, interesses militares e científicos aumentaram a demanda por este tipo de tecnologia, apenas possível após o advento dos computadores e com grande impulso a partir da década de 70, com os processadores digitais.

Este capítulo procura relatar, de forma abreviada, alguns dos fatos que compõem o desenvolvimento deste tipo de equipamento, citando embarcações dotadas de PD e descrevendo suas características mais importantes.

2.2 - Primórdios

A necessidade de se dispor de dispositivos que

surgiu naturalmente. Com o domínio das técnicas de ancoragem nas unidades de exploração petrolífera flutuantes, empreendeu-se a pesquisa em águas de profundidades crescentes, com objetivos não só da indústria de petróleo, mas também de interesse científico no conhecimento do sub-solo marinho como um todo. No entanto, o desenvolvimento da tecnologia de posicionamento convencional não conseguiu acompanhar o desejo sempre crescente por profundidades maiores. Isso significava sérios desafios para os sistemas de ancoragem, implicando em superdimensionamento dos equipamentos, altos custos de projeto e construção, utilização de barcos de manuseio de âncoras de grande capacidade e grande morosidade de operação, com os riscos inerentes do manuseio de grandes cargas em embarcações sujeitas aos movimentos originados pelas ondas. Além disso, o posicionamento por ancoragem mostrava-se bastante inadequado para atividades como lançamento de cabos submarinos, apoio à mergulhadores e perseguição de submarinos.

Procurou-se, assim, uma alternativa para o sistema de ancoragem passiva, em bases conceituais diferentes. Por volta do ano de 1960, iniciou-se nos Estados Unidos o projeto Mohole, que visava o desenvolvimento de uma plataforma semi-submersível dotada de posicionamento dinâmico. O projeto Mohole nunca foi terminado, provavelmente pelo seu próprio caráter, excessivamente ambicioso, que visava o estado-da-arte no desenvolvimento dos seus equipamentos. No entanto, o esforço despendido no projeto propiciou a existência de muitos dispositivos utilizados posteriormente por embarcações dotadas

de posicionamento dinâmico.

Um dos primeiros frutos do projeto Mohole consistiu na modificação do navio Cuss-I, dotando-o de quatro propulsores orientáveis, com 200 HP de potência cada um. Assim, em 9 de março de 1961, ele se manteve em posicionamento dinâmico ao largo de La Jolla, na Califórnia, em 948 m de profundidade. Para isso, no entanto, o Cuss-I foi controlado manualmente, fornecendo-se ao operador a posição da embarcação, de forma contínua, através de um sistema de radar que recebia informações de quatro bóias colocadas em águas rasas, e um sonar que interrogava¹ balizas submarinas. Após a primeira experiência, o navio efetuou cinco testemunhagens² em profundidades de 3560 m, próximo à ilha de Guadalupe no México, permanecendo dentro de um círculo de 180 m de raio. Como pode se imaginar, o processo de controle manual, exigia excessiva concentração por parte do operador, que não conseguia manter uma mesma ação de controle por muito tempo; além do que, diferentes operadores produziam diferentes resultados, introduzindo dúvidas quanto à confiabilidade do controlador. A idéia de um controlador automático se impunha.

¹ Envio de um pulso acústico a um receptor - transmissor submarino (baliza), que responde com outro pulso permitindo, pela demora do sinal, determinar distâncias.

² Operação que consiste em extrair amostras cilíndricas de rocha para estudos.

2.3 - Primeira geração PD

Em 1961, o navio de testemunhagem Eureka, da Shell Oil Company, que inicialmente era comandado manualmente, foi equipado com um computador analógico para permitir controle automático de posição e aproamento. O Eureka, primeira embarcação de posicionamento dinâmico automática, era capaz de realizar testemunhagens em águas de profundidades superiores à 1300 m, submetido à alturas de ondas de 6 m e ventos de até 40 nós. Como sensor de posição, era utilizado o sistema de taut-wire³, que sobrevive até hoje. A ação de controle no Eureka não dispunha de compensação ativa de vento, além disso, ele dispunha de apenas um computador, sem os benefícios de redundância. A utilização de um controlador analógico se deu, sem dúvida, devido à ainda incipiente tecnologia dos computadores digitais.

Em 1964, a Caldrill Offshore Co. lançou o Caldrill-I. Como características principais ele possuía quatro propulsores orientáveis de 300 HP cada, dois computadores analógicos trabalhando em paralelo e dois sistemas de taut-wire, sendo capaz de testemunhar em águas de até 2000 m de profundidade. Era o início da utilização de sistemas redundantes em posicionamento dinâmico, com o objetivo de

³ Sensor eletro-mecânico de posição: mede a inclinação de um cabo sob tensão ligado a um peso no fundo do mar.

garantir a não interrupção das operações, apesar do custo adicional em equipamentos e manutenção.

Paralelamente aos desenvolvimentos dos sistemas de PD (Posicionamento Dinâmico) nos Estados Unidos, e de forma análoga, na França, em 1963, a Companhia Gaz de France (GDF) equipou uma antiga Unidade de Desembarque de Tropas com dois propulsores suplementares de 120 HP cada, comandados manualmente. Este navio, o *Salvor*, foi utilizado para lançamento de linhas submarinas, tendo lançado 8 km de tubos de diâmetro de 24 cm, no Mediterrâneo, em lâminas d'água de até 2600 m. Ainda em 1963, o Institut Français du Pétrole (IFP) iniciou o desenvolvimento de um sistema de PD, lançando ao mar, no ano seguinte, o *Terebel*.

O *Terebel*, também foi construído a partir de uma Unidade de Desembarque de Tropas com 900 tons de deslocamento e, sendo dotado inicialmente de controle manual, foi equipado com controlador analógico em 1965. Como sensor de posição dispunha de equipamento de taut-wire. O *Terebel* permitiu pesquisas, de 1964 à 1975, sobre diversos aspectos de posicionamento dinâmico e sua utilização na indústria de petróleo, tais como: determinação de esforços de onda, correntes e vento; comportamento do controlador automático; experimentação de estudos teóricos (a partir de modelos matemáticos); desenvolvimento de sensores de posição, como o taut-wire, radiolocalização, sensores acústicos; realização de estudos de solo marinho; desenvolvimento de equipamentos de

compensação de movimentos; desenvolvimento de técnicas de perfuração em grandes profundidades, como: testemunhagem, instalação de cabeças de poços submarinas (com os inevitáveis estudos de modificações nos equipamentos), operações de reentrada em poços sem a ajuda de cabos-guias,⁴ lançamento de linhas flexíveis, etc...

Além disso, as pesquisas conduzidas pelo Institut Français du Pétrole, incluíram o desenvolvimento de equipamentos submarinos telecomandados, conhecidos atualmente por ROV's (Remote Operated Vehicle), que desempenham papel cada dia mais importante nas operações em lâminas d'água profundas onde, devido à impossibilidade de utilização de mergulhadores, eles realizam tarefas multi-propósitos, que incluem corte e retirada de peças defeituosas, serviços de limpeza, serviços de acompanhamento de operações através de câmeras de TV submarinas, etc...

É preciso, ainda, dar destaque ao navio Glomar Challenger, que se constituiu na maior embarcação de primeira geração de PD, e que ficou famoso no mundo inteiro pelas suas expedições de testemunhagem em águas de até 6000 m de profundidade, sendo o responsável por inúmeras descobertas geológicas, inclusive fornecendo provas para a teoria de placas tectônicas. O Challenger, embora não possuisse

⁴ Cabos descidos no início de cada poço convencional, no mar, ligados à plataforma de perfuração e ao poço, com função de guiar os equipamentos a serem descidos.

redundância no seu sistema de PD, nem mecanismo de compensação ativa de vento, era equipado com controlador digital (fabricado pela General Motors Co) e operava com um dos primeiros sistemas de sensores acústicos de posição (1968), que lhe permitia uma maior precisão de medida em lâminas d'água superiores à 1000 m, onde os efeitos de carregamento estático e dinâmico de correntezas marinhas sobre o taut-wire, causam excessiva movimentação deste, resultando em grande círculo de excursão da embarcação e grande utilização de potência nos propulsores.

2.4 - Segunda geração PD

Com os estudos realizados a partir dos navios da primeira geração PD e com o desenvolvimento da moderna tecnologia digital, foi possível o aparecimento e operação competitiva dos primeiros navios de perfuração PD, cabendo ao Sedco-445 o papel de pioneiro [1,2].

Com o lançamento do Sedco-445, em 1971, inicia-se a segunda geração de navios dotados de PD. Como características desta nova fase, o Sedco-445 apresentava redundância completa em seu sistema de PD, além de contar com um minicomputador comercial de 16-bits para as tarefas de controle. Dispunha, como sistema de sensores de posição: taut-wire, sistema acústico e inclinômetros instalados na coluna de riser, que

permittedam o controle de posição mantendo o ângulo da coluna com a vertical, junto à cabeça do poço, em um mínimo. Estes sensores equipam hoje todas as unidades de exploração de petróleo existentes.

Outros navios pioneiros da segunda geração foram o Saipem Due e o Pelican. As diferenças mais marcantes entre estes navios de perfuração residiam nos seus sistemas de propulsão. Enquanto o Sedco-445 possui 11 propulsores laterais retráteis de hélices de passo fixo e velocidade variável, movidos por motores elétricos de corrente alternada, o Pelican foi equipado com 5 propulsores tipo túnel de hélice de passo variável e motores de corrente contínua e o Saipem Due recebeu quatro propulsores cicloidais. As unidades de perfuração de poços de petróleo dotadas de PD, produzidas após, apresentaram nítida tendência à utilização de propulsores de hélice de passo variável de tipo túnel ou azimutal (orientável).

A partir de meados da década passada, com o aumento dos preços do petróleo e conseqüente escalada das atividades de exploração, várias unidades PD foram produzidas até o fim dos anos 70. Entre estes navios e plataformas de segunda geração, encontram-se alguns que tornaram-se famosos por fixar a imagem de versatilidade, rapidez e segurança nas operações de Posicionamento Dinâmico. Assim, destacam-se Petrel, Ben Ocean Lancer, Pelerin, Sedco-471, Sedco-472, Pacnorse-I, e outros.

Com o desenvolvimento das técnicas de construção de

plataformas semi-submersíveis, apresentando nítidas vantagens sobre as embarcações tipo navio, como maior capacidade de carga e menores amplitudes de movimento, surgiu a Sedco-709, primeira plataforma semi-submersível dotada de sistema de posicionamento dinâmico, que entrou em operação em 1977. A Sedco-709 possui 8 propulsores azimutais com hélice de passo variável e 3000 HP cada um, deslocando 25000 tons. É capaz de perfurar ou intervir em poços situados em profundidades de até 1800 m, tendo sido a responsável pela perfuração de poços em águas de profundidade superior à 1500 m, no Brasil.

2.5 - Terceira geração PD

A terceira geração de unidades PD com finalidades de perfuração de poços de petróleo, que inclui como exemplo a plataforma semi-submersível Sedco-710⁵, possui poucos exemplares, embora já equipe diversas embarcações multipropósitos e plataformas guindaste. A diferença principal destas unidades é a concepção do sistema controlador. Enquanto que nos controladores convencionais de segunda geração, é preciso que a embarcação se afaste da posição desejada para que se comande os propulsores de forma a voltar ao ponto de referência, a terceira geração introduziu métodos de

⁵ Fonte: SEDCO-FOREX CO.

estimativa dos movimentos da embarcação a partir dos movimentos progressos desta. Assim, o controlador baseia-se nas informações do estimador para calcular os empuxos necessários para anular os movimentos previstos, e utiliza os sensores de posição para aperfeiçoar as estimativas. Além disso, os sistemas PD atuais dispõem de sensores de posição múltiplos, incorporando sensores acústicos, mecânicos, por ondas de rádio, óticos, por satélites e, ainda em estágio de protótipos, sensores inerciais.

Por fim, pode-se dizer que, apesar do maior custo de construção e operação das plataformas semi-submersíveis, a tendência é de que se equipem, com sistemas PD, mais destas unidades do que as embarcações tipo navio. Em 1986 já existiam em operação nove plataformas semi-submersíveis dotadas de sistemas de posicionamento dinâmico [1, 2]. Pode-se acrescentar, ainda, que com o desenvolvimento contínuo das técnicas de ancoragem convencional e a utilização de novos materiais, como o Kevlar⁶, permitindo o uso de âncoras em profundidades cada dia maiores, uma utilização importante para os sistemas PD passa a ser de apoio à ancoragem convencional, em unidades que disponham dos dois sistemas. O sistema de propulsão atuaria no sentido de eliminar os afastamentos das plataformas ancoradas, causados pela ação de vento, correnteza e ondas, permitindo um menor círculo de passeio da embarcação,

⁶ Material sintético de resistência a tração equivalente a do aço, porém com densidade significativamente inferior.

principalmente em condições pesadas de mar e oferecendo maior segurança em situações de rompimento de amarras ou deslizamento de âncoras.

2.6 - Resumo

Este capítulo enfocou os aspectos históricos dos sistemas de posicionamento dinâmico, com considerações sobre os fatores que motivaram o início dos estudos, as primeiras tentativas e as sucessivas gerações de unidades PD, que surgiram na esteira do desenvolvimento explosivo, tanto da tecnologia digital quanto da exploração marítima de petróleo, nestas últimas duas décadas.

CAPÍTULO III

O SIMULADOR DE POSICIONAMENTO DINÂMICO

3.1 - Introdução

A análise no domínio do tempo do problema proposto, em que o navio sofre perturbações, no controle de sua posição no plano X-Y, de forma contínua ao longo de uma mudança de aproamento qualquer, é de difícil enfoque pelas técnicas clássicas onde, em geral, introduz-se, no eixo de controle em estudo, uma perturbação em impulso, degrau, rampa ou parábola, analisando-se a resposta subsequente. No problema aqui em discussão, as perdas de posição ocorrem quando são introduzidas entradas em degrau ou rampa no eixo de controle de aproamento, e não nos eixos, X e Y, responsáveis pela manutenção da posição no plano horizontal.

A modelagem das perturbações durante o giro da embarcação depende, assim, do comportamento das forças ambientais em coordenadas de navio e do modo como se processa o giro que, nos casos reais, é realizado em pequenos passos ou

segundo um modelo de referência¹.

Desta forma, o estudo de desempenho de um sistema de posicionamento dinâmico, durante manobras de mudança de aproamento, pode ser melhor conduzido através do uso de um simulador, que permite uma melhor análise no domínio do tempo.

Este capítulo trata do simulador utilizado neste trabalho, abordando as modelagens matemáticas utilizadas para as forças ambientais, empuxos dos propulsores, dinâmica da embarcação, o controlador e para os diferentes sensores que compõem o sistema de Posicionamento Dinâmico. Discute-se ainda, os filtros de onda tipo *dual notch*, empregados nas unidades existentes de PD, aspectos particulares do programa de simulação, como tempo de ciclo e modos de aproamento e alterações introduzidas no mesmo, que revelaram-se necessárias à medida que as simulações foram sendo levadas a efeito neste trabalho.

O controlador utilizado, HONEYWELL, é basicamente o que se encontra implementado na maioria das unidades de perfuração marítima, produzidas entre o final da década passada e início desta, e que constituem-se, ainda, a maioria das unidades disponíveis, para este tipo de atividade, no mundo, tendo sido esta a principal razão para a escolha deste tipo de controlador neste trabalho.

Por fim, neste capítulo sugere-se modificações a serem feitas no atual programa, na hipótese de seu emprêgo em

¹ Refere-se a uma mudança no valor da referência feita de forma contínua, em forma de rampa.

simulações mais elaboradas, tais como: a inclusão de um modelo de alta frequência para a dinâmica da embarcação, adição de ruído branco para a ação dos sensores de posição e degradação da ação dos propulsores devido ao influxo da correnteza.

3.2 - Descrição do sistema PD

A concepção geral de um sistema de Posicionamento Dinâmico é colocada na figura 3.1, onde observa-se, basicamente, uma embarcação tipo navio, dotada de propulsores laterais e longitudinais, cujo empuxo combinado equilibra a resultante das forças de vento, ondas e correnteza.

Identifica-se como partes principais do sistema:

- o O navio;
- o Os propulsores;
- o Os diferentes sensores, de posição, de direção e de vento;
- o O sistema de controle;

O navio, neste caso, é o SEDCO-472, que possui 12 propulsores laterais e dois propulsores longitudinais, todos dotados de hélices de passo fixo.

Os sensores de posição compõem três sub-sistemas:

- o Sensores acústicos - emissores e receptores;
- o Taut-wire;
- o Sensores de ângulo do riser².

² Tubulação que liga o poço à embarcação, permitindo acesso de equipamentos e fluidos ao poço, após a sua instalação.

A figura 3.2 mostra a disposição dos sensores acústicos, do dispositivo de *taut-wire* e da coluna de *riser*, ligada à cabeça-de-poço.

O sistema acústico de determinação da posição do navio, por sua vez, compreende:

- o *Beacon* ou *transponder*- emissor de pulsos acústicos, fixado no fundo do mar próximo à locação.
- o Hidrofonos - receptores do sinal acústico, colocados na extremidade de hastes que se projetam abaixo da quilha do navio.
- o Microprocessador - dispositivo que recebe os sinais acústicos dos hidrofonos, após processo de filtragem analógica e conversão analógico - digital, e calcula a posição da embarcação no plano X-Y.

O *taut-wire* compõe-se, basicamente, de um peso, de concreto ou de aço, descido ao fundo do mar e ligado a um cabo de aço, que é sujeito à tensão constante através de um sistema de compensação do movimento de *heave*³. Um inclinômetro, instalado na polia-guia do cabo, na superfície, registra o ângulo entre o cabo e a vertical em cada instante, informando o sistema de controle. Admitindo-se verticalidade do cabo até o fundo do mar, determina-se a posição da embarcação a partir desta informação angular.

O sensor de ângulo de *Riser* opera de maneira similar, diferenciando-se pela posição do inclinômetro, que

³ Movimento ascendente-descendente da embarcação causado pelas ondas do mar.

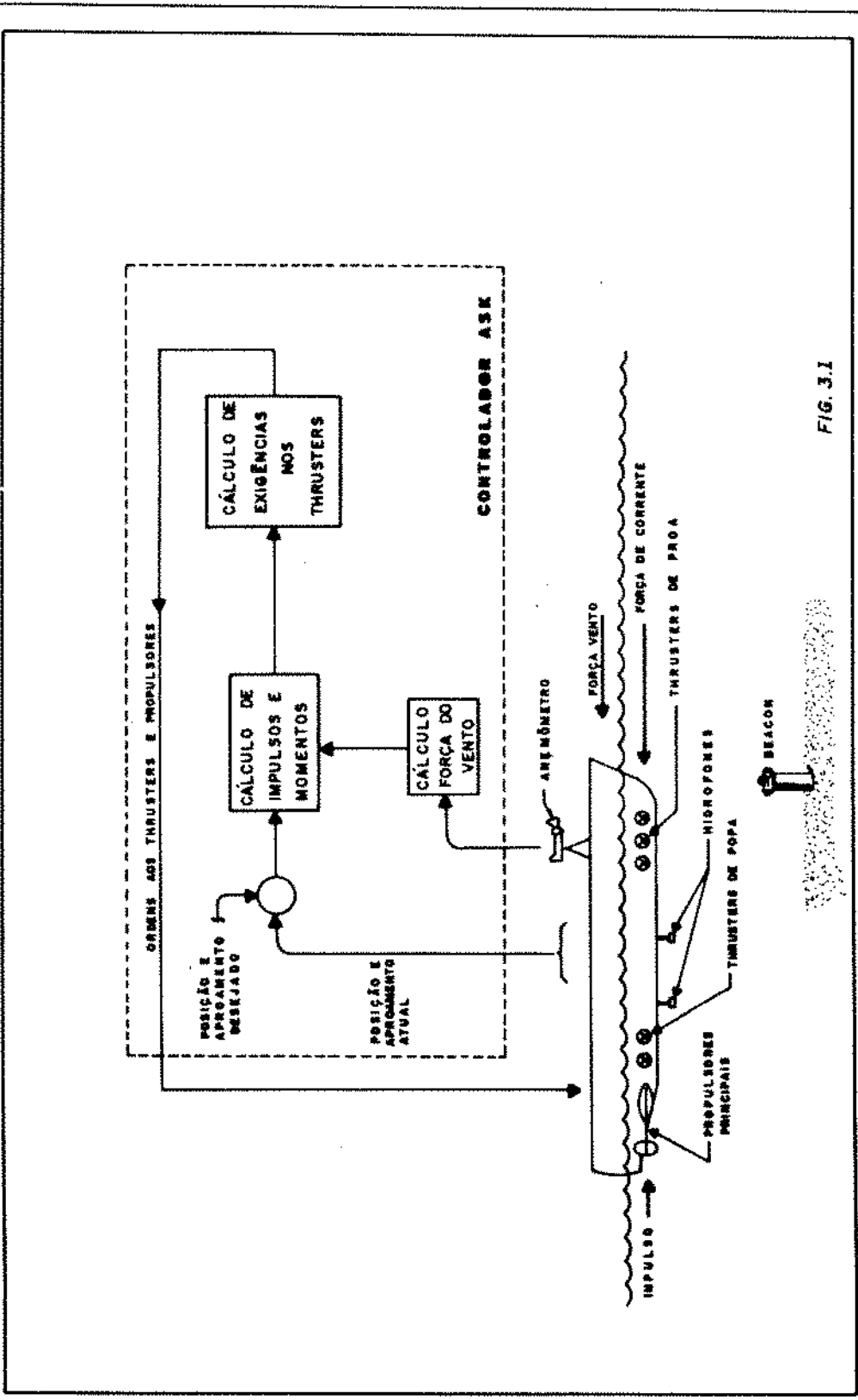


FIG. 3.1

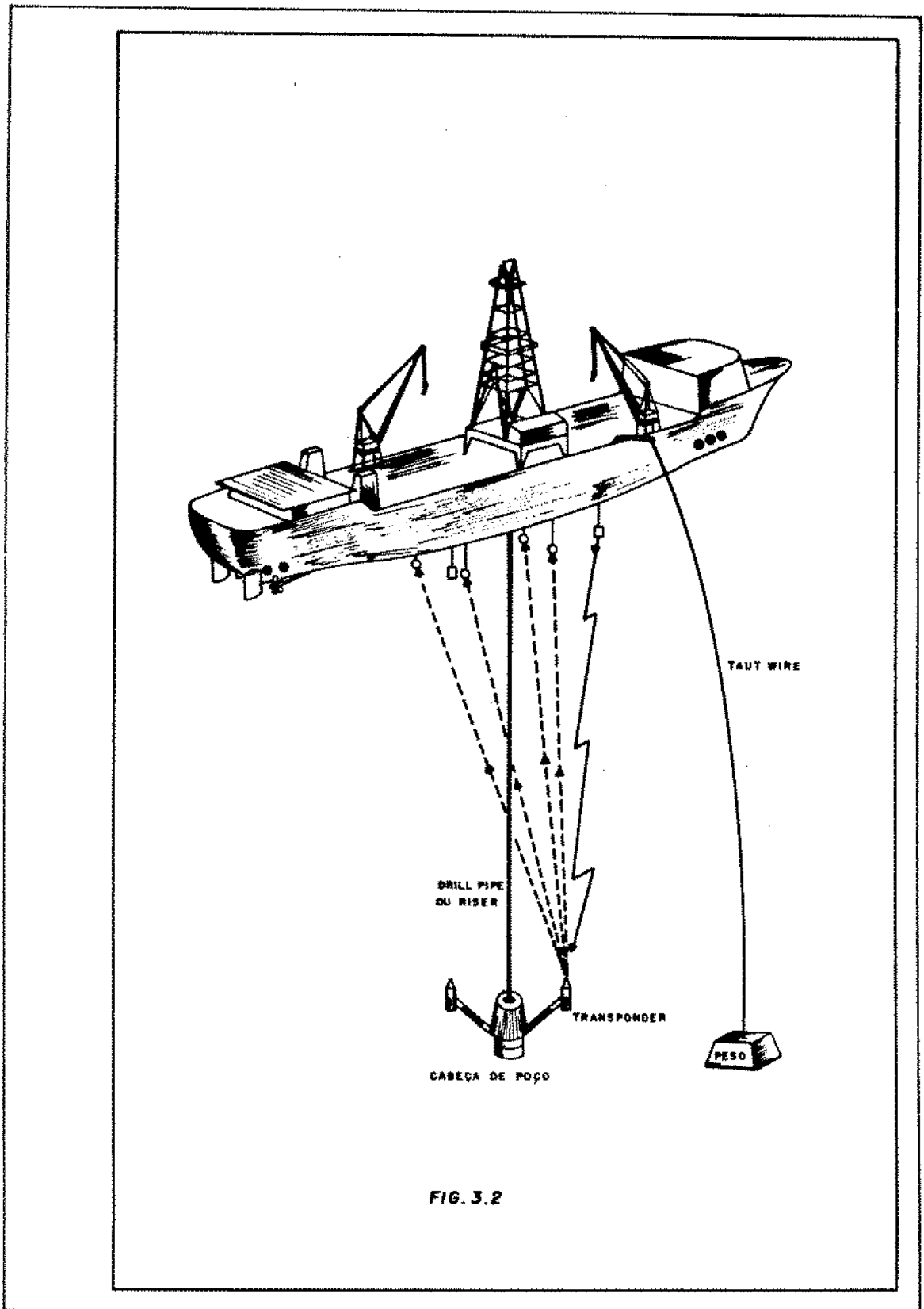


FIG. 3.2

neste caso é localizado no fundo do mar, instalado imediatamente acima da junta flexível⁴. O sistema de controle, quando encontra-se operando com as informações deste tipo de sensor, procura minimizar o ângulo da tubulação de *Riser* com a vertical, junto ao poço.

O aproamento do navio é dado por bússulas giroscópicas e os movimentos de *roll* e *pitch* por Unidades de Referência Vertical.

Os anemômetros medem velocidade e direção do vento. Esta informação, uma vez fornecida ao sistema controlador, é utilizada para determinar a força de vento atuante sobre a embarcação, através do uso de coeficientes de arrasto determinados em túneis de vento, em ensaios com modelos em escala reduzida.

O sistema de controle opera a partir da informação de posição, que é comparada à posição de referência. Ao empuxo determinado como necessário, pelo controlador, para a manutenção de posição e aproamento, soma-se o esforço de vento calculado a partir das informações dos anemômetros. O empuxo total necessário é distribuído entre os propulsores pela Lógica de Alocação de Empuxos, que prioriza a satisfação das necessidades de momento para a manutenção do aproamento.

Determinados os empuxos a serem exercidos por cada propulsor, o sistema comanda, automaticamente, a variação da potência fornecida às hélices através de sistema

⁴ Tubo especial, com função de rótula, que une o *Riser* ao poço.

eletro-hidráulico.

3.3 - Estrutura do simulador

3.3.1 - Diagrama de blocos

Da figura 3.3, destacam-se quatro blocos estruturais no programa de simulação, quais sejam : bloco gerador das Perturbações, o Controlador, o Navio e o bloco de realimentação da malha de controle.

A função do bloco de perturbações é simular as forças de vento, onda e correnteza, que afastam a embarcação da sua posição desejada. É feita uma realimentação, a este bloco, das informações de aproamento e velocidades nos eixos X-Y terrestres. As razões para isso são que:

- o Dependendo do ângulo relativo entre a embarcação e a força perturbadora considerada, haverá uma componente maior desta força agindo no eixo X que em Y;
- o As forças de correnteza dependem do movimento relativo entre o barco e a água havendo, portanto, um aumento destas forças, caso o navio possua velocidade de mesma direção e sentido contrário às correntes. É necessário, também, a determinação das componentes nos eixos X e Y.

No controlador, além do algoritmo PID, incluem-se

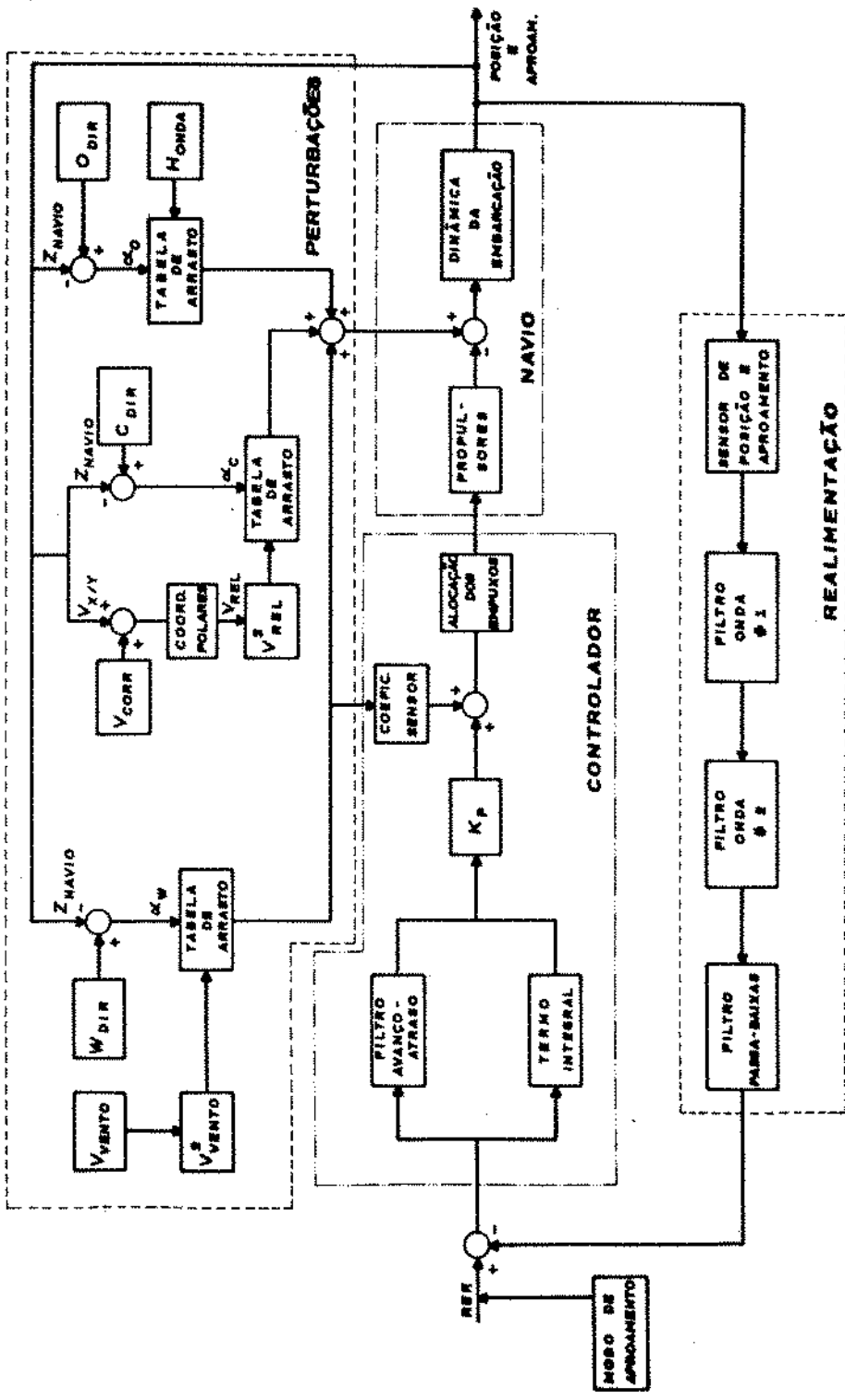


FIG.3.3 - Diagrama de blocos do simulador

também a seleção do modo de aproamento, os anemômetros e a lógica de alocação dos empuxos entre os propulsores. Os sensores de vento são incluídos aí, por se tratar de uma informação que se soma diretamente ao sinal gerado pela lógica PID, para o comando dos propulsores. O modo de aproamento pode ser:

- o Manutenção Automática: é o modo normal, onde o navio tentará permanecer no aproamento desejado;
- o Seleção do Empuxo Mínimo : neste modo a embarcação irá comparar a sua direção com a da resultante das forças externas, procurando alinhar-se com estas a fim de minimizar o consumo de combustível, através de demanda mínima de empuxo;
- o Seleção do Momento Mínimo: é semelhante à anterior, buscando agora minimizar a modulação dos propulsores, através da escolha de empuxo lateral para contrapor-se ao momento gerado pelas forças perturbadoras;
- o Modelo de Referência: opção que determina, em caso de mudança de aproamento, que esta se dê segundo uma velocidade de giro constante, fixada *a priori* pelo operador.

Há que se destacar que a lógica de modo de aproamento, afeta a seleção do azimute de referência usado pelo controlador tendo, portanto, grande influência sobre a sua atuação.

A lógica de alocação de empuxos depende do número,

tipo e localização dos propulsores do navio. O simulador utiliza a configuração mais simples de um propulsor no eixo X e dois no eixo Y, todos do tipo fixo (não possuem liberdade de giro, como os propulsores azimutais), além disso, a rotina limita os valores de empuxo a serem utilizados, aos máximos disponíveis nos propulsores, estabelecendo uma hierarquia entre os eixos X e Y, com prioridade para a satisfação da demanda de momento para o aproamento. Há duas razões para isso, sendo a primeira de ordem prática já que, sem a condição de prioridade, o problema admite mais de uma solução [1]; o segundo motivo tem relação com o fato de que uma embarcação tipo navio, ao enfrentar forças maiores que o empuxo que dispõe, tende a colocar-se de través em relação à resultante destas forças oferecendo, assim, maior área ao ataque do ambiente, perdendo posição rapidamente e de forma desordenada. Com a manutenção do aproamento em condições-limite, visa-se obter uma perda de posição mais lenta e suave.

No bloco representativo do navio, procura-se determinar os movimentos deste, sob a ação das forças perturbadoras e dos empuxos dos propulsores. A inclusão destes neste bloco, e não como atuadores do controlador, deve-se a que eles estão espalhados pela embarcação fazendo, realmente, parte dela.

O último bloco refere-se aos sensores de posição (que podem ser acústicos, por ondas de rádio, taut-wire, ângulo de riser ou outros) e a rede de filtros de onda que, apesar de fazer parte integrante do programa do sistema de

controle, é localizada no tramo de realimentação do processo e como tal deve ser encarada.

3.3.2 - O Controlador

O controlador automático de um sistema de posicionamento dinâmico deve, a partir de mudanças de posição e aproamento, acionar os atuadores dos propulsores, de forma a não permitir afastamentos significativos da locação e aproamentos desejados.

O controlador do simulador utilizado é o mesmo adotado nos sistemas HONEYWELL, onde se usa uma configuração em paralelo para os termos derivativo e integral que, por sua vez, estão em série com o termo proporcional do controlador.

O termo derivativo não é do tipo clássico, em que a entrada consiste na taxa de variação do sinal de erro. Ao invés, usa-se um filtro avanço-atraso, que promove um adiantamento de fase até uma dada frequência de atuação do controlador, passando a retardar a fase em frequências mais altas. O uso de filtros avanço-atraso, em lugar da ação derivativa com base na velocidade de erro, tem a vantagem de manter a ação antecipatória sem causar amplificação dos sinais de ruído, nem provocar efeito de saturação nos propulsores em regime permanente [1, 3].

Outra característica do controlador é a dependência dos parâmetros de controle em relação à lâmina d'água de operação, sendo tomada como norma a profundidade de 200 pés

(61.0 m). Isto se deve ao fato de que o sistema de PD não controla, em realidade, a posição no plano X-Y, e sim o ângulo de passeio, que é definido como aquele cuja tangente é igual à relação entre o afastamento horizontal e a lâmina d'água. Como pode se depreender, em águas rasas a necessidade de se permitir apenas pequenas excursões, é maior que em águas profundas, de forma a manter os limites estabelecidos para o máximo ângulo de passeio.

Os critérios para o estabelecimento dos valores angulares críticos dependem, basicamente, do máximo ângulo de desconexão do equipamento de cabeça-de-poço,⁵ do tempo requerido para a operação de desconexão e de considerações sobre o alongamento da coluna de Riser que, nas excursões, além de submetido à tração dos tensionadores de bordo (que pode ser variada pelo operador), assume o lugar geométrico da hipotenusa do triângulo cujo cateto menor é o afastamento radial em relação à posição de referência.

Fica evidente, no entanto, que quanto maior a profundidade, menor é a rigidez necessária de controle e menor, por conseguinte, pode ser a modulação exigida dos propulsores.

Isso se reflete na rede de filtragem, onde o filtro passa-baixas, responsável pela atenuação das altas frequências dos movimentos do navio, tem sua frequência de corte

⁵ Conjunto de válvulas de alta pressão, conectadas ao poço e à coluna de Riser, com função de controle de possíveis erupções de fluidos contendo hidrocarbonetos.

dependente da profundidade. Assim, quanto maior for a lâmina d'água, menor será a frequência de corte e maior será a faixa atenuada pelo filtro, fazendo com que o controlador receba oscilações de menor amplitude no sinal de movimento e, em consequência, demande menos empuxo dos propulsores, economizando equipamento e combustível.

Há que destacar a dependência, tanto do termo derivativo quanto do termo integral, do parâmetro frequência de corte do controlador, que é ajustada para um compromisso adequado entre a rapidez de resposta e a rejeição a perturbações, e que, juntamente com o valor do ganho proporcional são os principais coeficientes de ajuste do controlador [3, 5].

3.3.3 - Modelagem de ondas, vento e correnteza

As forças geradas pelo vento são simuladas a partir do seguinte modelo [1, 5]:

$$\begin{aligned} F_{wx} &= V_w^2 \cos \alpha_w C_{wx} \\ F_{wy} &= V_w^2 \operatorname{sen} \alpha_w C_{wy} \\ M_{wz} &= V_w^2 \operatorname{sen} 2\alpha_w C_{wz} \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde :

α_w : $\psi_w - \psi$

ψ_w : Azimute do vento em relação ao norte (graus)

ψ : Aproximado do navio (graus)

V_w : Velocidade do vento (m/s)

C_{wi} : Coeficientes de força de arrasto em relação aos eixos X, Y e Z [$N/(m/s)^2$]

M_w, F_{wi} : Momento e forças de vento nos eixos de controle X, Y e Z (Nm, N)

As forças aerodinâmicas são referidas aos eixos coordenados de navio, já que os anemômetros medem o vento neste sistema. Em uma simulação, no entanto, o vento deve ser gerado no sistema de coordenadas terrestre, sendo as forças calculadas levando-se em conta o ângulo de incidência do vento em relação à proa da embarcação, de forma a que não hajam mudanças na direção das forças aerodinâmicas, quando houver um giro do navio.

Os coeficientes de arrasto aerodinâmico são determinados a partir de ensaios em túneis de vento com modelo reduzido, ou através de fórmulas de cálculo aceitas por organismos normatizadores [1].

Mesmo usando-se ensaios para a determinação dos coeficientes de arrasto, a utilização destes acarretará imprecisões na determinação das forças de vento, na embarcação real. A simulação destas imprecisões é obtida através de uma degradação do sinal provindo do sensor, antes que este seja usado pelo controlador.

Ainda assim, observa-se na prática um bom desempenho das unidades de PD que usam Compensação Ativa de Vento, ou seja: fornecem a informação obtida dos anemômetros ao controlador, antes que a força medida de vento confira

movimento ao navio. A esta técnica denomina-se de controle antecipativo [1, 14, 2, 17].

Usando procedimento similar ao da modelagem das forças aerodinâmicas, a correnteza é determinada por [1, 5]:

$$\begin{aligned} F_{cx} &= V_{rel}^2 \cos \alpha_{rel} C_{cx} \\ F_{cy} &= V_{rel}^2 \operatorname{sen} \alpha_{rel} C_{cy} \\ M_{cz} &= V_{rel}^2 \operatorname{sen} 2\alpha_{rel} C_{cz} \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde :

F_{cx}, M_{cz} : Forças e momento gerados pela correnteza nos eixos de controle (N, Nm)

α_{rel} : $\psi_c - \psi$ - Ângulo entre as direções do navio e da correnteza (graus)

ψ_c : Ângulo de incidência da correnteza em relação ao norte (graus)

ψ : Aproximado do navio (graus)

V_{rel}^2 : $(u + u_c)^2 + (v + v_c)^2$ - Velocidade relativa entre o navio e a correnteza (m/s)

u_c, v_c : Componentes da velocidade da correnteza em X-Y (m/s)

u, v : Componentes da velocidade da embarcação em X-Y (m/s)

C_{ci} : Coeficientes de arrasto hidrodinâmico devido à correnteza $[N/(m/s)^2]$

As correntezas marinhas devem ser definidas em coordenadas terrestres pela mesma razão adotada para o vento : a direção destas forças não deve mudar (em coordenadas fixas) se houver uma mudança de aproximação da embarcação.

Para o modelo de ondas, o simulador usa as seguintes fórmulas [5]:

$$\begin{aligned} F_{ox} &= H_o^2 Cq_{ox} + H_o \cos \alpha_o Cl_{ox} \\ F_{oy} &= H_o^2 Cq_{oy} + H_o \sin \alpha_o Cl_{oy} \\ M_{oz} &= H_o^2 Cq_{oz} + H_o \sin 2\alpha_o Cl_{cz} \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde :

α_o : $(\psi_o - \psi)$ - Ângulo entre a direção das ondas e o aproamento do navio (graus)

ψ_o : Ângulo de incidência das ondas em relação ao norte (graus)

H_o : Altura significativa de onda (m)

Cl_{oi} : Coeficientes de deriva constante para as forças de onda [(N/m) p/eixos X e Y e (Nm/m) para o eixo Z]

Cq_{oi} : Coeficientes quadráticos de deriva para as forças de onda [(N/m²) p/eixos X e Y e (Nm/m²) para o eixo Z]

Esta modelagem trata apenas das forças de baixa frequência das ondas, no fenômeno de deriva. Aparentemente, o mecanismo gerador destas forças, de variação lenta, é a presença do casco da embarcação refletindo as ondas de encontro aos trens de novas ondas incidentes. Esta interação casco-ondas ainda é objeto de estudos e não possui modelagem precisa [1].

Os valores dos coeficientes de arrasto utilizados neste trabalho, encontram-se reunidos na tabela 3.1.

Eixos do Navio	X	Y	Z
Vento (Cw)	309.3878	1059.1940	10515.797
Correnteza (Cc)	34197.5050	300012.8058	6154296.125
Ondas (Clo)	2991.7490	23160.5590	475925.733
Ondas (Cqo)	924.0887	7086.2758	145615.265

TABELA 3.1 - Valores dos coeficientes de arrasto utilizados

3.3.4 - Modelagem da dinâmica do navio

A embarcação é uma massa flutuando em um fluido, a água, com uma parte de sua área externa sujeita à ação de forças hidrodinâmicas, e outra parte submetida à ação do vento.

Estas áreas, a imersa e a emersa, não são constantes, na medida em que a ação das ondas causa movimentos angulares de *roll* e *pitch*, e não permite a existência de uma linha d'água estacionária.

A massa da embarcação, igual ao deslocamento da mesma multiplicado pela densidade da água, também sofre variações, a depender da carga contida à bordo. Isso faz com que o momento de inércia, em torno do eixo Z do navio, varie, uma vez que é definido como a massa multiplicada pelo quadrado do raio de giração em torno do eixo de aproamento. Há que lembrar que a massa tem influência no calado da embarcação, alterando a relação entre as áreas imersa e emersa.

No entanto, para fins práticos, os efeitos destas variações são desprezados e o operador de PD altera, se

necessário, o parâmetro de calado, para que o sistema de controle seja simplificado a partir da hipótese de invariabilidade dos fatores acima descritos.

A modelagem dos movimentos do navio é difícil não só devido ao grande número de fatores que os influenciam, mas também devido ao fato de as forças hidrodinâmicas envolvidas serem de caráter complexo. Assim, procurou-se um modelo simplificado que simulasse adequadamente as forças e movimentos causados pelo ambiente.

Desta forma, os movimentos de alta frequência não foram levados em conta na modelagem da dinâmica da embarcação, considerando-se que a rede de filtragem tenha rendimento ideal, removendo todo o conteúdo de alta frequência das forças de onda. O modelo utilizado é :

$$\begin{aligned} \sum F_x &= \rho \nabla (\dot{u} - v w) + A_{11} \dot{u} - B_{11} u \\ \sum F_y &= \rho \nabla (\dot{v} + u w) + A_{22} \dot{v} + A_{26} \dot{w} - B_{22} v \\ \sum M_z &= (k_z \rho \nabla + A_{66}) \dot{w} + A_{62} \dot{v} - B_{66} w | w | \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde :

ρ : Peso específico da água do mar (N/m^3)

∇ : Deslocamento da embarcação (m^3)

A_{ij} : Matriz de massa adicional (Kg)

B_{ij} : Matriz de coef. de amortecimento viscoso [$N/(m/s)$]

k_z : Raio de giração em torno do eixo de aproamento (m)

u, \dot{u} : Velocidade e aceleração segundo o eixo X (m/s), (m/s^2)

v, \dot{v} : Velocidade e aceleração segundo o eixo Y (m/s), (m/s^2)

w, \dot{w} : Velocidade e aceleração angulares (grs/s), (grs/s²)

$\sum F_i$: Somatório das forças externas e dos propulsores nos eixos X e Y (Kgf)

$\sum M_z$: Somatório dos momentos ambientais e devidos aos propulsores em torno do eixo Z (Nm)

Colocadas desta forma, as equações de movimento constituem o que se chama de modelo de baixa frequência, uma vez que as forças e momentos, gerados pelas ondas, são apenas os de deriva. Os movimentos do navio, assim, não incluem as oscilações de alta frequência causadas pela ação das ondas.

3.3.5 - Modelagem dos propulsores

A dinâmica dos propulsores usada nas simulações, tem por premissas :

- a) Limitação dos empuxos máximo e mínimo dos propulsores em valores correspondentes aos do navio real.
- b) Limitação da taxa de variação do empuxo, sendo que a máxima velocidade de aumento, ou diminuição, das forças fornecidas pelos propulsores são as taxas médias existentes no SEDCO-472, calculadas a partir dos tempos necessários para se atingir, partindo de zero, os empuxos máximos (mínimos) de cada propulsor.

A literatura encontrada sugere, para os propulsores do sistema de PD, que a modelagem matemática seja a de um sistema de primeira ordem [13, 14], com função de transferência do tipo :

$$E(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (3.5)$$

onde :

$E(s)$: Empuxo no domínio Laplaciano (N)

τ : Constante de tempo do propulsor (s)

s : Operador Laplaciano

No domínio do tempo, a equação teria a forma :

$$E_c(t) = E(t) + \tau \frac{d}{dt} E(t) \quad (3.6)$$

onde :

E_c : Empuxo comandado pelo controlador (N)

E : Empuxo produzido pelo propulsor considerado (N)

τ : Constante de tempo (s)

A curva de resposta a uma entrada em degrau do propulsor número 1 simulado, pode ser vista na figura 3.4, onde se observa que:

- o A constante de tempo do propulsor, é de cerca de 5,0 segundos.
- o O tempo de recuperação-de-linearidade, definido como o intervalo de tempo entre o ponto em que a curva deixa de ser linear, até o ponto em que ela atinge o valor do degrau, é de cerca de 3 segundos, um valor típico em PD [1].
- o O tempo para que o propulsor mude do empuxo mínimo para o máximo é de cerca de 17 segundos,

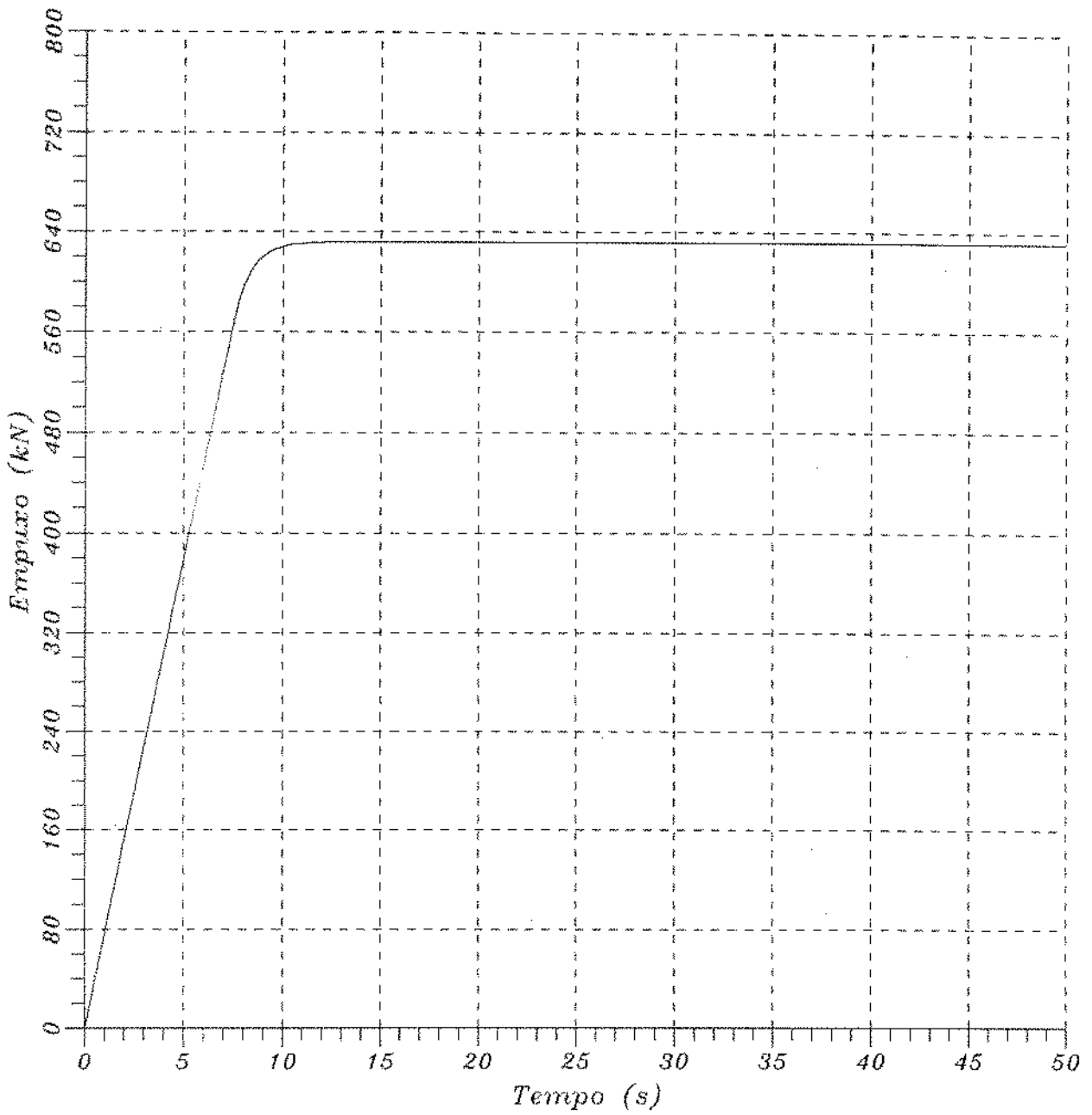


Figura 3.4 : Curva de aumento de empuxo dos propulsores

situando-se dentro dos limites esperados em PD :
entre 10 e 20 segundos [1].

o Não há atraso de transporte.

Outro fator, reconhecidamente de influência sobre o desempenho dos propulsores, é a diminuição do empuxo destes, causada pelo influxo das correntes marinhas [1, 2, 17], em um fenômeno semelhante a remar-se contra a correnteza, e que também não é considerada neste simulador.

Outro fenômeno relacionado à ação da correnteza, é o desvio da direção do empuxo causado por esta [1, 17]. Isso ocorre porque, geralmente, a soma vetorial da velocidade do navio e a velocidade da corrente atuante, não é coincidente com o eixo dos propulsores. Esta diferença de direções faz com que haja um desvio do fluxo proveniente destes, introduzindo componentes de força à 90 graus em relação ao empuxo original, que irão se somar, vetorialmente, aos esforços atuantes no eixo complementar de controle, ou seja : empuxos no eixo X terão componentes no eixo Y. Esta soma pode aumentar ou diminuir a carga sobre o eixo acoplado, o que, de qualquer forma, não é previsto pelo controlador, que terá de compensar este efeito, introduzindo-se mais um atraso de transporte no sistema.

Como se pode imaginar, o fenômeno aumenta o acoplamento entre os eixos X, Y e Z, pois para este último, o efeito de uma correnteza de través irá criar uma componente no mesmo sentido, devido à sua ação sobre o fluxo dos propulsores principais, que irá gerar, além de empuxo adicional no eixo Y,

um acréscimo de momento. O simulador atual tampouco possui modelagem para este fenômeno.

3.3.6 - Rede de Filtragem dos sinais

Como as forças de onda são de grande amplitude e de alta frequência, seria impraticável tentar opor-se à elas, já que a magnitude dos empuxos envolvidos e a presteza de resposta dos propulsores teriam que ser de tal ordem, que inviabilizariam os projetos de PD [1, 14, 21, 15]. Todavia, devido ao caráter oscilatório das forças de alta frequência das ondas, elas possuem média zero, o que quer dizer que, embora o navio mova-se de modo rápido (grandes forças), ele o faz em torno de uma mesma posição. Na prática, isso torna necessária a supressão da informação deste movimento de alta frequência, que é detectado pelos sensores, antes que o sinal de posição seja fornecido ao controlador que, de outra forma, tentaria opor-se à estas forças oscilatórias, saturando a demanda dos propulsores, desgastando o equipamento e desperdiçando combustível. Há que informar, no entanto, os movimentos que forem causados pelas forças de baixa frequência das ondas e que não apresentam média zero.

Para se conseguir a supressão das oscilações rápidas da embarcação em torno de uma mesma posição, se faz uso de filtros digitais, que atuam sobre o sinal dos sensores, retirando as altas frequências. Os mais utilizados são os filtros do tipo *notch* e os filtros de Kalman [1, 15, 20, 17].

▷ Filtros Dual Notch

Definição : Um filtro tipo notch resulta da razão entre duas funções de transferência quadráticas, com baixo coeficiente de amortecimento e mesma frequência natural [15, 18, 6]. A função de transferência é dada por:

$$G(s) = \frac{s^2 + s \frac{b d}{(1 - 2d^2)^{1/2}} + w_o^2}{s^2 + s \frac{b}{(1 - 2d^2)^{1/2}} + w_o^2} \quad (3.7)$$

onde :

$w_o = 2\pi f_o$: frequência de centro do filtro (rd/s)

d : razão de atenuação na frequência de centro

b : largura de banda à -3 dB (rd/s)

O gráfico de resposta de frequência típico deste filtro, pode ser visto na figura 3.5 .

Nas unidades que operaram, até aqui, no Brasil, os sistemas de posicionamento dinâmico utilizam, sem exceção, filtros tipo notch como filtros de onda.

Os filtros de onda têm como tarefa impedir que o sistema de controle tente se opor aos movimentos de alta frequência, causados pela ação oscilatória do mar. Isso é conseguido através da supressão de parte da informação provinda dos sensores de posição, que registram as mudanças de lugar da embarcação.

As diferenças entre os movimentos do corpo flutuante

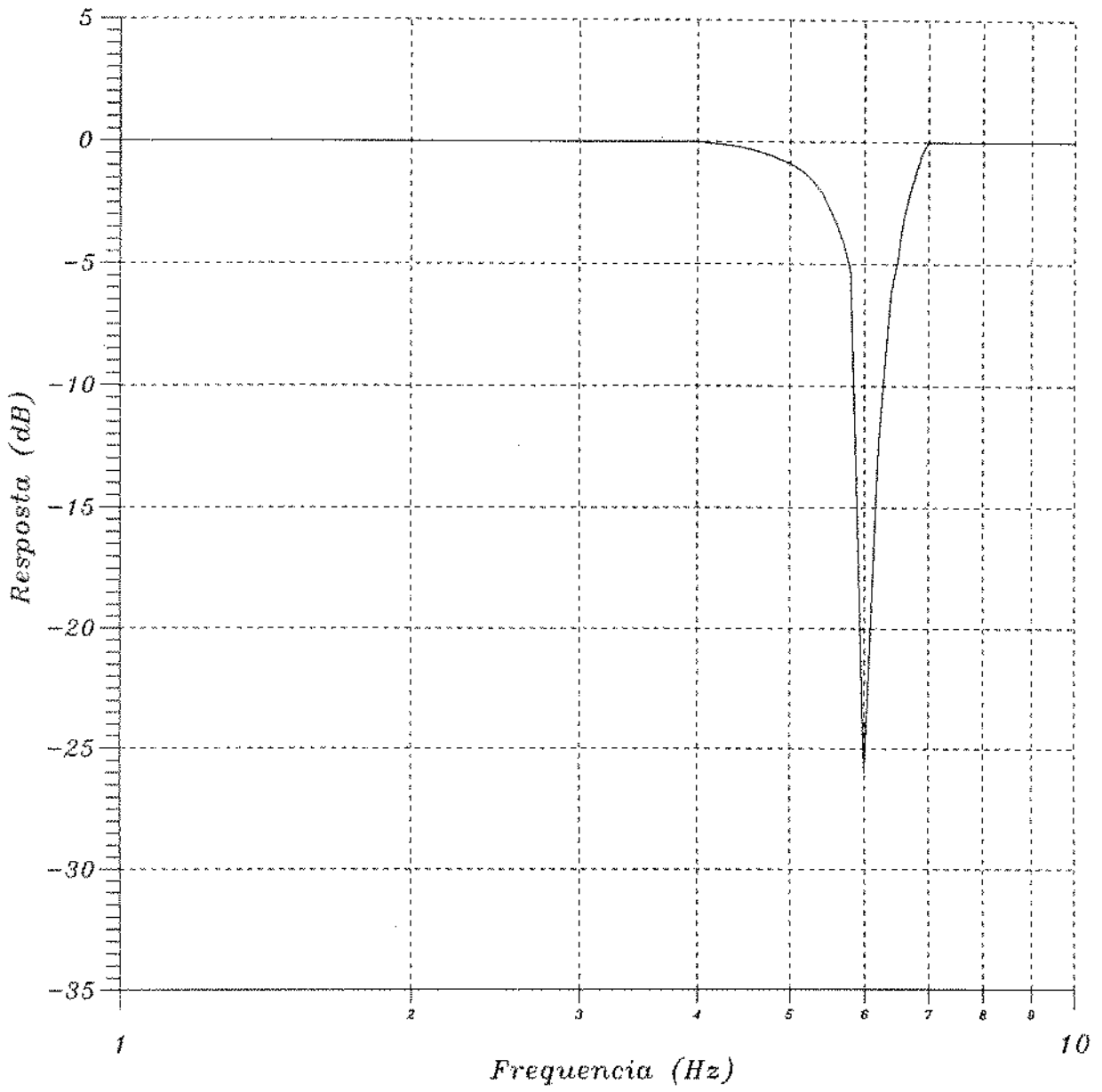


Figura 3.5 : Resposta típica de um filtro notch

e o mar, vão depender principalmente da massa da embarcação. Assim, barcos pequenos tendem a mover-se muito, enquanto grandes navios apresentam maior "indiferença" à ação das ondas. No entanto, ao medirmos os movimentos de uma embarcação, teremos um espectro de frequências que terá relação direta com o espectro das ondas.

Como o mar apresenta picos de energia que se concentram em uma faixa de frequências relativamente estreita, com período normalmente entre 5 e 20 segundos [6,7,10,15], torna-se conveniente a aplicação de filtros tipo notch, para a atenuação da informação de posição nestas frequências, já que estes filtros têm emprego generalizado em situações que exigem a eliminação de efeitos de ressonância [18].

Com a adoção de dois filtros notch, e escolhendo-se as frequências de centro e larguras de banda apropriadas, reduz-se o espectro à forma da figura 3.6, com três regiões de áreas A₁, A₂ e A₃, reduzindo-se o pico de energia.

Neste sistema, utiliza-se filtros tipo dual notch adaptativos que incluem, além dos filtros, um analisador de espectro e um algoritmo para ajuste das frequências de centro a serem usadas [Ver Anexo A].

Desta forma, os filtros têm bom desempenho tanto em situações de mar calmo, onde o pico de energia do espectro se encontra em frequências mais altas, como em tempestades, quando a energia é maior, mas em frequências mais baixas.

Quanto maior for a largura de banda do notch, maior será a faixa de atenuação do espectro, resultando em menor

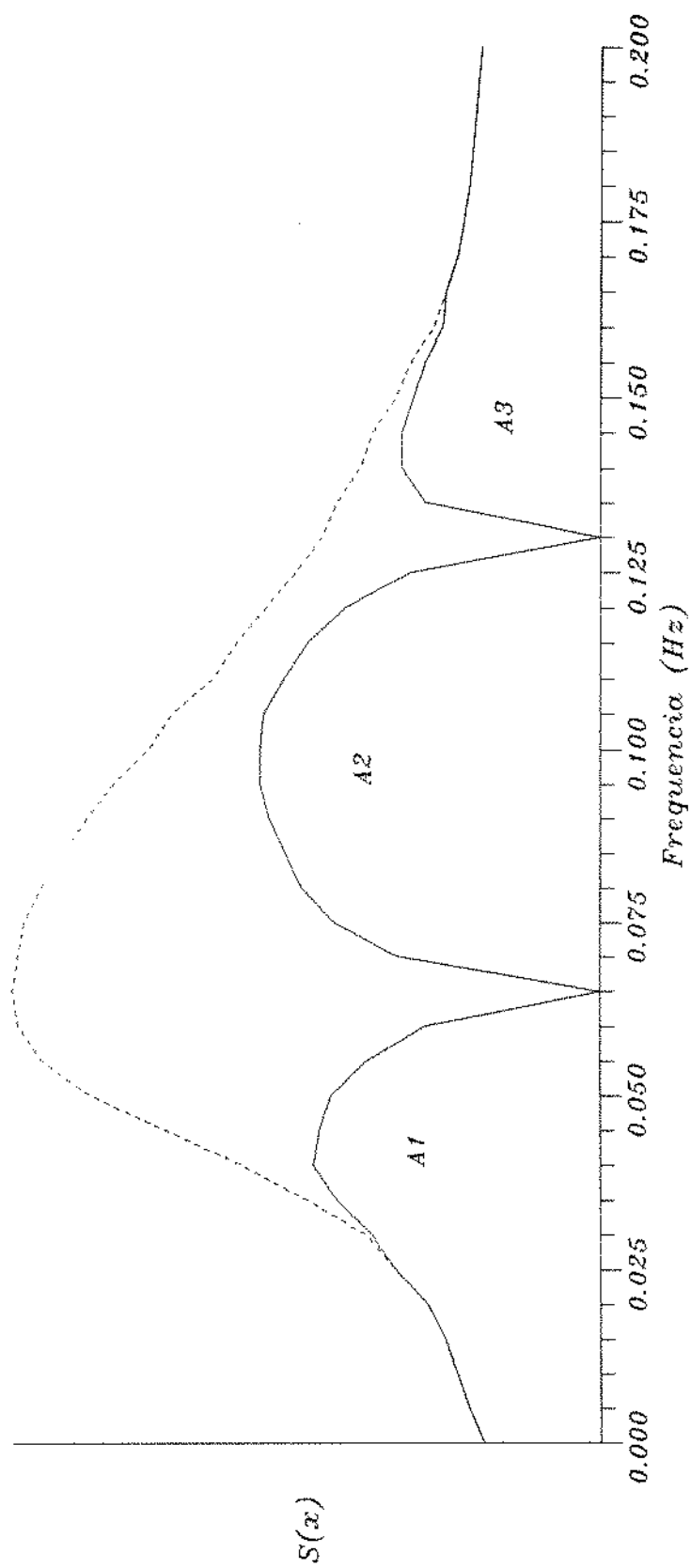


Figura 3.6 : Densidade Espectral dos movimentos filtrados com filtros notch

atividade dos propulsores (modulação), porém em maiores "círculos de passeio" da embarcação [11].

A utilização de apenas um filtro notch, assim, exigiria uma largura de banda excessiva, para que se cobrisse a faixa de frequências correspondente ao pico de energia do espectro. Isso causaria uma atenuação exagerada do sinal de posição, resultando em um sistema de respostas muito lentas [11].

Outra limitação refere-se ao atraso de fase introduzido pelos filtros, que deve se manter abaixo de 10 graus, principalmente nas frequências próximas à frequência de cruzamento do controlador, sob pena de instabilizar o sistema [15].

Por fim, o sinal proveniente dos filtros de onda passa por um filtro passa-baixas, de forma a que se use apenas o conteúdo do espectro correspondente às baixas frequências.

Os filtros de onda, implementados no simulador utilizado, embora sejam do tipo dual notch, não possuem o algoritmo analisador de espectro dos navios existentes, não sendo, portanto, adaptativos. Isso, todavia, não significa necessariamente perda de precisão, uma vez que os tempos, empregados nas simulações, são pequenos o suficiente para que se assuma que o espectro não apresenta variações significantes.

3.3.7 - Modelagem dos sensores

Os sensores envolvidos em uma simulação de PD consistem em : a) sensores de posição para os eixos X e Y; b) sensor para o aproamento e c) sensores para velocidade e direção do vento. Opcionalmente, pode-se incluir um modelo para a ação de uma URV (unidade de referência vertical).

Para as determinações de posição e aproamento, a modelagem adotada no simulador atual é a mais simples : os sensores são tomados como perfeitos, tendo funções de transferência unitárias. Para o anemômetro, assume-se medição ideal da direção do vento, enquanto que a velocidade é multiplicada por um fator menor que a unidade (no caso, usa-se para o Fator de Compensação Ativa de Vento, FCAV = 0.70), para simular a imprecisão do sensor. O programa não inclui modelagem para a URV.

No caso do modelo para o sensor de aproamento, o desempenho real das modernas bússolas giroscópicas é suficientemente satisfatório, para que se possa adotar uma função de transferência unitária. Mas, apesar de a literatura consultada [1, 13, 14] sugerir a modelagem de funções não unitárias para os sensores de posição acústicos em X e Y, não foi possível encontrar uma discussão sobre a magnitude dos erros cometidos ao assumir-se perfeição para estes dispositivos.

3.4 - Programa Simulador

O simulador de PD usado neste trabalho, é um programa escrito em linguagem FORTRAN 77 onde, a princípio, dá-se entrada aos dados e executa-se rotinas de inicialização, atribuindo-se aos termos integrais de cada eixo, valor igual ao somatório das forças externas, o que faz com que estes sejam os sinais iniciais de controle. Inicia-se a simulação, em um dado instante qualquer, calculando-se as forças perturbadoras, o sinal de controle, as quantidades de empuxo de cada propulsor e integrando-se as equações de movimento.

Algumas técnicas empregadas, no entanto, são passíveis de outras implementações, a depender do grau de precisão e flexibilidade desejados na simulação.

Um exemplo disto é dado pela técnica de integração, o método de *Euler* modificado, em que se utiliza os dois primeiros termos da equação a ser integrada, desenvolvida em série de *Taylor*, usando-se, para o segundo termo, o valor médio das últimas duas derivadas primeiras observadas.

A implementação de procedimentos de integração mais sofisticados, como *RUNGE-KUTTA*, pode ser feita com facilidade no programa, caso se deseje trabalhar com intervalos de ciclo maiores.

O tempo de ciclo para que se percorra a malha de simulação, também pode ter valor diferente, em outros simuladores: o controlador de um navio equipado com PD possui, via de regra, um sistema acústico de posição, que opera

emitindo sinais com uma certa taxa de emissão, sendo que o período de repetição é o tempo entre uma emissão e outra. Estas taxas costumam ser altas, podendo chegar a 10 pulsos por segundo [1].

É necessário, para que se mantenha a informação de posição, que a taxa de amostragem seja, pelo menos, duas vezes maior que a mais alta frequência contida no sinal amostrado (teorema de Shannon).

Partindo das frequências escolhidas para o filtro dual notch empregado no simulador, têm-se $W_1 = 0.421$ rd/s (0.067 Hz) como valor da frequência de centro do primeiro filtro notch, sendo este um valor típico [5]. Uma vez que, após analisar o espectro de onda, o algoritmo de filtragem desconsidera as frequências superiores à W_1 , pode-se assumir esta como a maior frequência a ser usada pelo controlador. Têm-se, assim, que o período de amostragem deve ser, pelo menos, de 7,5 segundos. Na prática, o ciclo é de 1 segundo para os sistemas em uso, até aqui, no Brasil [10, 7]. Para o simulador utilizado, usa-se um tempo de ciclo de 0.25 segundos.

Quanto aos modos de aproamento, são quatro os disponíveis. No primeiro, o controlador busca manter os valores fornecidos como referência, para a posição em X-Y e o aproamento desejados. Este é o modo normal de operação nas unidades PD, sendo que uma diferença entre o valor de referência e o valor atual, em qualquer dos eixos, é encarado como erro pelo controlador, que o "vê" em sua inteireza,

tentando corrigi-lo com intensidade proporcional às suas magnitude e velocidade.

No segundo modo, é possível atuar da mesma forma, controlando-se apenas a posição em X-Y, ou seja : não há interesse em se manter o aproamento. Isso dá liberdade ao controlador, já que deixa de existir a prioridade para a satisfação da demanda por momento do eixo Z, permitindo que se use todo o empuxo disponível para a manutenção de posição. Não é disponível em sistemas reais.

Outra possibilidade é de se optar por deixar ao sistema, a escolha do aproamento que resulte em uma demanda mínima de empuxo, para manter a posição. Esse é o modo AHFMT, AUTOMATIC HEADING FOR MINIMUM THRUST, existente em navios e plataformas PD embora, nas últimas, seja indiferente o azimute escolhido, já que apresentam quase a mesma resistência ao vento em todas as direções. Para calcular o aproamento ideal, o controlador se vale das informações fornecidas pelos termos integrais dos eixos X e Y, em coordenadas terrestres, como visto anteriormente.

De maneira análoga, pode-se escolher o aproamento, visando-se obter uma direção que apresente momento resultante mínimo das forças externas. Isso pode permitir uma menor modulação dos propulsores (embora não necessariamente com valores de empuxo mínimo), já que haverá menor demanda de potência por parte do eixo de maior prioridade.

Para a implementação do modo de aproamento de mínimo empuxo e mínimo momento, é necessária a determinação das

forças e momentos ambientais, para orientar a embarcação segundo a direção da resultante que age sobre ela.

Para isso, parte-se da hipótese, válida, de que o termo integral de cada eixo, em regime estacionário, reflete a componente média das forças combinadas de vento, correnteza e ondas.

Existe, porém, um comportamento oscilatório dos termos integrais, decorrente do constante ajuste, em realimentação, às variações aleatórias do meio.

Assim, na busca de um valor médio representativo, a ser usado pelo algoritmo de aproamento contra o ambiente, existe a necessidade de se dispor de uma informação que apresente variações lentas, permitindo uma baixa modulação dos propulsores.

Em consequência, filtra-se os valores dos termos integrais com um filtro de atraso de primeira ordem, onde as constantes de filtragem dependem dos tempos de resposta do sistema para cada eixo que, por sua vez, variam segundo as massas adicionais e os coeficientes de ganho do controlador.

3.5 - Análise de desempenho do Simulador

Por fim, com o propósito de fornecer uma comparação entre o comportamento do navio Sedco-472 e dados simulados com o programa utilizado neste estudo, apresenta-se a figura 3.7, obtida a partir de dados em tempo real, gravados durante a

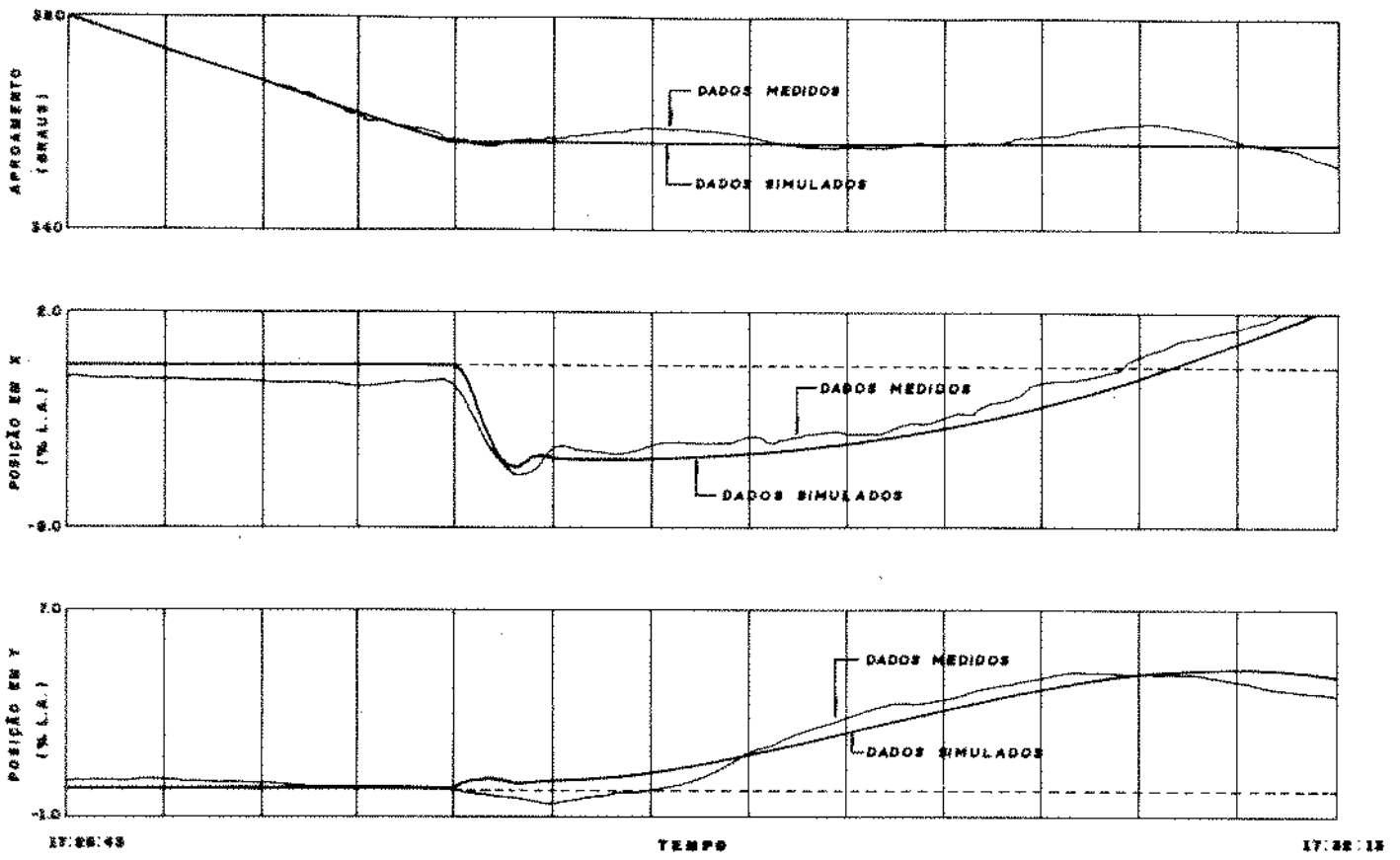


FIG.3.7 - Comparação entre dados reais e simulados do sedco-472

perda de posição do navio Sedco-472 referida no início do capítulo [8]. Os dados para a simulação incluíram os registros de velocidade, e direção de vento, também gravados em fita magnética à bordo, e informações sobre a direção e intensidade de correnteza e ondas.

Na primeira trilha, apresenta-se apenas o sinal de aproamento, que é um dado de entrada para a simulação. Observa-se a manobra de giro da embarcação, segundo uma taxa aproximadamente constante de 5,6 graus/minuto até 012 graus, onde ocorre a instabilidade no sistema de controle, com a subsequente perda de posição.

As segunda e terceira trilhas são, respectivamente, as componentes filtradas de posição nos eixos X e Y. As curvas são apresentadas com valores dados em % da lâmina d'água, por ser angular a informação fornecida pelos sensores. As máximas discrepâncias entre os dados reais e simulados, são da ordem de 0,7% da profundidade para o eixo X e de 0,6% para Y.

As duas últimas trilhas, referem-se aos sinais de comando de empuxo global, para os eixos X e Y. O comportamento da simulação, nestes casos, caracteriza-se por uma "suavidade" significativamente maior que a dos dados reais, mantendo valores que são aproximadamente iguais à média dos empuxos demandados pelo controlador real. Isso ocorre porque o simulador não calcula as forças e movimentos de alta frequência, causados pela ação aleatória das ondas. Embora estes movimentos rápidos, contidos no sinal de posição, sejam atenuados por ação de filtragem, o controlador real recebe uma

parte remanescente destas oscilações e a elas tenta se opor. É de se esperar que, com a inclusão de um modelo matemático que permita ao simulador o cálculo destas forças e movimentos de alta frequência, a concordância entre dados simulados e reais se acentue.

3.6 - Complementos ao Programa Simulador

3.6.1 - Onda variável

O simulador possui entrada para leitura de arquivos de dados de ondas, vento e correnteza variáveis, que podem ser obtidos a partir de informações gravadas à bordo, pelo sistema de registro de dados de posicionamento dinâmico, se este existir.

Não dispondo de tais registros, incluiu-se no corpo do programa um algoritmo gerador de ondas variáveis, com base no espectro de Bretchneider [1], particionado em 40 intervalos, ou seja : as ondas são formadas a partir do somatório de uma série cossenoidal de 40 termos, com frequências obtidas a partir da divisão do espectro em igual número de segmentos.

O objetivo desta inclusão foi o de analisar o comportamento do sistema, diante de variações aleatórias nas forças perturbadoras. Embora o vento seja a maior perturbação atuante sobre o navio, ele é medido e atua no laço de controle

em mecanismo de ação antecipatória, com o controlador agindo contra estas forças antes que os seus efeitos se façam sentir.

As forças de correnteza têm variação lenta e, para fins de simulação de períodos curtos, de até algumas horas, podem ser consideradas constantes.

3.6.2 - Modelo de Referência

Uma das formas de se obter uma mudança de aproamento, em um navio PD, consiste em se ordenar ao controlador novos azimutes de referência, sucessivamente, de tal modo que o giro se dê em pequenos passos. O que se pretende, nestes casos, é evitar uma perda de posição excessiva, que poderia ocorrer em uma manobra maior e mais rápida.

Porém, mesmo com uma variação brusca no valor de referência, nos sistemas PD ocorre uma limitação na velocidade máxima de giro, ajustada a depender da embarcação e sistema, entre 5 e 10 graus/minuto. A esse modo de mudança de aproamento, pode-se dizer que segue um modelo de referência, fixado *a priori* [6,7,8].

Originalmente, o simulador não dispunha de um tal modo de aproamento, que foi incluído a fim de se poder estudar as perdas de posição em X-Y, com velocidades de giro ajustáveis.

O algoritmo implementado, ao se requisitar um giro da embarcação, interfere impedindo que o controlador seja

informado do valor total do erro, ou seja : da diferença entre o azimute atual e o desejado. Este valor é fracionado e, à medida que o giro prossegue, o controlador recebe novos incrementos no valor de referência a ser utilizado, até o azimute final. Variando-se o tamanho destes incrementos, ajusta-se a velocidade de mudança de aproamento.

3.7 - Modelagens propostas

Com vistas a estudos que exijam maior precisão em simulações de Posicionamento Dinâmico, e para caracterizar melhor o simulador utilizado, inclui-se aqui sugestões para melhoras futuras do mesmo.

3.7.1 - Dinâmica da embarcação

O simulador atual não dispõe de um conjunto de equações que simule os movimentos rápidos causados pelas ondas. Os movimentos de alta frequência poderiam ser modelados como oscilações harmônicas, obtidas em processo semelhante ao adotado para o cálculo das alturas variáveis de onda, já descrito. Estes movimentos seriam, posteriormente, somados aos de baixa frequência e submetidos à ação dos filtros de onda. A inclusão de um tal modelo permitiria um estudo melhor da atuação da rede de filtragem dos sinais de posição, além de uma maior concordância dos dados simulados com os reais.

3.7.2 - Propulsores

Embora a degradação do empuxo, causada pela correnteza seja normalmente pequena, ela tem que ser compensada pela ação do controlador que, ao perceber afastamentos maiores, aumentará a demanda por empuxo de forma a suprir a deficiência. Isto, é claro, implica em mais atraso de resposta introduzido no sistema. Outro fator de introdução de atraso devido à correnteza, mencionado anteriormente, consiste no desvio de fluxo dos propulsores.

A fim de incluir estes efeitos no simulador, seria necessário que se conhecesse, ao menos de forma aproximada, o coeficiente de degradação de empuxo dos propulsores simulados. Isso poderia ser obtido de ensaios com modelos em escala reduzida ou de informações fornecidas pelo fabricante do equipamento. Multiplicando-se a velocidade da embarcação em relação à água pelo coeficiente de degradação, obter-se-ia um valor que, subtraído ao empuxo inicialmente calculado, modelaria o efeito mencionado. O desvio na direção de fluxo das hélices, todavia, depende de dados de difícil obtenção junto aos fabricantes de propulsores, sendo em geral, motivo de ensaios de laboratório [1].

3.7.3 - Sensores

Os sensores em PD são, normalmente, fontes de ruídos aleatórios, havendo para os sensores de posição, no caso real, uma pré-filtragem dos sinais a serem usados. Os efeitos dos

ruidos e da rede de filtragem são variáveis, podendo, no entanto, ter influência significativa no desempenho do sistema de PD [1, 6]. Por isso, é de se supor que as simulações poderiam ser aperfeiçoadas com a inclusão dos modelos propostos na literatura. Isso envolveria, basicamente, atraso computacional puro para os sensores de posição, dependente da profundidade, afim de emular o tempo de percurso do som na água e a adição de um ruído branco, de média zero e uma dada variância (a depender do equipamento escolhido), para espelhar as variações randômicas na velocidade de propagação acústica. Para o anemômetro, além do fator de compensação ativa, propõe-se um atraso de primeira ordem, como o sugerido na modelagem dos propulsores [1].

A dinâmica do navio não inclui os movimentos angulares de roll e pitch que, embora não sejam objeto de controle, exercem influência sobre o processo de medição da posição, na medida em que conferem velocidades tangenciais aos sensores e alteram suas posições continuamente. Na prática, estes movimentos são medidos pelas Unidades de Referência Vertical (URVs) e seus efeitos são subtraídos dos movimentos observados. Como esta compensação não é perfeita, o roll e o pitch são responsáveis por uma parcela de ruído (imprecisão) dos sensores de posição.

Se houver a inclusão, na dinâmica da embarcação, de simulação dos movimentos angulares de roll e pitch, deve-se introduzir, no bloco de realimentação, um modelo que simule a ação das URVs, que também contribuirão com um certo ruído,

cuja causa maior é a sua sensibilidade à acelerações laterais [1], uma vez que consistem, em sua maioria, basicamente em inclinômetros pendulares.

3.8 - Resumo

Discutiu-se, neste capítulo, as características daquela que foi a ferramenta básica para este estudo: o programa de simulação de Posicionamento Dinâmico.

Após uma descrição de como ele se encontra organizado, tratou-se das diferentes modelagens matemáticas envolvidas, incluindo-se o controlador, as perturbações, os atuadores, a planta e os sensores de realimentação do sistema.

Como a análise de sistemas de PD pode se tornar difícil, devido às várias não-linearidades possíveis de ocorrer e devido à elevada ordem das funções de transferência envolvidas, o estudo do comportamento de tal tipo de sistema de controle é, muitas vezes, feito mais facilmente através de simulações no tempo. Desta forma, com o objetivo de estimular a introdução de melhoramentos no simulador, este capítulo incluiu discussões sobre a adoção de um modelo de movimentos de alta frequência para a dinâmica da embarcação, modelagem dos sensores de posição com a adição de ruído branco, efeito da degradação da ação dos propulsores devido ao influxo da correnteza, além de modificações feitas durante este estudo e sugestões para alterações futuras.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DOS SISTEMAS DE CONTROLE EXISTENTE E PROPOSTO

4.1 - Introdução

O problema proposto surge da variação da intensidade das componentes vetoriais das forças de vento, correnteza e ondas, sobre uma embarcação tipo navio, no decorrer de uma manobra de mudança de aproamento, devido à variação do ângulo de incidência destas forças; por outro lado, os propulsores, por serem fixos ao navio, também experimentam mudança na direção dos seus eixos, obrigando ao sistema de controle que, para manter o equilíbrio entre o meio ambiente e o empuxo dos propulsores, ajuste a força destes últimos, de forma contínua durante o giro, de forma a não permitir perdas excessivas de posição.

Como estas mudanças são periódicas e pouco frequentes no aproamento de navios de posicionamento dinâmico, estabeleceu-se como objetivo uma solução que não implique em modificações estruturais no controlador existente, com vistas à obtenção de um algoritmo que possa ser acionado apenas

ocasionalmente e que possibilite implementação simples, dentro das limitações do equipamento em operação. Para isso, realizou-se um estudo das características do atual sistema, com o objetivo de analisar a estrutura do sistema de controle e buscar uma solução nos moldes propostos.

Para a análise, foram empregadas técnicas clássicas de diagramas do lugar das raízes e de respostas no domínio da frequência e do tempo.

Este capítulo descreve os sistemas existente e proposto, incluindo um estudo de ajuste dos parâmetros de ganho do sistema em uso, visando otimizá-lo. Apresenta os lugares das raízes, curvas de Nyquist e respostas à entradas em rampa, de cada um dos sistemas, fazendo uma análise comparativa que visa avaliar suas diferenças em termos de velocidade de resposta e estabilidade relativa.

4.2 - Descrição dos sistemas estudados

4.2.1 - Descrição do sistema existente

A figura 4.1 mostra o diagrama de blocos simplificado do sistema, correntemente implementado na maioria das embarcações de PD de exploração de petróleo. As funções de transferência deste controlador, bem como dos filtros de onda e filtro passa-baixas, encontram-se no Anexo C.

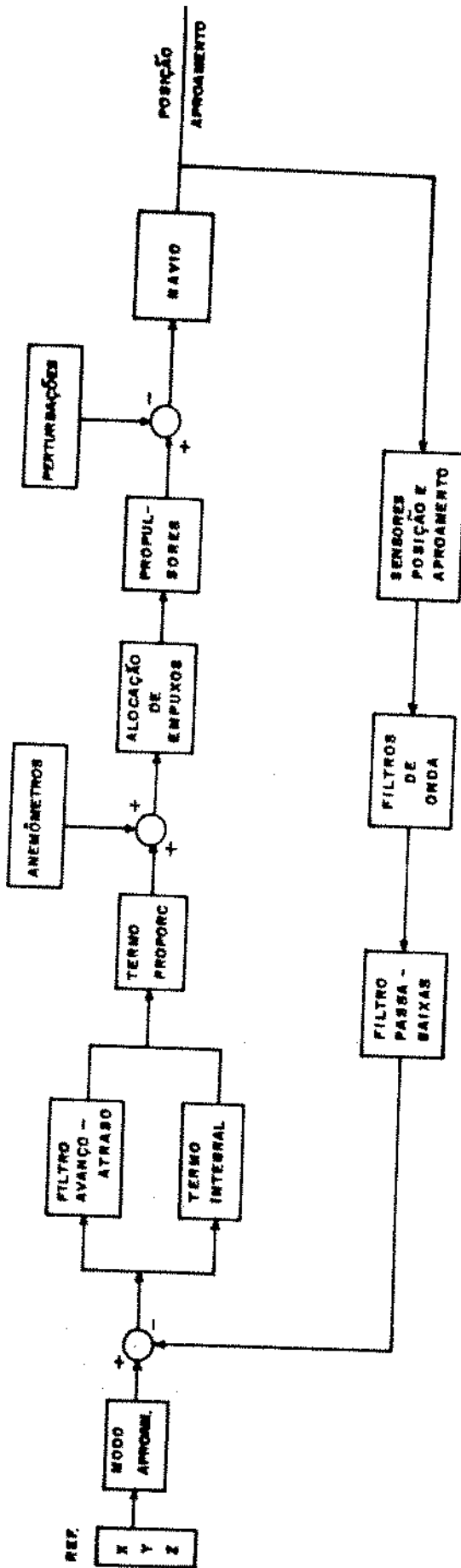


FIG.4.1 : Diagrama de Blocos Simplificado do Sistema Existente

A modelagem do sistema, para fins de análise, foi feita a partir do diagrama de blocos da figura 4.2. Este diagrama representa o eixo Y de controle apenas, uma vez que o eixo X possui os mesmos parâmetros, diferindo apenas nos valores de massa, coeficiente de amortecimento de casco e no ganho proporcional, sendo o eixo Y o que demanda maiores potências para manutenção de posição. O eixo Z também não é objeto de análise, já que o problema restringe-se à perda de posição no plano X-Y, causada por uma mudança no valor desejado para o aproamento.

Na modelagem desprezou-se o bloco de perturbações e, conseqüentemente, da alimentação em avanço da força e direção do vento, uma vez que o problema em estudo surge, basicamente, de variações na entrada de referência angular do sistema. Estes efeitos são, no entanto, considerados na análise temporal realizada com a utilização do simulador.

A alocação dos empuxos tampouco foi incluída, pois a análise é feita em um eixo apenas, sendo esta também a razão para a não inclusão do bloco de escolha do modo de aproamento. Há que ressaltar, no entanto, que a ação do bloco de alocação de empuxos entre os propulsores, tem influência no acoplamento entre os eixos, na medida em que estabelece hierarquia de satisfação da demanda por potência dos diferentes eixos. A ação do bloco de alocação de empuxos manifesta-se nas simulações realizadas e é discutida no capítulo seguinte.

A função de transferência adotada para o atuador é

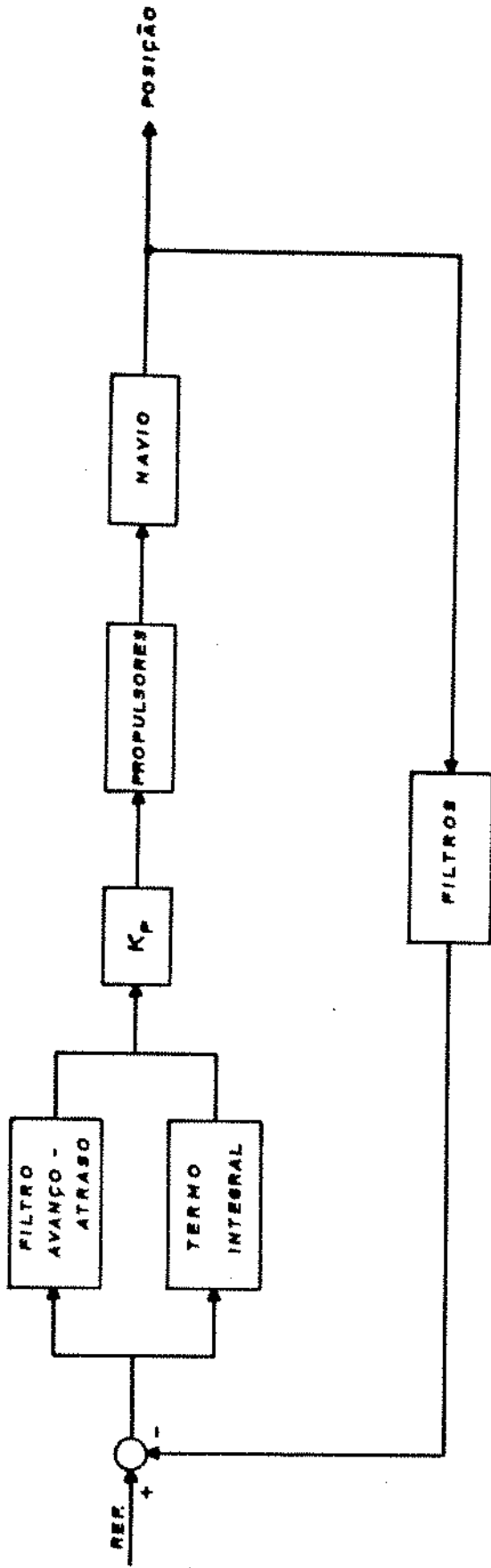


FIG.4.2 - Modelagem do sistema existente

dada por :

$$E(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (4.1)$$

onde a constante de tempo dos propulsores (τ) tem valor igual a 5.0 segundos.

A planta tem função de transferência dada por :

$$Plt(s) = \frac{1}{M_t s^2 + (2B_{22} V_{rel})s} \quad (4.2)$$

onde : M_t : Massa total (Kg)

B_{22} : Coeficiente de amortecimento viscoso na direção Y [N/(m/s)]

V_{rel} : Velocidade relativa entre o casco e a água durante mudanças de aproamento (0.152 m/s) [5]

Para o conjunto de parâmetros de ganho do controlador tem-se, nas unidades PD existentes, as seguintes opções (chamadas simplesmente de ganho do sistema) : a) Ganho baixo, consistindo em um ajuste de menor rapidez de resposta, a ser utilizado em situações de mar calmo, a fim de poupar equipamento e combustível através de menor modulação dos propulsores; b) Ganho normal e c) Ganho alto, selecionado quando em mar agitado e em operações que requerem grande precisão de posicionamento.

As análises e simulações foram realizadas usando-se a opção de ganho alto, tanto para o sistema existente quanto para os sistemas modificado e proposto.

No caso do sistema existente, os valores de ganho alto são:

$GP_x = 538.35$	$GP_y = 548.467$	$GP_z = 52162110.0$
$GI_x = 0.002513$	$GI_y = 0.002513$	$GI_z = 0.0058$
$GD_x = 0.4444$	$GD_y = 0.4444$	$GD_z = 0.5102$

4.2.2 - Descrição do Sistema Existente Modificado

Como os estudos preliminares do sistema existente indicavam a possibilidade de um ajuste de parâmetros de ganho em outros valores, foi feita uma otimização do controlador existente, visando avaliar o aumento de desempenho na resposta transitória resultante. A determinação dos valores de ganho modificado foi conseguida através de simulações que buscaram minimizar um índice de desempenho.

Dentre os índices disponíveis na literatura [3], optou-se pelo ITAE (integral do tempo multiplicado pelo erro absoluto), devido às suas características de sobre-sinal pequeno na resposta transitória, oscilações bem amortecidas e boa seletividade (variações apreciáveis no índice de desempenho para pequenas variações no valor do parâmetro em estudo).

O índice ITAE, que consiste na área sob a curva

afastamento x tempo e é dado por :

$$J_i = \int_0^T t | e_i(t) | dt \quad (4.3)$$

onde :

t : tempo de simulação (s)

e_i : função erro no eixo i (m ou graus)

T : tempo final do intervalo observado (s)

J_i : índice de desempenho para o eixo i (m·s)

O processo de ajuste foi feito para cada eixo de controle e, devido aos efeitos de acoplamento entre os eixos, computou-se um índice ITAE para o afastamento polar do navio, a fim de não incorrer em uma maior otimização de um eixo em detrimento de outro. Ou seja :

$$J_{\text{polar}} = \int_0^T t | \sqrt{e_x^2(t) + e_y^2(t)} | dt \quad (4.4)$$

O índice é tanto mais representativo quanto maior for o valor adotado para T , implicando, no entanto, em aumento do tempo de simulação necessário para a sua obtenção. O valor de T utilizado foi de 2000 segundos, verificando-se a consistência dos parâmetros obtidos através de simulações com diferentes condições de mar, ou seja : diferentes solicitações sobre os três eixos de controle. Desta forma obteve-se um sistema modificado, onde apenas os valores de ganho diferem

daqueles utilizados no sistema original. Os novos valores são:

$GP_x = 1310.0$	$GP_y = 3400.0$	$GP_z = 52162110.0$
$GI_x = 0.0028$	$GI_y = 0.0051$	$GI_z = 0.0058$
$GD_x = 0.4444$	$GD_y = 0.4444$	$GD_z = 0.5102$

4.2.3 - Descrição do modelo Proposto

A partir dos estudos de desempenho dos sistemas existente e modificado, alterou-se a configuração de pólos e zeros do sistema existente, para se obter maior rapidez de resposta e maior estabilidade relativa do que o do sistema modificado.

Para que esta mudança não alterasse a estrutura do controlador existente, optou-se por um algoritmo em paralelo que tivesse características PID, sem fazer uso de outras informações que aquelas fornecidas pelos sensores já em operação. O termo derivativo do algoritmo proposto é do tipo clássico, em lugar de um filtro de avanço-atraso, e permite uma maior rapidez de resposta ao sistema.

O diagrama de blocos simplificado do sistema proposto é apresentado na figura 4.3, onde a única diferença para o sistema existente consiste em um bloco de controle em paralelo com o seguinte modelo:

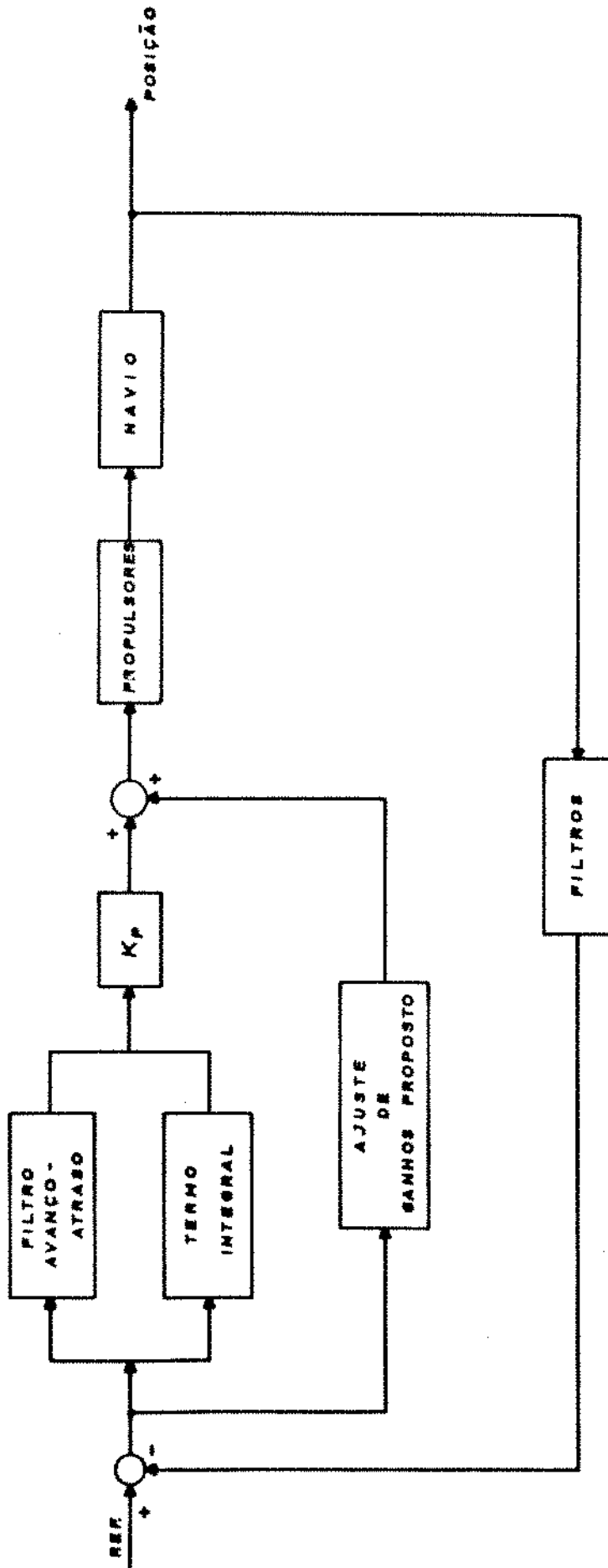


FIG.4.3 - Modelagem do sistema proposto

$$\begin{aligned}
 F_{xi} &= F_{x(i-1)} + (GP_x \dot{e}_x) + (GI_x e_x) + (GD_x q_x) \\
 F_{yi} &= F_{y(i-1)} + (GP_y \dot{e}_y) + (GI_y e_y) + (GD_y q_y) \\
 F_{zi} &= F_{z(i-1)} + (GP_z \dot{e}_z) + (GI_z e_z) + (GD_z q_z)
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

onde :

F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} : Forças de ajuste a serem requisitadas aos propulsores, no instante i (N)

$F_{x(i-1)}, F_{y(i-1)}$

$F_{z(i-1)}$: Forças de ajuste no instante $i-1$ (N)

GP_x, GP_y, GP_z : Ganhos proporcionais do algoritmo de ajuste

GI_x, GI_y, GI_z : Ganhos integrais de ajuste

GD_x, GD_y, GD_z : Ganhos derivativos de ajuste

e_x, e_y, e_z : Sinais de erros de posição e aproamento (m e graus)

$\dot{e}_x, \dot{e}_y, \dot{e}_z$: Sinais de erro de velocidade (m/s e graus/s)

q_x, q_y, q_z : Sinais de erro de aceleração, obtidos por derivação dupla do sinal de erro de posição (m/s² e graus/s²)

Os valores de ganho para o algoritmo do sistema proposto são:

$GP_x = 320.0$	$GP_y = 700.0$	$GP_z = 575000.0$
$GI_x = 3.1$	$GI_y = 17.75$	$GI_z = 525.0$
$GD_x = 3500.0$	$GD_y = 27500.0$	$GD_z = 0.0$

Integrando-se no tempo, obtém-se :

$$\begin{aligned}
\int \Delta F_x dt &= GI_x \int e_x dt + GP_x \int \dot{e}_x dt + GD_x \int q_x dt \\
\int \Delta F_y dt &= GI_x \int e_y dt + GP_y \int \dot{e}_y dt + GD_y \int q_y dt \\
\int \Delta F_z dt &= GI_z \int e_z dt + GP_z \int \dot{e}_z dt + GD_z \int q_z dt
\end{aligned} \tag{4.6}$$

ou, finalmente :

$$\begin{aligned}
F_x &= (GP_x e_x) + (GI_x \int e_x dt) + (GD_x \dot{e}_x) \\
F_y &= (GP_y e_y) + (GI_y \int e_y dt) + (GD_y \dot{e}_y) \\
F_z &= (GP_z e_z) + (GI_z \int e_z dt) + (GD_z \dot{e}_z)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

A obtenção dos coeficientes para o algoritmo proposto, foi feita com o mesmo processo de ajuste empregado na modificação do controlador existente, ou seja através da otimização do índice de desempenho ITAE.

4.3 - Análise segundo o método do lugar das raízes

A análise comparativa entre os sistemas, pelo método do lugar das raízes, foi feita objetivando-se um melhor conhecimento da estrutura dos sistemas, com a determinação da distribuição dos diferentes pólos e zeros no campo complexo e verificação dos que maior influência possuem sobre a resposta transitória dos diferentes sistemas.

4.3.1 - Lugar das raízes do sistema existente

A função de transferência do sistema existente, em malha aberta, é dada por: (Ver Anexo C)

$$(\text{Num})_{\text{EX}} = 172.86s^7 + 13.75s^6 + 84.87s^5 + 6.73s^4 + 6.75s^3 + 0.53s^2 + 0.01s$$

$$(\text{Denominador})_{\text{EX}} = \dots$$

$$10^6(6.24s^{12} + 9.19s^{11} + 8.34s^{10} + 4.46s^9 + 1.65s^8 + \dots \\ + 0.42s^7 + 0.073s^6 + 0.0085s^5 + 0.0006s^4)$$

Cujos pólos e zeros são :

Polos :

$$P_1 = 0.0$$

$$P_2 = 0.0$$

$$P_3 = -0.0025$$

$$P_4 = -0.0567 + 0.0784i$$

$$P_5 = -0.0567 - 0.0784i$$

$$P_6 = -0.1094 + 0.1894i$$

$$P_7 = -0.1094 - 0.1894i$$

$$P_8 = -0.1564 + 0.2710i$$

$$P_9 = -0.1564 - 0.2710i$$

$$P_{10} = -0.2000$$

$$P_{11} = -0.3129 + 0.5419i$$

$$P_{12} = -0.3129 - 0.5419i$$

Zeros :

$$Z_1 = 0.0 + 0.3129i$$

$$Z_2 = 0.0 - 0.3129i$$

$$Z_3 = 0.0 + 0.6258i$$

$$Z_4 = 0.0 - 0.6258i$$

$$Z_5 = -0.0029$$

$$Z_6 = -0.0233$$

$$Z_7 = -0.0533$$

O diagrama do lugar das raízes do sistema, com todos os seus pólos e zeros, é dado na figura 4.4.

As contribuições individuais de cada bloco

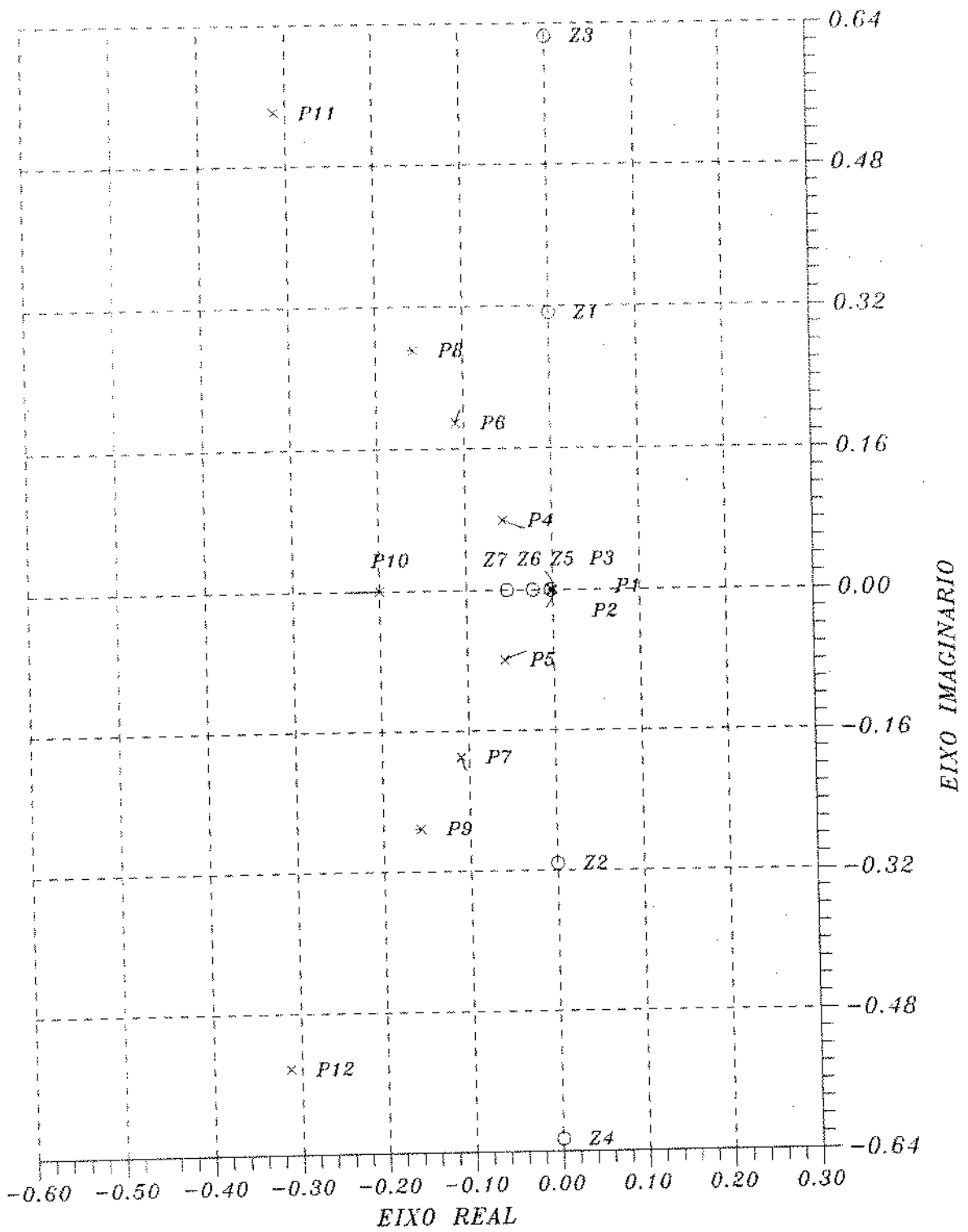


Figura 4.4 : Lugar das raízes do sistema existente

componente do sistema, na Função de Transferência global, são:

1) Controlador :

Polos :

$$P_1 = 0.0$$

$$P_4 = -0.0567 + 0.0784i$$

$$P_5 = -0.0567 - 0.0784i$$

Zeros :

$$Z_5 = -0.0029$$

$$Z_6 = -0.0233$$

$$Z_7 = -0.0533$$

2) Navio :

Polos :

$$P_2 = 0.0$$

$$P_3 = -0.0025$$

3) Filtro de onda 1 :

Polos :

$$P_8 = -0.1564 + 0.2710i$$

$$P_9 = -0.1564 - 0.2710i$$

Zeros :

$$Z_1 = 0.0 + 0.3129i$$

$$Z_2 = 0.0 - 0.3129i$$

4) Filtro de onda 2 :

Polos :

$$P_{11} = -0.3129 + 0.5419i$$

$$P_{12} = -0.3129 - 0.5419i$$

Zeros :

$$Z_3 = 0.0 + 0.6258i$$

$$Z_4 = 0.0 - 0.6258i$$

5) Filtro Passa-Baixas :

Polos :

$$P_6 = -0.1094 + 0.1894i$$

$$P_7 = -0.1094 - 0.1894i$$

6) Propulsores :

Polo :

$$P_{10} = -0.2000$$

O diagrama do lugar das raízes foi determinado, variando-se o ganho de 0.0 a 1.0. Os pólos P_1 e P_2 , para ganhos maiores, tendem para o zero Z_6 , enquanto que P_4 e P_5 tendem a se projetar no lado direito do campo complexo, instabilizando o sistema para ganhos maiores que 2.5.

4.3.2 - Lugar das raízes do sistema modificado

O lugar das raízes do sistema modificado, com todos os seus pólos e zeros, pode ser visto na figura 4.5.

A função de transferência do sistema é dada por :

(Numerador)_{mod} = ...

$$850.94 s^7 + 137.36 s^6 + 421.67 s^5 + 67.26 s^4 + 35.13 s^3 + 5.28 s^2 + 0.20 s + 0.001$$

(Denominador)_{mod} = ...

$$10^6(6.24 s^{12} + 9.92 s^{11} + 9.51 s^{10} + 5.56 s^9 + 2.28 s^8 + 0.66 s^7 + 0.136 s^6 + 0.02 s^5 + 0.0018 s^4 + 0.0001 s^3)$$

As raízes da função de transferência do sistema modificado são :

Pólos :

$$P_1 = 0.0$$

$$P_2 = 0.0$$

$$P_3 = -0.0025$$

Zeros :

$$Z_1 = 0.0 + 0.3129i$$

$$Z_2 = 0.0 - 0.3129i$$

$$Z_3 = 0.0 + 0.6258i$$

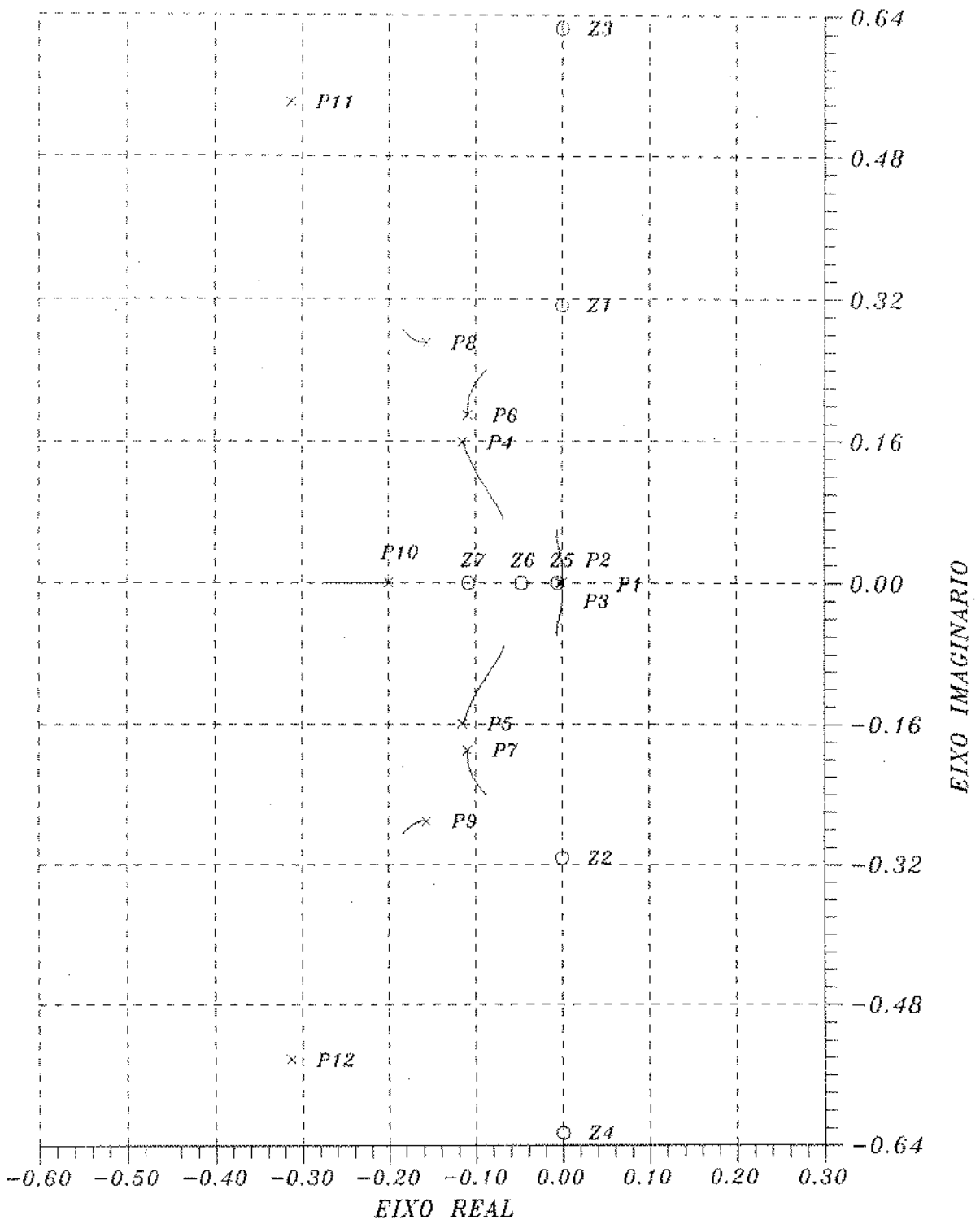


Figura 4.5 : Lugar das raízes do sistema otimizado

$$P_6 = -0.1094 + 0.1894i$$

$$Z_4 = 0.0 - 0.6258i$$

$$P_7 = -0.1094 - 0.1894i$$

$$Z_5 = -0.0058$$

$$P_4 = -0.1151 + 0.1591i$$

$$Z_6 = -0.0473$$

$$P_5 = -0.1151 - 0.1591i$$

$$Z_7 = -0.1083$$

$$P_8 = -0.1565 + 0.2710i$$

$$P_9 = -0.1565 - 0.2710i$$

$$P_{10} = -0.2000$$

$$P_{11} = -0.3129 + 0.5419i$$

$$P_{12} = -0.3129 - 0.5419i$$

Os pólos e zeros devidos ao controlador modificado são:

Pólos :

Zeros :

$$P_1 = 0.0$$

$$Z_5 = -0.0058$$

$$P_4 = -0.1151 + 0.1591i$$

$$Z_6 = -0.0473$$

$$P_5 = -0.1151 - 0.1591i$$

$$Z_7 = -0.1083$$

Comparando-se os diagramas dos lugares das raízes dos sistemas existente e modificado, vê-se que ocorre um deslocamento dos pólos P_4 e P_5 e os zeros Z_6 e Z_7 (correspondentes ao controlador), no segundo sistema, que se posicionam mais afastados do eixo imaginário do que no sistema existente, aumentando a participação dos pólos P_1 , P_2 e P_3 na resposta do sistema. O sistema torna-se instável para valores de ganho de malha superiores à 1,4.

4.3.3 - Lugar das raízes do sistema proposto

A função de transferência do sistema é dada por :

$$(\text{Numerador})_{\text{prop}} = \dots$$

$$10^3(1.316 s^9 + 0.356 s^8 + 0.675 s^7 + 0.175 s^6 + 0.066 s^5 + \dots \\ + 0.014 s^4 + 0.0012 s^3)$$

$$(\text{Denominador})_{\text{prop}} = \dots$$

$$10^6(6.237 s^{13} + 9.19 s^{12} + 8.34 s^{11} + 4.46 s^{10} + 1.65 s^9 + \dots \\ + 0.416 s^8 + 0.073 s^7 + 0.0085 s^6 + 0.0006 s^5)$$

As raízes da Função de Transferência são dadas por:

Polos :

$$P_1 = 0.0$$

$$P_2 = 0.0$$

$$P_3 = 0.0025$$

$$P_4 = -0.0567 + 0.0784i$$

$$P_5 = -0.0567 - 0.0784i$$

$$P_6 = -0.1094 + 0.1894i$$

$$P_7 = -0.1094 - 0.1894i$$

$$P_8 = -0.1564 + 0.2710i$$

$$P_9 = -0.1564 - 0.2710i$$

$$P_{10} = -0.2000$$

$$P_{11} = -0.3129 + 0.5419i$$

$$P_{12} = -0.3129 - 0.5419i$$

$$P_{13} = 0.0$$

Zeros :

$$Z_1 = 0.0 + 0.3129i$$

$$Z_2 = 0.0 - 0.3129i$$

$$Z_3 = 0.0 + 0.6258i$$

$$Z_4 = 0.0 - 0.6258i$$

$$Z_5 = -0.0120 + 0.0154i$$

$$Z_6 = -0.0120 - 0.0154i$$

$$Z_7 = -0.1231 + 0.0154i$$

$$Z_8 = -0.1231 - 0.0434i$$

$$Z_9 = 0.0$$

As raízes devidas ao controlador são :

Polos :

$$P_1 = 0.0$$

$$P_{13} = 0.0$$

$$P_4 = -0.0567 + 0.0784i$$

$$P_5 = -0.0567 - 0.0784i$$

Zeros :

$$Z_9 = 0.0$$

$$Z_5 = -0.0120 + 0.0154i$$

$$Z_6 = -0.0120 - 0.0154i$$

$$Z_7 = -0.1231 + 0.0434i$$

$$Z_8 = -0.1231 - 0.0434i$$

O diagrama do lugar das raízes do sistema proposto pode ser visto na figura 4.6.

Pode-se ver que o controlador proposto mantém a configuração de pólos do controlador original, adicionando-lhe um pólo na origem. A configuração de zeros, que no sistema existente possui três zeros reais, passa a ter, além dos zeros complexos devidos aos filtros de onda, um par de zeros complexos (Z_5 e Z_6) mais próximos do eixo imaginário do que os seus equivalentes reais no sistema original, outro par complexo (Z_7 e Z_8) em lugar do zero Z_7 real no primeiro controlador, e um zero na origem. Este último permite o cancelamento do pólo adicional em $(0.0, 0.0)$, enquanto que o par Z_5 e Z_6 melhora a dinâmica dos pólos P_1, P_2 e P_3 , devido à sua proximidade destes. O mesmo efeito pode ser atribuído às posições dos zeros Z_7 e Z_8 , próximos de P_6 e P_7 . Há que acrescentar, ainda, que o sistema torna-se instável para valores de ganho de malha superiores à 1,6.

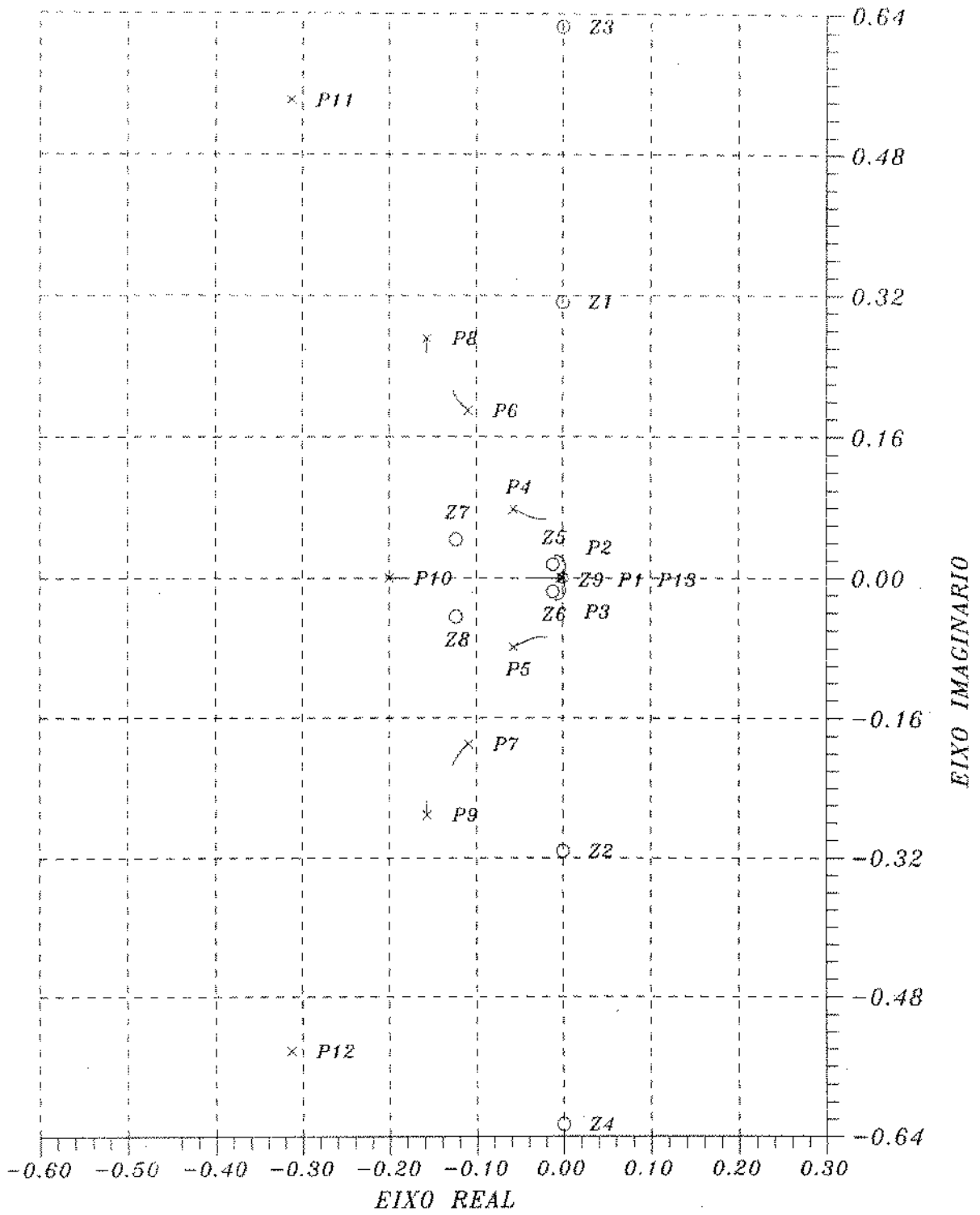


Figura 4.6 : Lugar das raizes do sistema proposto

4.4 - Análise de estabilidade dos sistemas apresentados

As modificações introduzidas no sistema existente, que geraram os sistemas modificado e proposto, implicaram em preocupação quanto às possíveis influências na estabilidade de controle. Assim, procedeu-se à uma análise comparativa utilizando-se o critério de Nyquist de resposta no domínio da frequência.

4.4.1 - Estabilidade do sistema existente

A curva de Nyquist do sistema existente é apresentado na figura 4.7. O ponto A marca o local de cruzamento da curva com o eixo real, fornecendo a margem de ganho do sistema que, para o sistema existente é de 8.1 dB^1 . O ângulo β , formado pela linha entre a origem e a intersecção da curva com o círculo unitário e o eixo real, representa a margem de fase que, no caso, é de 32.8 graus.

Deve-se tomar tais valores como parâmetros de referência para comparações com os sistemas modificado e proposto, uma vez que estes são os valores que ocorrem nos casos reais.

¹ Denominando-se de OA a distância entre a origem e o ponto em que a curva cruza o eixo real, a margem de ganho em dB, MG, é dada por: $MG = -20 \log |OA|$.

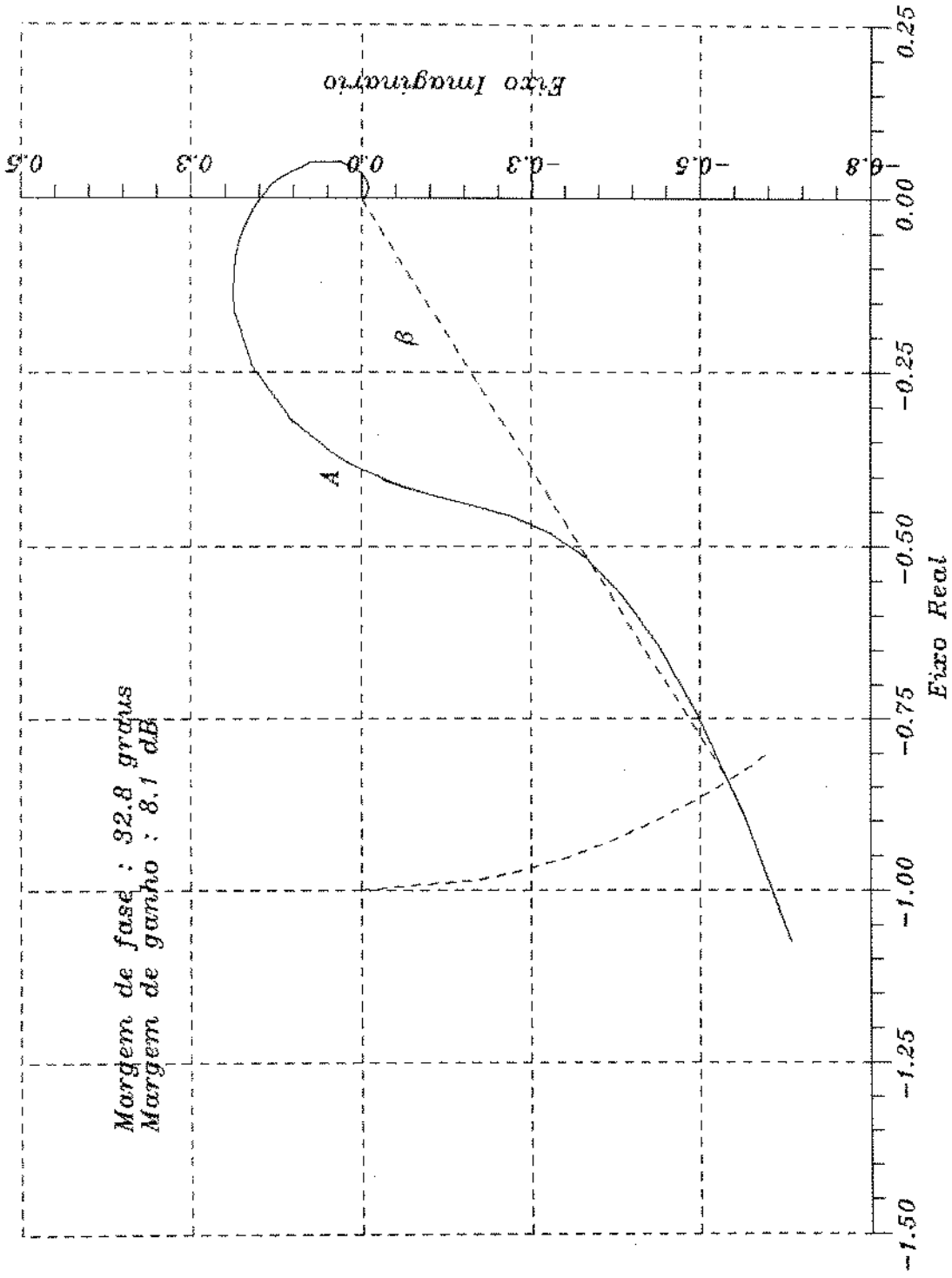


Figura no 4.7 : grafico de estabilidade do sistema existente.

4.4.2 - Estabilidade do sistema modificado

A curva de Nyquist para o sistema modificado é dado na figura 4.8.

A margem de ganho do sistema é de 2.2 dB e a margem de fase é igual a 6.5 graus, havendo uma significativa diminuição da estabilidade relativa do sistema modificado, em relação ao existente, com diminuição de 49.3% na margem de ganho e de 80.2% na margem de fase.

4.4.3 - Estabilidade do sistema proposto

A curva de Nyquist para o sistema proposto pode ser visto na figura 4.9, onde a margem de ganho é de 3.96 dB, enquanto a margem de fase é de 25.0 graus.

Nota-se aqui uma melhora em relação ao sistema modificado, principalmente na margem de fase, que se aproxima do valor apresentado pelo sistema existente, embora o sistema proposto, ainda assim, apresente estabilidade relativa inferior a este, numa diminuição de 23.8% na margem de fase e de 37.9% na margem de ganho.

Este fato deve ser encarado como o resultado de uma troca: ao buscar-se uma maior velocidade de resposta, diminuindo-se o tempo requerido para os ajustes necessários durante uma manobra de mudança de aproamento, é forçoso que se abra mão de uma parcela de estabilidade, reforçando-se aqui a noção de que a alternativa proposta deve ser utilizada apenas

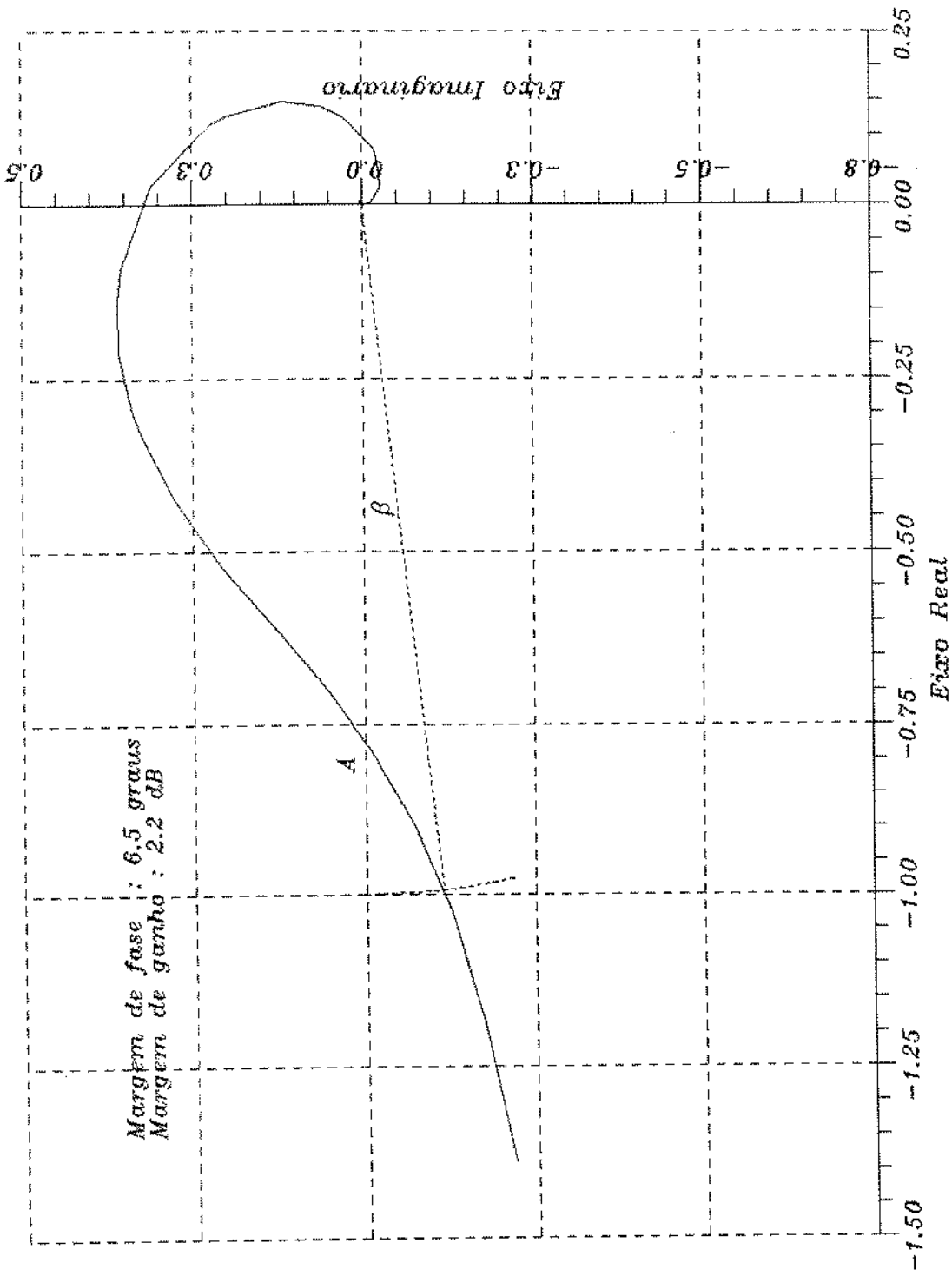


Figura no 4.8 : grafico de estabilidade do sistema modificado

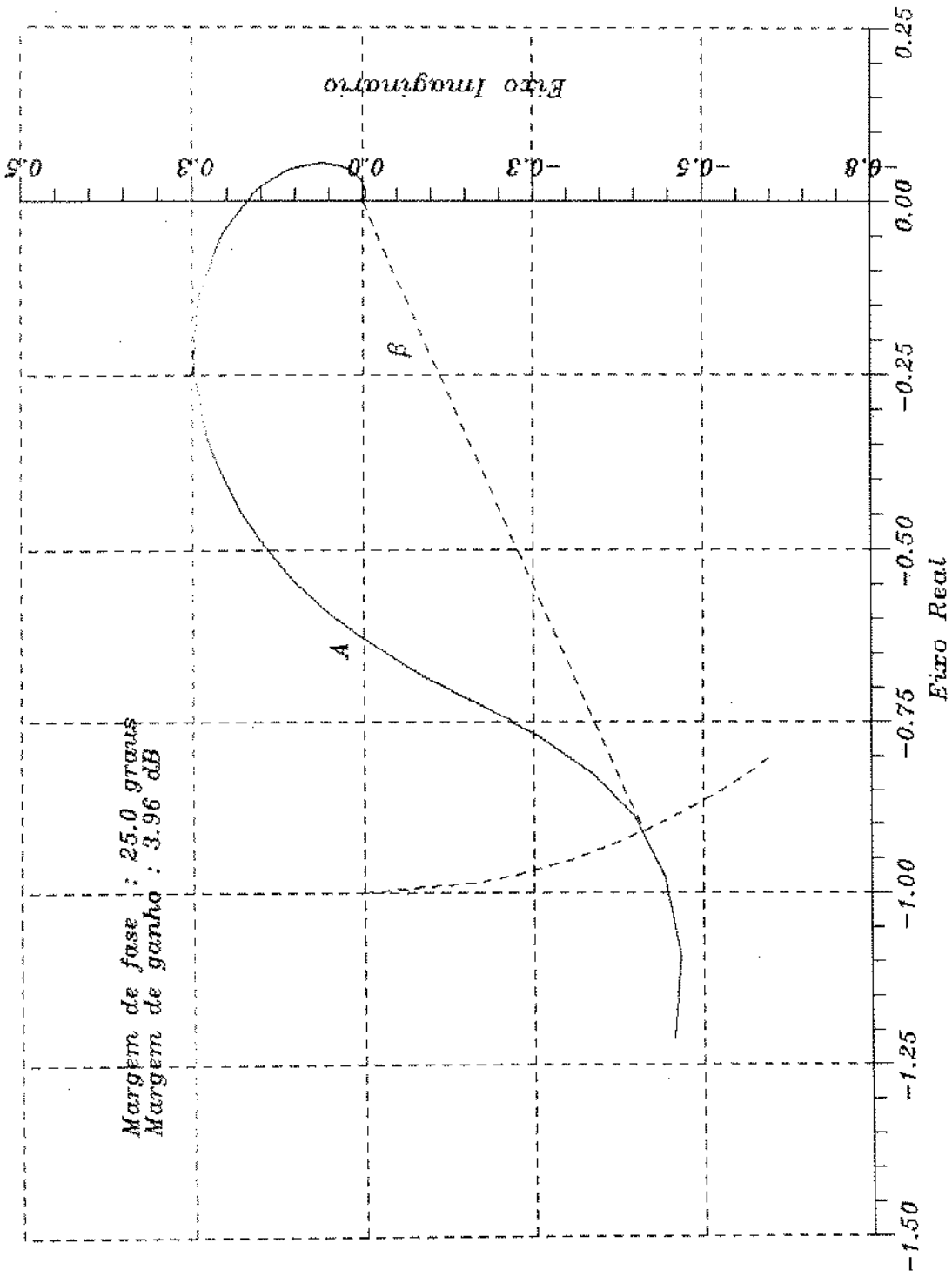


Figura no 4.9 : grafico de estabilidade do sistema proposto

em caráter transitório, devolvendo-se ao controlador a parcela de estabilidade perdida através de um retorno ao sistema original, após o giro. Importa, no entanto, buscar um equilíbrio satisfatório entre o que é perdido em estabilidade e o que é ganho em rapidez de resposta.

4.5 - Análise no domínio do tempo

Nas análises no domínio do tempo, utilizou-se entradas tipo rampa unitária, onde o valor da referência varia continuamente e com velocidade constante, uma vez que a modelagem do problema em questão, embora trate de variações súbitas no valor da referência angular, leva em conta que é o processo de giro, que sempre demanda um período de tempo para que se complete, que introduz as perturbações nos eixos X e Y que levam, por sua vez, à perda de posição. O distúrbio de posição causado pelo giro, não pode ser, assim, modelado como uma entrada em degrau, sendo que um modelo mais coerente seria dado por uma série de degraus, correspondentes à cada incremento angular conferido ao navio, durante a manobra em questão, o que pode ser aproximado por uma entrada em rampa. O comportamento dos diferentes sistemas analisados, no domínio do tempo, é ainda estudado no capítulo subsequente, valendo-se de técnicas de simulação.

4.5.1 - Resposta no domínio do tempo do sistema existente

Os critérios para análise do comportamento dos sistemas de controle, foram: o tempo necessário para que a resposta de um dado sistema alcance a rampa unitária, o valor do sobresinal subsequente e o tempo requerido para que se atinja o regime permanente, ou seja: até a estabilização do sinal, quando este tende a ficar paralelo à rampa, tendendo à esta sem apresentar as oscilações do período transitório.

Para o sistema existente, figura 4.10, o tempo necessário para que a resposta atinja a rampa unitária é de 117 segundos, com sobresinal de 19.1 pés ocorrendo após 205 segundos. O tempo de estabilização é de cerca de 300 segundos, apresentando um erro de regime de 9.4 pés acima da linha de rampa unitária.

O eixo de amplitude de resposta apresenta valores em pés², já que o controlador HONEYWELL utiliza como sistema de unidades o padrão americano; estando os valores de ganho e os parâmetros de filtragem ajustados para os valores de massa da embarcação, empuxo dos propulsores e força de vento, em tal sistema de unidades.

4.5.2 - Resposta no domínio do tempo do sistema modificado

Para o sistema modificado, figura 4.11, o tempo requerido para que a resposta alcance a rampa unitária é de 40

² Unidade de medida Britânica: 1 pé = 0,3048 m.

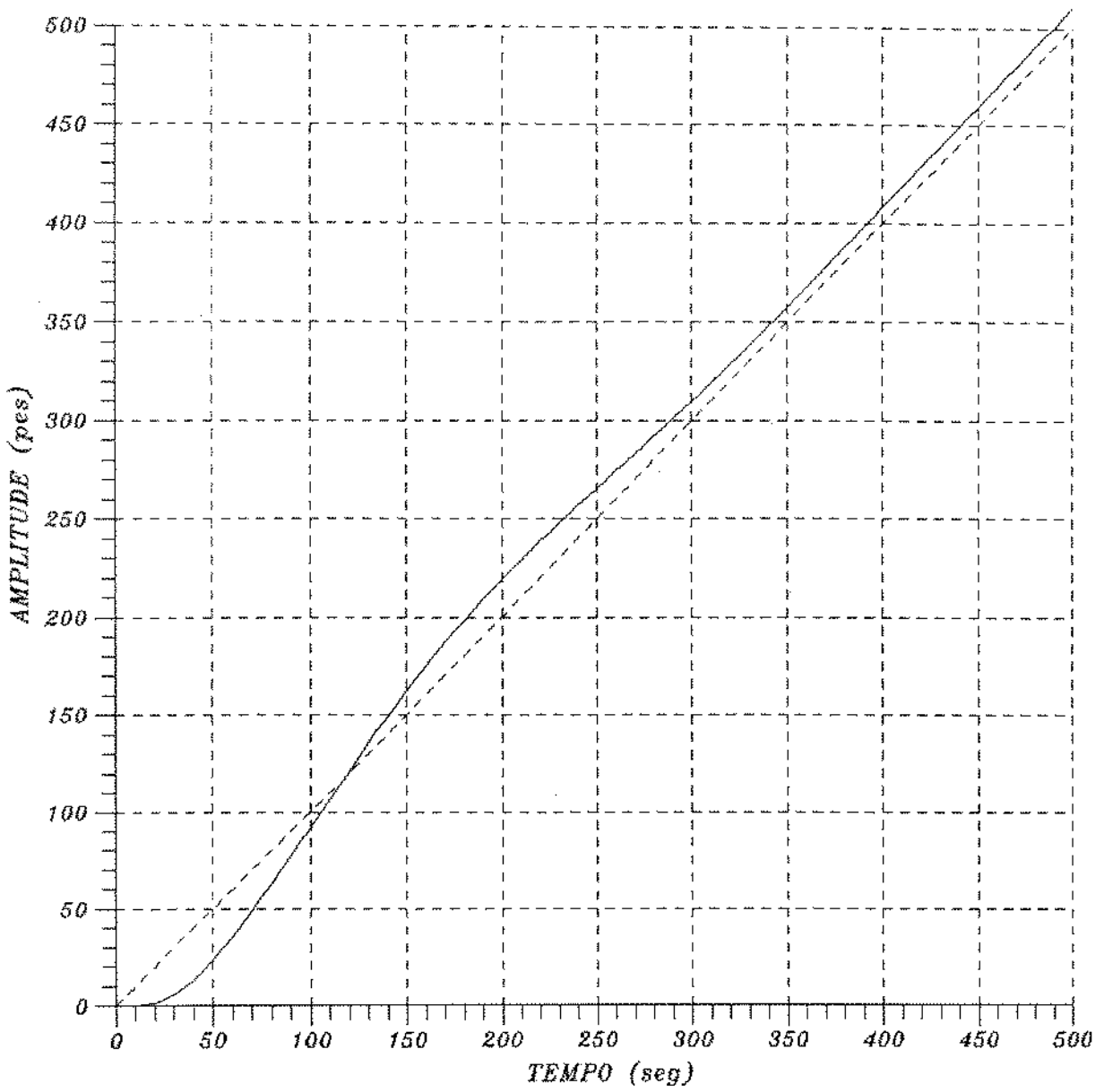


Figura 4.10 : Resposta a uma entrada em rampa unitaria do sistema Existente

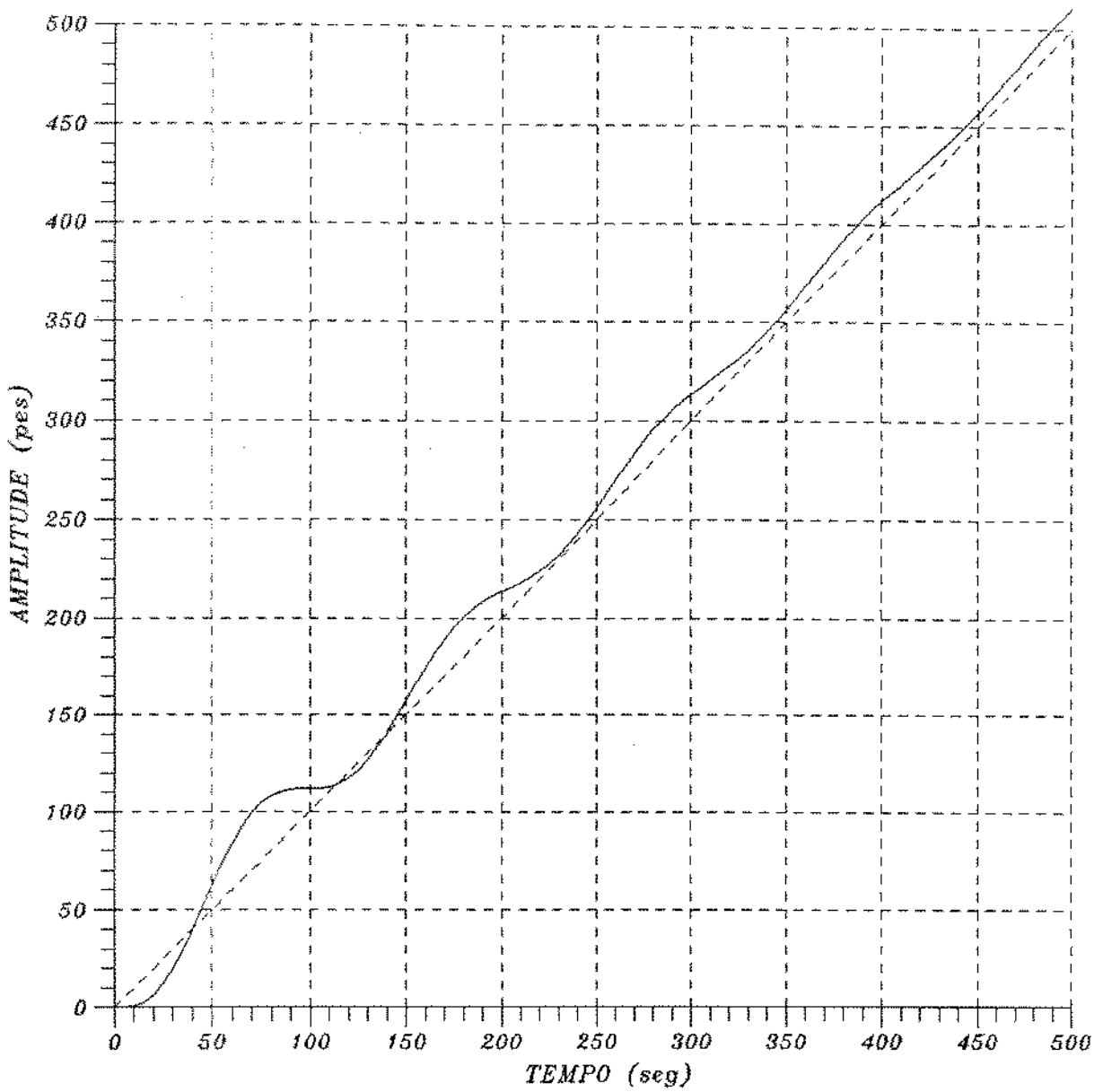


Figura 4.11 : Resposta a uma entrada em rampa unitária do sistema Modificado

segundos, com sobresinal de 29.3 pés ocorrendo após 75 segundos. O tempo de estabilização é de cerca de 400 segundos, prejudicado pelo comportamento bastante oscilatório da curva de resposta do sistema. Também apresenta erro de regime de 9.4 pés.

Em relação ao sistema não modificado, verifica-se que o aumento na rigidez de controle proporcionou uma redução de 65.8% no tempo de subida da resposta transitória. A esta redução deve ser creditada a melhora no desempenho do sistema, durante as operações de mudança de aproamento.

4.5.3 - Resposta no domínio do tempo do sistema proposto

Para o sistema proposto, figura 4.12, o tempo necessário para que a resposta atinja a rampa unitária é de 52 segundos, com sobresinal de 25.1 unidades, ocorrendo após 100 segundos. O tempo de estabilização é em torno de 200 segundos, apresentando o mesmo erro estacionário dos outros sistemas: 9.4 unidades. A curva de resposta não apresenta comportamento tão oscilatório quanto o do sistema modificado, estabilizando em tempo menor que o sistema existente. A redução no tempo de subida é de 55.6%, em relação ao sistema original não-modificado, explicando-se o melhor desempenho do sistema proposto pelo seu menor tempo de estabilização, que é 33.3% menor.

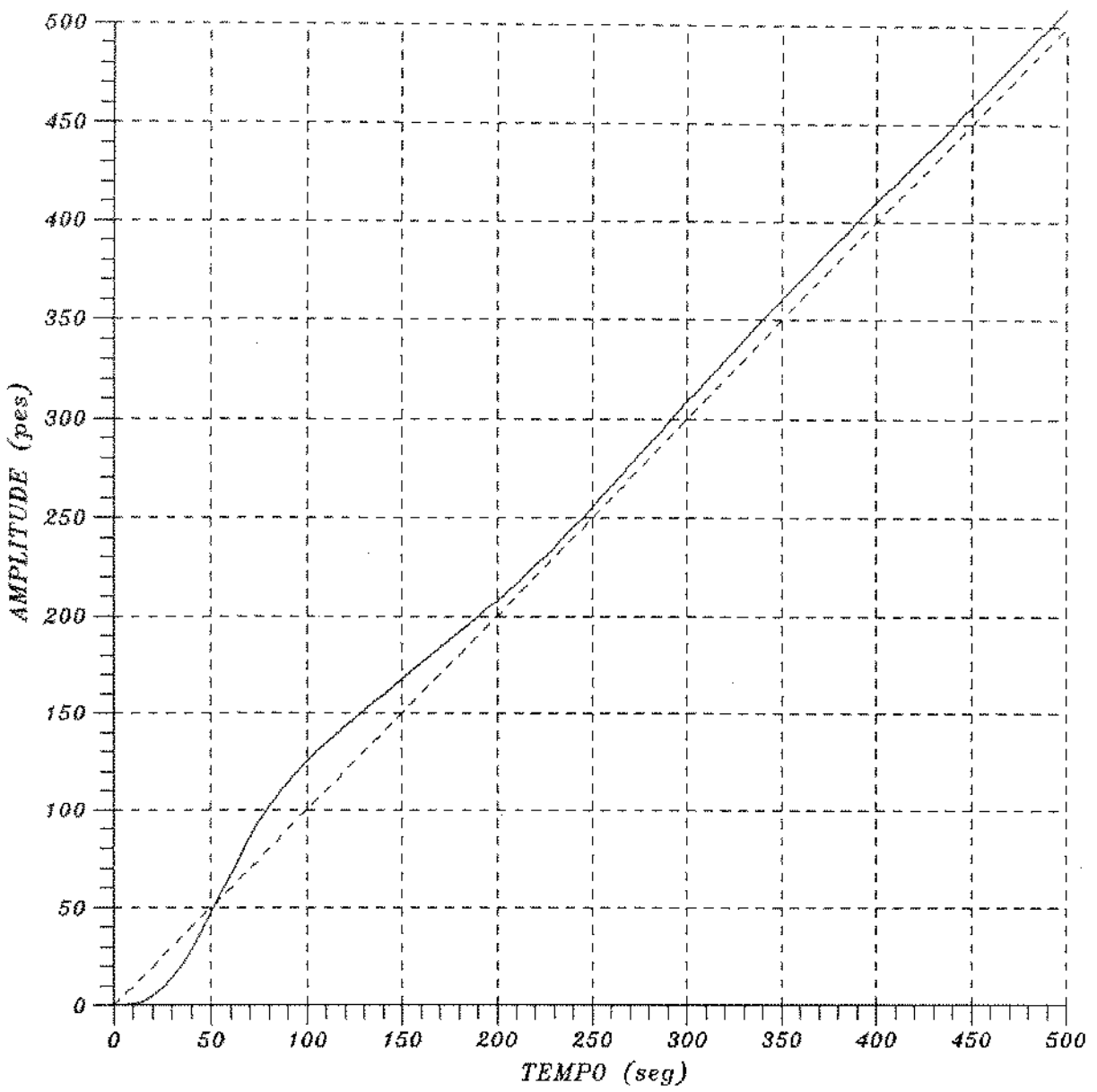


Figura 4.12 : Resposta a uma entrada em rampa unitária do sistema Proposto

4.6 - Comparação entre os sistemas

Com o objetivo de reunir os resultados obtidos e, assim, permitir uma melhor análise comparativa dos três sistemas discutidos, apresenta-se a seguir a tabela 4.1.

Sistema	EXISTENTE	MODIFICADO	PROPOSTO
Margem de ganho	8.1 dB	2.2 dB	3.96 dB
Margem de fase	32.8 grs	6.5 grs	25 grs
Tempo de resposta	117 s	40 s	52 s
Sobresinal	19.1	29.3	25.1
Tempo de sobresinal	205 s	75 s	100 s
Tempo de estabiliz.	300 s	400 s	200 s
Erro de regime	9.4	9.4	9.4

TABELA 4.1 - Comparação entre os sistemas analisados

4.7 - Resumo

Neste capítulo apresentou-se a arquitetura dos sistemas de Posicionamento Dinâmico existentes, atualmente, à bordo de navios de exploração de petróleo na Bacia de Campos. Além disso, discutiu-se o mesmo sistema com parâmetros de ganho modificados e modificações no controlador original, no

que se constitui o modelo proposto neste trabalho.

A seguir, foram feitas análises comparativas entre os sistemas, utilizando-se das técnicas de diagrama do Lugar das raízes, para a determinação da influência relativa dos pólos e zeros das funções de transferência de cada sistema, de respostas no domínio da frequência, através de curvas de Nyquist, para que se obtivesse dados comparativos de estabilidade dos diferentes sistemas analisados, e, por fim, de respostas no domínio do tempo, com entradas em rampa unitária, para que se pudesse comparar as respostas transitórias dos diferentes sistemas.

CAPÍTULO V

ANÁLISE E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

5.1 - Introdução

Neste capítulo, o desempenho dos sistemas descritos no capítulo anterior são analisados utilizando-se o simulador discutido no capítulo III. Na primeira seção, descreve-se os critérios para a escolha dos diferentes modos de aproamento e condições de mar utilizados, tendo em vista ser impraticável testar-se os sistemas segundo as infinitas combinações possíveis de condições ambientais e modos de aproamento. Na seção seguinte são apresentados e discutidos os gráficos com os resultados das simulações realizadas. Por fim, na última seção do capítulo, discute-se os efeitos na modulação dos propulsores, causados por cada um dos sistemas apresentados, uma vez que o aumento da rigidez¹ introduzido no sistema de controle acarreta, em contrapartida, uma maior atividade do sistema de propulsão.

¹ Aumento do valor da constante de ganho global do sistema.

5.2 - Escolha das condições de mar de simulação

Durante o desenvolvimento do controlador proposto, verificou-se que a escolha dos parâmetros de ganho do sistema dependiam, em certo grau, das condições ambientais vigentes, ou seja: a minimização de um índice de desempenho para um dado estado de mar revelava-se não mínima em outras condições.

Em vista disso, e visando verificar se os sistemas apresentavam comportamento semelhantes em diferentes condições ambientais, foi preciso definir quais, dentre as diversas possibilidades de carregamento ambiental, seriam as intensidades e direções de vento, correnteza e ondas, mais representativas para o problema em questão.

Partindo das considerações de projeto do navio estudado, procurou-se determinar, primeiramente, valores máximos para as intensidades de vento, ondas e correntes marítimas, sem considerações de direção destas forças.

Os dados de projeto disponíveis para o Sedco-472 [19], consistem em gráficos de dimensionamento estático dos propulsores [1]. Os dados para a obtenção destas curvas, consistem em forças de arrasto estático causadas pelo ambiente e forças estáticas de propulsão, ou seja: com a embarcação estacionária e máximo empuxo na direção do carregamento.

O sistema de posicionamento dinâmico deve ser capaz de manter o navio dentro de um círculo de raio igual à 6% da lâmina d'água, em locações com profundidades de até 1830 m, nas

seguintes condições meteorológicas:

- o Ventos de velocidade média igual à 18.0 m/s (35 nós), com rajadas de até 25.7 m/s (50 nós) durante períodos de 10 segundos. Em qualquer direção dentro de um setor de $\pm 45^\circ$ em relação à proa da embarcação.
- o Correntes marinhas coincidentes com a direção do vento e intensidade de 0.772 m/s (1.50 nós).
- o Ondas com altura significativa de 3.0 m (10 pés) e período entre 6.0 e 14.0 segundos, com atraso de fase, em relação ao vento, de até 90° .

Nas simulações efetuadas, o vento possui caráter constante, por simplicidade, já que os esforços assim gerados, possuem compensação ativa no controlador (alimentação em avanço). Em vista disso, adotou-se como valor médio para a velocidade de vento, independentemente de direção, 18.0 m/s (35 nós). Também pelos mesmos motivos, utilizou-se 0.772 m/s (1.50 nós) para velocidade de correntes e 3.0 m para altura significativa de onda, geradas a partir do espectro de Bretschneider [1], com número de partições² igual à 40, sem se considerar direção.

Uma vez definidas as intensidades dos elementos meteorológicos, foi preciso analisar as diferentes combinações de direção que estes podem apresentar, com vistas às piores situações em que procede-se à uma mudança de aproamento: giros

² Número de vezes em que divide-se o eixo de frequências, para construção do espectro.

de 90° e de 180°.

A seguir foi necessário estabelecer critérios de ordem prática, na escolha das situações de carregamento. Estes foram:

o Simetria em relação ao eixo longitudinal do navio

Significando que uma configuração de forças agindo à bombordo produziria resultados iguais se aplicada à estibordo. O que assemelha-se razoável, dadas as pequenas diferenças existentes nas unidades em operação. Quanto ao eixo transversal, a simetria não é possível, pois o Sedco-472 fornece empuxo à ré de valor máximo igual à apenas 60% do valor fornecido à vante.

o Impraticabilidade de situações em que a correnteza atinja o navio pela pôpa

Nestas condições, admitindo-se posicionamento acústico, a corrente tem o efeito de carrear bôlhas de ar, geradas pela ação das hélices principais, até os hidrofones situados à meia-nau. Isso pode ocasionar mudanças de densidade na água, bloqueando a transmissão dos emissores e causando a perda de informação de posição por via acústica, principal tipo de sensor utilizado. Assim, por questão de segurança, o operador procurará evitar que a manutenção de posição se dê com correntes marinhas vindas de ré.

Há que se ressaltar, todavia, que se as condições de vento forem amenas, é possível trabalhar com correnteza de pôpa. Ocorre que a formação de bôlhas pela ação das hélices

principais passa a ser importante, apenas quando a demanda de empuxo destes propulsores ultrapassa, em média, 40% da potência máxima. Este fato provém de observações dos operadores³ de posicionamento dinâmico das unidades classe Pelican⁴, e depende, obviamente, da forma dos impulsores e do empuxo máximo. Desta forma, aproveitando-se de uma configuração tal que o vento atinja o navio pela proa e a correnteza pela pôpa, economiza-se combustível já que as forças de vento são parcialmente compensadas pela correnteza.

o Dificuldades de operações de perfuração com o navio não orientado com a direção das ondas

Quando perfura-se um poço de petróleo, é necessário descer diversos tipos de tubulações, em diversas operações que se encadeiam. Todas as tubulações descidas precisam ser conectados em posição vertical. As cargas são grandes e, se houver grandes amplitudes do movimento de roll (maiores que 5°), as operações de manuseio e conexão dos tubos ficam muito prejudicadas e aumentam os riscos de acidentes. Via de regra, isso ocorre devido a um desalinhamento da embarcação com a direção das ondas que, atingindo o navio de través, causam excessiva rolagem. Pressupõe-se portanto, que o operador mantenha o navio sempre aproado contra as ondas.

Reunindo estas diretivas e examinando caso por caso,

³ Fonte: UME (Consórcio brasileiro de empresas de perfuração de petróleo formado por: UNAP, MONTREAL e ETESCO), navio-sonda PACNORSE-1.

⁴ Navio-sonda de perfuração dotado de posicionamento dinâmico. Seu projeto foi utilizado para a construção de vários navios, cuja classe recebeu seu nome.

foram escolhidas as situações-tipo listadas na Tabela 5.1.

CONDIÇÃO MAR número	DIREÇÃO (graus)		
	VENTO 18.0 m/s	ONDAS 3.0 m	CORRENTEZA 0.772 m/s
1	90	000	000
2	90	180	045
3	90	000	090
4	90	000	225
5	90	180	135
6	180	180	090
7	180	180	135

TABELA 5.1 - Condições de mar escolhidas para as simulações

5.3 - Resultados das simulações

As principais diferenças entre os gráficos com os resultados obtidos nas simulações, encontram-se reunidas na tabela 5.2, onde, para cada diagrama, indica-se o maior afastamento polar e a taxa de giro utilizada. Os limites de excursão para a embarcação são:

- o Alarme AMARELO: é atingido quando o navio afasta-se, radialmente, mais que 2% da lâmina d'água. Para a profundidade utilizada, 600.0 m, isso significa um afastamento de 12.0 m da posição de referência.

Figura número	Controlador empregado	Cond. mar número	Máx. afast polar (m)	Taxa média de giro (grs/min)
5.1	Existente degrau	1	45.8	66.2
5.2	Existente rampa	1	22.7	3.5
5.3	Modificado degrau	1	15.7	66.4
5.4	Proposto rampa	1	7.0	64.9
5.5	Existente degrau	2	37.2	66.5
5.6	Existente rampa	2	10.9	3.5
5.7	Modificado degrau	2	16.5	66.6
5.8	Proposto rampa	2	5.9	65.5
5.9	Existente degrau	3	13.7	65.0
5.10	Existente rampa	3	7.1	3.5
5.11	Modificado degrau	3	10.1	65.3
5.12	Proposto rampa	3	2.8	70.9
5.13	Existente degrau	4	20.5	63.7
5.14	Existente rampa	4	11.8	3.2
5.15	Modificado degrau	4	16.5	63.2
5.16	Proposto rampa	4	2.6	65.0
5.17	Existente degrau	5	35.0	66.8
5.18	Existente rampa	5	18.5	3.4
5.19	Modificado degrau	5	8.3	67.0
5.20	Proposto rampa	5	5.7	71.9
5.21	Existente degrau	6	39.0	89.0
5.22	Existente rampa	6	15.3	3.4
5.23	Modificado degrau	6	26.8	87.9
5.24	Proposto rampa	6	7.2	82.9
5.25	Existente degrau	7	38.1	88.6
5.26	Existente rampa	7	17.9	3.5
5.27	Modificado degrau	7	31.8	86.5
5.28	Proposto rampa	7	5.2	82.1

TABELA 5.2 - Resultados obtidos nas simulações realizadas

o Alarme VERMELHO: é atingido para excursões maiores que 5% da lâmina d'água, ou seja: afastamentos maiores que 30.0 m, para a profundidade de 600 m. Nas figuras apresentadas foram incluídas linhas demarcatórias dos afastamentos correspondentes aos alarmes amarelo e vermelho.

Escolheu-se os modos de aproamento segundo entrada

em degrau e rampa, para as simulações com o sistema existente, com o objetivo de mostrar as perdas de posição excessivas, decorrentes de mudanças de aproamento feitas rapidamente e, por outro lado, comparar tais afastamentos com aqueles obtidos com o mesmo sistema submetido à entradas em rampa, com pequenas taxas de giro, de forma semelhante às dos casos reais. Para o sistema modificado o objetivo era verificar o quanto era possível reduzir, nos valores das excursões, em relação ao desempenho do sistema existente, escolhendo-se, assim, o giro segundo uma entrada em degrau na referência angular. Para o sistema proposto, as simulações foram realizadas fornecendo-se entradas em rampa (modelo de referência), pois o objetivo era verificar o quanto a embarcação se afastaria da locação, se submetida às taxas de giro equivalentes às do sistema existente em giro rápido.

A primeira simulação é apresentada na figura 5.1, onde a condição de mar é a de no. 1 da tabela 5.1, ou seja: ventos com intensidade de 18.0 m/s (35 nós) e direção de 090° , ondas com altura significativa de 3.0 metros e vindas de 000° e correnteza de 0.772 m/s (1.5 nós) com direção de 000° .

O sistema de controle empregado é o sistema existente, sendo que a mudança de aproamento é de 090° e realizada em modo automático, ou seja: fornece-se ao controlador o novo valor de referência para o aproamento e este realiza o giro segundo uma entrada em degrau. O navio, inicialmente, encontra-se no azimute de 000° .

O comportamento da embarcação no eixo X

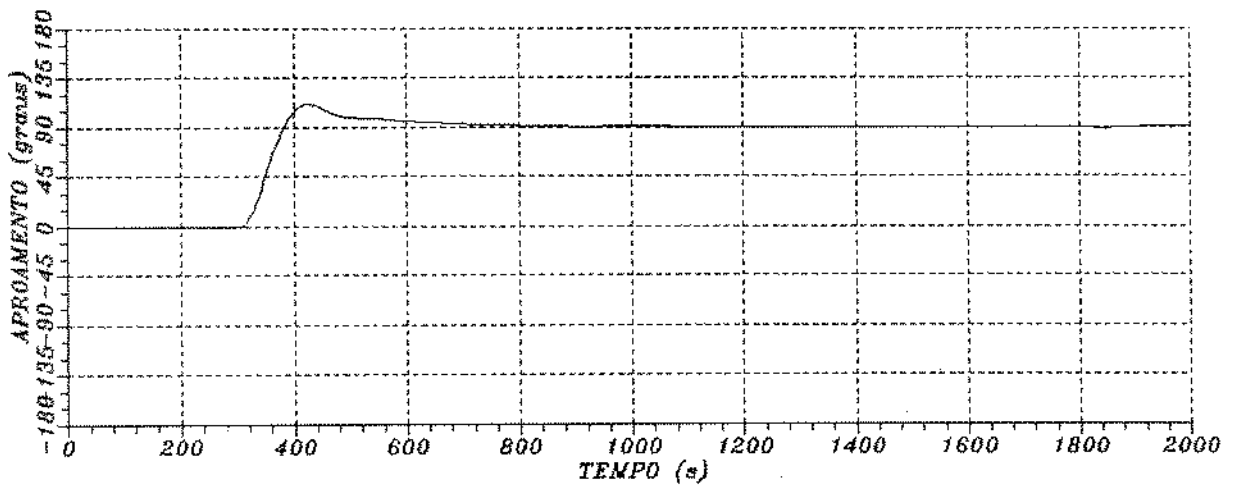
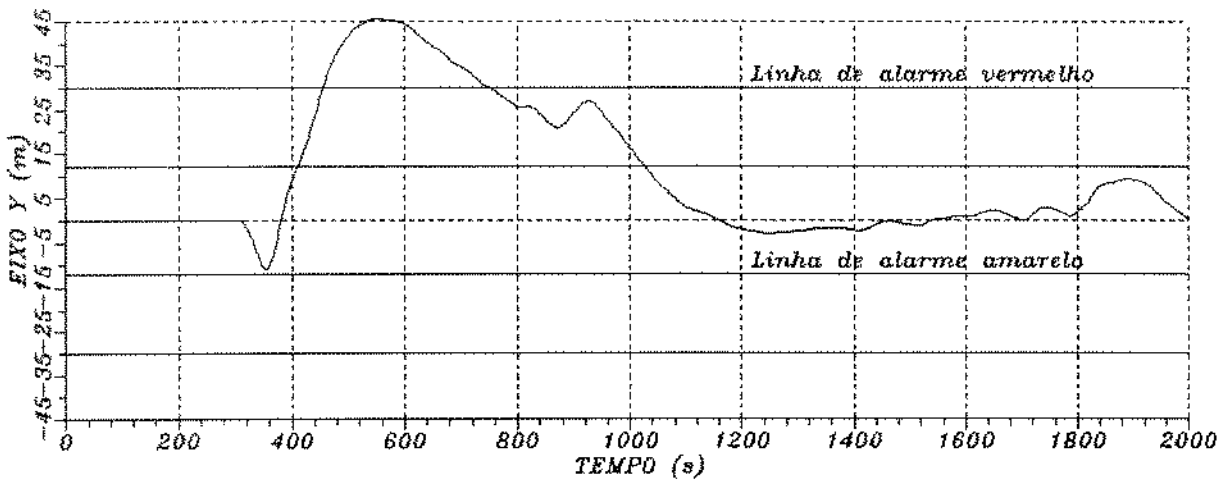
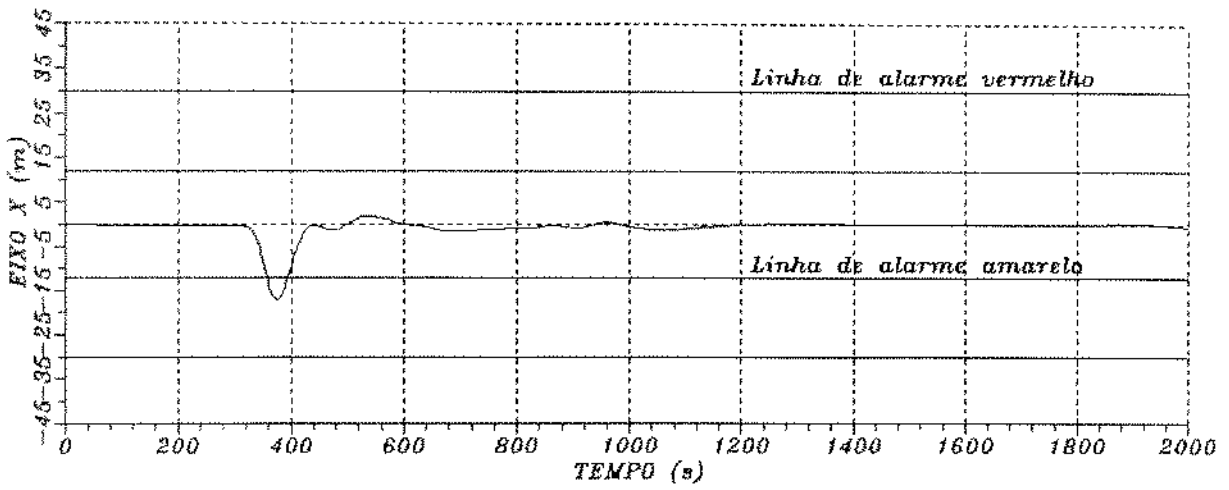


Fig. 5.1: Ambiente 1. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau

(longitudinal), ao iniciar o giro, apresenta uma perda de posição negativa, derivando à ré, já que, ao girar, passa a enfrentar uma componente da força de vento pela proa e não dispõe de um valor significativo de comando de empuxo nesta direção, pois o termo integral em X é negligenciável.

Os maiores afastamentos, tipicamente, ocorrem no eixo Y, onde o navio perde, à princípio, posição à bombordo (negativo) devido à diminuição da potência disponível neste eixo, pois o controlador utiliza parte do empuxo lateral para satisfazer as necessidades de momento, uma vez que o eixo de aproamento possui a mais alta prioridade na distribuição do empuxo disponível. O termo integral em Y, no entanto, apresenta um valor alto, já que a força de vento, antes do giro, atuava exclusivamente sobre este eixo. Desta forma, ao girar, a componente sobre o bordo do navio diminui com velocidade superior àquela com que o controlador ajusta o termo integral em Y, fazendo com que o empuxo comandado empurre o navio para estibordo (positivo), perdendo posição.

Com o aumento dos afastamentos, os termos proporcional e derivativo restabelecem o equilíbrio de forças, sem que a embarcação retorne à locação de imediato, o que se dá apenas após a lenta diminuição do termo integral.

Os valores dos afastamentos máximos polares, ou seja: as distâncias radiais, de todas as simulações realizadas, encontram-se reunidos na tabela 5.2, onde apresenta-se ainda a taxa média de giro para cada caso.

O comportamento do eixo Z demonstra quão rapidamente

pode ser feita uma mudança de aproamento, sem que se considere a perda de posição envolvida.

A figura 5.2 apresenta simulação feita para o caso em que ocorre mudança de aproamento segundo um modelo de referência, ou entrada em rampa, onde, com uma taxa de giro reduzida, o navio muda de direção continuamente em um tempo muito maior, permitindo um ajuste mais ordenado dos termos integrais. As condições de mar são as mesmas da simulação anterior, o mesmo ocorrendo com o controlador empregado, que é o que equipa a unidade existente, que opera com taxa de giro de 3.6 graus/min, inferior às taxas comumente utilizadas, que situam-se entre 6.0 e 9.0 graus/min.

Atuando desta maneira, o controlador existente consegue limitar de forma significativa os afastamentos da locação, devidos à mudança de aproamento.

No eixo X, nota-se ainda a tendência de perda de posição à ré, porém com valores bastante inferiores aos anteriores (ver tabela 5.2).

Já no eixo Y, não ocorre a perda inicial de posição à bombordo (negativa), uma vez que o controlador, no modo de mudança de aproamento segundo uma entrada em rampa, é informado, em cada instante, de pequenas modificações no valor de referência existente. Desta forma, as necessidades de momento para a realização do giro são pequenas, dispondo-se de empuxo suficiente para atender tanto ao eixo Z quanto ao eixo Y. Assim, a perda de posição à estibordo deste último, dá-se apenas devido ao lento processo de ajuste do seu termo

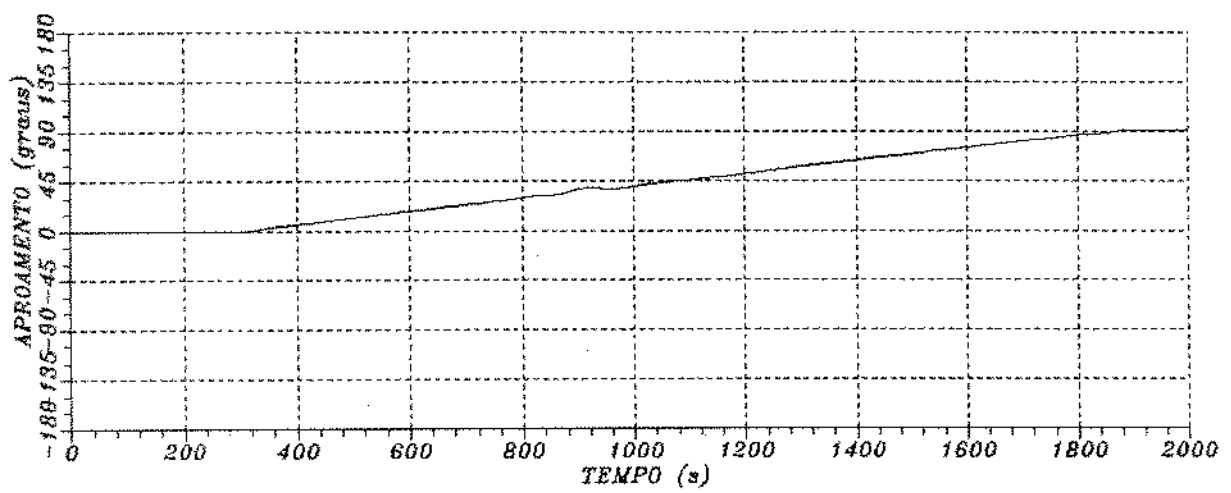
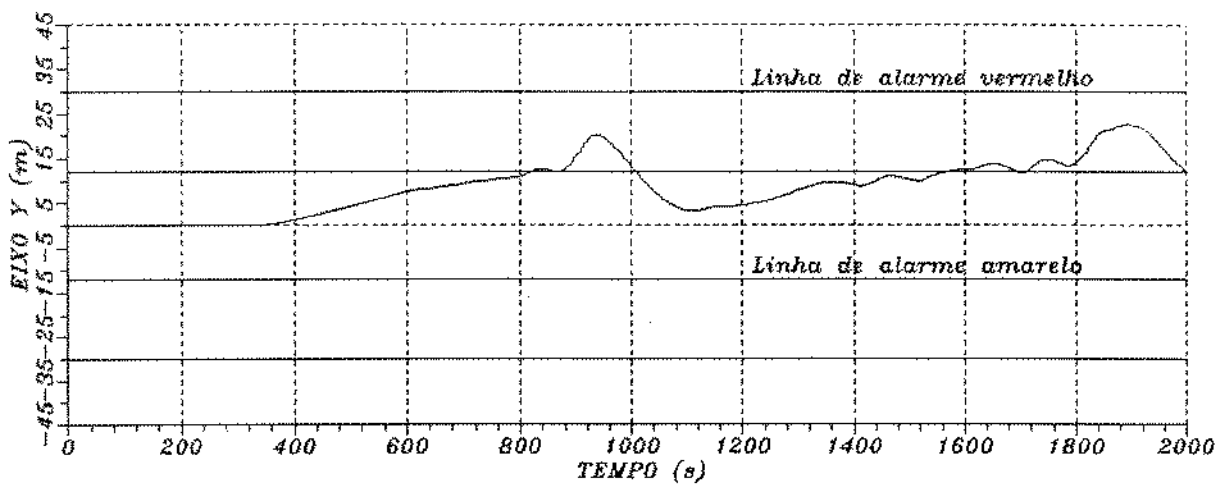
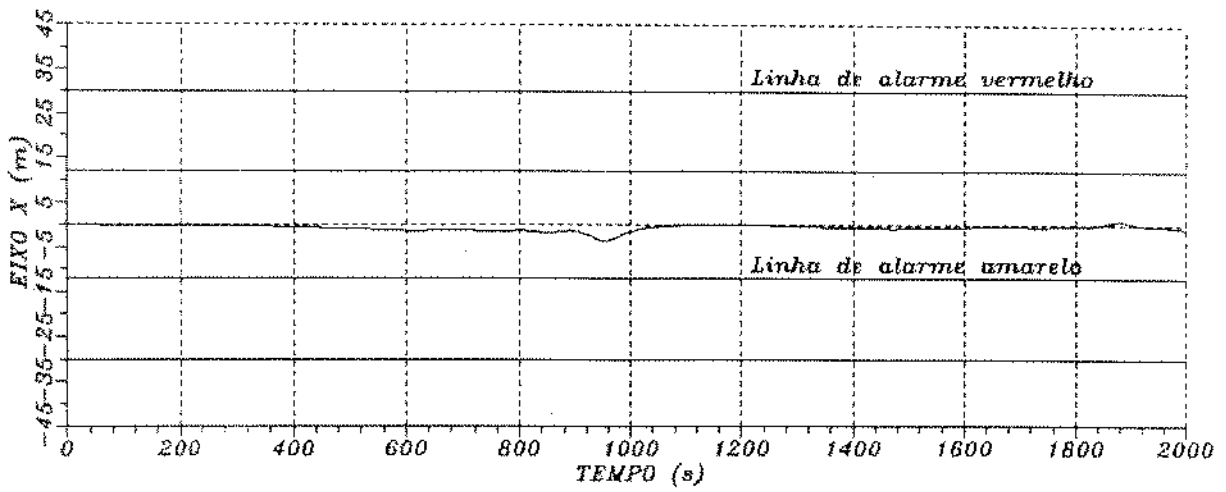


Fig. 5.2: Ambiente 1. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa

integral, apresentando magnitude de afastamentos sensivelmente reduzida, devido ao maior tempo disponível para isto: cerca de 1600 segundos (26.7 min).

Na figura 5.3 as forças ambientais também são as mesmas (caso 1 da tabela 5.1), porém o controlador empregado é o do modelo modificado, atuando segundo entrada em degrau.

Observa-se o mesmo comportamento inicial para o eixo X, ou seja: há uma perda de posição à ré, de afastamento um pouco menor devido à maior rigidez de controle, também causada pelo pequeno valor de empuxo comandado pelo termo integral. A sobrelevação à vante, no entanto, é maior devido à uma maior exigência de potência para controle da posição no eixo Y e à prioridade de satisfação de momento no eixo Z, ocorrendo um compromisso melhor de distribuição do empuxo disponível (ver tabela 5.2).

No eixo Y, isto manifesta-se através de afastamentos significativamente menores, permitindo a manutenção da ligação do navio ao poço. O comportamento apresentado mantém o mesmo padrão da simulação com o controlador existente em modo de aproamento segundo entrada em degrau, que ocorre também com o eixo Z.

A figura 5.4 mostra a simulação do navio comandado pelo controlador proposto, submetido à condição ambiental 1, igual às anteriores.

Observa-se, aqui, comportamento de características parecidas às da segunda simulação, feita com o controlador existente em modo de aproamento controlado por modelo de

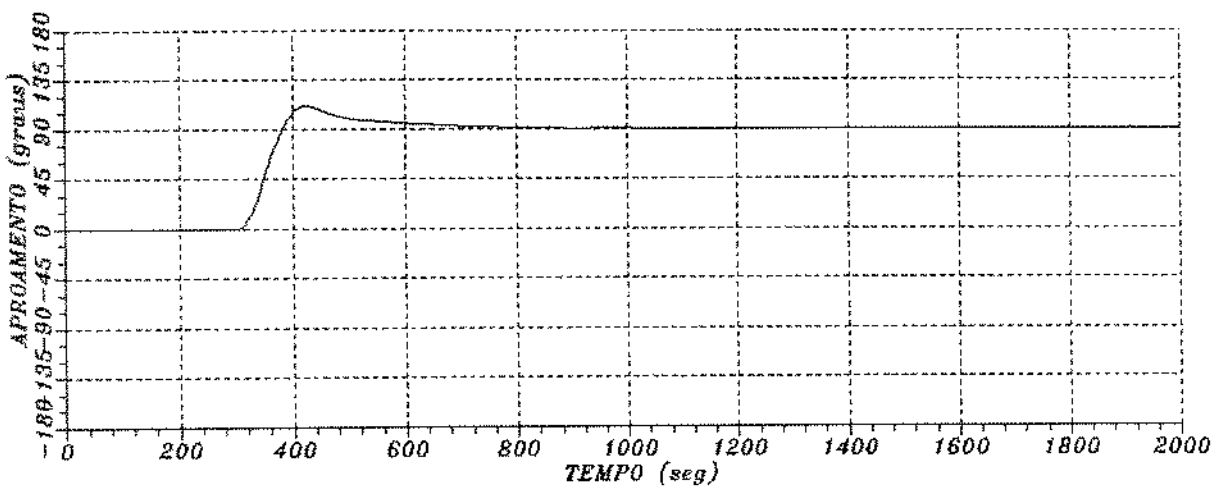
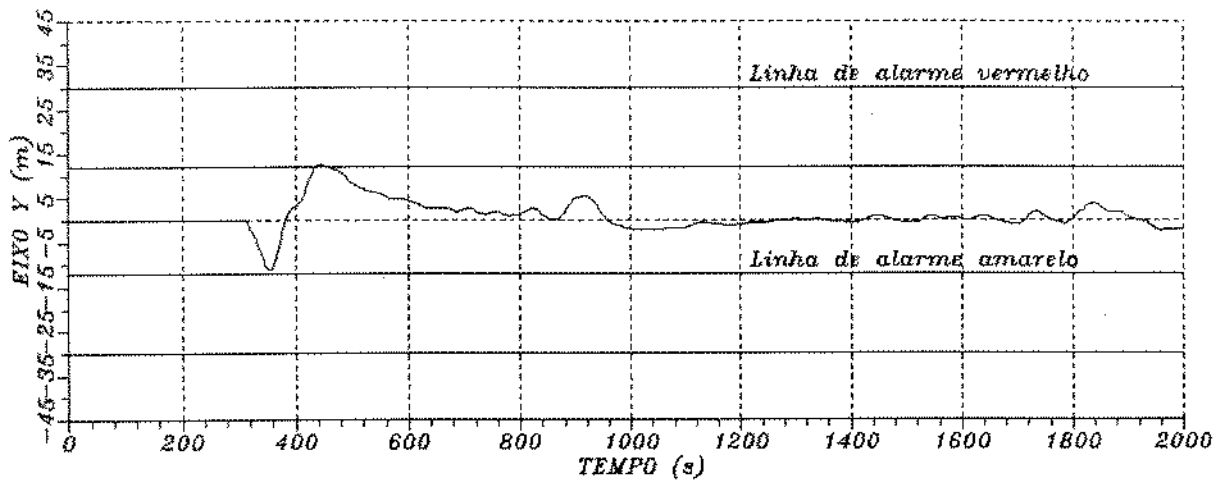
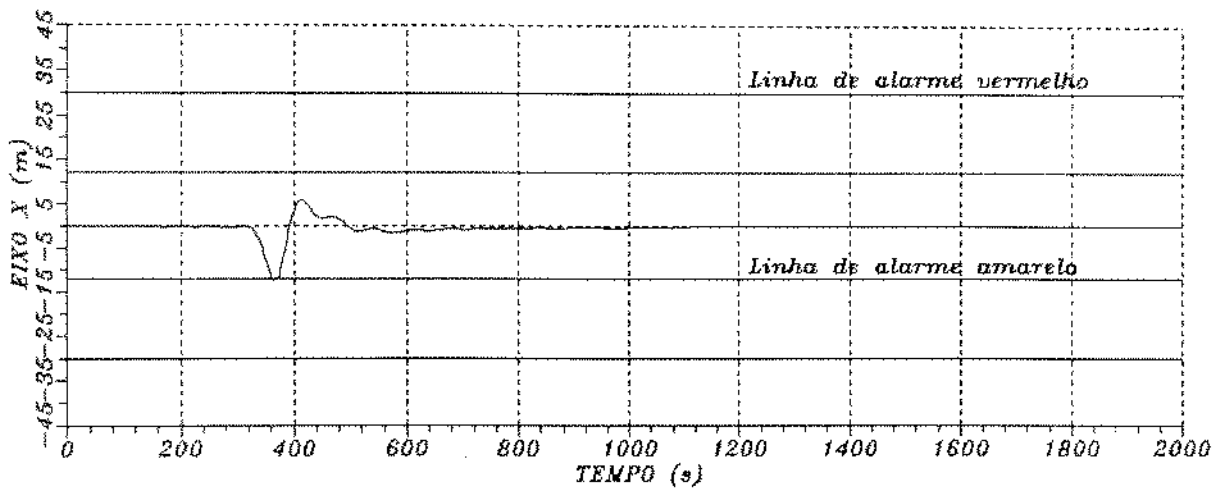


Fig. 5.3: Ambiente 1. Sistema modificado em giro segundo entrada em degrau

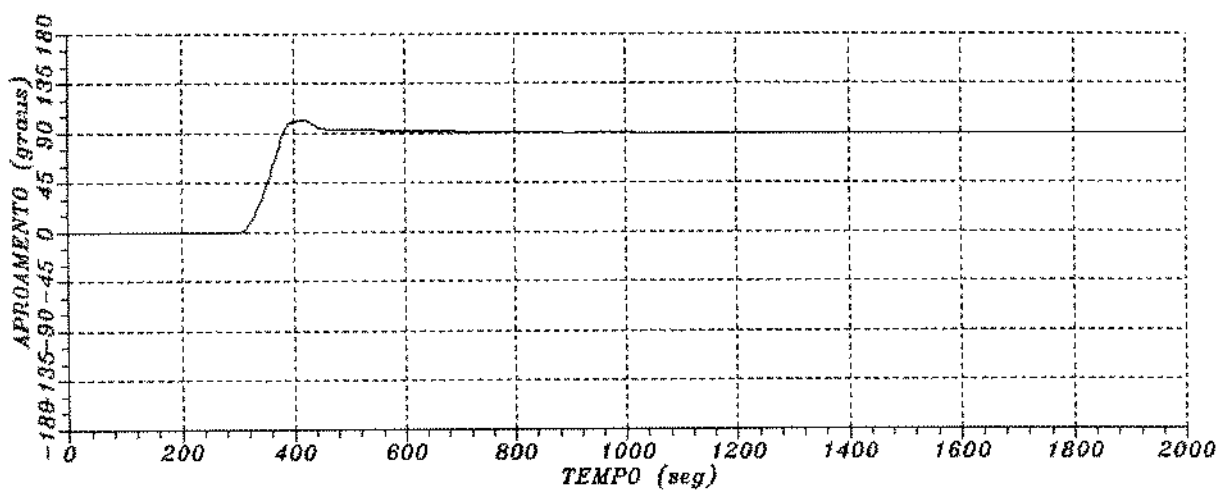
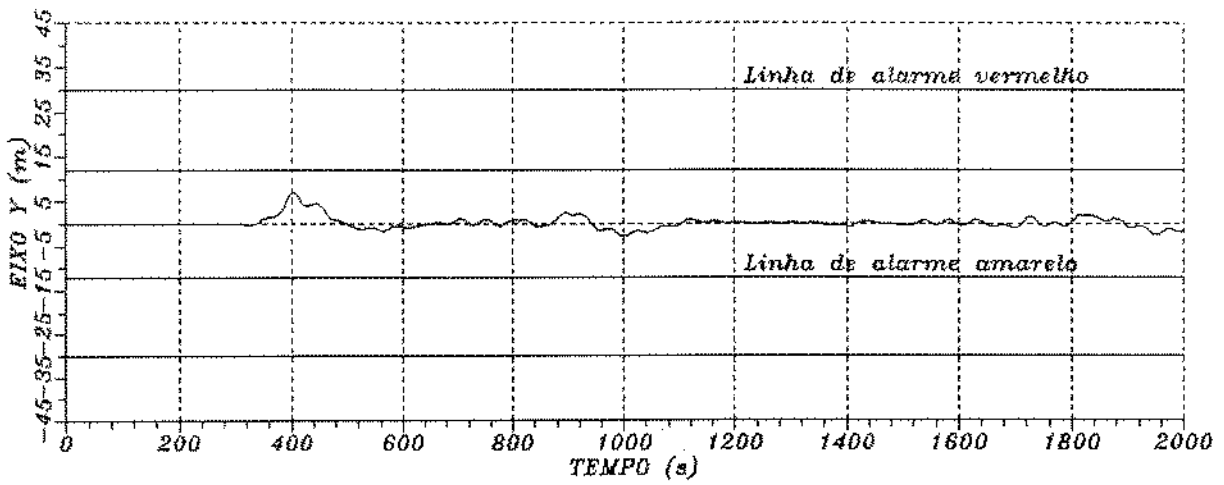
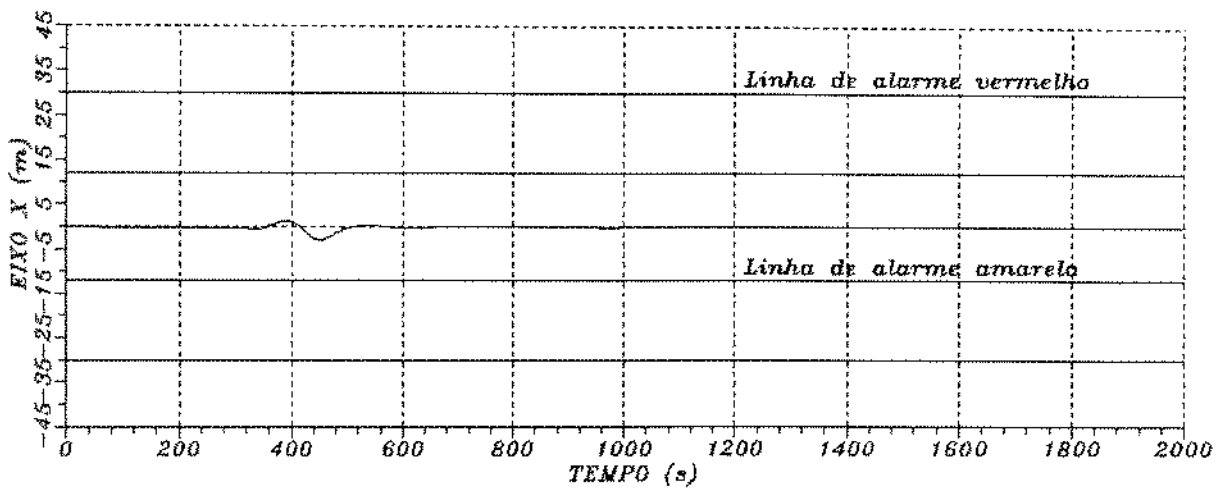


Fig. 5.4 : Ambiente 1. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa.

referência, uma vez que aqui também utiliza-se o mesmo modo de aproamento. No entanto, as taxas de giro obtidas, sem a ocorrência de perda de posição, são equivalentes àquelas apresentadas quando realiza-se a mudança de aproamento segundo uma entrada em degrau (ver tabela 5.2).

No eixo X, os afastamentos são bastante minimizados, enquanto que no eixo Y, os deslocamentos da posição de referência são de tal ordem, que mesmo o alarme amarelo, equivalente à 2% da lâmina d'água, não é acionado. Nota-se, todavia, que a curva traçada pelo navio no eixo Y apresenta comportamento oscilatório, reflexo da maior rigidez de controle, que produz um aumento na modulação dos propulsores [1, 11].

O eixo Z apresenta resposta rápida e sobrepico pequeno, comparando-se ainda com a figura 5.1, obtendo-se assim uma mudança rápida de aproamento com pequenos afastamentos nos eixos X e Y.

Na figura 5.5, a condição ambiental escolhida para a simulação é a de número 2, onde vento, ondas e correnteza apresentam os mesmos valores de intensidade, mantendo-se a direção do vento enquanto as ondas passam a incidir de 180° e a correnteza provém de 045° (ver tabela 5.1). O aproamento inicial da embarcação, como em todas as simulações feitas, é de 000° .

Seguindo-se a mesma ordem de apresentação, a figura 5.5 mostra a simulação realizada para o controlador existente em modo de aproamento segundo entrada em degrau.

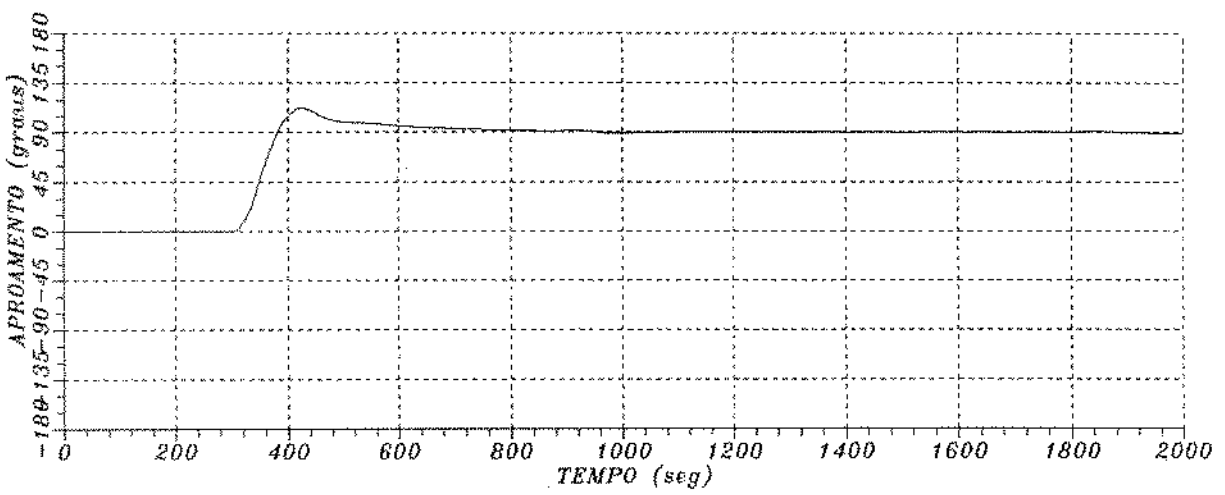
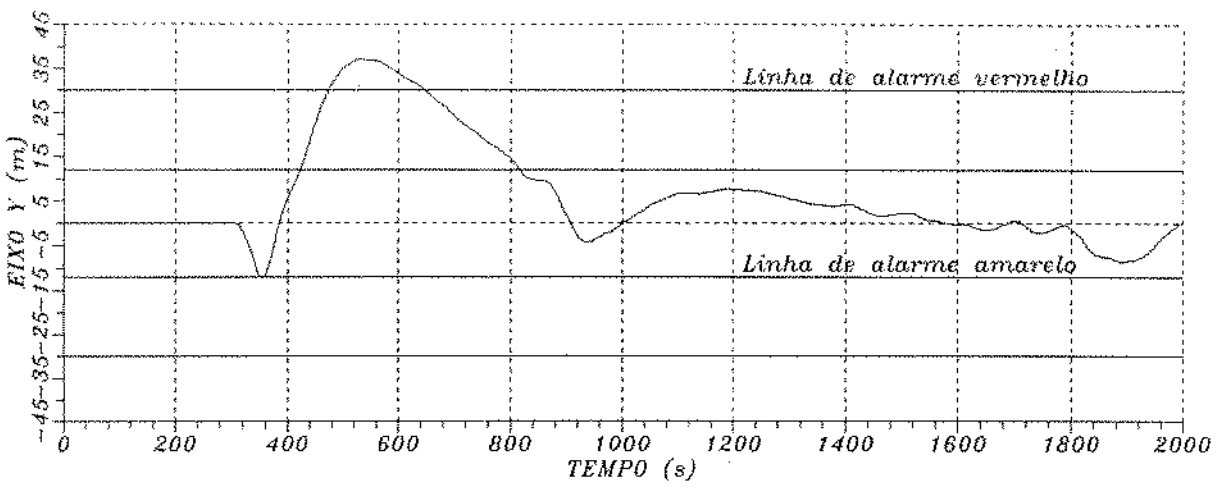
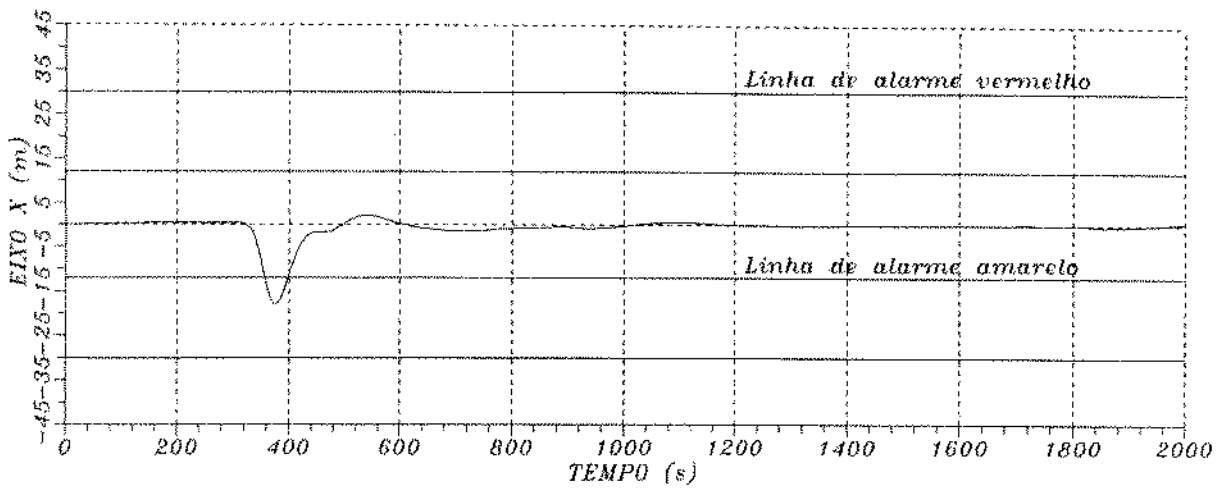


Fig. 5.5: Ambiente 2. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau.

Os resultados obtidos são semelhantes em comportamento e valores de afastamento àqueles observados para a primeira condição de forças ambientais, sendo que os deslocamentos no eixo X são ligeiramente maiores que no caso anterior, uma vez que, ao iniciar-se o giro, além de um maior esforço de vento atuando sobre a proa, soma-se uma componente crescente de correnteza, até 045 graus, com a agravante em relação ao primeiro caso de que, com a direção das ondas de 180 graus, o termo integral em X, inicialmente, é menor.

Para o eixo Y, nota-se um decréscimo do pico de afastamento, em decorrência do cancelamento parcial das forças de onda e de correnteza, após a mudança de aproamento.

Na figura 5.6, o controlador ainda é o existente, agora em modo de aproamento por modelo de referência. O comportamento do eixo X apresenta-se bastante próximo ao da figura 5.2, enquanto que, no eixo Y, a curva é significativamente mais suave, por causa da compensação parcial das forças de onda e de correnteza. O tempo de estabilização, desta forma, também é menor.

A figura 5.7, que trata da simulação realizada com controlador modificado, também na condição de mar 2, revela comportamento bastante semelhante à simulação correspondente, mostrada na figura 5.3, com pequenas diferenças de direção de afastamentos no eixo Y, após o término da manobra de mudança de aproamento, uma vez que a direção das forças de onda difere, de uma para outra simulação, em 180°.

O mesmo pode-se dizer da figura 5.8, feita com

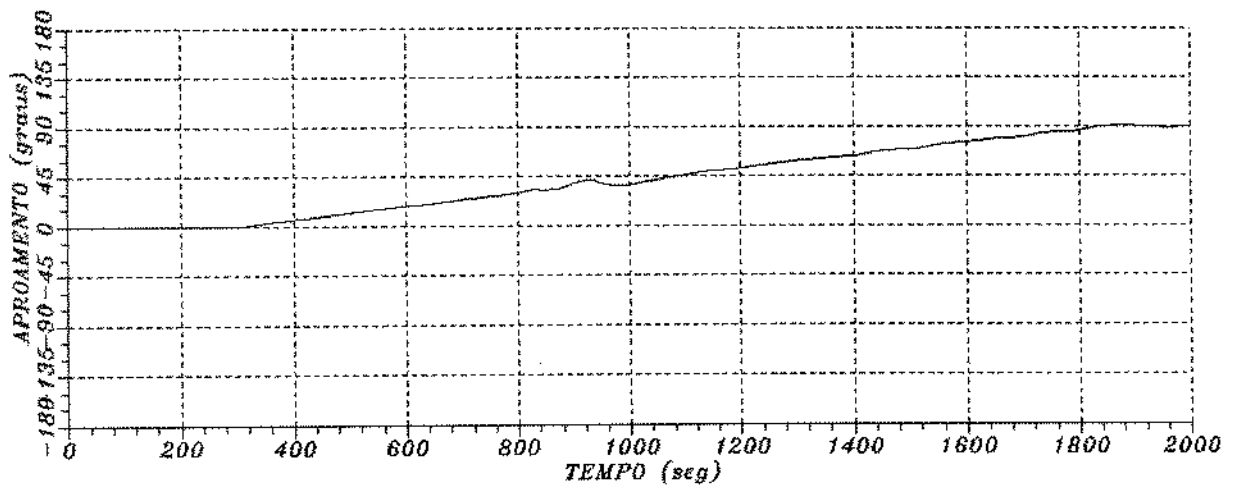
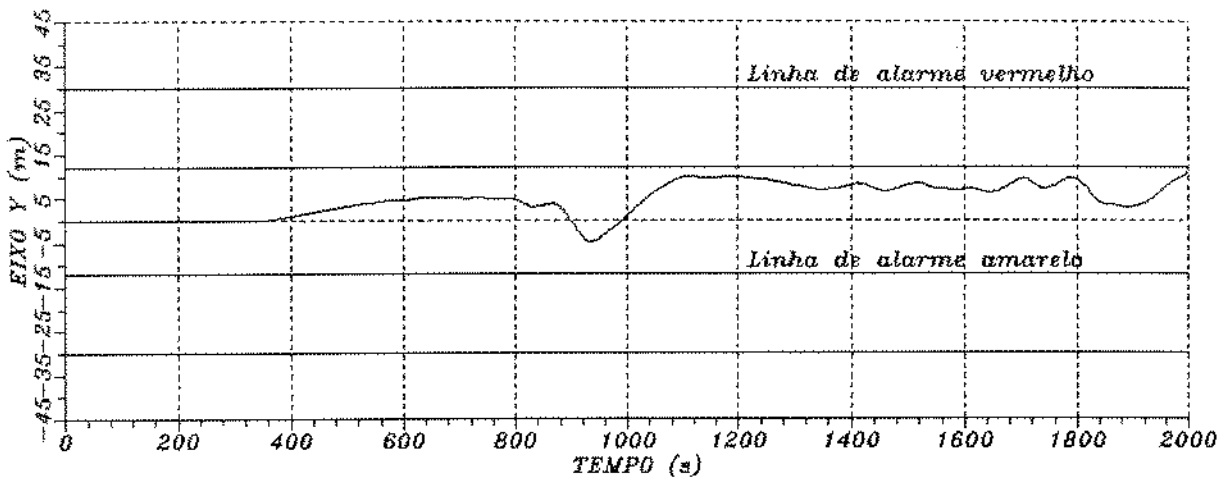
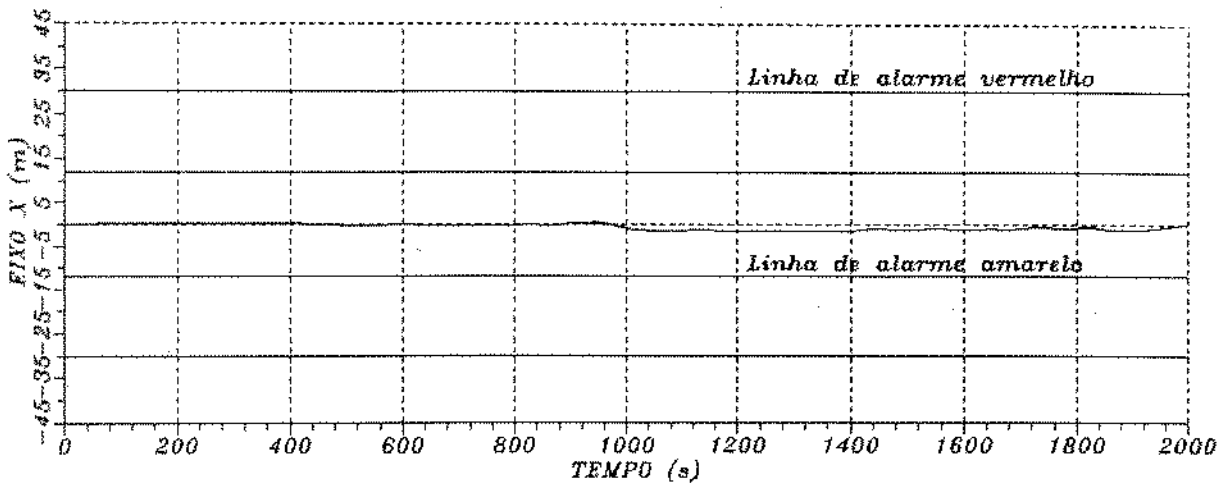


Fig. 5.6 : Ambiente 2. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa

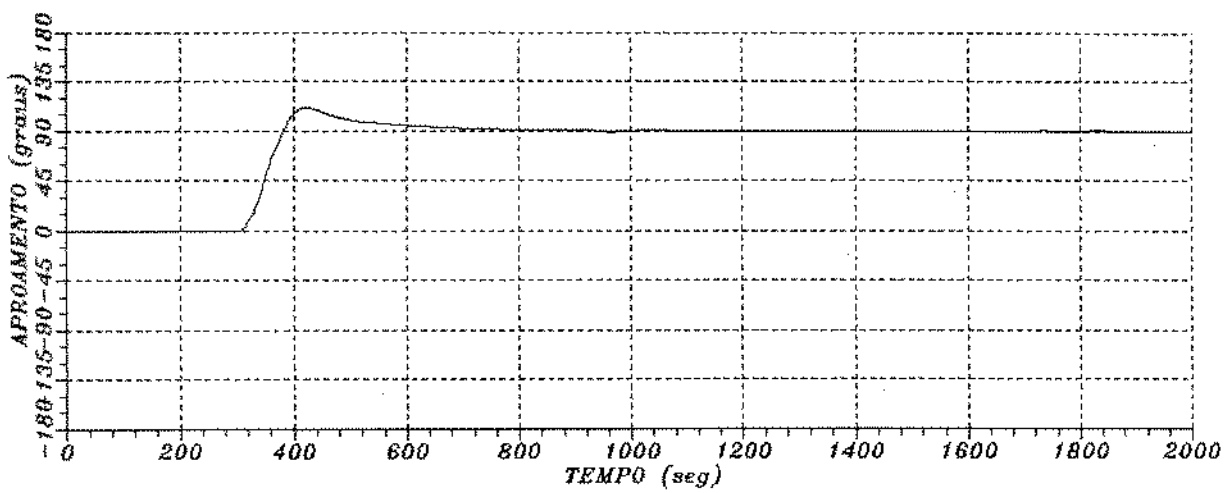
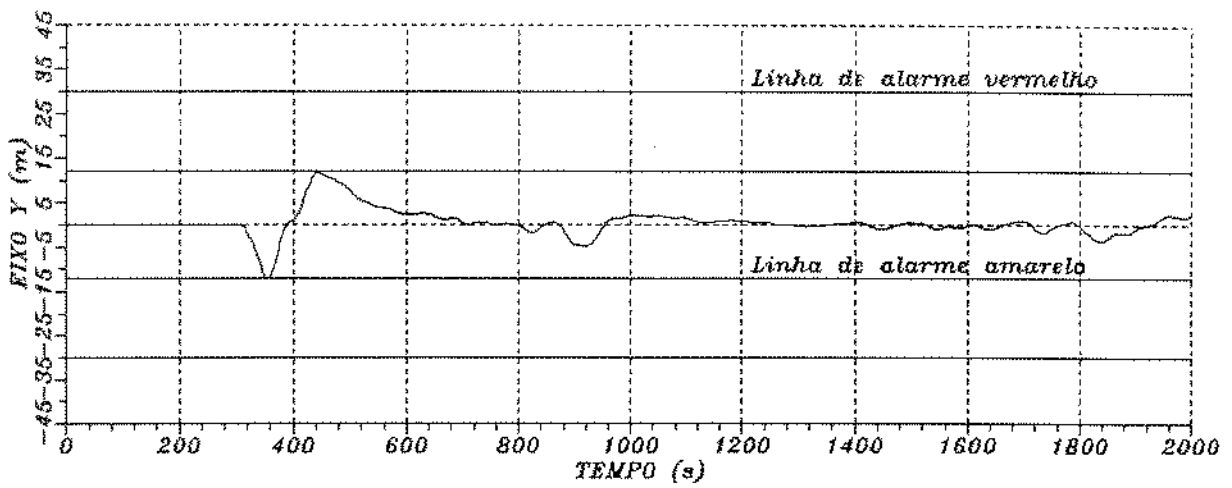
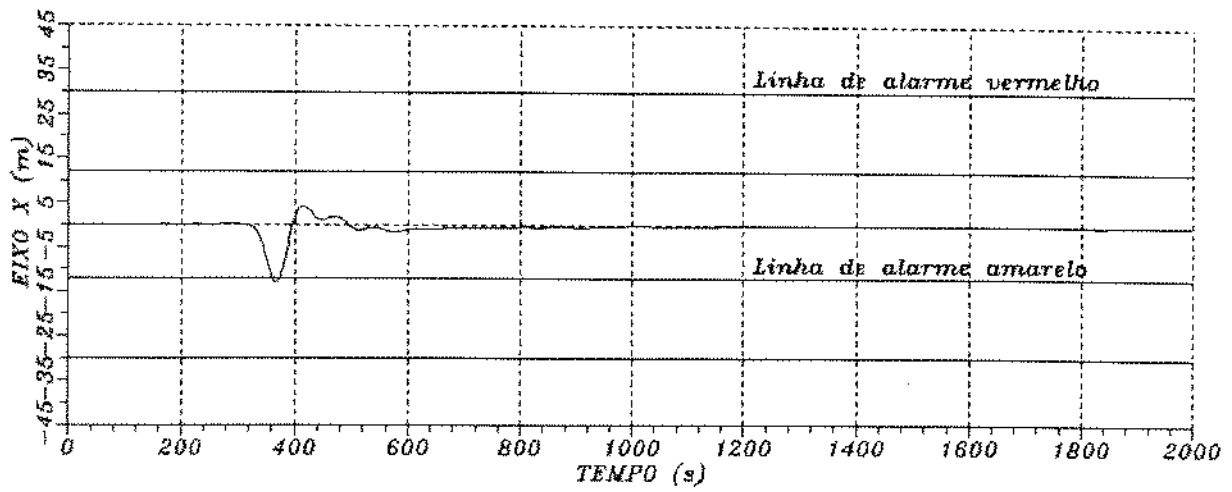


Fig 5.7: Ambiente 2. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau

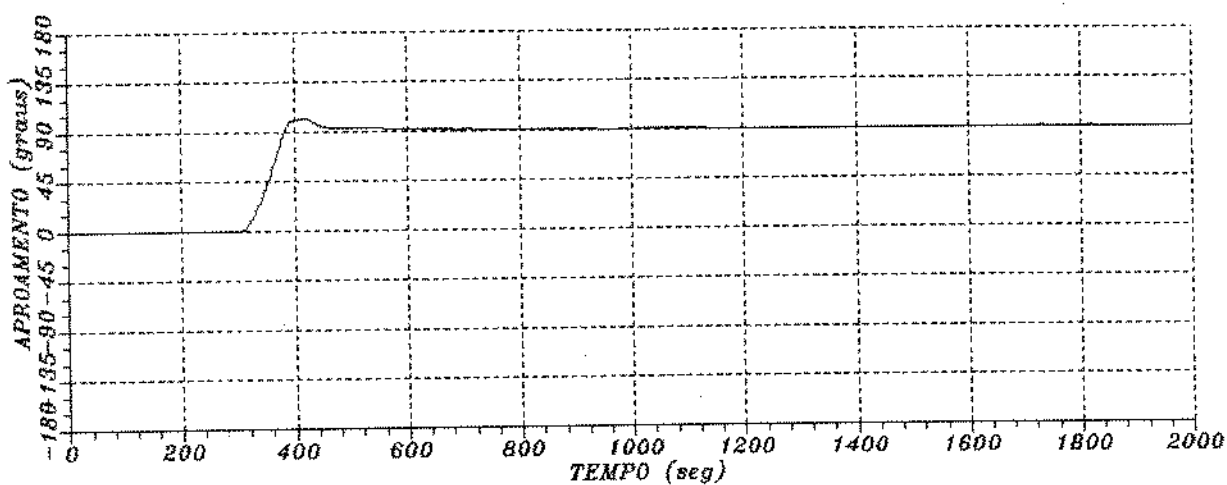
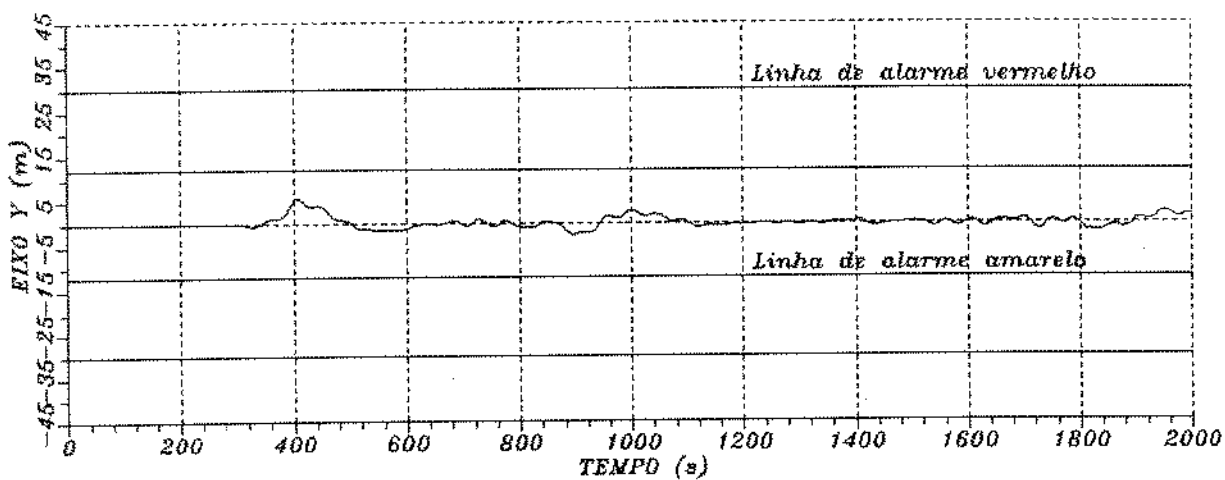
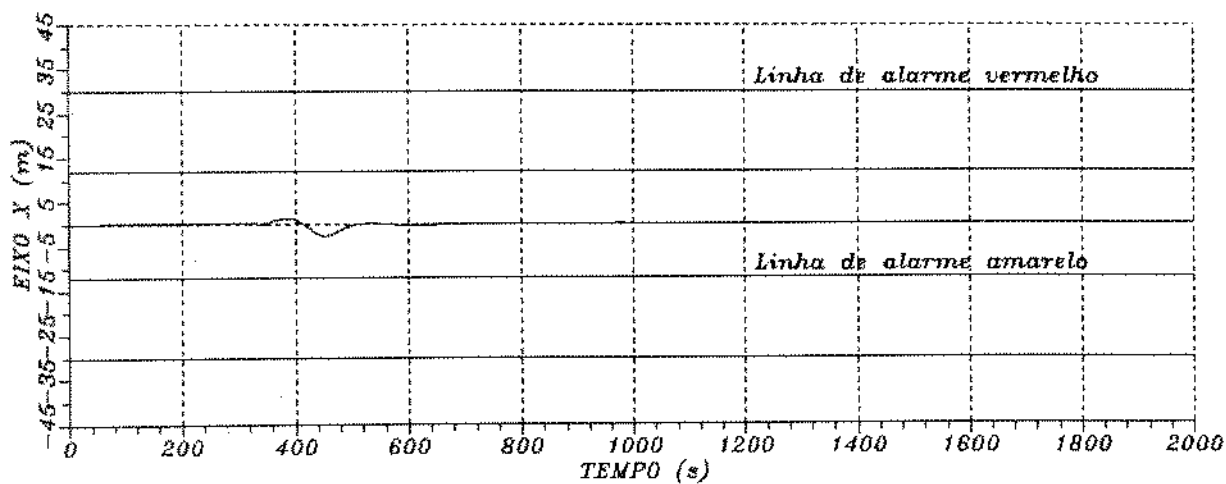


Fig. 5.8 : Ambiente 2. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa

controlador proposto, para as mesmas forças ambientais (ver tabela 5.2).

A comparação entre as simulações com condições ambientais 1 e 2, e suas semelhanças, indicam a preponderância das forças de vento sobre as de ondas e correntezas: mesmo com mudanças de 180 graus para a direção das ondas e de 045 graus para a de correnteza, os afastamentos observados nas duas séries de simulações diferem muito pouco, seguindo um padrão ditado pelas forças de vento, que são as mesmas para os dois casos.

A figura 5.9 apresenta simulação com condição de mar número 3 e controlador existente em modo de aproamento segundo entrada em degrau. Neste caso a correnteza possui direção de 090° e as ondas provém de 000° . Em geral, pode-se afirmar que, pelas simulações realizadas, esta condição ambiental leva à afastamentos menores da locação que as anteriores (ver tabela 5.2).

O comportamento do eixo X apresenta, de forma similar às simulações anteriores, uma perda inicial de posição à ré, sendo que esta, agora, possui resposta mais lenta uma vez que, com a mudança de aproamento, o eixo X percebe uma componente de forças, devida ao vento, crescente à medida que processa-se o giro. A quase inexistência de sobrepico na resposta, que estabiliza logo após retornar à posição de referência, pode ser creditada à um maior tempo de ajuste do termo integral, realizado durante a recuperação da posição inicial em X.

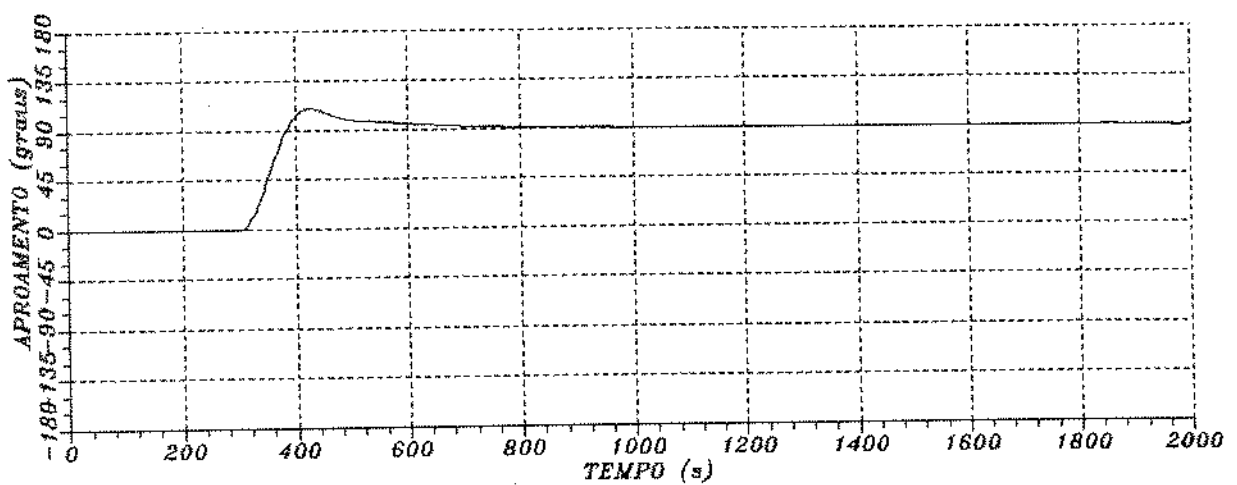
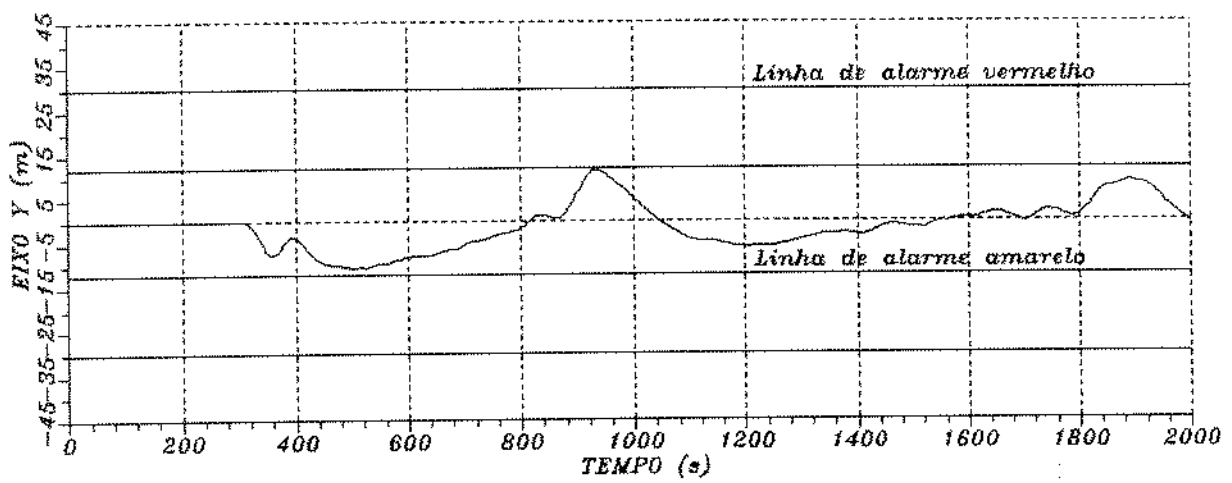
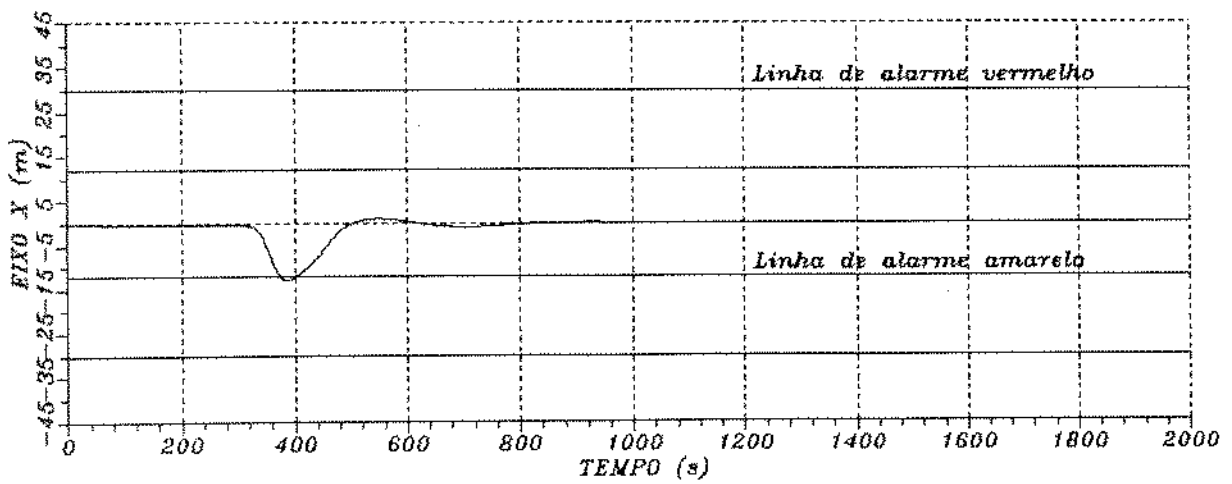


Fig 5.9: Ambiente no 3. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau

O eixo Y, por sua vez, apresenta curva bastante distinta das anteriores, com a perda inicial à bombordo persistindo durante 500 s em comparação à um tempo inferior à 100 s, nas simulações precedentes. Pode-se atribuir tal comportamento ao fato de que, com a correnteza provindo de 090° , mesma direção do vento, o momento atuante sobre a embarcação é razoavelmente maior, ficando, o controlador, obrigado a satisfazer o eixo de aproamento em detrimento do eixo Y, caso atinja-se os níveis máximos de utilização da potência disponível nos propulsores laterais. Apenas quando atinge-se regime permanente no eixo Z, a embarcação recupera posição em Y, apresentando, também, sobrepico menor que nas simulações anteriores, devido ao maior tempo para o ajuste do seu termo integral.

Este comportamento é visível nas simulações feitas com o mesmo controlador em modo de aproamento por modelo de referência (figura 5.10) onde, no entanto, observa-se um menor tempo requerido para que o eixo Y atinja regime permanente; e na simulação com controlador modificado, figura 5.11, que apresenta valores para os afastamentos de posição, tanto em X quanto em Y, bastante menores, confirmando a condição de mar 3 como mais favorável à uma mudança de aproamento que as anteriores (ver tabela 5.2).

A simulação realizada com o controlador proposto (figura 5.12), porém, não apresenta afastamentos significativos da locação, mantendo-se desde o início do giro com pequenas variações em torno da posição de referência,

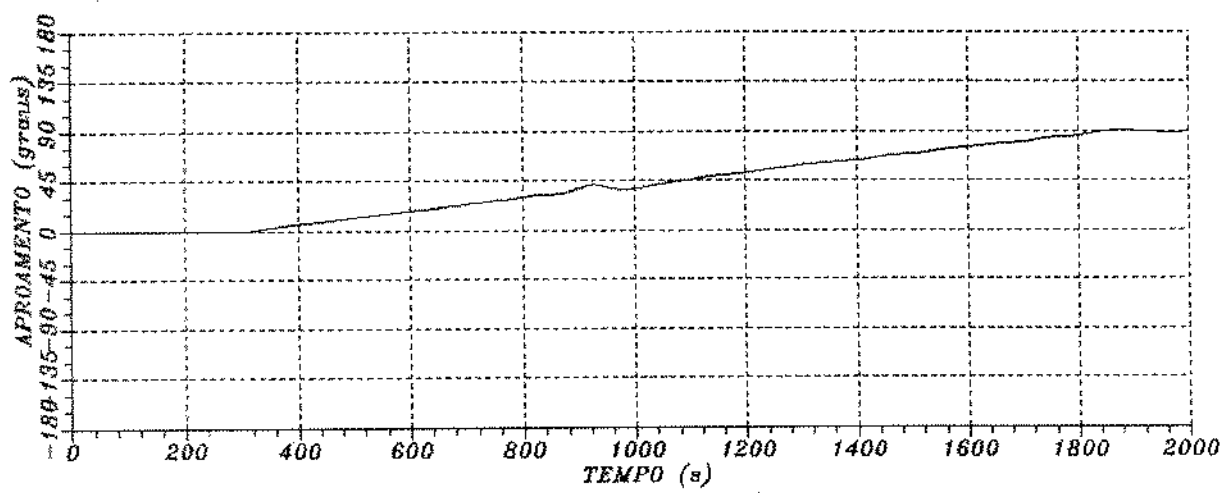
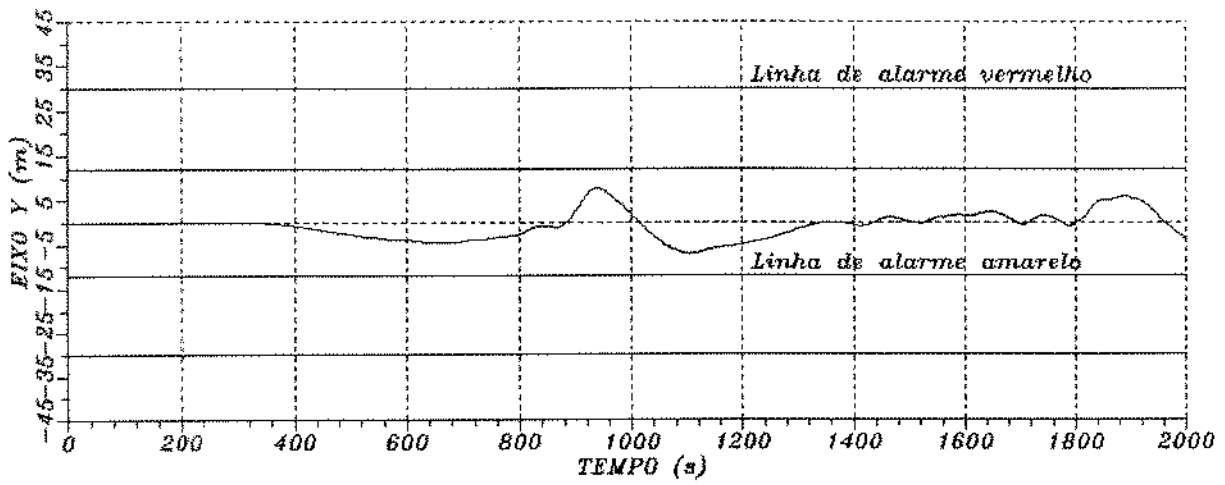
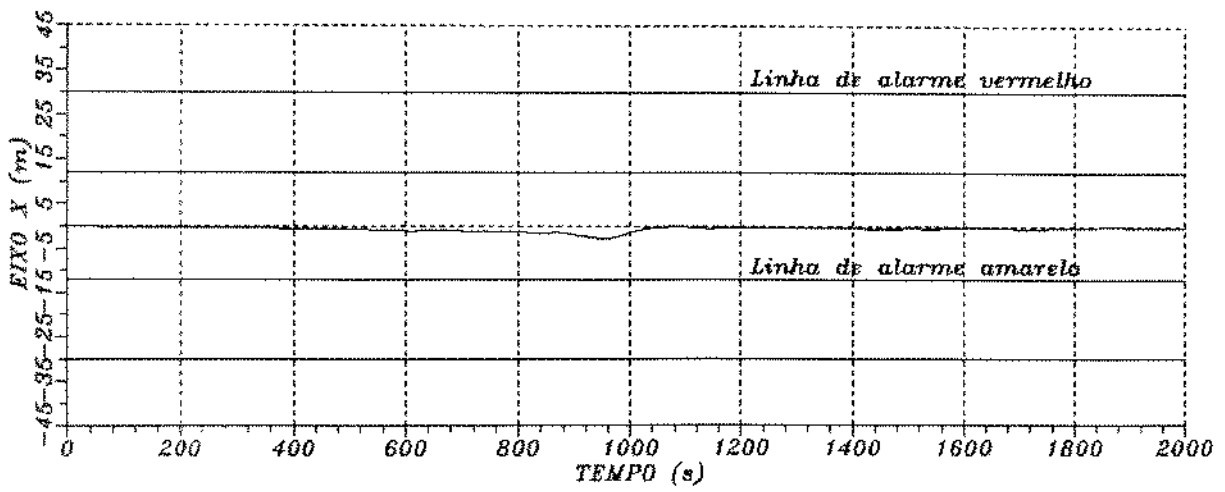


Fig 5.10: Ambiente 3. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa

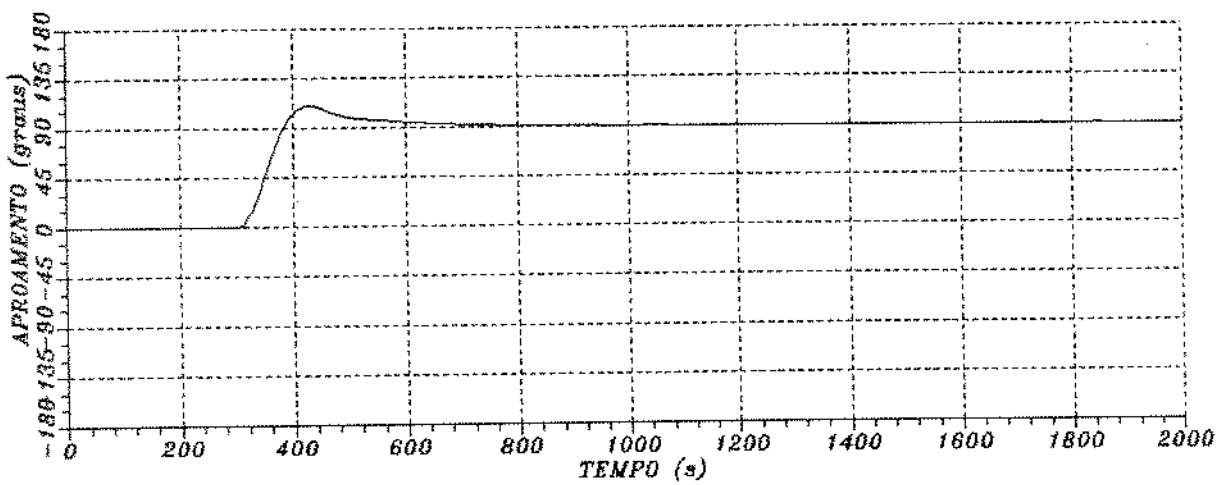
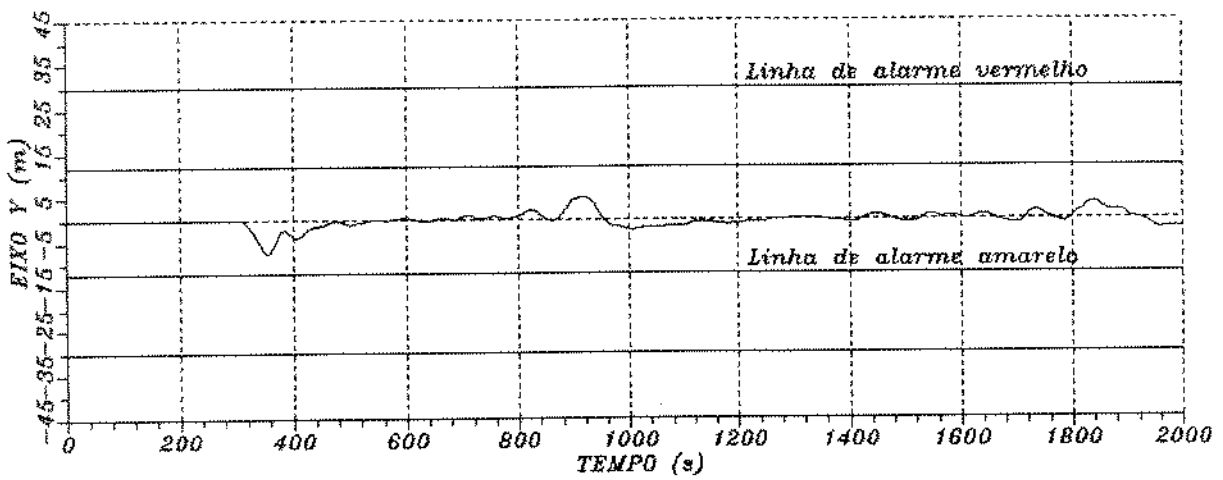
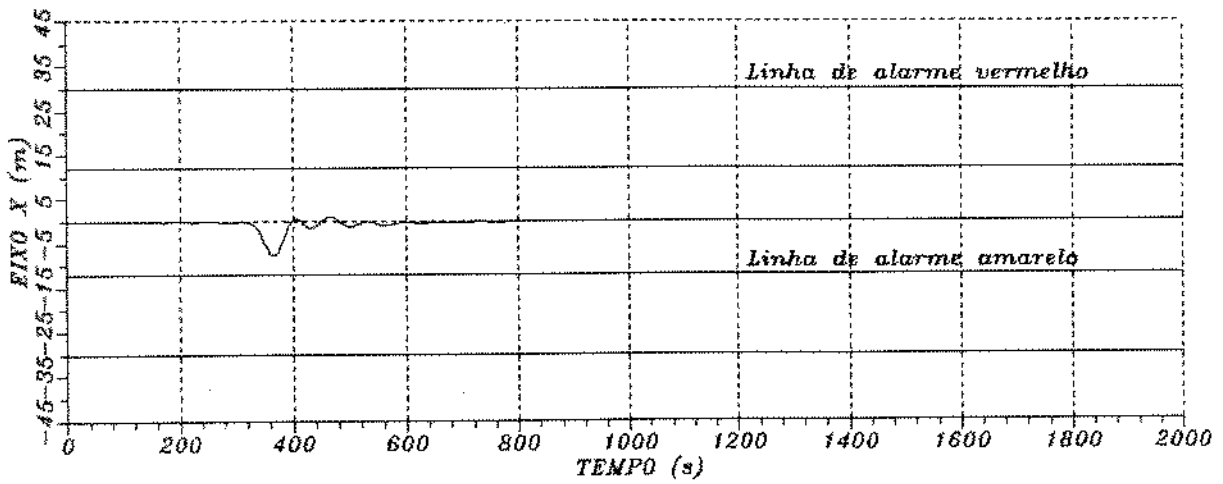


Fig 5.11: Ambiente 3. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau

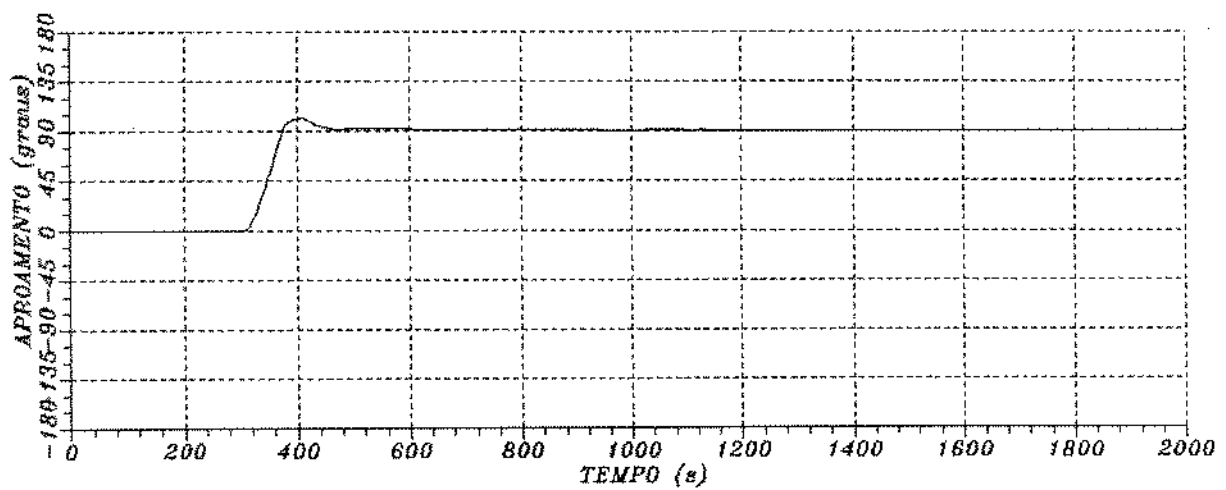
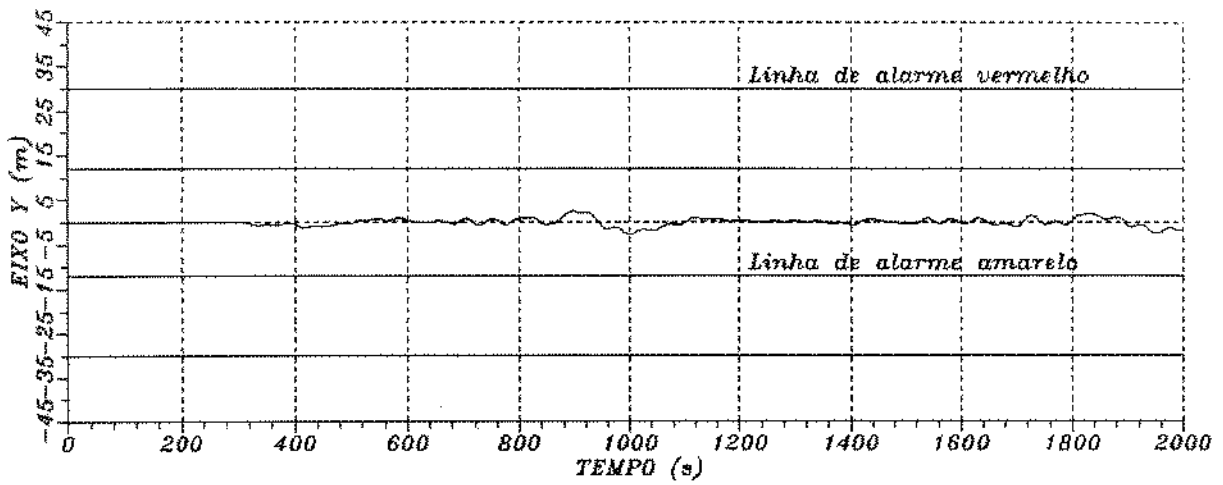
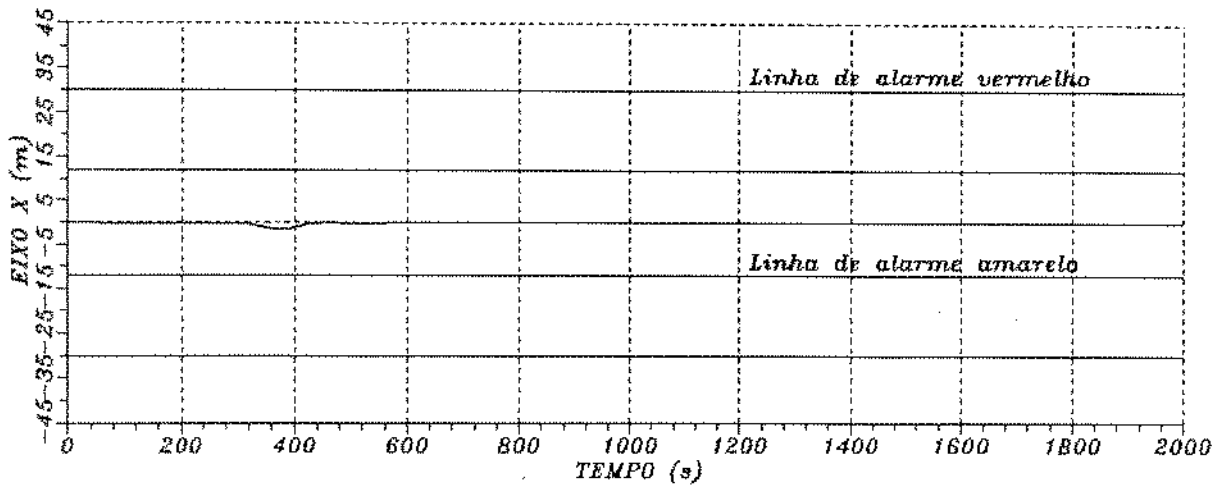


Fig 5.12 : Ambiente 3. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa

tanto no eixo X quanto no eixo Y, sendo que estas variações devem ser atribuídas, novamente, ao maior grau de rigidez de controle do sistema.

As simulações realizadas com a condição de mar número 4 começam pela figura 5.13, onde o controlador é o existente em modo de giro segundo entrada em degrau. Neste caso, as forças de onda possuem direção de 000° , enquanto que as de correnteza atuam vindas do azimute de 225° .

Para o eixo X, observa-se perda inicial de posição à como na simulação anterior, com um tempo maior de recuperação do valor de referência. Isto pode ser creditado a que, à medida que gira-se o navio, o termo integral, que possuía valores de comando de empuxo à ré, devido à predominância do valor da componente de correnteza sobre a de ondas, provoca a perda de posição negativa, fator este que, somado ao aumento da componente devida à força de vento, retarda o retorno à posição de referência.

Em Y, o comportamento bastante oscilatório da curva, com tempo de estabilização em torno de 1300 segundos, pode ser explicado da seguinte forma: inicialmente, ao girar com ondas vindas de 000° , correnteza de 225° e ventos de 090° , o controlador atende ao eixo de aproamento e perde posição à bombordo, uma vez que os propulsores laterais são os responsáveis tanto pelo controle do eixo Y quanto pela aplicação de momento à embarcação, que possui prioridade.

Ao completar-se o giro, o momento atuante, que atua no sentido de giro (sentido horário), ocasiona um sobrepico na

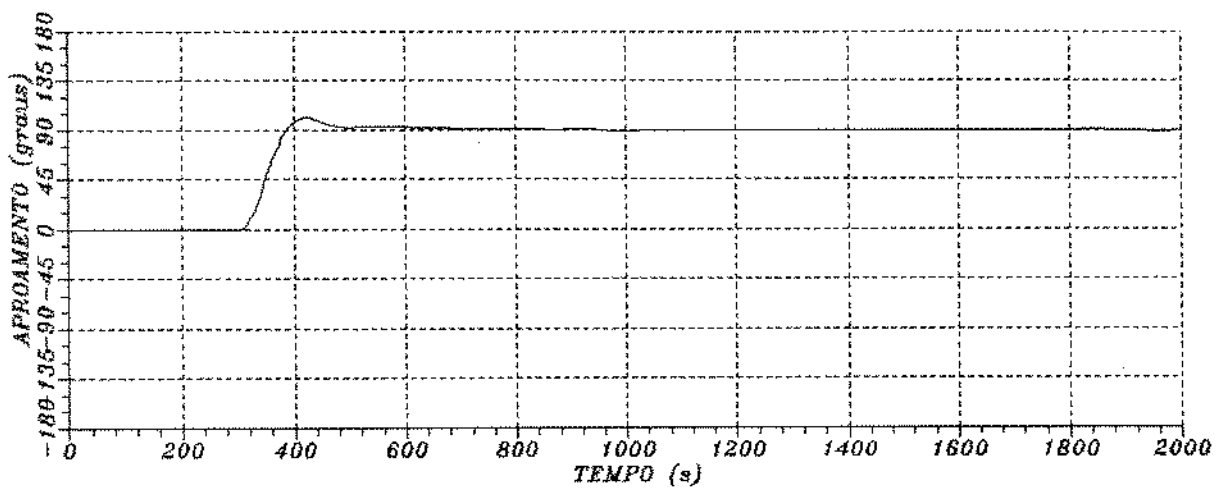
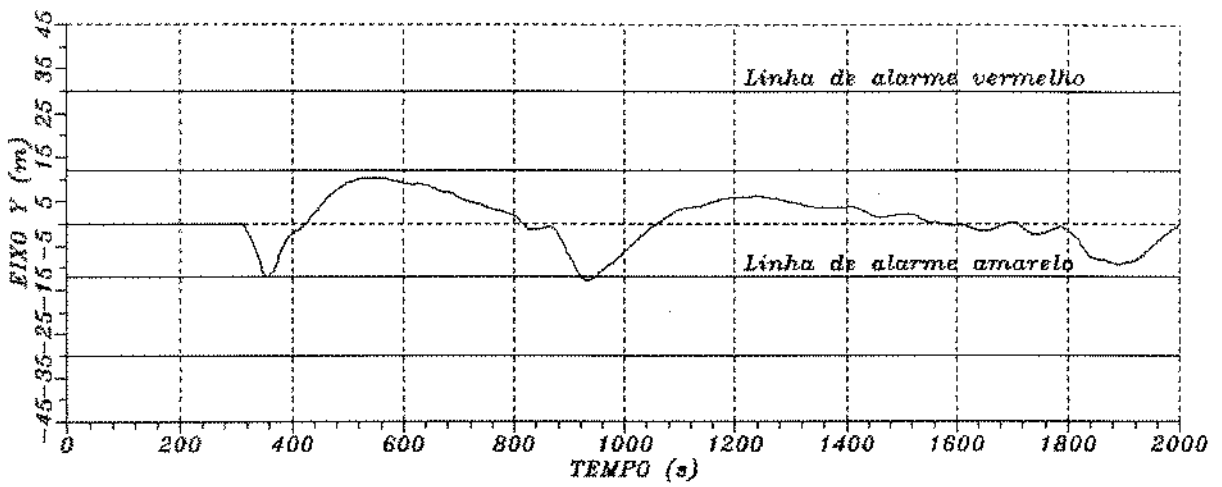
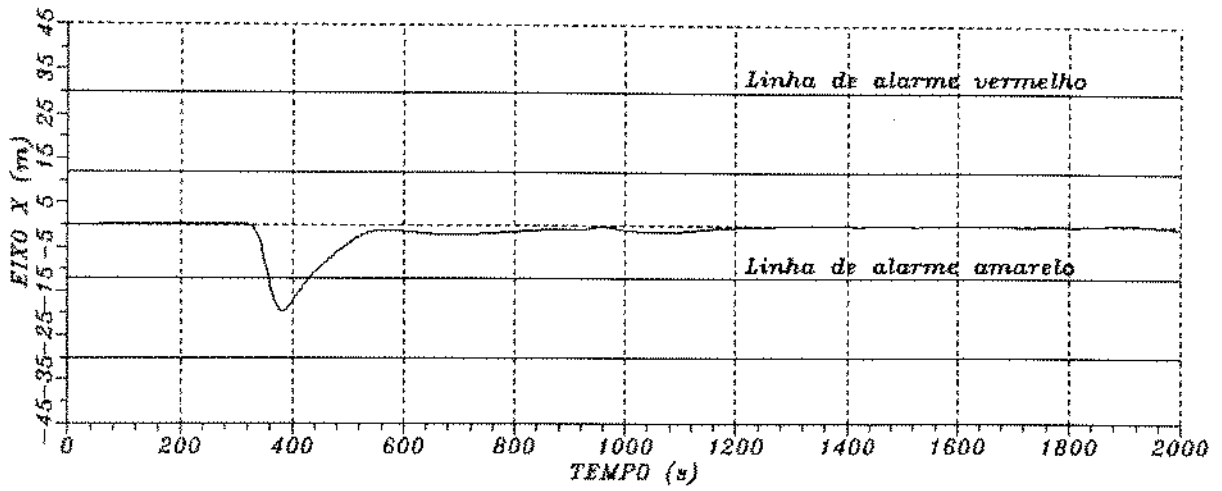


Fig 5.13: Ambiente 4. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau

resposta do eixo Z, fazendo com que o vento e as ondas reforcem a componente atuando à estibordo que, somada ao aumento do empuxo comandado pelo reajuste do termo integral, também à estibordo, ocasionam o afastamento da embarcação para esta direção. O termo integral passa a ajustar-se para bombordo, levando o navio a derivar, após algum tempo, negativamente no eixo Y. O processo prossegue até o correto ajuste do termo integral, que se dá de forma lenta.

Os afastamentos totais, no eixo Y, não são excessivos, no entanto. Isso pode ser entendido pelas direções de ondas e correnteza, cujas componentes de força tendem a anular-se e que, uma vez completado o giro, atuam principalmente sobre este eixo.

Na figura 5.14, o controlador existente atua segundo o modo de aproamento por modelo de referência. Nota-se as características descritas para a simulação anterior, para valores bastante mais reduzidos de afastamentos, já que o giro se dá de forma muito mais lenta (ver tabela 5.2).

O mesmo ocorre com a figura 5.15, onde o controlador agora é o modelo modificado, atuando segundo entrada em degrau. Verifica-se que, com o aumento da rigidez de controle, as curvas para os eixos X e Y apresentam oscilações em torno das posições de referência.

Já na figura 5.16, com o controlador proposto atuando segundo o modo por modelo de referência, os afastamentos são muito pequenos, tanto para X quanto para Y, apresentando oscilações, neste último, que devem ser

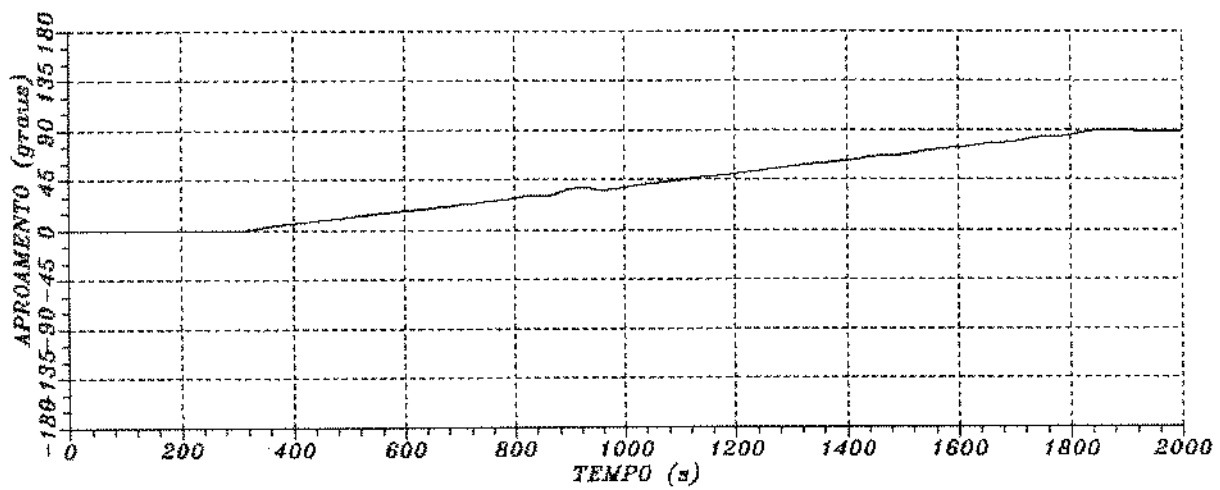
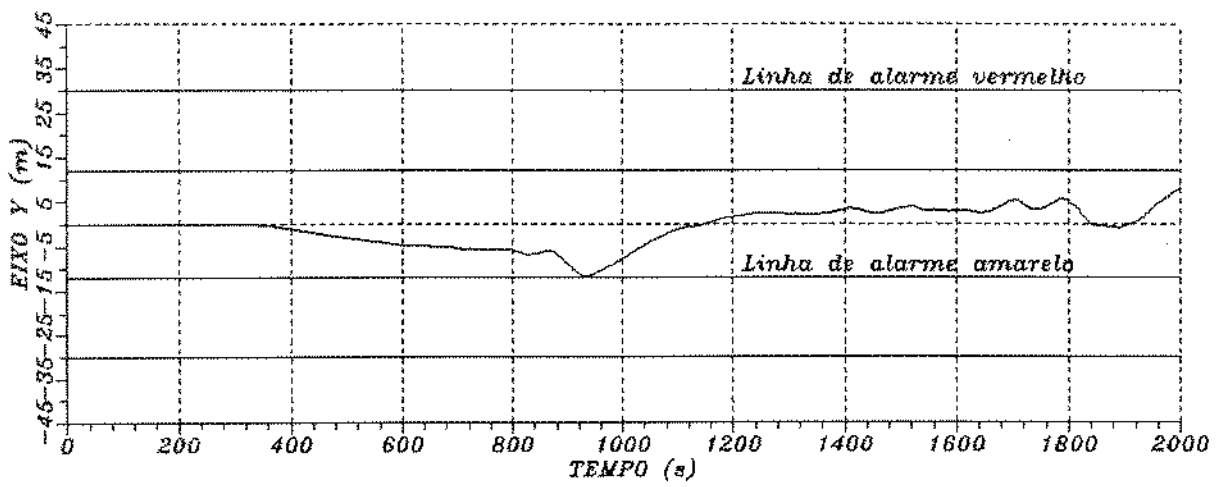
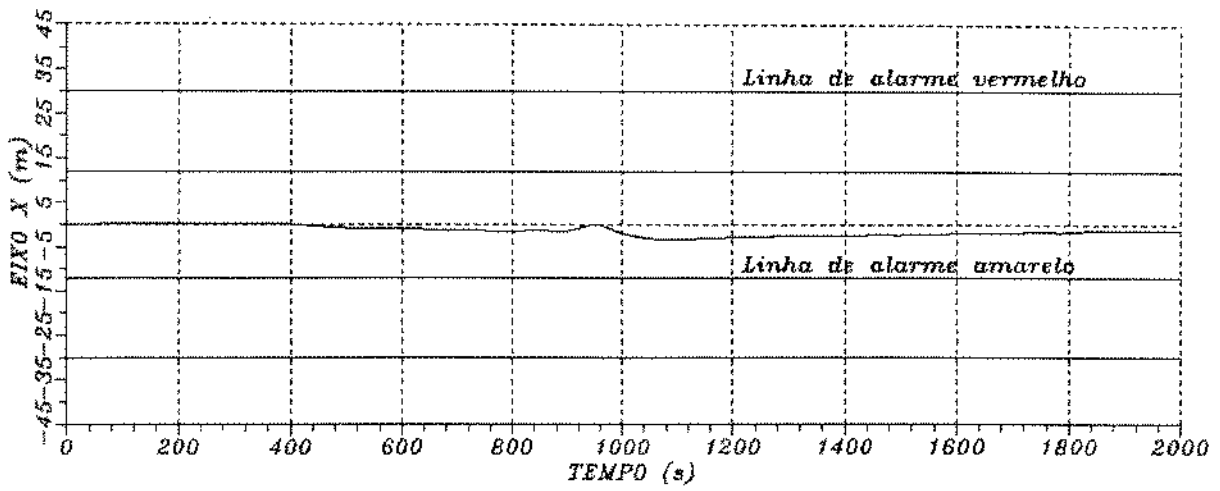


Fig 5.14 : Ambiente 4. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa

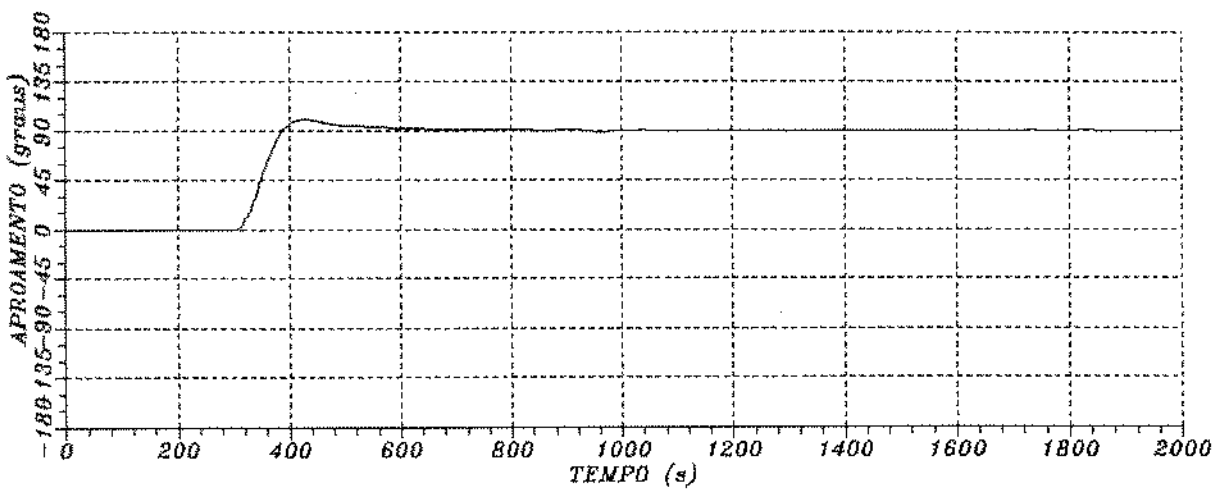
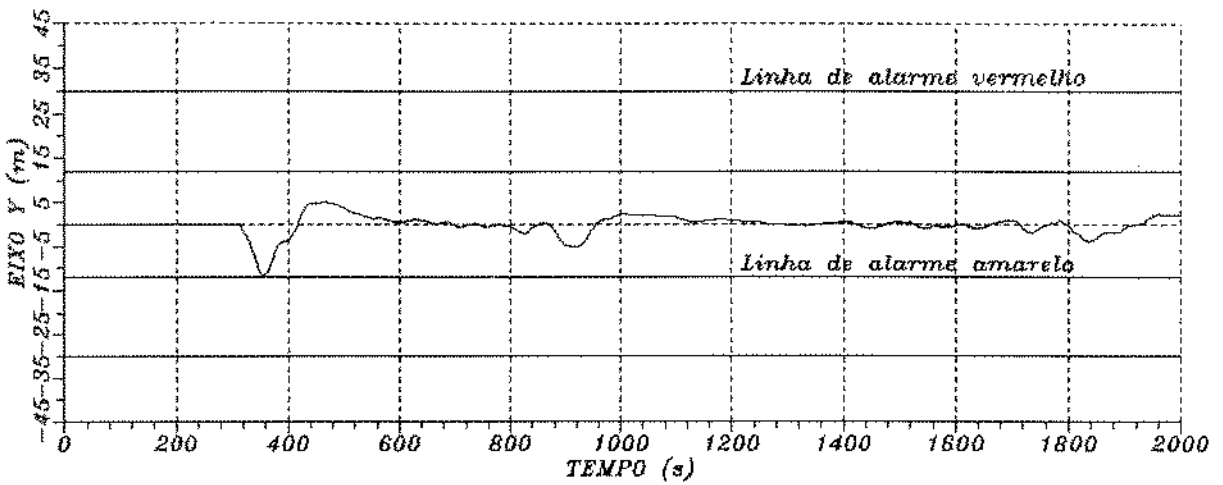
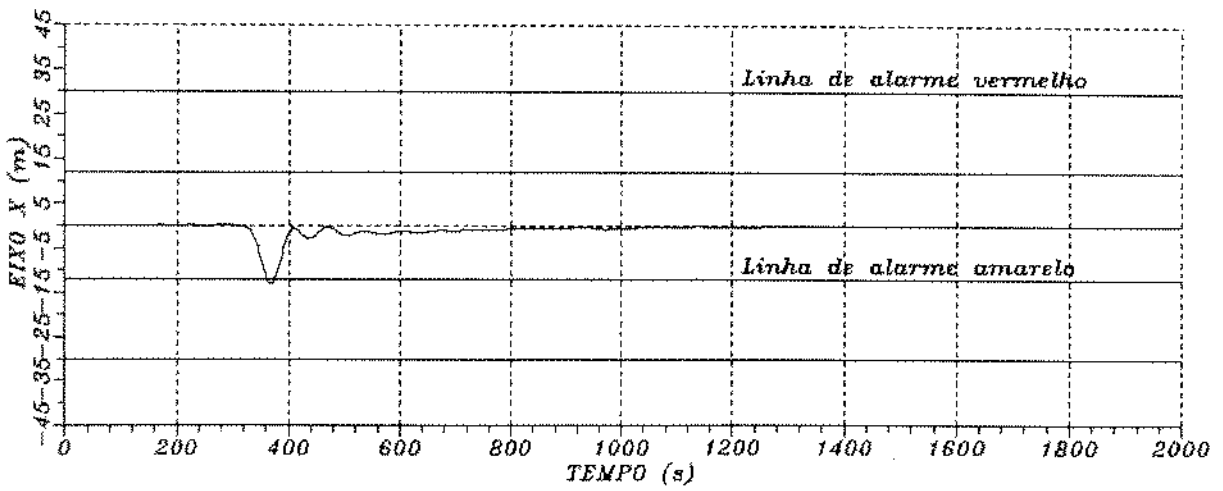


Fig 5.15: Ambiente 4. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau

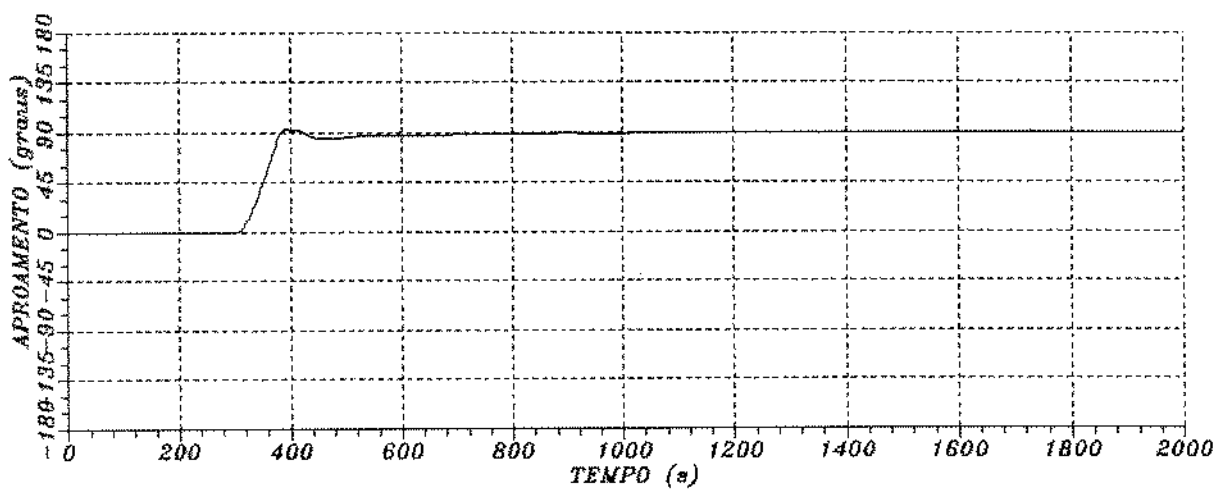
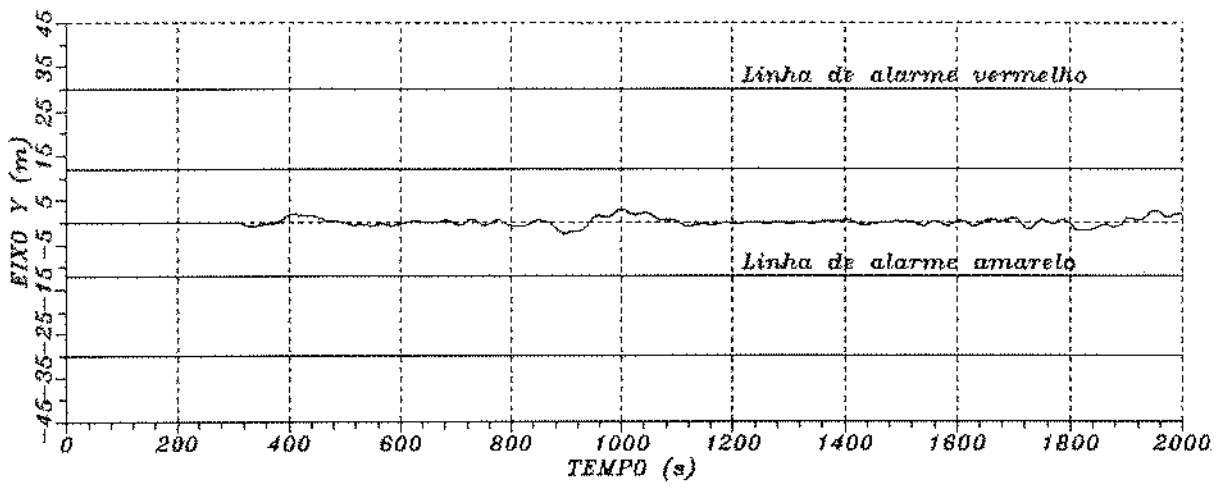
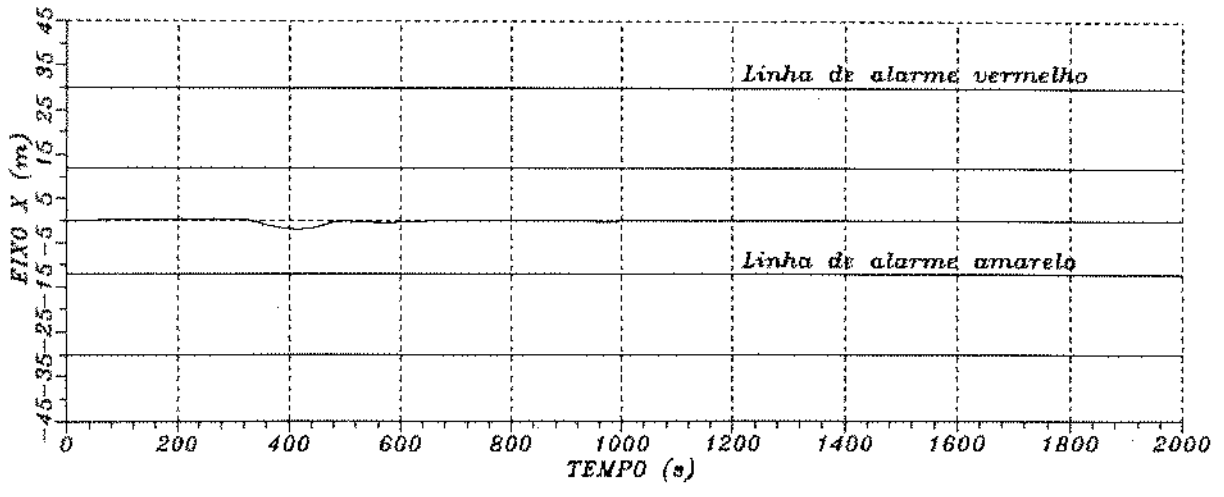


Fig 5.16 : Ambiente 4. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa

creditadas, também, à maior rigidez de controle.

A condição de mar seguinte, de número 5, a direção de vento ainda é mantida em 090° , enquanto a de ondas passa a ser de 180° e para a correnteza têm-se 135° .

Analisando-se a figura 5.17, observa-se que, para o eixo X, têm-se inicialmente uma perda de posição negativa, ao realizar-se o giro. Isto deve-se, principalmente, ao aumento da componente de esforço de vento sobre a proa e, em menor grau, ao decréscimo da componente devida às ondas e correnteza. Há, também, o fato de que, submetido anteriormente aos esforços de onda e parte da correnteza pela pôpa, o navio desenvolve uma demanda significativa de empuxo à ré que, com a mudança de aproamento, demora a ser diminuída, devido à resposta lenta do sistema existente.

No eixo Y, observa-se também uma perda negativa, ou seja: no sentido de bombordo, causada pelo aumento da demanda de momento exigido pela mudança de aproamento que, com a prioridade devida ao eixo Z, diminui temporariamente o empuxo disponível no eixo Y. Com o alívio das forças atuantes sobre este eixo, à medida que as forças de vento passam a atuar sobre o eixo X, o navio recupera posição e passa a sair à estibordo devido ao lento ajuste do seu termo integral que precisa adequar a demanda de empuxo à nova configuração de forças, cuja componente é composta pela correnteza e força de deriva de ondas. Os afastamentos polares máximos encontram-se na tabela 5.2.

A figura 5.18 apresenta o mesmo controlador da

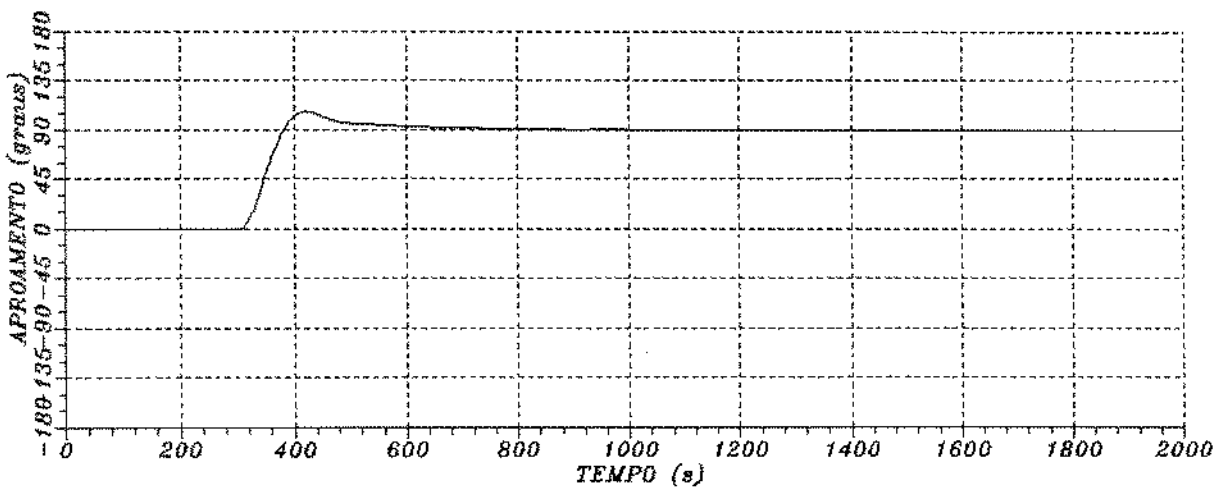
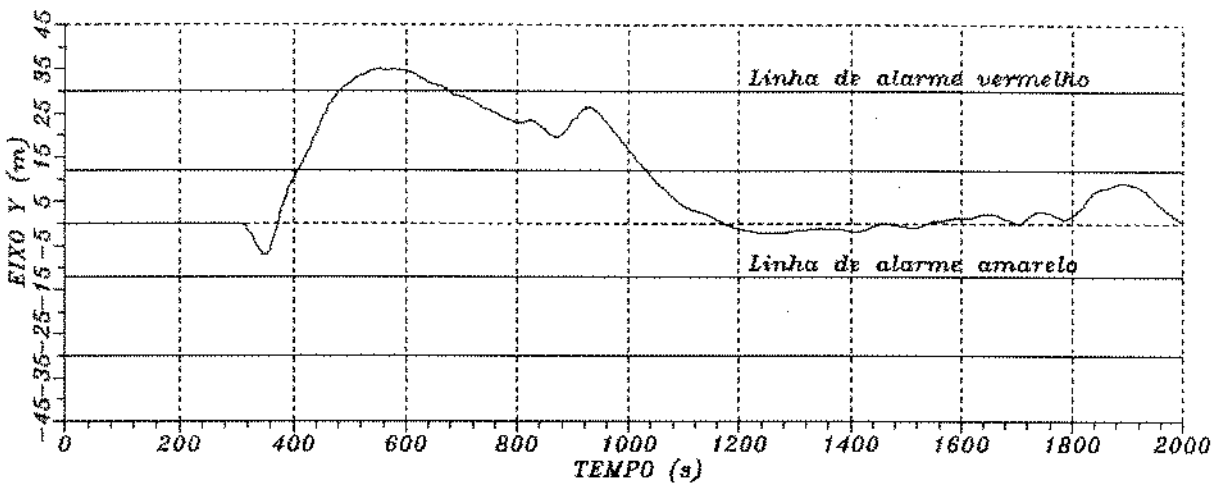
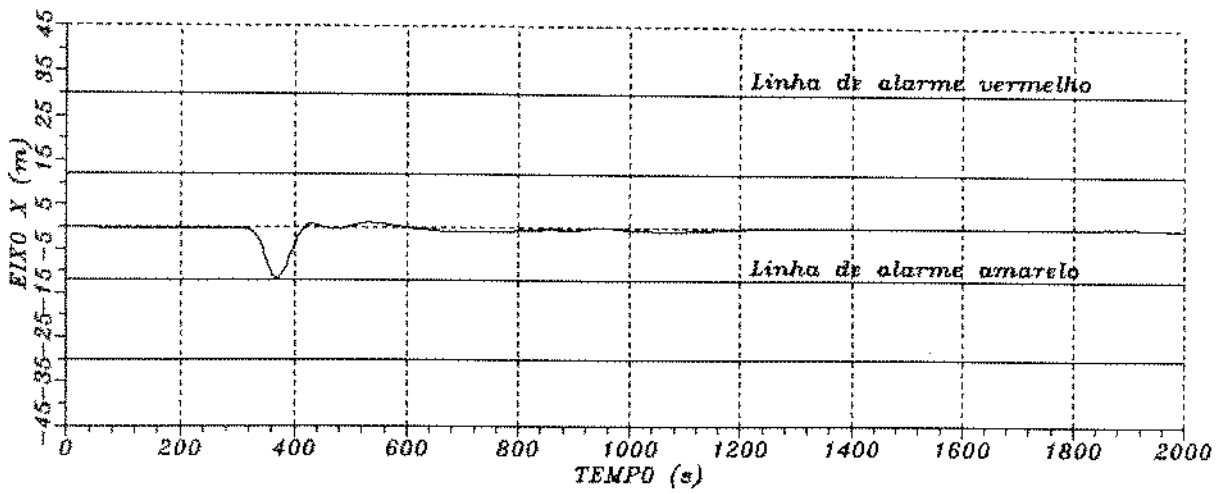


Fig 5.17: Ambiente 5. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau

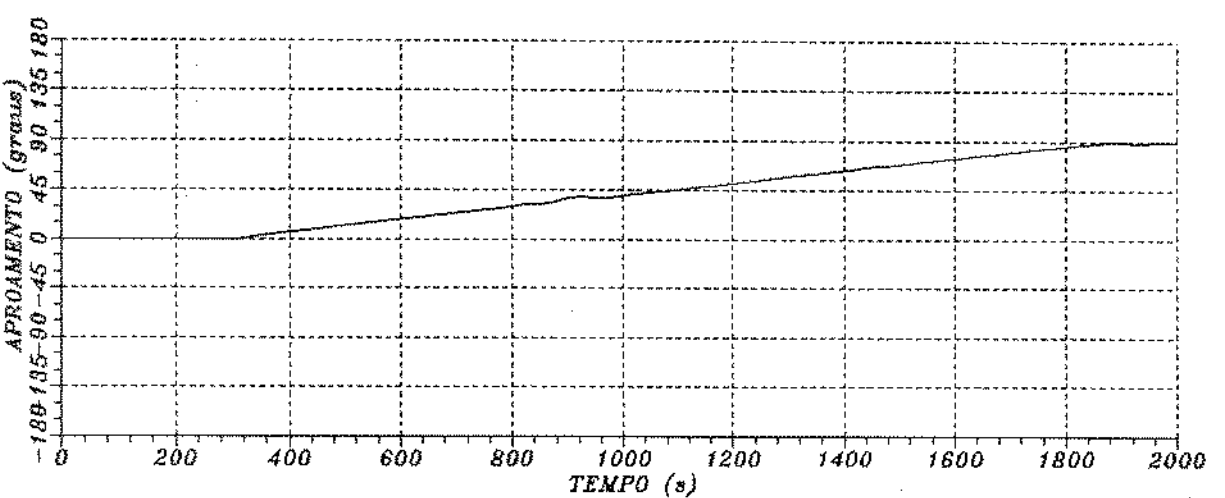
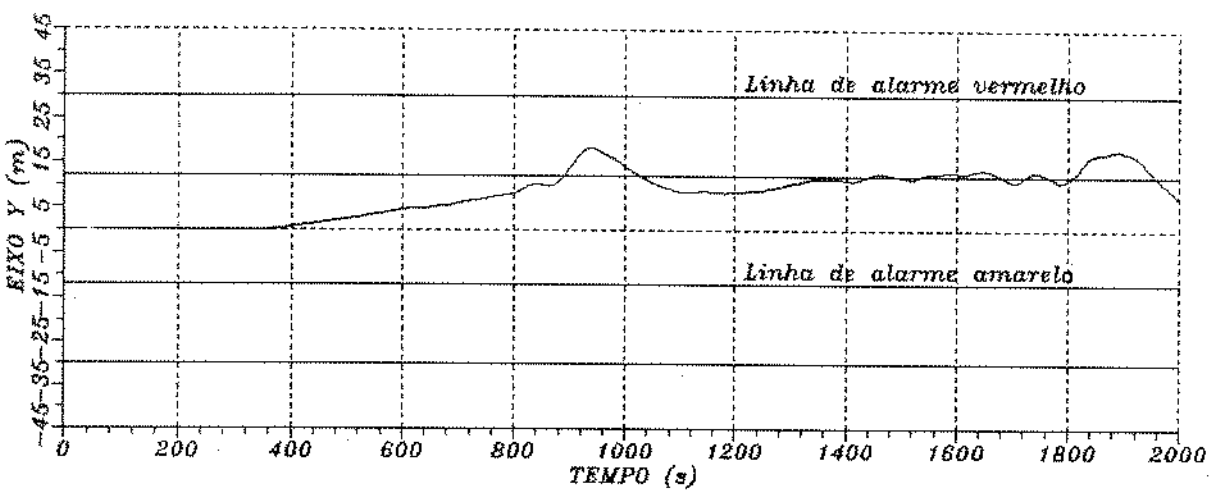
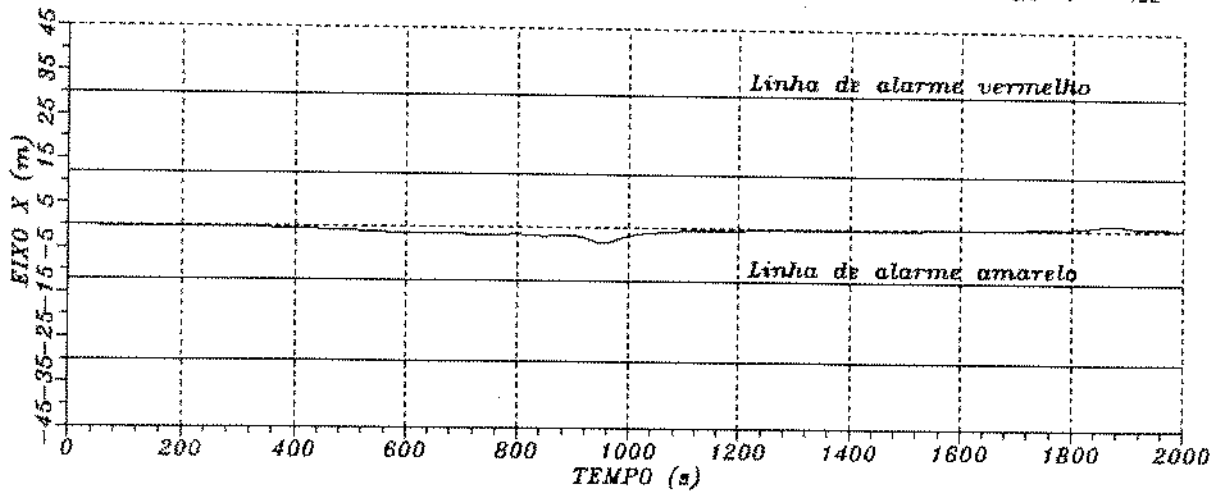


Fig 5.18 : Ambiente 5. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa

figura anterior, submetido agora ao modo de aproamento por modelo de referência, onde o giro se dá de forma lenta, o que permite melhor ajuste dos termos integrais de cada eixo.

Nota-se aí, que o comportamento da curva em X é sensivelmente mais suave, limitando-se bastante a excursão à ré. No eixo Y, com uma menor demanda de momento para o giro, a embarcação não apresenta tendência inicial de sair à bombordo, e a perda à estibordo é condideravelmente menor (ver tabela 5.2). A contrapartida é dada pelo tempo exigido para que efetue-se a mudança de aproamento, que torna-se muito maior.

A figura 5.19 apresenta, para a mesma condição ambiental, o comportamento do navio sob a ação do controlador modificado em modo de aproamento segundo entrada em degrau. Em relação aos afastamento polar máximo e taxa de giro médio ver tabela 5.2.

Para o eixo X, nota-se que a perda à ré inicial é drasticamente reduzida, ocorrendo, no entanto, afastamento subsequente à vante. Isto deve-se à que, com o alívio das forças atuantes sobre este eixo e a maior rigidez de controle do sistema, a maior rapidez de resposta, embora corrija a excursão negativa, ocasiona um sobrepico positivo. O mesmo, basicamente, ocorre no eixo Y.

Na figura 5.20 ocorre comportamento semelhante, tanto no eixo longitudinal quanto no eixo transversal do navio, que encontra-se sob o comando do controlador proposto, nas mesmas condições de mar. Observa-se, ainda assim, menores afastamentos da posição de referência neste caso, em relação

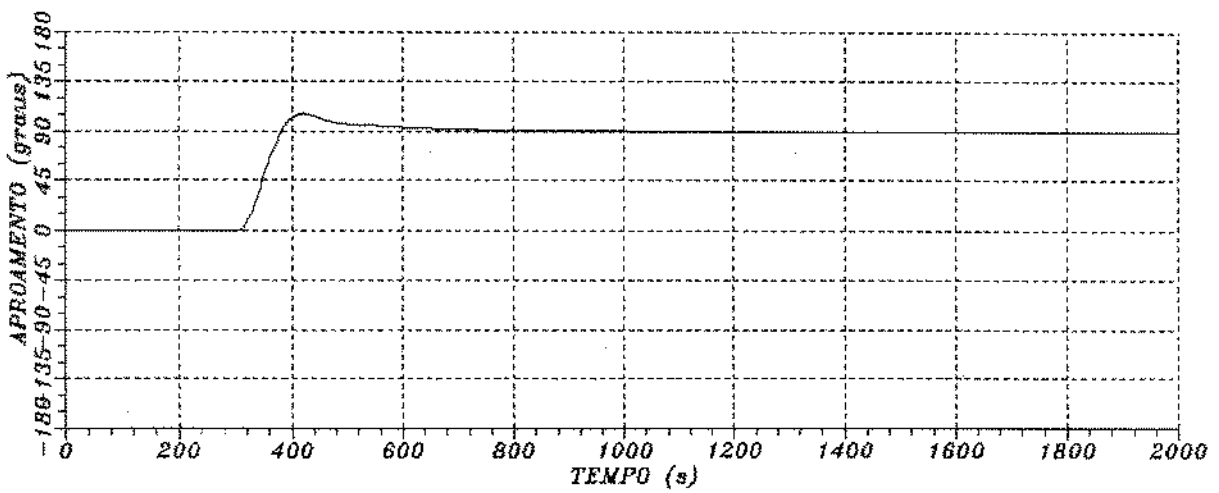
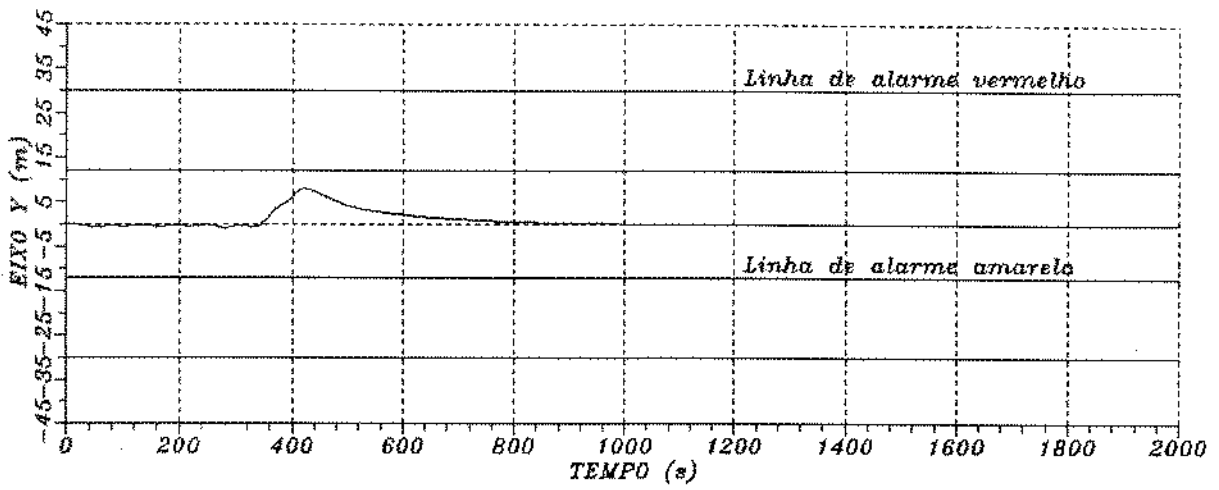
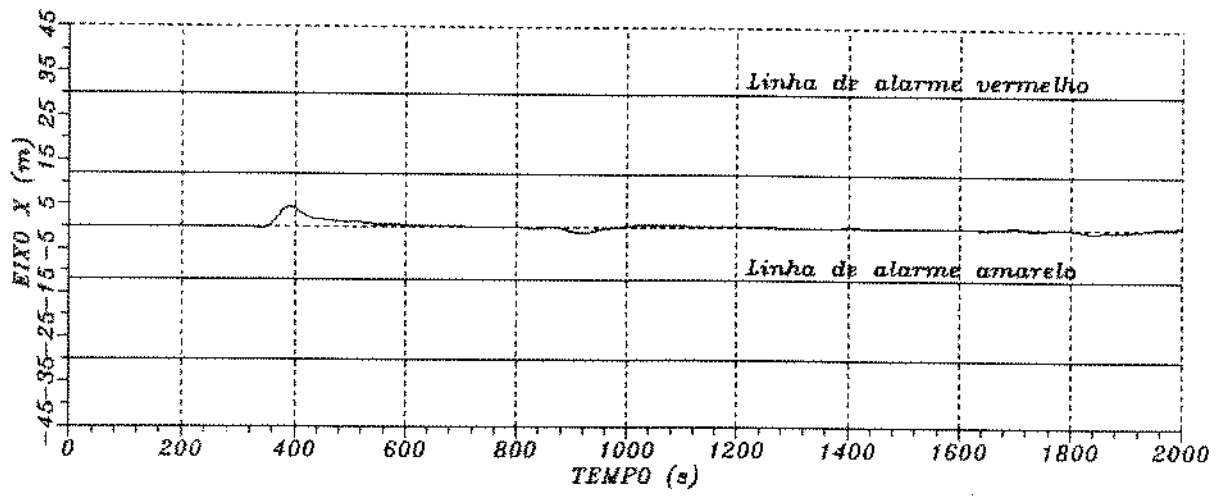


Fig 5.19: Ambiente 5. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau

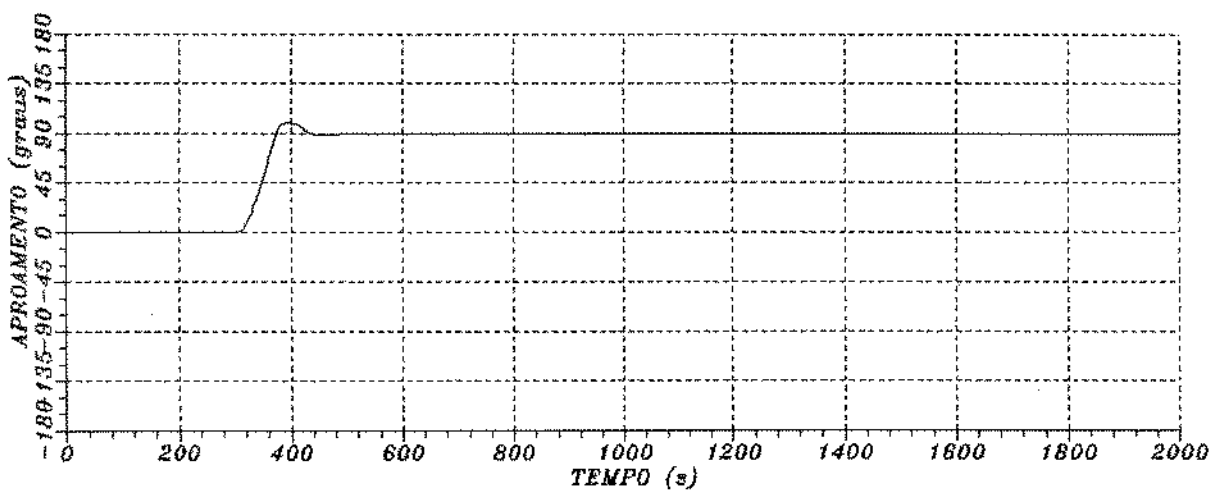
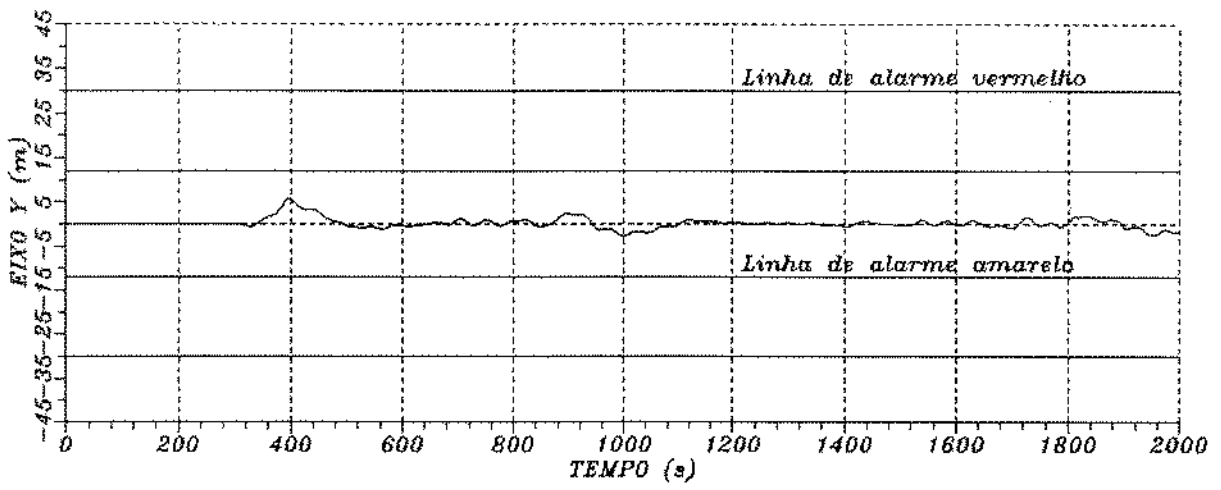
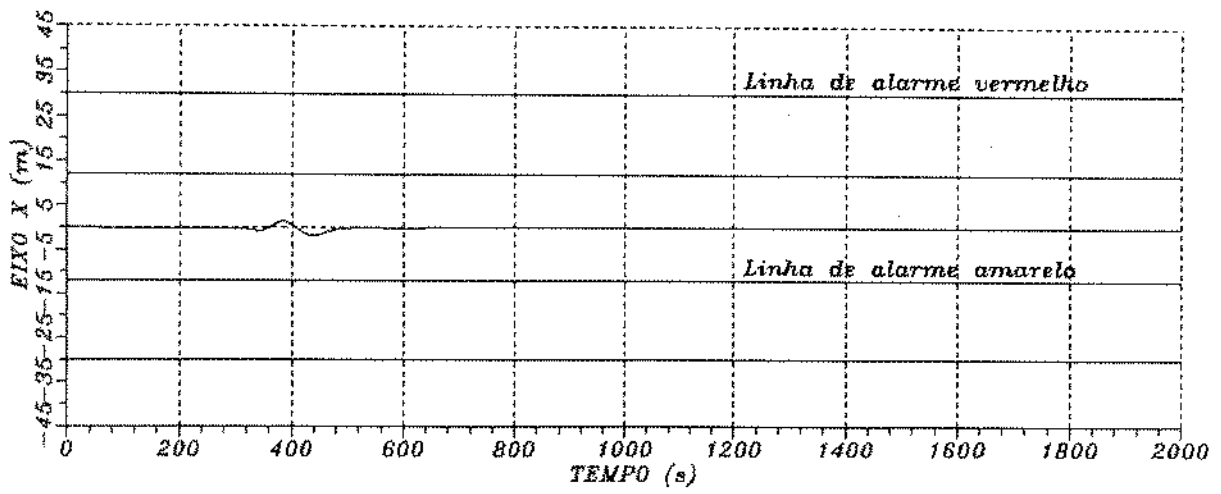


Fig 5.20 : Ambiente 5. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa

ao anterior, nos dois eixos (ver tabela 5.2).

A próxima situação ambiental simulada é aquela em que o vento e as ondas provém de 180° , enquanto a correnteza vem de 90° , mantendo-se o aproamento inicial da embarcação em 000° e realizando-se um giro de 180° . Para isto, o tempo de simulação passa a ser de 4000 segundos, o dôbro daquele utilizado nas simulações vistas até aqui.

Observa-se, na figura 5.21 que, sob a ação do controlador existente em modo aproamento segundo entrada em degrau, o desequilíbrio de posição em X é bastante acentuado, ultrapassando-se os 30 metros de excursão à ré (5% da lâmina d'água) durante a manobra de giro. Novamente o raciocínio é semelhante: a ocorrência de uma diminuição das forças atuantes sobre esta direção da embarcação e o lento ajuste dos empuxos dos propulsores principais, comandados pelo controlador, faz com que a diminuição da potência dispendida não seja feita em tempo adequado.

O decréscimo da resultante de forças sobre o eixo X, dá-se durante a primeira metade da mudança de aproamento, quando o vento passa a incidir, mais e mais, sobre o eixo Y, até que atinja-se o aproamento de 090° . Ao continuar-se o giro, a embarcação volta a sofrer o efeito das forças de vento sobre o seu eixo longitudinal, porém em sentido contrário ao anterior. Com isto, a excursão à ré, experimentada pelo navio, é bruscamente revertida e o controlador passa a ajustar-se à nova configuração de forças contando, agora, com estas para a correção do desvio de posição experimentado.

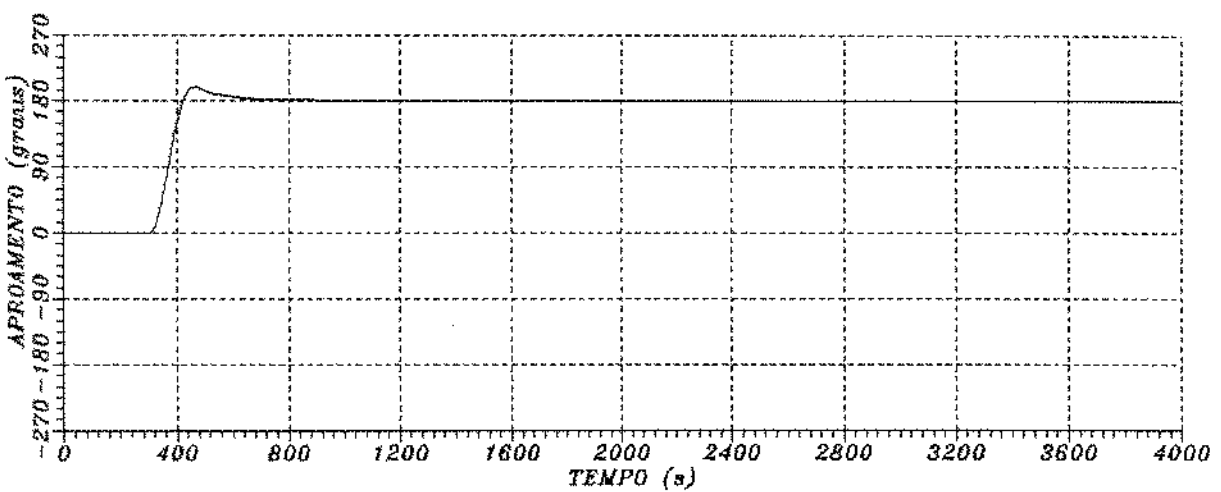
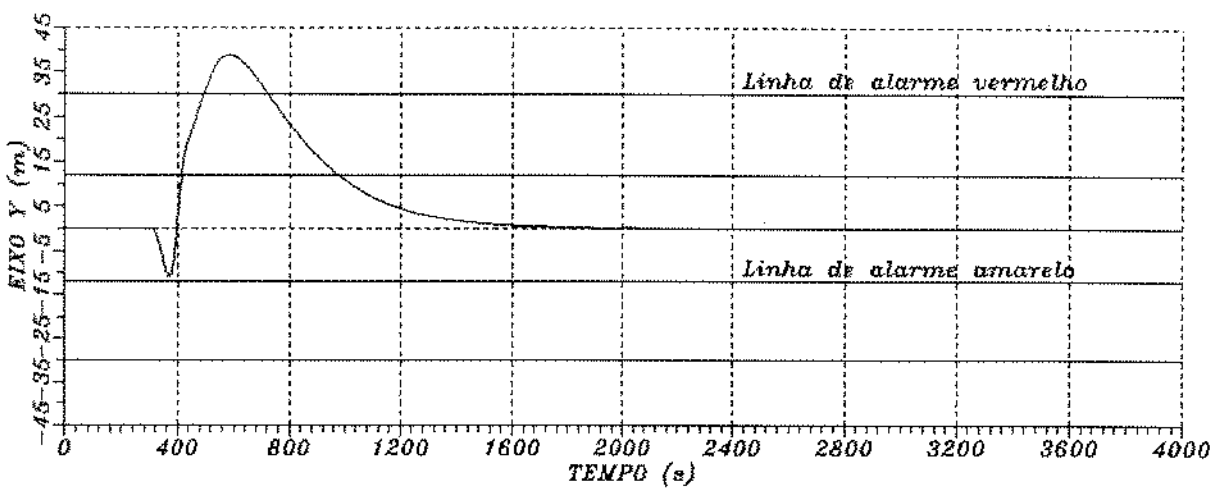
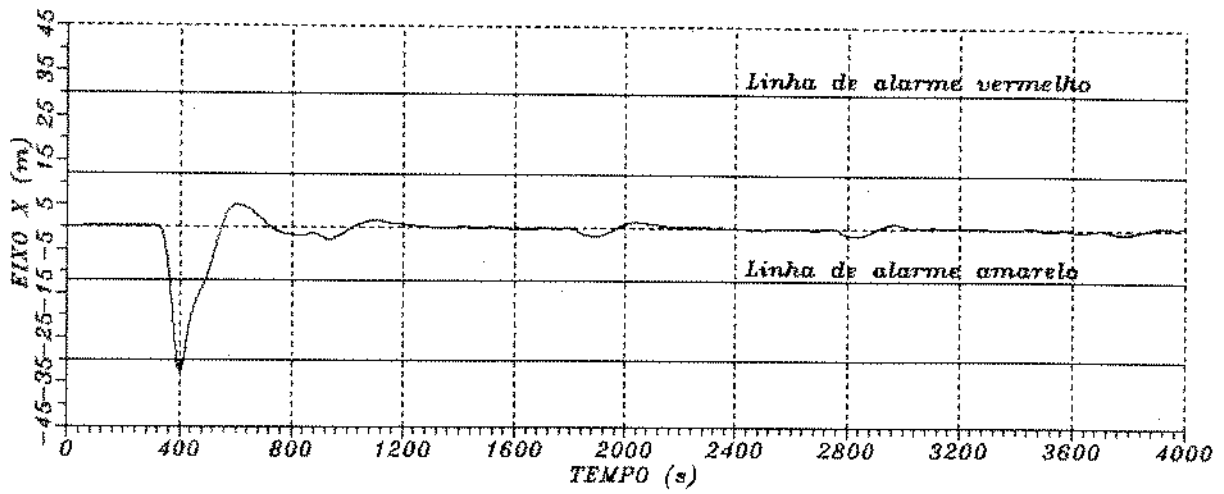


Fig 5.21: Ambiente 6. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau

No eixo Y, a perda inicial à bombordo não mais se explica pela necessidade de satisfação de momento, exigida pelo eixo Z, uma vez que estes momentos são pequenos inicialmente e a demanda de empuxo lateral, antes do giro, também é restrita, já que os maiores esforços atuam sobre o eixo X da embarcação. O que ocorre é que, ao girar-se, surge uma componente de vento sobre o eixo transversal do navio, o de maior área, forçando a embarcação à bombordo. Como o termo integral em Y é negativo (a força de correnteza sobre estibordo é a responsável pelo aparecimento deste termo), no início do giro existe empuxo dos propulsores para estibordo fazendo com que, apesar da grande área sujeita à ação do vento, a excursão negativa inicial em Y seja menor que no eixo X, o que faz com que, ao atingir-se a metade da manobra de giro, o deslocamento da posição de referência não seja tão pronunciado. Com o ajuste do controlador, que comanda os empuxos à estibordo, aliado às forças de correnteza e a quantidade de movimento adquirida devido ao acoplamento de movimentos, existente entre os eixos Y e Z, a tendência de perda de posição à estibordo é grande, depois de ultrapassar-se o azimute de 090° . Ver tabela 5.2.

A figura 5.22, onde simula-se o comportamento do navio com o controlador existente em modo de aproamento por modelo de referência, apresenta valores significativamente menores para os afastamentos em X e Y, em comparação com o modo segundo entrada em degrau, sendo que as excursões de maior redução ocorrem no primeiro eixo citado, enquanto que no

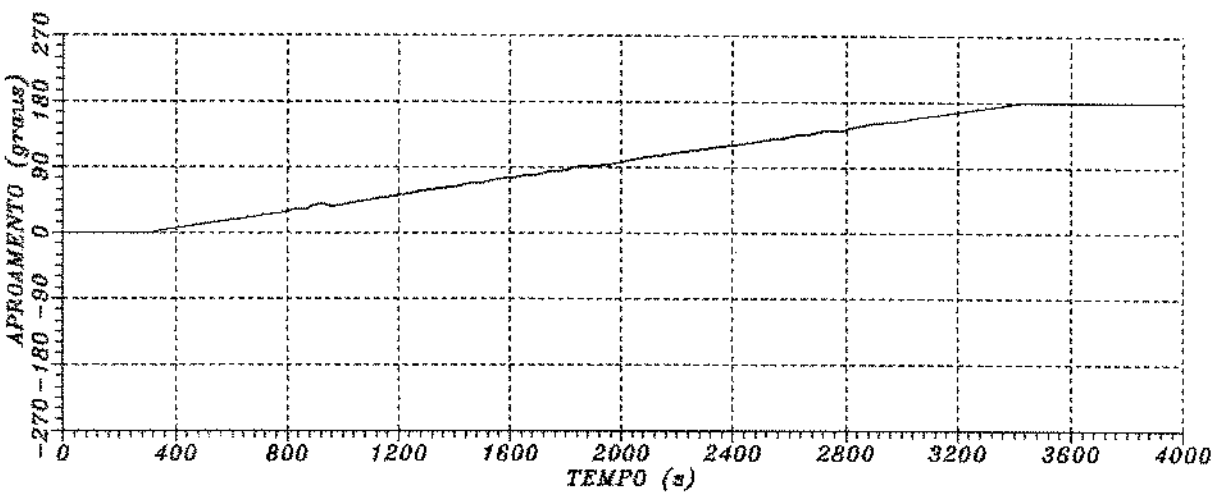
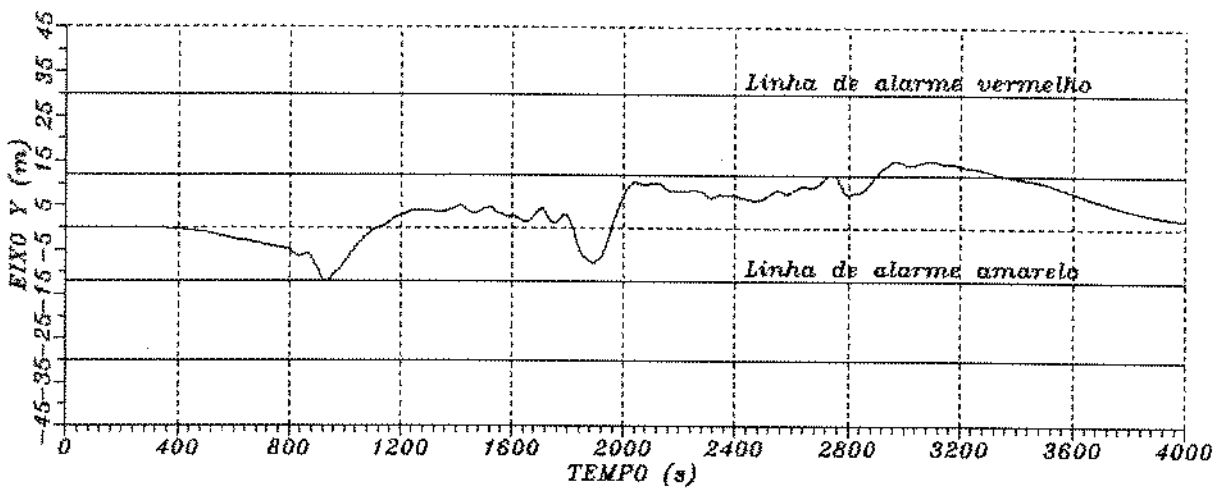
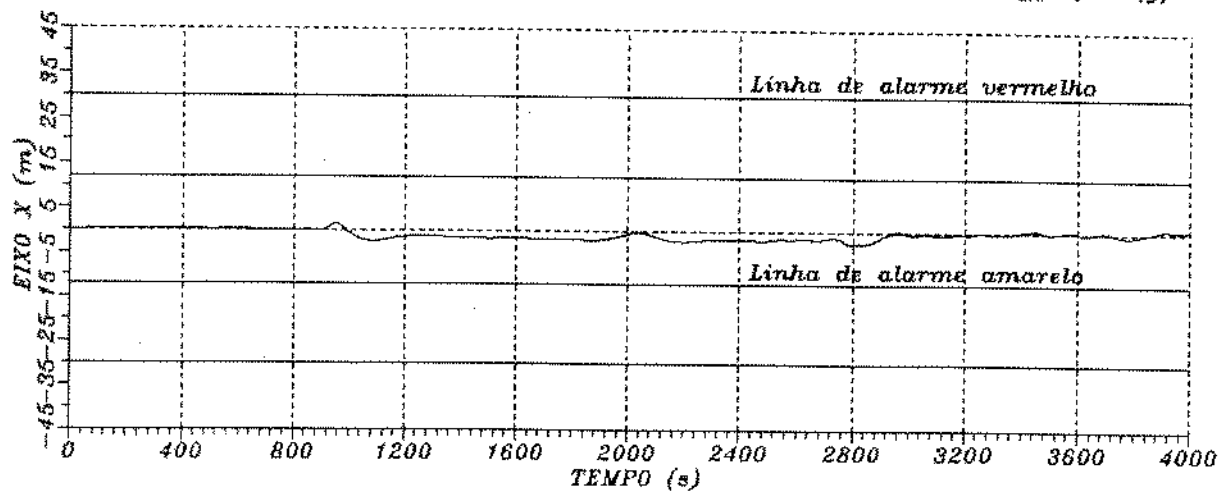


Fig 5.22 : Ambiente 6. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa

eixo Y os afastamentos máximos ainda ultrapassam o limite de 2% da lâmina d'água (ver tabela 5.2). O tempo requerido para que complete-se a mudança de aproamento, no entanto, é grande: 3100 segundos quando, na simulação anterior, demandou-se cerca de 200 segundos.

O comportamento do controlador modificado em modo de aproamento segundo entrada em degrau, apresentado na figura 5.23, assemelha-se ao da figura 5.21, com valores menores para as excursões observadas (ver tabela 5.2).

A simulação realizada com o controlador proposto, em modo de aproamento por modelo de referência, encontra-se na figura 5.24.

A comparação entre o desempenho da embarcação com o controlador proposto e com o controlador modificado, indica afastamentos bastante reduzidos para o modelo proposto, que apresenta comportamento satisfatório durante toda a mudança de aproamento, sem que incorra-se sequer em alarmes amarelos. Além disso, o tempo de estabilização do sistema proposto é cerca de metade do exigido para o sistema modificado (ver tabela 5.2).

Na última condição ambiental simulada, para um aproamento inicial de 000° da embarcação, têm-se ventos e ondas atuando sobre o navio à 180° e correntezas vindas de 135° . A figura 5.25 apresenta as curvas de deslocamentos do navio, para os três eixos de controle, usando-se o controlador existente em modo de aproamento segundo entrada em degrau.

Como a correnteza, neste caso, apresenta componente

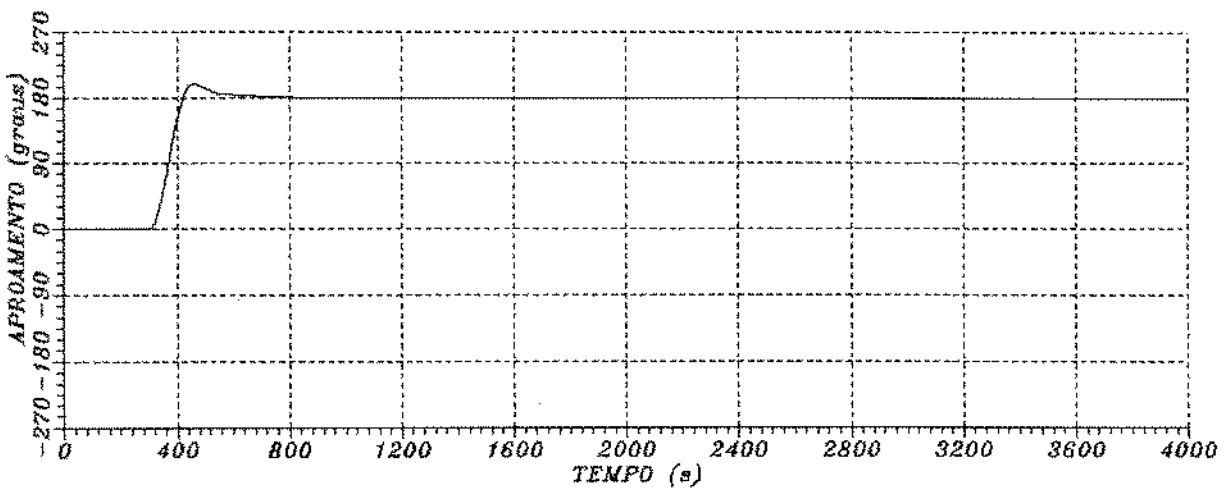
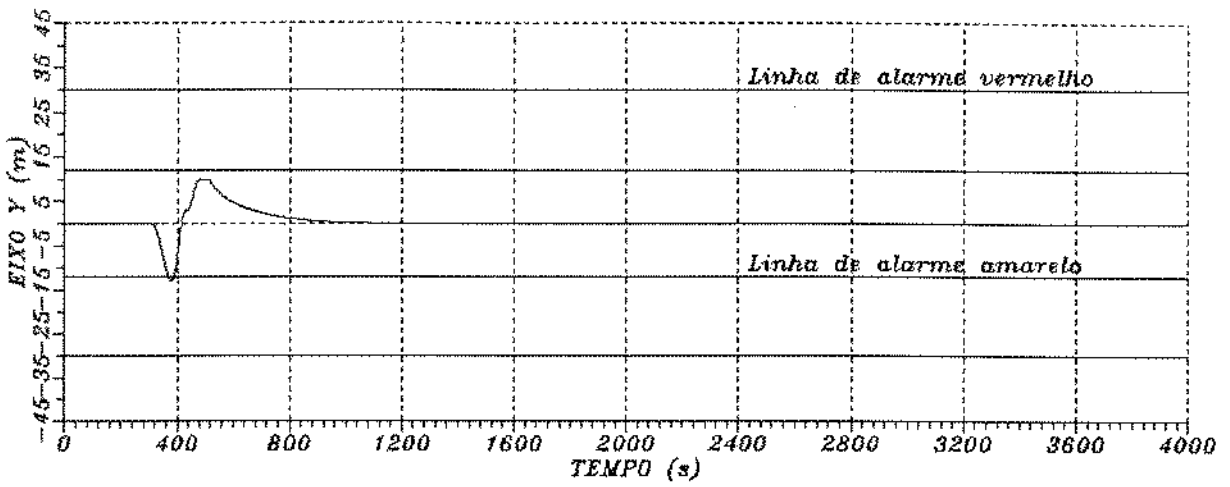
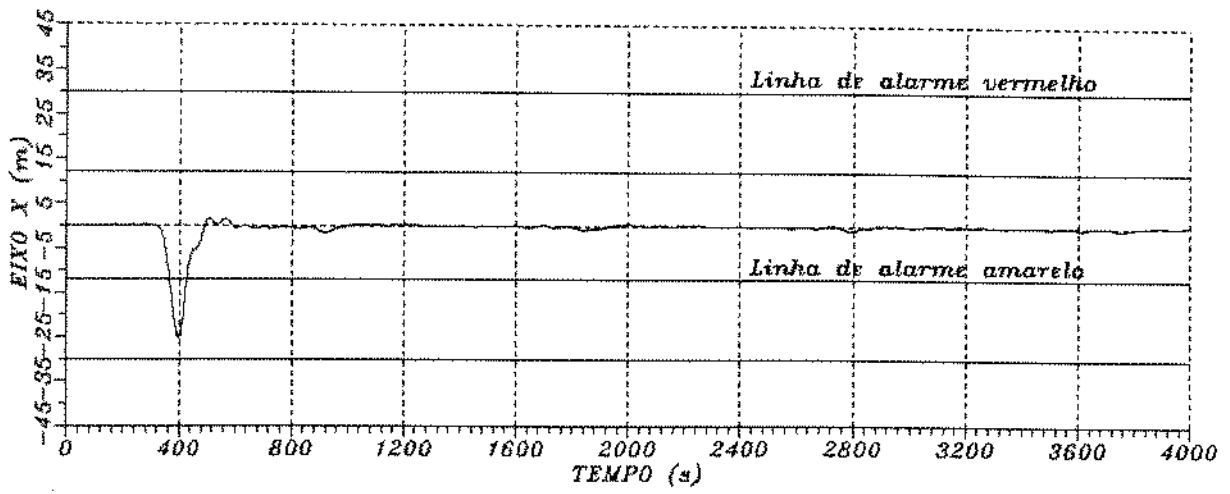


Fig 5.23 : Ambiente 6. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau

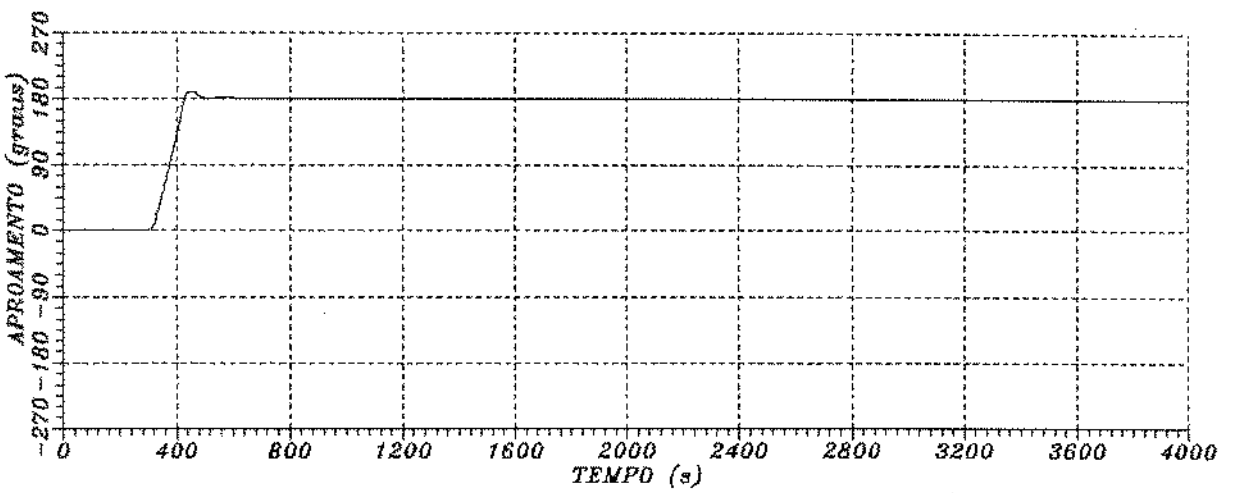
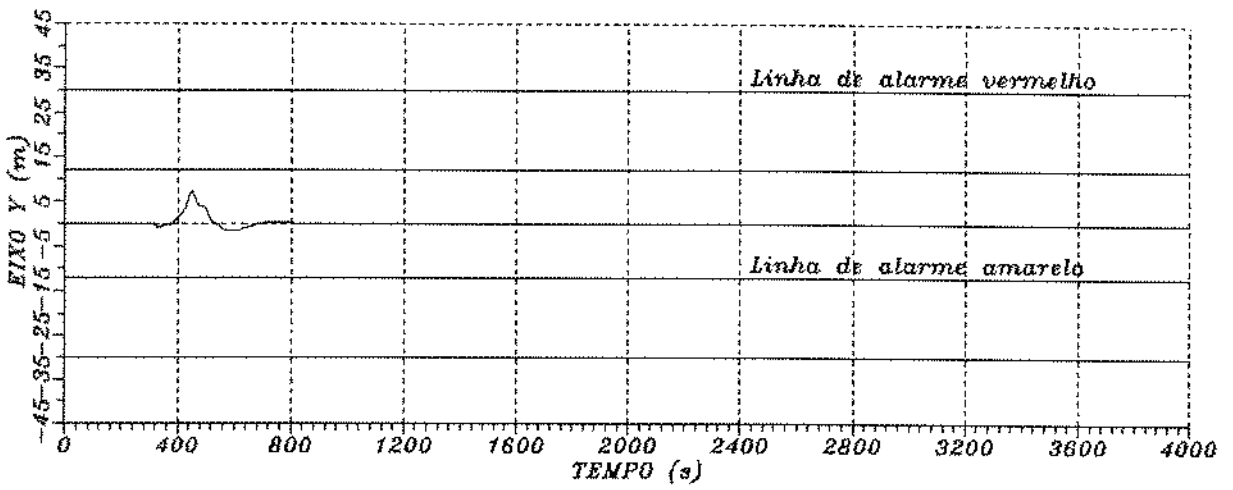
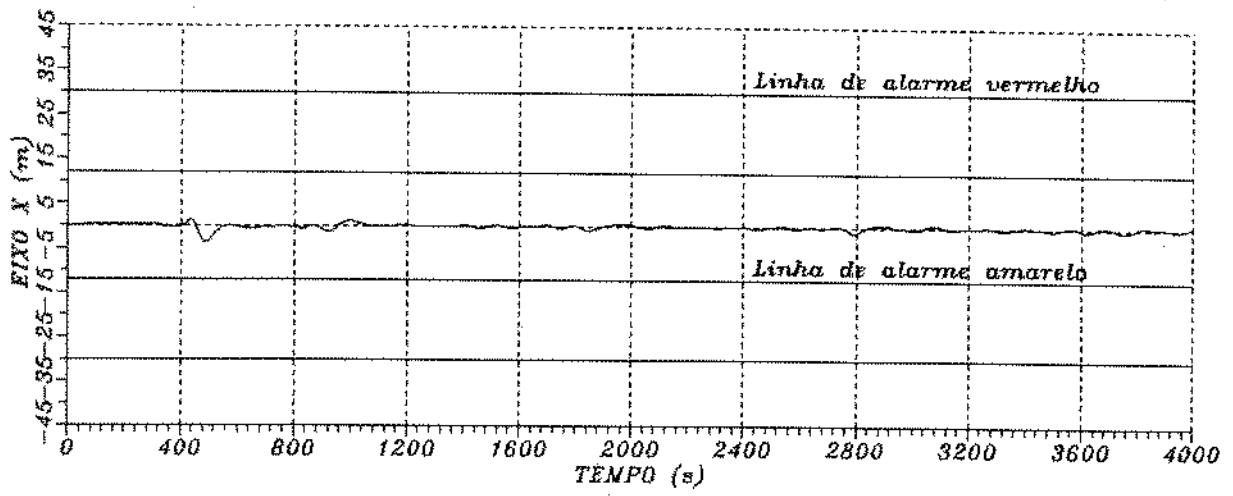


Fig 5.24 : Ambiente 6. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa

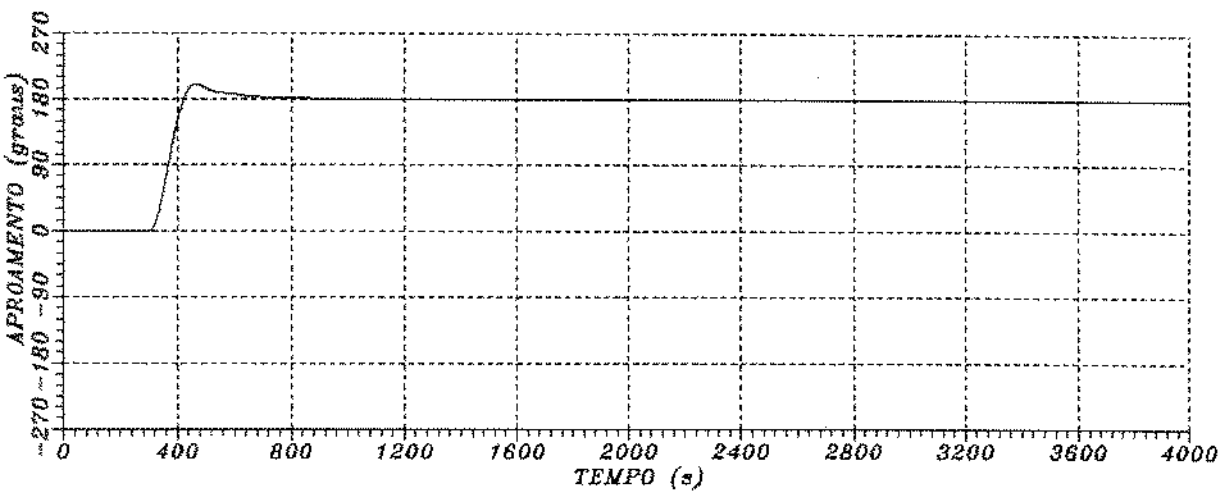
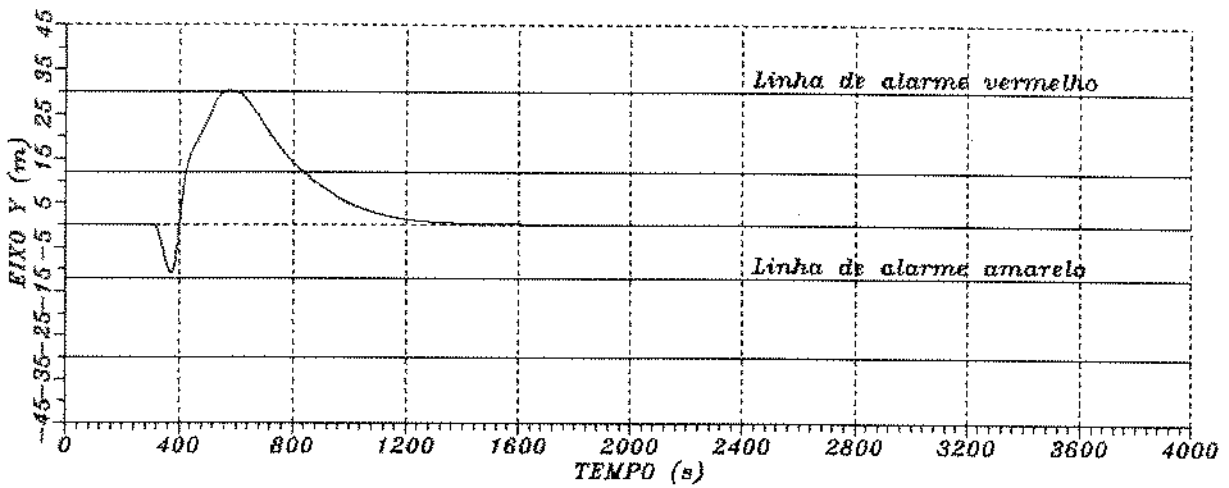
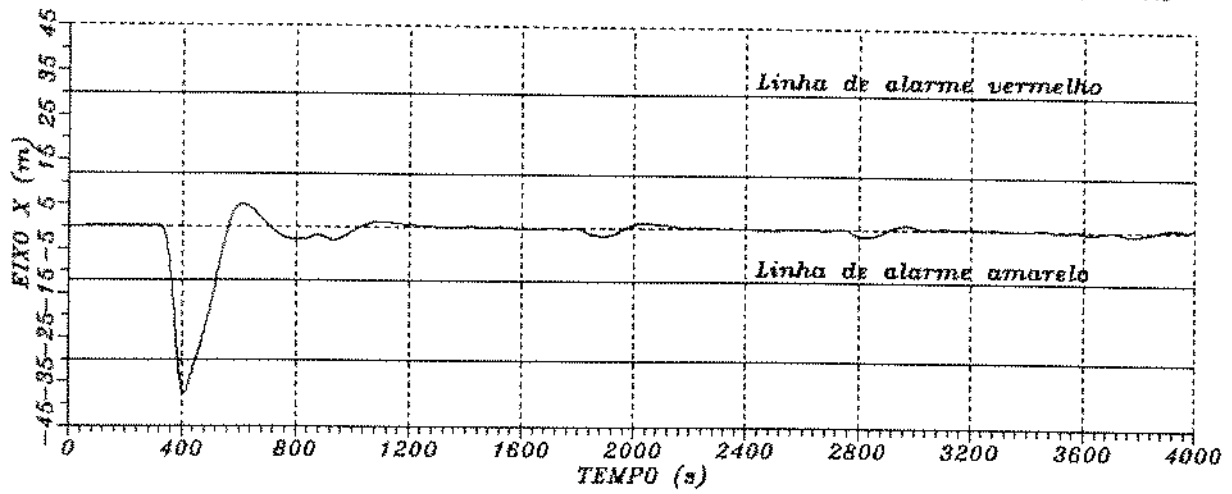


Fig 5.25: Ambiente 7. Sistema Existente em giro segundo entrada em degrau

que reforça a resultante de forças que atuam no eixo X, ao iniciar-se o giro do navio, a diminuição desta resultante é maior do que no caso precedente, fazendo com que a embarcação apresente excursões maiores à ré. Também como na simulação anterior, após a metade da mudança de aproamento ocorre uma brusca variação na direção das forças atuantes, em coordenadas de navio, que ocasiona um rápido retôrno à posição de referência, com sobrepico de afastamento positivo.

No eixo Y os afastamentos, por outro lado, são menores que na situação anterior, embora o comportamento apresentado pela curva de deslocamentos seja semelhante. De um modo geral, verifica-se que os afastamentos polares são ligeiramente maiores no caso precedente (ver tabela 5.2).

A figura 5.26 representa a simulação com controlador existente em modo de aproamento por modelo de referência. O eixo X revela afastamentos com valores que não diferem em muito dos apresentados na figura 5.22, sendo que observa-se excursões ligeiramente maiores no eixo Y, na presente condição ambiental. O valor de afastamento máximo radial é maior aqui, em contraste com a comparação feita para o modo de aproamento segundo entrada em degrau entre as duas últimas condições de mar, evidenciando que diferentes situações ambientais podem provocar respostas diversas, dependendo inclusive, do modo de aproamento escolhido.

A figura 5.27 apresenta a resposta do controlador modificado, em modo de aproamento segundo entrada em degrau, à condição de mar número 7. No eixo X, os afastamentos, apesar

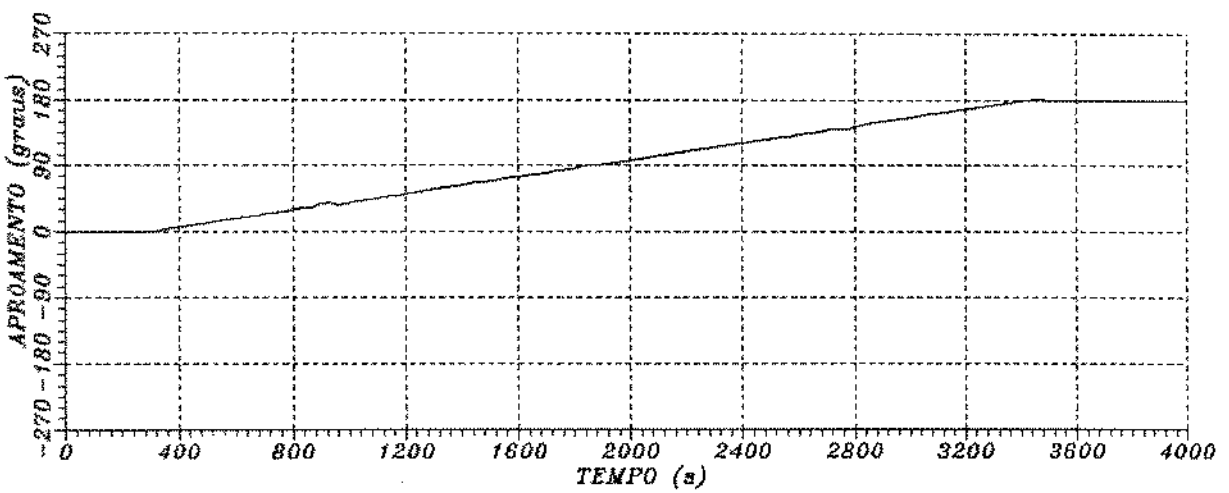
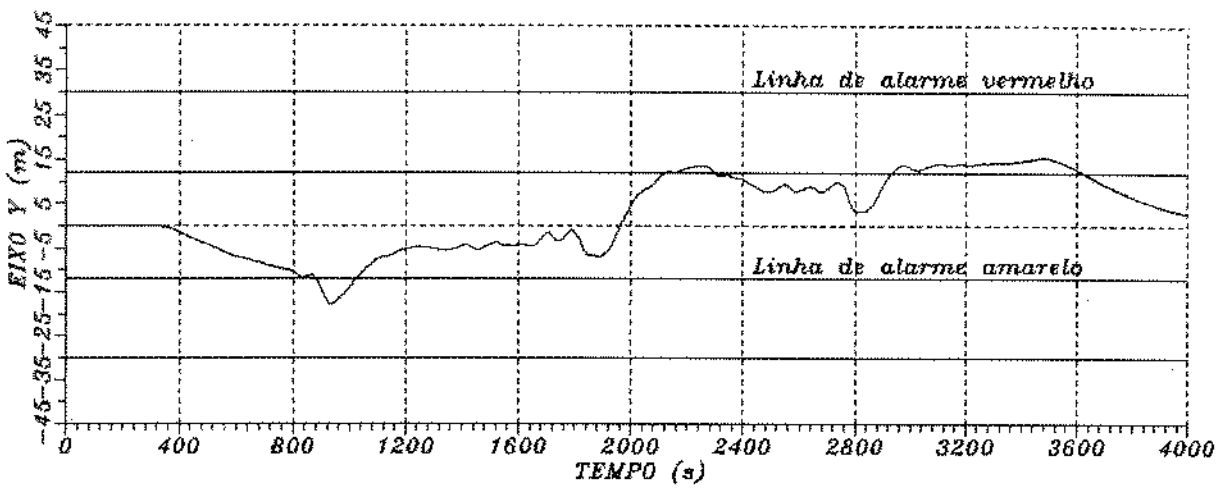
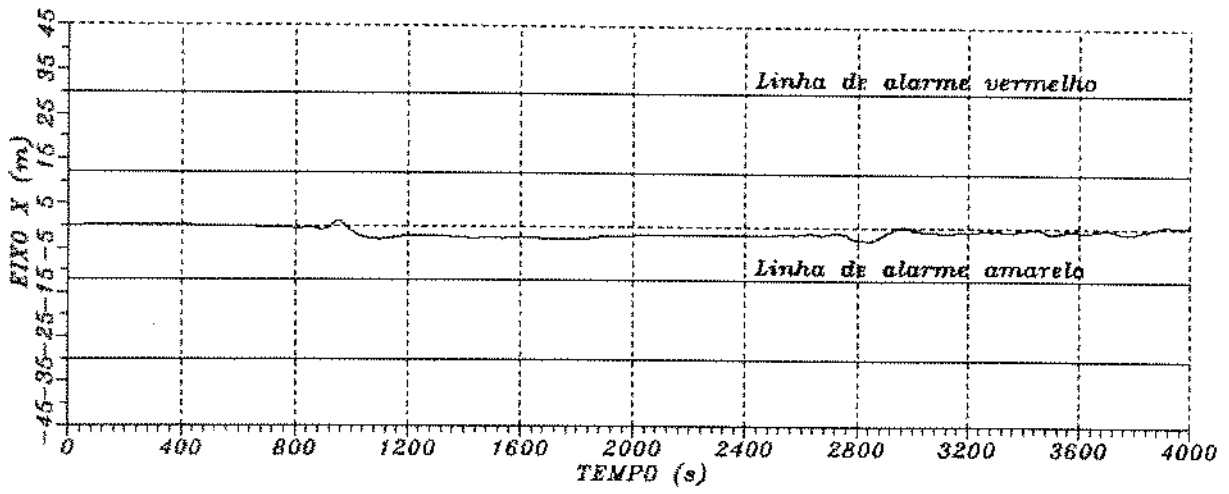


Fig 5.26 : Ambiente 7. Sistema Existente em giro segundo entrada em rampa

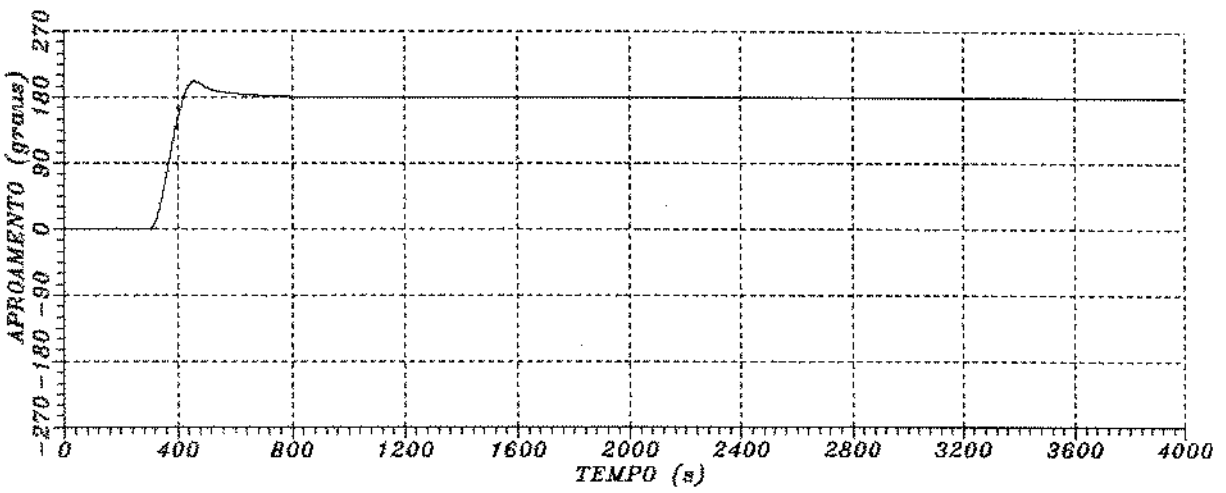
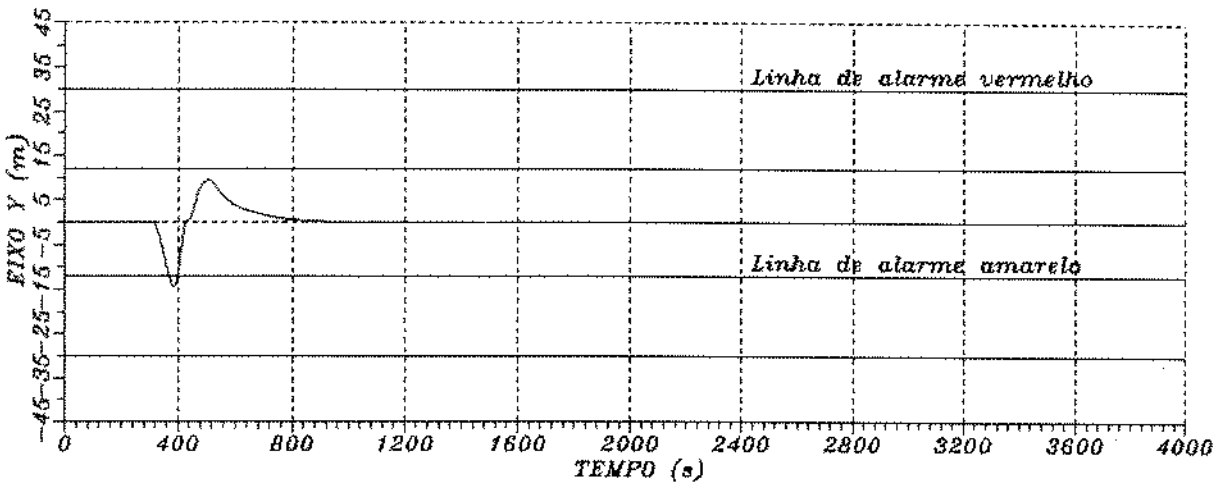
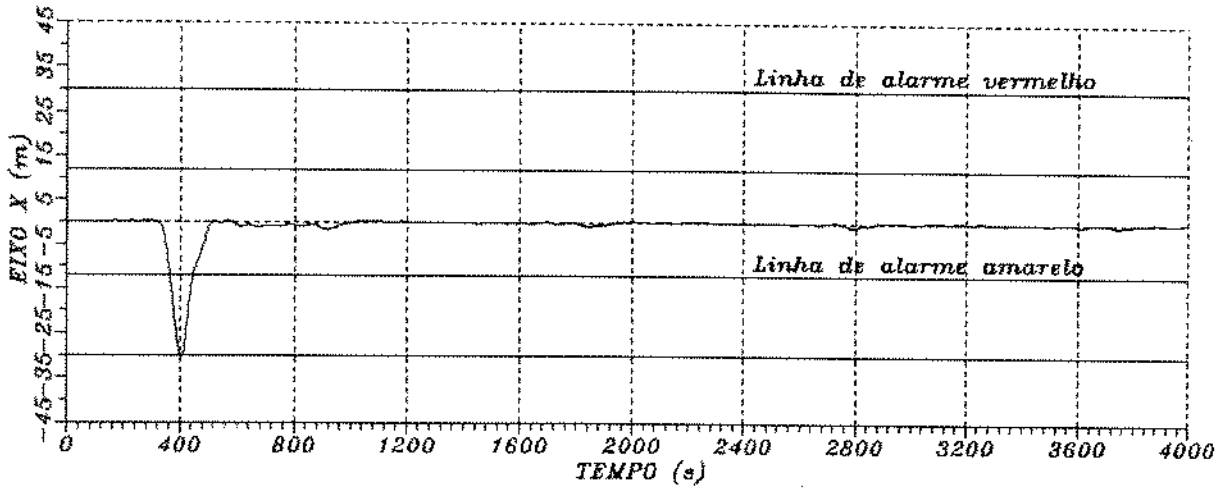


Fig 5.27: Ambiente 7. Sistema Modificado em giro segundo entrada em degrau

de menores em relação àqueles observados para o controlador existente no mesmo modo de aproamento, não apresentam melhora de desempenho equivalente às obtidas nas simulações realizadas em que as mudanças foram de 090° , comportamento este já observado na condição de mar 6, onde o giro também foi de 180° (ver tabela 5.2). No eixo Y, no entanto, a melhora no desempenho é razoável.

Na figura 5.28, por fim, as curvas de deslocamentos para os três eixos de controle, com o controlador proposto atuando em modo de aproamento por modelo de referência, são as que apresentam melhor desempenho, em comportamento coerente com a simulação anterior.

5.4 - Modulação dos propulsores

Define-se como modulação de propulsores, as variações de caráter aleatório na variável de comando dos mesmos [1]. As causas destas variações, em geral, são ruídos de sensores e flutuações nas forças de vento e de ondas, que são atenuados através de filtragem conveniente.

No entanto, chama-se também de modulação de propulsores, à variações excessivas na variável de controle dos atuadores, e que têm por origem uma maior rigidez de controle, sendo um controlador mais rígido aquele que mantém a embarcação dentro de um círculo de passeio de menor raio, mantidas as mesmas condições de mar [11]. Rigidez de controle

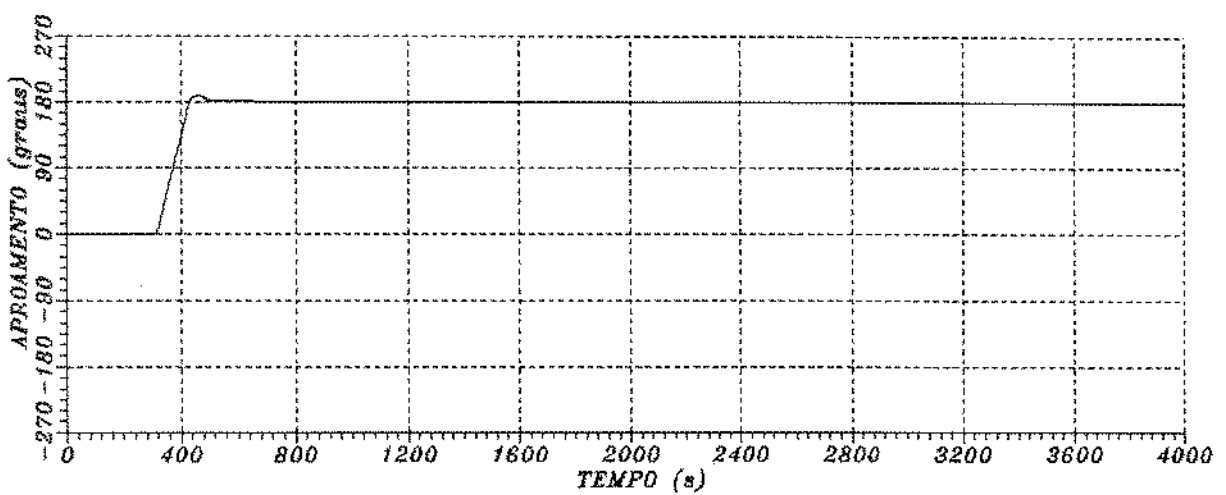
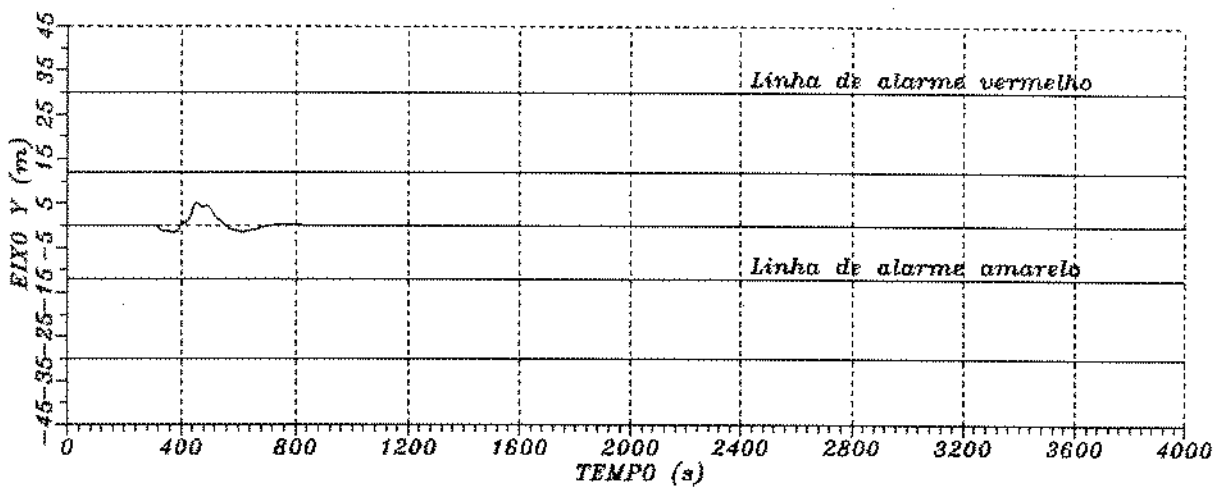
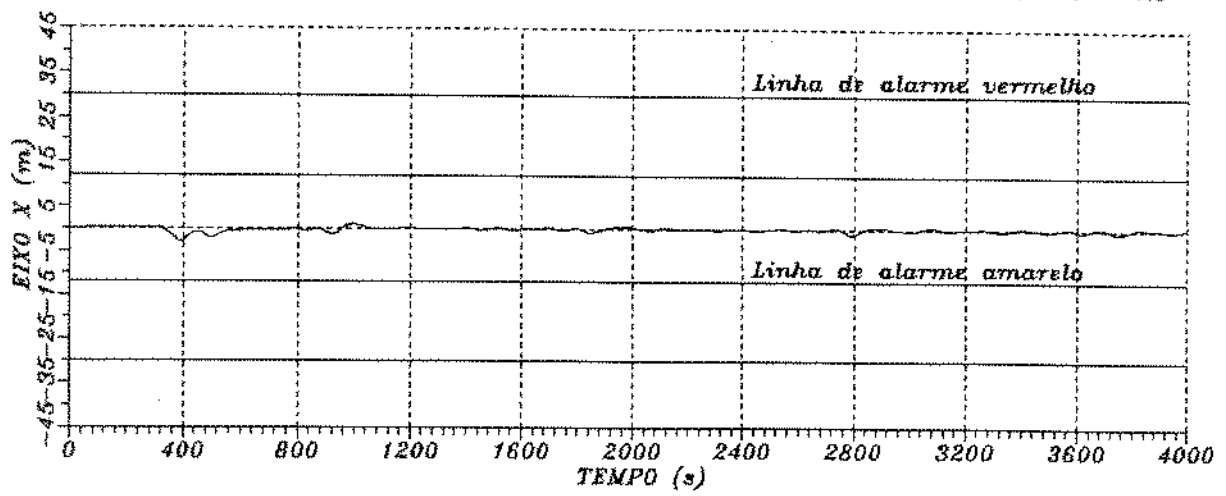


Fig 5.28 : Ambiente 7. Sistema Proposto em giro segundo entrada em rampa

e modulação de propulsores são elementos de projeto mutuamente exclusivos: a melhora em um implica em degradação do desempenho do outro.

Níveis de modulação dos propulsores excessivos, quando em operação contínua e prolongada, induzem à fadiga dos equipamentos de propulsão e grande consumo de combustível. Por outro lado, variações bruscas na demanda de potência solicitam o sistema de geração de energia, que deve ser projetado, todavia, para situações de emergência como a que apresenta-se quando ocorre a falha de um propulsor que desenvolve empuxo máximo, ou quando o envio de sinal errôneo, pelo controlador, exige potência total dos propulsores.

No tipo de situação estudada neste trabalho, é de supor-se que os efeitos de fadiga no equipamento sejam minimizados, devido à transitoriedade das ocasiões em que necessita-se de grande rigidez de controle para manter a posição.

Na figura 5.29 apresenta-se o empuxo aplicado por um propulsor lateral, na condição de mar 1, nas seguintes simulações: a) Mudança de aproamento com controlador existente segundo entrada em degrau, com uma taxa de giro de 64 graus/min. b) A mesma operação com controlador proposto e taxa de 61 graus/min. c) Giro com controlador proposto segundo taxa de 34.0 graus/min. Apesar da maior modulação do sistema proposto, o sistema existente também apresenta um grande pico inicial de empuxo, sendo este outro motivo para que realize-se a mudança de aproamento de forma controlada e vagarosa. Com

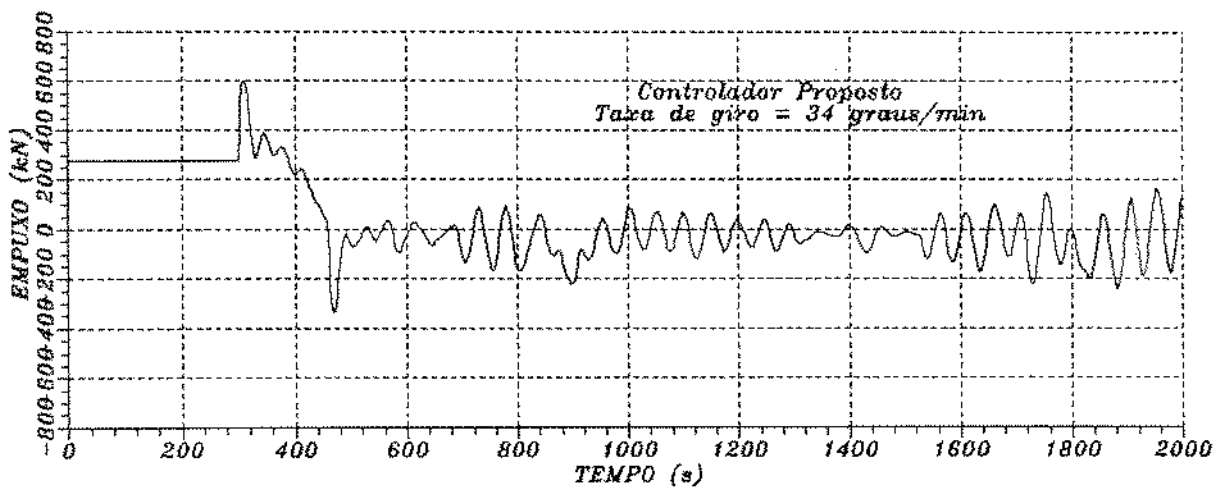
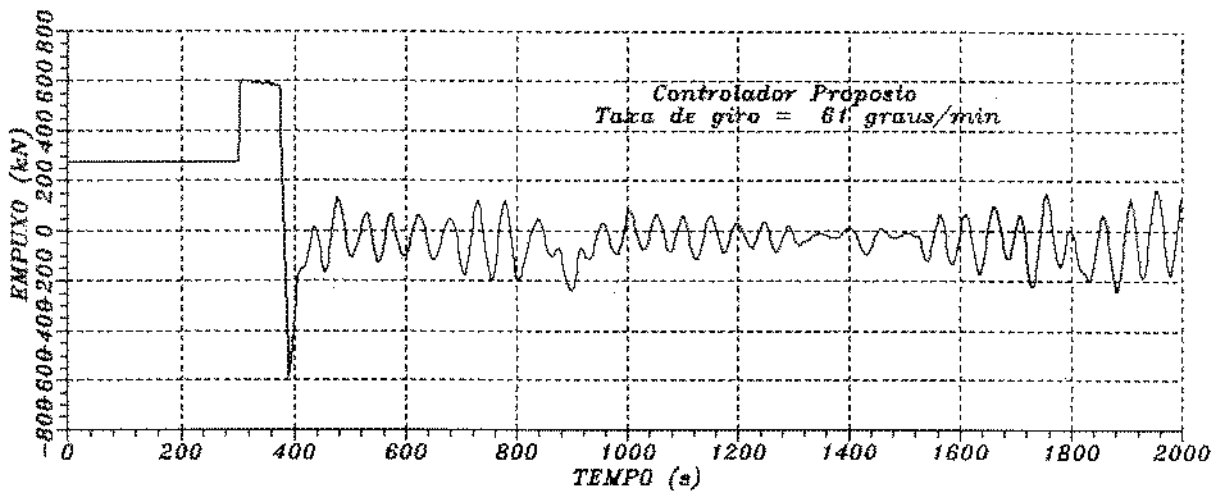
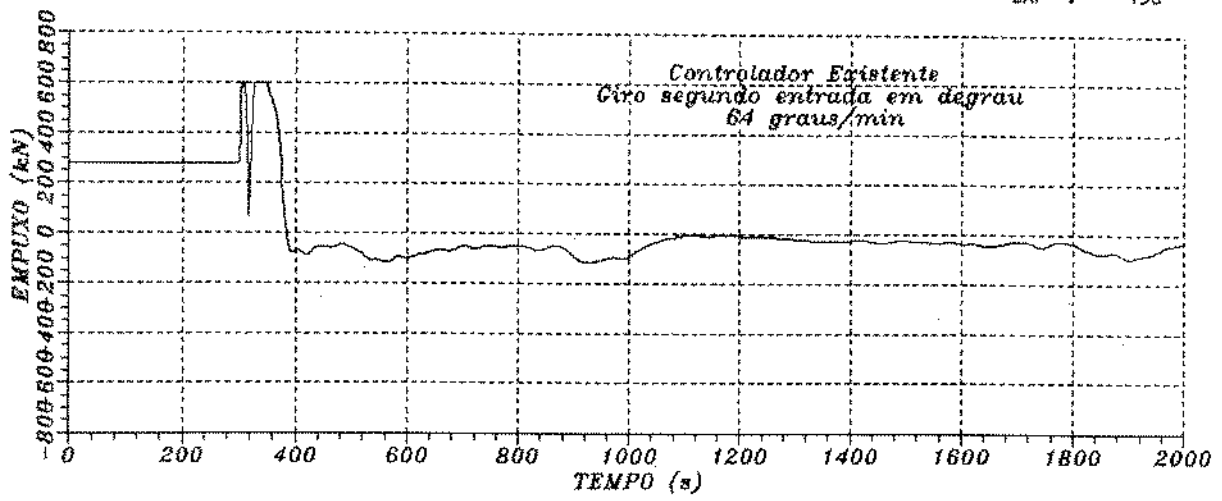


Figura 5.29: Propulsor de proa submetido ao ambiente no 2

taxas mais lentas de giro, o controlador proposto apresenta sensível diminuição da modulação de propulsores, durante a operação de mudança de aproamento. Pode-se propor, assim, que uma vez atingido o regime permanente, promova-se uma passagem, de forma gradual, do controle do sistema para o controlador original (através do decaimento exponencial da diferença dos comandos, por exemplo), o que reduziria o tempo sob o qual os equipamentos estariam sujeitos aos maiores níveis de modulação.

5.5 - Resumo

Com a constatação de que a capacidade da embarcação em manter-se sobre a locação varia, a depender do controlador e do modo de aproamento utilizados, foram selecionadas várias condições de vento, ondas e correnteza, para que se obtivesse maior certeza no desenvolvimento do controlador proposto.

Apresentou-se, desta forma, os critérios de escolha das condições ambientais e os resultados das simulações realizadas com os sistemas existente, modificado e proposto. Além disso, discutiu-se, neste capítulo, os efeitos que o aumento da rigidez de controle, introduzida no sistema proposto, acarretam na modulação dos propulsores.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

6.1 - Introdução

Os estudos realizados tiveram, necessariamente, que iniciar por um processo de compreensão do problema-tema, em que os movimentos de um navio, durante uma mudança de aproamento, tiveram que ser analisados, identificando-se os fatores de influência nas perdas de posição verificadas. Apenas a partir de um melhor entendimento do processo em foco, foi possível o desenvolvimento de uma linha de ação, no sentido de se obter maiores velocidades de giro com menores raios de excursão por parte do navio-sonda.

Procura-se, aqui, descrever em linhas gerais o que foi feito neste sentido, discutindo-se a forma em que foi concebido e desenvolvido o controlador proposto, além do programa simulador utilizado para tanto e das modificações que se fizeram necessárias a este último. Tenta-se, outrossim, um balanço dos resultados obtidos com as simulações e discussão em relação às possibilidades de implementação do algoritmo

proposto em casos reais. Por fim, com vistas a estudos de continuação deste, propõe-se alternativas de novos controladores e modificações no programa simulador.

6.2 - Estudos iniciais

Após obter-se o programa simulador em condições de trabalho e de um estudo inicial do sistema existente, familiarizando-se com o seu desempenho e identificando-se algumas das condições de mar mais desfavoráveis para uma mudança de aproamento, o estudo direcionou-se para uma análise da estrutura do sistema de controle por meio de métodos clássicos como o do lugar das raízes e de resposta nos domínios da frequência e do tempo.

Como primeira aproximação de uma solução, procurou-se uma melhor sintonia dos parâmetros de ganho do sistema existente, aumentando-os com vistas a obtenção de uma resposta transitória mais rápida, uma vez que identificava-se o lento ajuste dos termos de controle como responsável pelas perdas de posição durante as manobras de mudança de aproamento.

Para isto, lançou-se mão de índices de desempenho, mais especificamente do índice ITAE, onde procura-se minimizar a área sob a curva afastamento x tempo, com o objetivo de chegar-se a um controlador otimizado segundo o critério de

maiores ganhos de controle.

Também para o sistema, assim obtido, foram necessárias análises com os métodos do lugar das raízes, respostas nos domínios da frequência e do tempo e de simulações nas mesmas condições de mar utilizadas para o sistema existente. Os resultados obtidos apontavam para uma melhora significativa do desempenho, durante o giro do navio, apresentando, no entanto, um significativo decréscimo nas condições de estabilidade do sistema, assim modificado.

Em vista disso, procurou-se a seguir, uma solução que não implicasse em uma redução de estabilidade de tal magnitude, mantendo-se um desempenho de mesma ordem de grandeza.

6.3 - O Controlador proposto

Partindo de observações do comportamento dos termos proporcional, integral e derivativo do sistema existente, durante as manobras de mudança de aproamento, em que o ajuste destes revelava-se lento, limitando a velocidade de giro afim de permitir compatibilidade com o redirecionamento da potência dos propulsores, levantou-se a idéia de que, com um sistema auxiliar, a ser acionado quando em operações de giro da embarcação, que fornecesse uma ação PID suplementar, talvez fosse possível modificar-se a configuração da função de

transferência do sistema, de forma a obter-se um desempenho semelhante ao do sistema modificado, porém com maior estabilidade relativa que este último.

O programa simulador foi modificado para que se pudesse testar esta linha de raciocínio, buscando-se, com o apoio de simulações, uma configuração de polos e zeros que fornecesse rapidez de resposta transitória com margens de estabilidade aceitáveis.

As novas ações proporcionais e integrais dos eixos X e Y foram introduzidas sem diferenças, em termos de polos e zeros da função de transferência do controlador, fazendo-se com que a nova ação de controle PID atuasse em paralelo, em contraste com a ação do controlador original, onde os termos derivativo e integral encontram-se em paralelo entre si e em série com o termo proporcional. O termo derivativo introduzido depende da derivada da função de posição, enquanto que no controlador existente, a ação derivativa é levada a efeito através do uso de um filtro de avanço-atraso, já descrito. Isto fez com que se modificasse a distribuição de polos e zeros, o que permitiu melhorar a dinâmica do sistema.

Foi necessário, também, que se procedesse a uma sintonia do sistema assim concebido, de forma a ajustar os parâmetros de ganho auxiliares para o melhor desempenho possível. Isto foi realizado utilizando-se a mesma técnica empregada para a otimização do sistema original, ou seja : através da minimização do índice de desempenho ITAE em

simulações com diferentes condições de mar.

6.4 - Conclusões

Dos resultados obtidos das simulações, e amparados pelas análises feitas sobre as velocidades dos regimes transientes e estabilidades relativas de cada sistema em estudo, pode-se concluir que :

- o O sistema atual possui resposta excessivamente lenta à modificações de aproamento. Isto torna necessária a limitação da velocidade de giro da embarcação, de forma a coadunar-se esta à capacidade de ajuste do seu controlador.
- o O sistema existente é passível de aumento nos valores dos seus parâmetros de ganho, sem incorrer-se em instabilidade do sistema. Pelos estudos feitos há uma margem significativa para o aumento destes valores.
- o O aumento dos parâmetros de ganho do sistema existente, segundo a otimização pelo índice de desempenho ITAE, reduz apreciavelmente as margens de ganho e de fase do sistema, embora, por outro lado, aumente significativamente o desempenho do sistema em operações de mudanças de aproamento.

- o As respostas transitórias à entradas em rampa unitária, dos sistemas existente modificado e do sistema proposto, apresentam uma redução significativa no tempo de resposta, em relação ao sistema original. A modificação deste, no entanto, confere um carácter excessivamente oscilatório à resposta transitória, fazendo com que o tempo requerido para a estabilização do sinal em regime permanente, seja equivalente ao sistema existente.

- o O sistema proposto, embora também apresente redução nas margens de ganho e de fase, em relação ao sistema original, possui estabilidade sensivelmente melhor que a do sistema modificado, apresentando o melhor desempenho, nas simulações efetuadas, dentre os três sistemas em foco.

- o O sistema proposto mantém as premissas de poder ser apenas acrescentado ao sistema existente, sem implicar em modificações estruturais neste último, e de possuir carácter transitório, ou seja, o de ser utilizado para e apenas durante manobras de mudança de aproamento.

6.5 - Implementação do algoritmo proposto

Os navios em operação, que poderiam incluir em seus programas controladores o algoritmo proposto, são de segunda geração e dispõem de computadores com reduzida capacidade de memória e processamento (microcomputadores de 16 bits com 48 a 64 Kbytes de memória RAM). O algoritmo proposto, por outro lado, é de pequeno tamanho, não exigindo espaço significativo de memória. É necessário, porém, a introdução de um mecanismo de ajuste dos parâmetros de ganho do algoritmo proposto, dependente da profundidade de operação, de forma a permitir menor modulação dos propulsores em grandes lâminas d'água, uma vez que quanto maior for a distância entre o navio e o poço, maiores serão os afastamentos permissíveis, sem que se incorra em riscos de dano ao equipamento.

Outro recurso a ser implementado, é o de uma transferência suave entre a atuação do algoritmo proposto e o modo de operação normal do controlador, após completar-se a manobra de mudança de aproamento. Como o ajuste paralelo de ganhos aumenta consideravelmente a rigidez de controle, a maior modulação de propulsores decorrente pode induzir excessivo desgaste por fadiga no equipamento de propulsão, se os períodos de tempo envolvidos forem muito prolongados. Assim, é recomendável que haja um retorno à parâmetros de ganho menores, após a operação de giro, para que a manutenção de posição prossiga com valores baixos de modulação.

Mecanismos de transferência suave entre diferentes modos de operação PD são utilizados quando, por exemplo, promove-se a passagem de um sensor de posição acústico para o sensor eletro-mecânico (taut-wire). Como a posição lida pelos dois instrumentos difere, em geral, entre si, o controlador recebe a informação de uma brusca mudança de posição, caso a transferência não seja suave, respondendo com um aumento dos termos derivativo e proporcional. Para evitar desequilíbrios, a passagem é feita através de decaimento exponencial da diferença de leitura entre os dois sensores, fazendo com que o controlador ajuste-se gradualmente à nova informação de posição. Um mecanismo semelhante poderia ser utilizado para a passagem do controle com o algoritmo proposto para o modo de operação original.

Tendo em vista o fato de que o desenvolvimento de novos mecanismos exigiriam maior espaço de memória que o algoritmo aqui apresentado, mecanismos estes que assegurem um adequado conjunto de parâmetros de ganho dependente da profundidade de trabalho e uma transferência suave entre o modo de controle proposto e o existente, seria necessário fazer-se um estudo dos equipamentos existentes, para que se estabelecesse a factibilidade da implementação citada. No entanto, é de se crer que tal espaço de memória seja disponível, uma vez que os programas controladores destas embarcações admitem modificações [9].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Morgan, Max. Dynamic positioning of offshore vessels. Tulsa, Oklahoma : Petroleum Publishing Co. 1978.
2. Fa., H. Ancrege dynamique - technique et applications. Paris: Editions Technip, 1988.
3. Ogata, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. Rio de Janeiro : Prentice Hall do Brasil, 1982.
4. Kuo, Benjamin C. Sistemas de controle automático. Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil, 1982.
5. SEDCO-FOREX Dynamic positioning simulation program Schlumb, operations manual, 1988.
6. Stanbery, S.R. & Philbrick, R. SEDCO-472 & SEDCO-709 dynamic positioning systems. PETROBRAS - Curso Avançado de Perfuração. 1988.
7. HONEYWELL, Sedco-472 dynamic positioning manuals.
8. SEDCO-FOREX Schl. SEDCO-472 emergency disconnect 08/03/1987. Relatório interno #ASK472-002-87, 1987.
9. SEDCO-FOREX Schl. SEDCO-472 load shed 02/dec/1986. Relatório interno #082/87.
10. CIT-ALCATEL, King Fisher dynamic positioning manuals. 1981.
11. Sargent, J.S. & Eldred, J.J. Adaptive control of thruster modulation for a dynamically positioned drillship. OTC No2036, 1974.
12. Sargent, J.S. & Morgan, M. Augmentation of a mooring system

through dynamic positioning. OTC #2064, 1974.

13. Sargent, J.S. & Cowgill, P.N. Design considerations for dynamically positioned utility vessels. OTC #2633, 1976.
14. Zunderdorp, H.J. & van der Vlies, J.A. How to optimize a dynamic stationing system. SPE #3757, 1972.
15. Sorheim, H.R. & Galtung, F.L. Wave filter performance evaluation. OTC #2869, 1977.
16. Schneiders, C.C. & Pronk, C. Performance of thrusters. OTC #2230, 1975.
17. Sjouke, J. & Lagers, G. Development of dynamic positioning for IHC drill ship. OTC # 1498, 1971.
18. Wilson, D.R. & Corral, D.R. The design of digital notch networks for use in servomechanisms. IEEE Transactions on industrial electronics and control instrumentation. 1973, Vol IECI-20, 3, 138-144.
19. Bowes, J. & Newby, M.P. Propulsion systems for dynamically positioned drilling rigs. Society Underwater Technology Oceanology International Conference, 1975. 41-47.
20. Balchen, J.G. & Jenssen, N.A. & Mathisen, E. & Salid, S. A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control. Modeling, Identification and Control. 1980, vol 1, 3, 135-163.
21. Grimble, M.J. Relationship between Kalman and notch filters used in dynamic positioning systems. Electronics Letters. 1978, 13, vol.14, 399-400.
22. Drager, Harold. Classification of dynamic positioning systems. OTC #2859, 1977.

23. Pinkster, J.A. Wave feed-forward as a means to improve dynamic positioning. OTC #3057, 1978.
24. Aalbers, A.B. & Nienhuis, U. Wave direction feed-forward on basis of relative motion measurements to improve dynamic positioning performance. OTC # 5445, 1987.
25. McKinstry, G. & Fujita, M.T. & Swanson, T.L. An integrated positioning thruster control system. OTC # 4386, 1982.
26. Smith, G.D. & Parlas, S.C. Drilling in water depths in excess of 3000 feet from moored and dynamically positioned vessels. SPE # 8313, 1979.
27. Moler, C. & Little, J. & Bangert, S. & Kleiman, S. PC-MATLAB for MS-DOS personal computers, versão 2.2, The MathWorks Inc, 1986.
28. RSV GUSTO Engineering, Dynamically positioned drillships, 1979

ANEXO A

O ANALISADOR DE ESPECTRO HONEYWELL

O sinal de deslocamentos da embarcação, proveniente dos sensores de posição, contém todo o espectro dos movimentos causados pelas ondas do mar. Com o objetivo de atenuar a informação dos movimentos oscilatórios de média zero, aos quais o sistema de controle não deve opor-se, o sinal de posição é processado por uma rede de filtros digitais.

Inicialmente, o sinal é filtrado pelos dois filtros notch, que eliminam toda a informação de movimento em duas frequências específicas, atenuando parte do sinal de frequências vizinhas. Isto faz com que o espectro apresente três áreas distintas.

O sinal é fornecido, então, ao analisador de espectro [1], que o divide em nove faixas de frequência, através de nove filtros passa-banda. A seguir, a média dos valores de deslocamentos em cada faixa de frequência é elevada ao quadrado e passa a representar, dentro de sua banda de frequência, o valor estimado para a energia do espectro de onda correspondente. O produto do quadrado da média dos

deslocamentos pela largura da respectiva faixa de frequência é tratado como parte da área sob a curva de densidade espectral do movimento da embarcação.

Com o espectro reconstruído desta forma, um algoritmo de ajuste das frequências de centro dos filtros notch calcula o valor de cada uma das três áreas existentes, verificando se são iguais. Em caso negativo, o algoritmo escolhe novos valores para as frequências de centro dos filtros notch, em um processo iterativo feito a cada 50 segundos [6], de forma a obter a igualdade entre as áreas do espectro, adaptando-se a rede de filtragem à mudanças nas condições de mar.

O mesmo sinal fornecido ao analisador de espectro é filtrado por um filtro passa-baixas e fornecido ao sistema de controle.

As frequências que limitam as faixas utilizadas pelos filtros passa-banda são [6]:

- o P(1) = 0.0200 Hz
- P(2) = 0.0259
- P(3) = 0.0334
- P(4) = 0.0430
- P(5) = 0.0557
- P(6) = 0.0718
- P(7) = 0.0928
- P(8) = 0.1200
- P(9) = 0.1550
- P(10) = 0.2000 Hz

As frequências de centro dos filtros passa-banda,

que possuem coeficiente de amortecimento $\zeta = 0.074$ [6], são determinadas por:

$$PB_i = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \quad i = 1, 2, \dots, 9$$

ANEXO B

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO EMPREGADO

Este programa consiste de:

- 1) Programa principal;
- 2) Arquivo COMMON de variáveis diversas SIMCM.FOR
- 3) Arquivo COMMON de variáveis de controle CNTCM.FOR
- 4) Arquivo de entrada de dados CORRIDA.DAT

```
C
C
C          SIMULADOR DE SISTEMA DE POSICIONAMENTO DINÂMICO
C
C
C
C
C
C
C
C          $INCLUDE:'SIMCM.FOR'
C          $INCLUDE:'CNTCM.FOR'
C
C          CALL      DADOS
C          CALL      ENTRA
C          CALL      PARAM
C          CALL      INICI
C
C
C          10 CALL  SNSOR
C             CALL  VENTO
C             CALL  ONDAS
C             CALL  CORRRT
C             CALL  APROA
C             CALL  CONTR
C             CALL  ALOCA
C             CALL  PROPS
C             CALL  NAVIO
C             CALL  SAIDA
C             CALL  INTEG
C             IF (TIME.LE.TFIN) GOTO 10
C
C          END
C
C
C          SEDCO 472 ASK DATA BASE
C
C
C
C          SUBROUTINE DB472
C          $INCLUDE:'SIMCM.FOR'
```

\$INCLUDE:'CNTCM.FOR'

REAL EDF(3,3,37),C(3,8)

CHARACTER SON*2

EQUIVALENCE (C,DCOS)

DATA (((EDF(I,J,K), I=1,3), J=1,3), K=1,20)/

C VENT-X VENT-Y VENT-Z CRNT-X CRNT-Y CRNT-Z ONDA-X ONDA-Y ONDA-Z ANG

*-0.875,0.000, 0.000,-0.810, 0.000, 0.000,-1.000, 0.000, 0.000,

C |000

*-0.925,-0.150,-0.250,-0.880,-0.077,-0.312,-0.985,-0.174,-0.342,

C |010

*-0.900,-0.325,-0.500,-0.948,-0.175,-0.584,-0.940,-0.342,-0.643,

C |020

*-0.850,-0.500,-0.775,-0.982,-0.308,-0.805,-0.866,-0.500,-0.866,

C |030

*-0.775,-0.675,-0.950,-1.000,-0.503,-0.987,-0.766,-0.643,-0.985,

C |040

*-0.650,-0.810,-0.950,-0.975,-0.755,-0.987,-0.643,-0.766,-0.985,

C |050

*-0.500,-0.860,-0.800,-0.905,-0.881,-0.883,-0.500,-0.866,-0.866,

C |060

*-0.365,-0.950,-0.575,-0.791,-0.951,-0.701,-0.342,-0.940,-0.643,

C |070

*-0.210,-0.975,-0.325,-0.635,-0.986,-0.455,-0.174,-0.985,-0.342,

C |080

*-0.050,-1.000,-0.050,-0.436,-1.000,-0.156, 0.000,-1.000, 0.000,

C |090

* 0.000,-0.990, 0.250,-0.199,-0.983, 0.169, 0.174,-0.985, 0.342,

C |100

* 0.280,-0.975, 0.550, 0.055,-0.948, 0.447, 0.342,-0.940, 0.643,

C |110

* 0.450,-0.950, 0.800, 0.307,-0.881, 0.634, 0.500,-0.866, 0.866,

C |120

* 0.650,-0.850, 0.925, 0.540,-0.769, 0.727, 0.643,-0.766, 0.985,

C |130

* 0.727,-0.675, 0.875, 0.727,-0.531, 0.727, 0.766,-0.643, 0.985,

C |140

* 0.850,-0.475, 0.675, 0.850,-0.308, 0.610, 0.866,-0.500, 0.866,

C |150

* 0.890,-0.275, 0.450, 0.890,-0.175, 0.447, 0.940,-0.342, 0.643,

C |160

* 0.868,-0.100, 0.225, 0.868,-0.077, 0.221, 0.985,-0.174, 0.342,

C |170

* 0.800, 0.000, 0.000, 0.785, 0.000, 0.000, 1.000, 0.000, 0.000,

C |180

* 0.868, 0.100,-0.225, 0.868, 0.077,-0.221, 0.985, 0.174,-0.342/

C |190

DATA (((EDF(I,J,K), I=1,3), J=1,3), K=21,37)/

* 0.890, 0.275,-0.450, 0.890, 0.175,-0.447, 0.940, 0.342,-0.643,

C |200

* 0.850, 0.475,-0.675, 0.850, 0.308,-0.610, 0.866, 0.500,-0.866,

C |210

* 0.727, 0.675,-0.875, 0.727, 0.531,-0.727, 0.766, 0.643,-0.985,

C |220

* 0.650, 0.850,-0.925, 0.540, 0.769,-0.727, 0.643, 0.766,-0.985,

ANEXO B

167

C											230
	*	0.450,	0.950,-0.800,	0.307,	0.881,-0.634,	0.500,	0.866,-0.866,				240
C											250
	*	0.280,	0.975,-0.550,	0.055,	0.948,-0.447,	0.342,	0.940,-0.643,				260
C											270
	*	0.000,	0.990,-0.250,-0.199,	0.983,-0.169,	0.174,	0.985,-0.342,					280
C											290
	*	-0.050,	1.000,	0.050,-0.436,	1.000,	0.156,	0.000,	1.000,	0.000,		300
C											310
	*	-0.210,	0.975,	0.325,-0.635,	0.986,	0.455,-0.174,	0.985,	0.342,			320
C											330
	*	-0.365,	0.950,	0.575,-0.791,	0.951,	0.701,-0.342,	0.940,	0.643,			340
C											350
	*	-0.500,	0.860,	0.800,-0.905,	0.881,	0.883,-0.500,	0.866,	0.866,			360
C											370
	*	-0.650,	0.810,	0.950,-0.975,	0.755,	0.987,-0.643,	0.766,	0.985,			380
C											390
	*	-0.775,	0.675,	0.950,-1.000,	0.503,	0.987,-0.766,	0.643,	0.985,			400
C											410
	*	-0.850,	0.500,	0.775,-0.982,	0.308,	0.805,-0.866,	0.500,	0.866,			420
C											430
	*	-0.900,	0.325,	0.500,-0.948,	0.175,	0.584,-0.940,	0.342,	0.643,			440
C											450
	*	-0.925,	0.150,	0.250,-0.880,	0.077,	0.312,-0.985,	0.174,	0.342,			460
C											470
	*	-0.875,	0.000,	0.000,-0.810,	0.000,	0.000,-1.000,	0.000,	0.000/			480
C											490
		DT = 0.25									500
C											510
											520
											530
											540
											550
											560
											570
											580
											590
											600
											610
											620
											630
											640
											650
											660
											670
											680
											690
											700
											710
											720
											730
											740
											750
											760
											770
											780
											790
											800
											810
											820
											830
											840
											850
											860
											870
											880
											890
											900
											910
											920
											930
											940
											950
											960
											970
											980
											990
											1000

```

C          | COEF. DRAG VISCOSO EM SWAY (LBS/(FT/SEG))
BZ = 3.18E+10
C          | COEF. DRAG VISCOSO EM YAW (FT-LBS/(RAD/SEG)2)
MASX = MASS + A11
C          | MASSA EM SURGE ( LBM )
MASY = MASS + A22
C          | MASSA EM SWAY ( LBM )
MASZ = KZZ*KZZ*MASS+A66
C          | MOMENTO DE INÉRCIA EM YAW ( LBM-FT2 )
DISC = A26*A62-MASY*MASZ
C          | DISCRIMINANTE DAS EQUAÇÕES EM "Y" E "Z"
C
C          DO 1 K = 1,3
          DO 1 J = 1,3
          DO 1 I = 1,3
          EDC(I,J,K) = EDF(I,J,K)
C          | INICIALIZAÇÃO DOS COEF. DE DRAG
1 CONTINUE
C          ADF(1) = 6.4617
          | COEF. DE DRAG PARA VENTO EM X ( LB/(FT/SEC)2)
C          ADF(2) = 22.128
          | COEF. DE DRAG PARA VENTO EM Y ( LB/(FT/SEC)2)
C          ADF(3) = 720.56
          | COEF. DE DRAG PARA VENTO EM Z ( LB/(FT/SEC)2)
C          CDF(1) = 714.23
          | COEF. DRAG/CORRENTE EM X ( LB/(FT/SEC)2)
C          CDF(2) = 6265.90
          | COEF. DRAG/CORRENTE EM Y ( LB/(FT/SEC)2 )
C          CDF(3) = 421702.60
          | COEF. DRAG/CORRENTE EM Z ( FT-LB/(FT/SEC)2 )
C          WDF1(1) = 205.0
          | FATOR DRIFT LINEAR DE ONDA EM X (LB/FT)
C          WDF1(2) = 1587.0
          | FATOR DRIFT LINEAR DE ONDA EM Y (LB/FT)
C          WDF1(3) = 106992.4
          | FATOR DRIFT LINEAR DE ONDA EM Z (LB/FT)
C          WDF2(1) = 19.3
          | FATOR DRIFT QUADRADO DE ONDA EM X (LB/(FT)2)
C          WDF2(2) = 148.0
          | FATOR DRIFT QUADRADO DE ONDA EM Y (LB/(FT)2)
C          WDF2(3) = 9977.8
          | FATOR DRIFT QUADRADO DE ONDA EM Z (LB/(FT)2)
C
C          NTHR = 3
C
          TMAX(1) = 136000.0
          TMAX(2) = 136000.0
          TMAX(3) = 142000.0
          TMIN(1) = -136000.0
          TMIN(2) = -136000.0
          TMIN(3) = -85200.0

```

```

ACMD(1) = 1.5708
ACMD(2) = 1.5708
ACMD(3) = 0.0
C
XTH(1) = 136.3
XTH(2) = -142.0
XTH(3) = -142.0

DO 2 I = 1,3
C(1,I) = COS(ACMD(I))
C(2,I) = SIN(ACMD(I))
C(3,I) = XTH(I)*C(2,I)
2 CONTINUE
C
XTH(5) = XTH(1)
XTH(6) = -XTH(2)
XTH(7) = XTH(5)+XTH(6)
C
TMAX(5) = TMAX(1)*XTH(1) + TMIN(2)*XTH(2)
TMIN(5) = TMAX(1)*XTH(1) + TMAX(2)*XTH(2)
TMAX(6) = TMAX(1)*XTH(7)
TMAX(7) = TMAX(2)*XTH(7)
C
GHCM = TMAX(5)*0.1
RMAX = 0.0075
WRITE(*, '( VALOR ATUAL DE RMAX : ', F8.5)') RMAX
WRITE(*, '(A\)' ) ' DESEJA ALTERAR O VALOR DE RMAX ? (S/N)'
READ(*, '(A2)') SON
IF(SON.EQ.'S'.OR.SON.EQ.'s') GOTO 3
IF(SON.EQ.'N'.OR.SON.EQ.'n') GOTO 4
WRITE(*, '( POR FAVOR : DIGITE S OU N ... '))'
GOTO 1
3 WRITE(*, '(A\)' ) ' FORNEÇA O NOVO VALOR PARA RMAX : '
READ(*, '(F8.5)') RMAX
C
4 FLAT = 300.0
TAUN = 60.0
TAUE = 60.0
TAUZ = 10.0
KPX = 320.0
KPY = 700.0
KPZ = 575000.0
KIX = 3.1
KIY = 17.75
KIZ = 525.0
KDX = 3500.0
KDY = 27500.0
KDZ = 0.0
C
END

```

ROTINA DE ENTRADA DE DADOS

```

C
      SUBROUTINE INPUT
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
C
      CHARACTER IANS*1,AILOG*2
      CHARACTER TITL*65,LOG(20)*10
      CHARACTER CARD*5, MODE*4, LDIV*7, NAME*10, NULL*10
      INTEGER ASCI(5), FILE(5)
C
      EQUIVALENCE ( NULL,ASCI ), ( FILE,CASE )
      DATA ASCI/0,0,0,0,0/
C
      OPEN (12,FILE = 'XTEMP.DAT')
      OPEN (13,FILE = 'YTEMP.DAT')
      OPEN (14,FILE = 'ZTEMP.DAT')
      OPEN (15,FILE = 'VSET.DAT')
      OPEN (16,FILE = 'JDES.DAT')
      OPEN (17,FILE = 'THR1.DAT')
      OPEN (18,FILE = 'THR2.DAT')
      OPEN (19,FILE = 'THR3.DAT')
      ILOG = 1
C
C      WRITE ( *,'(A\)' ) ' DESEJA CONFIRMAR PARAMETROS? (S/N) : '
C      READ ( *,'(A2)' ) AILOG
C      IF (AILOG.EQ.'S'.OR.AILOG.EQ.'s') ILOG = 0
C      IF (AILOG.EQ.'N'.OR.AILOG.EQ.'n') ILOG = 1
C
10      OPEN ( 50, FILE = 'CASE', STATUS = 'OLD', ERR = 160 )
C
20      READ ( 50, '(A5)', END = 170 ) CARD
      IF (CARD.NE.'START') GOTO 20
C
      READ (50,'(7X,A65)',ERR=170,END=180) TITL
      READ (50,'(2(7X,F10.0),7X,110)',ERR=170,END=180) TFIN,PINT,LUPT
      READ (50,'(7X,F10.0,12X,A10)',ERR=170,END=180) LINT,OUTF
      READ (50,'(4(7X,F10.0))',ERR=170,END=180) XVES,YVES,ZVES,DPTH
      READ (50,'(3(7X,F10.0),7X,110)',ERR=170,END=180)
*
      XSPT,YSPT,ZDES,HHMT
      READ (50,'(2(7X,F10.0),12X,A10)',ERR=170,END=180) AVEL,ADIR,WNDF
      READ (50,'(2(7X,F10.0),12X,A10)',ERR=170,END=180) WHGT,WDIR,WVEF
      READ (50,'(2(7X,F10.0),12X,A10)',ERR=170,END=180) CVEL,CDIR,CNTF
      READ (50,'(A80)',ERR=170,END=180) HDNG
      READ (50,'(A80)',ERR=170,END=180) PFMT
      READ (50,'(A80)',ERR=170,END=180) PFMT2
      READ (50,'(I2)',ERR=170,END=180) BAND
      READ (50,'(7A10)',ERR=30,END=30) ( LOG(I),I = 1,20 )
30      CLOSE (50)
C
C      IF (LUPT.NE.6) LUPT = 1
      LDIV = 'TELA'
      IF (LUPT.EQ.6) LDIV = 'IMPRESSORA'
      MODE = 'HSPH'
      IF (HHMT.EQ.1) MODE = 'HHMT'
      IF (HHMT.EQ.2) MODE = 'HHMM'

```

```

IF (HHMT.EQ.3) MODE = 'AUTO'
IF (HHMT.EQ.4) MODE = 'NO Z'
IF (HHMT.EQ.5) MODE = 'NORM'
IF(WNDF.EQ.' ') WNDF = ' NENHUM'
IF(WVEF.EQ.' ') WVEF = ' NENHUM'
IF(CNTF.EQ.' ') CNTF = ' NENHUM'

```

C

```

NPRT = 0
J = 0
PINT = DT*IFIX(PINT/DT+0.5)
IF (PINT.LT.DT) GOTO 80

```

```

40 I = J
50 I = I+1
   IF (I.GT.80) GOTO 80
   IF (HDNG(I:I).EQ.' ') GOTO 50
   J = I
60 J = J + 1
   IF(J.GT.80) GOTO 80
   IF(HDNG(J:J).NE.' ') GOTO 60
   NAME = HDNG(I:J-1)
   K = LIST(NAME)
   IF (K.GT.0) GOTO 70
   HDNG(I:J-1) = '???????'
   GOTO 40
70 NPRT = NPRT+1
   PRTL(NPRT) = K
   IF (NPRT.LT.16) GOTO 40
80 IF (NPRT.GT.0) GOTO 90
   PINT = 0.0
   HDNG = ' '
   PFMT = ' '

```

C

```

90 NAME = NULL
   NLOG = 0
   I = 0
   LINT = DT*IFIX(LINT/DT+0.5)
   IF(LINT.LT.DT.OR.OUTF.EQ.' ') GOTO 120
100 I = I+1
   IF(I.GT.20) GOTO 120
   IF (LOG(I).EQ.NULL) GOTO 120
   K = LIST(LOG(I))
   IF (K.GT.0) GOTO 110
   LOG(I) = '???'
   GOTO 100
110 NLOG = NLOG+1
   LOGL(NLOG) = K
   GOTO 100
120 IF (NLOG.GT.0) GOTO 130
   LINT = 0.0
130 M = M+1
   IF (OUTF(M:M).NE.' ') NAME(M:M) = OUTF(M:M)
   IF (M.LT.10) GOTO 130

```

C

```

IF (ILOG.GT.0) GOTO 140

```

ANEXO B


```

C
      SUBROUTINE OUTPT
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
      REAL COMN(1)
C      EQUIVALENCE (COMN,TIME)
C
      IF(PINT.EQ.0.0.OR.TIME.LT.TPRT) GOTO 2
C
C      WRITE (LUPT,PFMT) (COMN(PRTL(I)),I=1,NPRT)
      IF (LINT.NE.0.0) GOTO 1
      WRITE (*,PFMT) (COMN(PRTL(I)),I=1,NPRT)
1     TPRT = TPRT+PINT
2     IF(LINT.EQ.0.0.OR.TIME.LT.TLOG) GOTO 6
      WRITE (11,PFMT2)(COMN(LOGL(I)),I=1,NLOG)
      IF(BAND.NE.0) GOTO 3
      WRITE (*,PFMT2)(COMN(LOGL(I)),I=1,NLOG)
C
3     CALL DESEMP
      WRITE (16,'(1X,F7.2,4(2X,-3PF9.4))') TIME,JX,JY,JZ,JV
      IF(BAND.EQ.0) GOTO 4
      WRITE(*,5)TIME,XVES,YVES,ZVES,TFOR(1),TFOR(2),TFOR(3),VIX,VIY,VIZ
C
4     XVES = XVES*0.30479
      YVES = YVES*0.30479
      VSET = VSET*0.30479
C
      TFOR(1) = TFOR(1)*4.44822
      TFOR(2) = TFOR(2)*4.44822
      TFOR(3) = TFOR(3)*4.44822
C
      WRITE (12,'(1X,F7.2,2X,F7.1)') TIME,XVES
      WRITE (13,'(1X,F7.2,2X,F7.1)') TIME,YVES
      WRITE (14,'(1X,F7.2,2X,F7.1)') TIME,ZVES
      WRITE (15,'(1X,F7.2,2X,F7.1)') TIME,VSET
      WRITE (17,'(1X,F7.2,2X,-3PF7.1)') TIME,TFOR(1)
      WRITE (18,'(1X,F7.2,2X,-3PF7.1)') TIME,TFOR(2)
      WRITE (19,'(1X,F7.2,2X,-3PF7.1)') TIME,TFOR(3)
C
      XVES = XVES/0.30479
      YVES = YVES/0.30479
      VSET = VSET/0.30479
      TFOR(1) = TFOR(1)/4.44822
      TFOR(2) = TFOR(2)/4.44822
      TFOR(3) = TFOR(3)/4.44822
C
      TLOG = TLOG+LINT
C
5     format (1X,F6.1,3(F7.0),3(-3PF7.0),2(F7.0),F11.0)
6     RETURN
      END

```

ROTINA PARA CÁLCULO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO

```

C
      SUBROUTINE DESEMP
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
C
      JX = JX + ABS(XERR)*TIME*DT
      JY = JY + ABS(YERR)*TIME*DT
      JZ = JZ + ABS(ZERR)*TIME*DT
      JV = JV + ABS(VSET)*TIME*DT
C
      IF(TIME.NE.FLAT) GOTO 2
      IF (HHMT.EQ.0.OR.HHMT.EQ.4) GOTO 1
      IF (HHMT.EQ.7) HHMT = 5
      IF (HHMT.EQ.8) HHMT = 6
      ZSPT = RMAX
      HSPT = ZDES
      GOTO 2
1     ZSPT = ZDES
      HSPT = ZSPT
C
2     RETURN
      END

```

```

C
C
C          ROTINA DE INICIALIZAÇÃO DE PARÂMETROS
C

```

```

C
      SUBROUTINE PARAM
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
$INCLUDE:'CNTCM.FOR'
C
C  INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GANHO EM SURGE,SWAY E YAW
C
      WCX = 0.066*SQRT(2.414E-4*DPTH+0.9517)*SQRT(200.0/DPTH)
      WNX = WCX*1.5
      WDX = WNX*( 2.8 - 0.34286*(1.0 - SQRT( 200.0/DPTH)))
      WRX = 0.9 - 1.0*( 1.0 - SQRT(200.0/DPTH))
      W1X = 0.3129
      W2X = 0.6258
      ZNX = 1.05
      ZDX = 0.45 + 0.2*(1.0 - SQRT(200.0/DPTH))
      ZRX = 0.5
      Z1X = 0.4210
      Z2X = 0.8357
      GCX = 0.6066*MASX*(2.414E-4 + 0.9517/DPTH)
      G1X = WCX*0.1
      GFX = WDX*WDX/WNX/WNX
      ZNX = 2.0*ZNX*WNX
      WNX = WNX*WNX
      ZDX = 2.0*ZDX*WDX
      WDX = WDX*WDX
      ZRX = 2.0*ZRX*WRX
      WRX = WRX*WRX
C
      WCY = 0.066*SQRT(2.414E-4*DPTH+0.9517)*SQRT(200.0/DPTH)

```

```

WNY = WCY*1.5
WDY = WNY*( 2.8 - 0.34286*(1.0 - SQRT( 200.0/DPTH)))
WRX = WRX
W1Y = W1X
W2Y = W2X
ZNY = ZNX
ZDY = ZDX
ZRY = ZRX
Z1Y = Z1X
Z2Y = Z2X
GCY = 0.6066*MASY*(2.414E-4 + 0.9517/DPTH)
G1Y = WCY*0.1
GFY = WDY*WDY/WNY/WNY
WNY = WNY*WNY
WDY = WDY*WDY

```

C

```

WCZ = 0.058
WNZ = WCZ*1.4
WDZ = WNZ*2.8
WRZ = 1.0 - 1.0*( 1.0 - SQRT(200.0/DPTH))
W1Z = 0.3129
W2Z = 0.6258
ZNZ = 1.1
ZDZ = 0.5
ZRZ = 0.45
Z1Z = 0.4210
ZZZ = 0.8357
GCZ = 0.00234*MASZ
G1Z = WCZ*0.1
GFZ = WDZ*WDZ/WNZ/WNZ
ZNZ = 2.0*ZNZ*WNZ
WNZ = WNZ*WNZ
ZDZ = 2.0*ZDZ*WDZ
WDZ = WDZ*WDZ
ZRZ = 2.0*ZRZ*WRZ
WRZ = WRZ*WRZ

```

C

```

TAU = 1.0 - EXP( -DT/TAUN )
IF( TAU.GE.10.0 ) TAU = TAU*(1.0-(EXP(-TAU)-1.0)/(TAU*TAU-1.0))
TAUN = TAU
TAUE = TAU
TAU = 1.0-EXP( -DT/TAUZ )
IF( TAU.GE.10.0 ) TAU = TAU*(1.0-(EXP(-TAU)-1.0)/(TAU*TAU-1.0))
TAUZ = TAU

```

C

```

IF (LUPT.EQ.1) WRITE (*,'(A80)') HDNG
RETURN
END

```

C

C

SUBROTINA DE INICIALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO

C

C

SUBROUTINE INITZ

```

C
$INCLUDE: 'SIMCM.FOR'
      XM=40.0
C
3     Z(1) = ZR2PI( ZVES/RTOD )
      CALL ROTAT ( XVES,YVES,Z(1),X(1),Y(1),0.0)
C
      ZSPT = ZVES
      ZSPT = ZR2PI ( ZSPT/RTOD )
      ZDES = ZR2PI ( ZDES/RTOD )
      HSPT = ZSPT
      IF ( HHMT.GE.1.AND.HHMT.LE.3 ) ZSPT = Z(1)
C
      DO 10 I = 6, 10 ,2
      X(1) = XVES
      Y(1) = YVES
      Z(1) = Z(1)
10    CONTINUE
      XFLT = XVES
      YFLT = YVES
      ZFLT = ZR360 ( ZVES )
C
      AVEL = AVEL*1.689
      CVEL = CVEL*1.689
C
      DO 11 I = 1,XM
      W(I) = (1.265/SQRT(WHGT))/(ALOG(2.*XM/ABS(2*I-1))**(0.25))
11    CONTINUE
C
      A = WHGT/SQRT(XM/2.0)
C
      CALL VENTO
      CALL WAVE
      CALL CRNT
C
      X(3) = (AWCX-1.0)*FAX-FCX-FWX
      Y(3) = (AWCY-1.0)*FAY-FCY-FWY
      Z(3) = (AWCZ-1.0)*FAZ-FCZ-FWZ
C
      XPID = X(3)
      YPID = Y(3)
      ZPID = Z(3)
C
      CALL TAL
C
      DO 15 I = 1,3
      TDIR(I) = ACMD(I)
15    CONTINUE
C
      CALL TAL
C
      DO 20 I = 1,3
      TFOR (I) = TCMD(I)
20    CONTINUE

```

ANEXO B

```

C
CALL ROTAT(X(3)-AWCX*FAX,(Y(3)-AWCY*FAY)/6.0,Z(1),NTSS,ETSS,0.0)
ZTSS = Z(3)-AWCZ*FAZ
CALL POLAR ( NTSS,ETSS,FTOT,FDIR )

C
IF ( HHMT.EQ.3 ) GHCM = ABS( XSPT )/10.0+10.0
IF ( HHMT.EQ.5.OR.HHMT.EQ.6 ) ZSPT = RMAX

C
IF ( WPDF.EQ.' NENHUM' ) GOTO 30
OPEN ( 60,FILE = 'WPDF',STATUS='OLD',ERR=60)
AFLG = 1
30 IF ( WVEF.EQ.' NENHUM' ) GOTO 40
OPEN (70,FILE='WVEF',STATUS='OLD',ERR=70)
WFLG = 1
OPEN (71,FILE='WDFTNK',STATUS='OLD',ERR=70)
40 IF ( CNTF.EQ.' NENHUM' ) GOTO 50
OPEN (80,FILE='CNTF',STATUS='OLD',ERR=80)
CFLG = 1

C
50 RETURN

C
60 WRITE (1,'('' ARQUIVO DE VENTO VARIÁVEL '' ,A10,
**' NAO ENCONTRADO : SIMULAÇÃO ABORTADA '' ,/)' ) WPDF
WRITE (*,'('' ARQUIVO DE VENTO VARIÁVEL '' ,A10,
**' NAO ENCONTRADO : SIMULAÇÃO ABORTADA '' ,/)' ) WPDF
STOP

C
70 WRITE (1,'('' ARQUIVO DE ONDA VARIÁVEL '' ,A10,
**' NAO ENCONTRADO : SIMULAÇÃO ABORTADA '' ,/)' ) WVEF
WRITE (*,'('' ARQUIVO DE ONDA VARIÁVEL '' ,A10,
**' NAO ENCONTRADO : SIMULAÇÃO ABORTADA '' ,/)' ) WVEF
STOP

C
80 WRITE (1,'('' ARQUIVO DE CORRENTE VARIÁVEL '' ,A10,
**' NAO ENCONTRADO : SIMULAÇÃO ABORTADA '' ,/)' ) CNTF
WRITE (*,'('' ARQUIVO DE CORRENTE VARIÁVEL '' ,A10,
**' NAO ENCONTRADO : SIMULAÇÃO ABORTADA '' ,/)' ) CNTF

C
IF (LUPT.EQ.1) WRITE (*,'(ABO)') HDNG

C
STOP
END

```

SUBROTINA DE SIMULAÇÃO DOS SENSORES
(assume sensores perfeitos)

```

C
SUBROUTINE SNSOR
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
XSNR = XVES
YSNR = YVES
ZSNR = Z(1)

```

```
C
RETURN
END
```

```
C
C
C      ROTINA PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE VENTO
```

```
C
SUBROUTINE VENTO
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
REAL ENV(5),DELV(5),V(5),F(3),LAST,NEXT
EQUIVALENCE (F,FAX),(ENV,AVEL)

C
IF(AFLG.EQ.0) GOTO 70
10 IF(TIME.LT.TRED) GOTO 50
20 DO 30 I = 1,5
ENV(I) = V(I)
30 CONTINUE
READ (60,'(3F10.0,3F15.0)',END=90) NEXT,V
LAST = TRED
TRED = TOFF+NEXT
IF(TIME.GE.TRED) GOTO 20
DELT = TRED-TIME
DO 40 I = 1,5
DELV(I) = (V(I)-ENV(I)) / DELT
40 CONTINUE
50 DELT = TRED-TIME
DO 60 I = 1,5
ENV(I) = V(I)-DELV(I)*DELT
60 CONTINUE

C
70 DLTA = ZR360(ADIR-ZVES)/10.0+1.0
K = DLTA
DLTA = DLTA-K
DO 80 I = 1,3
IF(AFLG.EQ.0) F(I) = 0.0
F(I) = F(I)+AVEL*AVEL*ADF(I)*
* (EDC(I,1,K)*(1.0-DLTA)+EDC(I,1,K+1)*DLTA)
80 CONTINUE

C
RETURN

C
90 REWIND (60)
TOFF = TIME
IF(TIME.EQ.0.0) TOFF = 1.0E+06
GOTO 10

C
END
```

```
C
C
C      ROTINA PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE DERIVA DE ONDA
```

```
C
SUBROUTINE WAVE
```

ANEXO B

```

$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
      REAL ENV(5),DELV(5),V(5),F(3),LAST,NEXT
      EQUIVALENCE (F,FWX),(ENV,WHGT)
      WHGT = 0.0
      DO 4 I = 1,XM
      WHGT = WHGT + A*SIN(W(I)*(TIME+30.0))
4     CONTINUE
C
5     IF(WFLG.EQ.0) GOTO 70
10    IF(TIME.LT.TRED) GOTO 50
20    DO 30 I= 1,5
        ENV(I) = V(I)
30    CONTINUE
      READ ( 70,'(3F10.0,3F15.0)',END=90 ) NEXT,V
C
      LAST = TRED
      TRED = TOFF+NEXT
      IF(TIME.GE.TRED) GOTO 20
      DELT = TRED-LAST
      DO 40 I = 1,5
        DELV(I) = (V(I) - ENV(I)) / DELT
40    CONTINUE
50    DELT = TRED-TIME
      DO 60 I = 1,5
        ENV(I) = V(I) - DELV(I)*DELT
60    CONTINUE
      CALL WDF
      RETURN
C
70    DLTA = ZR360(WDIR-ZVES) / 10.0+1.0
      K = DLTA
      DLTA = DLTA - K
      DO 80 I = 1,3
        IF(WFLG.EQ.0) F(I) = 0.0
        F(I) = F(I) + WHGT*( WHGT*WDF2(I) + WDF1(I))*
*          (EDC(I,3,K)*(1.0-DLTA)+EDC(I,3,K+1)*DLTA)
80    CONTINUE
C
      RETURN
C
90    REWIND (70)
      TOFF = TIME
      IF(TIME.EQ.0.0) TOFF = 1.0E+06
      GOTO 10
C
      END

```

ROTINA PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA RANDÔMICA DE ONDA

```

C
      SUBROUTINE WDF
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
      REAL VINT(3,5),DELV(3,5),V(3,5),F(3),LAST,NEXT

```

ANEXO B

```

      EQUIVALENCE (F,FWX)
C
10  IF(TIME.LT.TRED) GOTO 50
20  DO 30 I = 1,3
      DO 30 J = 1,5
          VINI(I,J) = V(I,J)
30  CONTINUE
      READ (71, '(F10.0,15E14.6)',END = 80) NEXT,V
      LAST = TRED
      TRED = TOFF+NEXT
      IF(TIME.GE.TRED) GOTO 20
      DELT = TRED - LAST
      DO 40 I = 1,3
          DO 40 J = 1,5
              DELV(I,J) = (V(I,J) - VINI(I,J)) / DELT
40  CONTINUE
50  DELT = TRED - TIME
      DO 60 I = 1,3
          DO 60 J = 1,5
              VINI(I,J) = V(I,J) - DELV(I,J)*DELT
60  CONTINUE
C
      RELW = ZR2PI((WDIR-ZVES)/RTOD)*RTOD/10.0
      DLTA = ABS(RELW)+1
      MULT = SIGN(1.0,RELW)
      K = DLTA
      IF(K.GE.4) K = 4
      DLTA = DLTA - K
      IF(K.GE.4) DLTA = DLTA/3.0
      DO 70 I = 1,3
          F(I) = VINI(I,K)*(1.0-DLTA)+VINI(I,K+1)*DLTA
          IF(I.EQ.1) GOTO 70
          F(I) = F(I)*MULT
70  CONTINUE
C
      RETURN
C
80  REWIND (71)
      TOFF = TIME
      GOTO 10
C
      END

```

C
C
C ROTINA PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE CORRENTES MARINHAS

```

C
      SUBROUTINE CRNT
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
      REAL ENV(5),DELV(5),V(5),F(3),LAST,NEXT
      EQUIVALENCE (F,FCX),(ENV,CVEL)
C
      IF(CFLG.EQ.0) GOTO 70
10  IF(TIME.LT.TRED) GOTO 50

```

ANEXO B


```

20 DO 30 I = 1,5
      ENV(I) = V(I)
30 CONTINUE
      READ (80, '(3F10.0,3F15.0)', END=90) NEXT, V
      LAST = TRED
      TRED = TOFF+NEXT
      IF (TIME.GE.TRED) GOTO 20
      DELT = TRED - LAST
      DO 40 I = 1,5
            DELV(I) = (V(I)-ENV(I))/DELT
40 CONTINUE
50 DELT = TRED - TIME
      DO 60 I = 1,5
            ENV(I) = V(I) - DELV(I)*DELT
60 CONTINUE
C
70 CALL ROTAT(CVEL,0.0,CDIR/RTOD,CVX,CVY,Z(1))
      CVX = CVX + X(2)
      CVY = CVY + Y(2)
      CALL POLAR (CVX,CVY,RVEL,RDIR)
      DLTA = ZR360(RDIR*RTOD) / 10.0+1.0
      K = DLTA
      DLTA = DLTA -K
      DO 80 I = 1,3
            IF(CFLG.EQ.0) F(I) = 0.0
            F(I) = F(I)+RVEL*RVEL*CDF(I)*
*           (EDC(I,2,K)*(1.0 - DLTA)+EDC(I,2,K+1)*DLTA)
80 CONTINUE
      RETURN
C
90 REWIND (80)
      TOFF = TIME
      IF (TIME.EQ.0) TOFF = 1.0E+06
      GOTO 10
C
      END

```

```

C
C      ROTINA PARA DETERMINAÇÃO DO APROAMENTO DE MÍNIMO EMPUXO
C      (heading for minimum thrust)

```

```

C
      SUBROUTINE HFMT
$INCLUDE: 'SIMCM.FOR'
C
      IF(HHMT.EQ.0.OR.HHMT.EQ.4) RETURN
      IF(HHMT.EQ.7.OR.HHMT.EQ.8) RETURN
C!           | MANTEM O APROAMENTO
      IF(HHMT.EQ.3) GOTO 20
      IF(HHMT.EQ.2) GOTO 10
      IF(HHMT.EQ.5.OR.HHMT.EQ.6) GOTO 30
C
      RATE = ZR2PI(FDIR+HSPT-ZSPT)
C!           | APROA CONTRA O AMBIENTE CALCULADO
ANEXO B

```

```

IF(ABS(RATE).GT.RMAX) RATE = SIGN(RMAX,RATE)
IF(YCUT.EQ.1.0.OR.ZCUT.EQ.1.0) RATE = 0.0
ZSPT = ZR2PI(ZSPT+RATE*DT)
RETURN

```

```

C
10 RATE = RMAX*ZTSS/GHCM
C | MUDA APROAMENTO PARA REDUZIR MOMENTO
IF(ABS(RATE).GT.RMAX) RATE = SIGN(RMAX,RATE)
IF(YCUT.EQ.1.0.OR.ZCUT.EQ.1.0) RATE = 0.0
ZSPT = ZR2PI(ZSPT+RATE*DT)
RETURN
C
20 RATE = -YERR*Y(7)/GHCM
C | APROA EM DIREÇÃO AO POÇO
IF(RATE.LE.0.0) RATE = 0.0
IF(RATE.GT.RMAX) RATE = RMAX
IF(YERR.LE.0.0) RATE = -RATE
IF(ZCUT.EQ.1.0) RATE = 0.0
ZSPT = ZR2PI(ZSPT+RATE*DT)
C
30 RATE = ZR2PI(HSPT - ZSPT)
IF(ABS(RATE).GT.RMAX) RATE = SIGN(RMAX,RATE)
IF(YCUT.EQ.1.0.OR.ZCUT.EQ.1.0) RATE = 0.0
ZSPT = ZR2PI(ZSPT+RATE*DT)
C
RETURN
END

```

ROTINA DE SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR PID

```

C
SUBROUTINE PID
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
$INCLUDE:'CNTCM.FOR'
C
XDOT(11) = XSNR - X(10) - X(11)*Z1X
XDOT(10) = X(11)*W1X
XDOT( 9) = XDOT(11)+X(10)-X(8)-X(9)*Z2X
XDOT( 8) = X(9)*W2X
XDOT( 7) = XDOT(9)+X(8)-X(6)-X(7)*ZRX
XDOT( 6) = X(7)*WRX
XERR      = XSPT-X(6)
EROR      = XERR*GCX
XDOT( 5) = EROR*GFX-X(5)*ZDX-X(4)*WDX
XDOT( 4) = X(5)
XDOT( 3) = EROR*GIX
XPID      = XDOT(5) + X(5)*ZNX + X(4)*WNX + X(3)
XDOT(12) = XDOT(7)*WRX
C
YDOT(11) = YSNR-Y(10)-Y(11)*Z1Y
YDOT(10) = Y(11)*W1Y
YDOT( 9) = YDOT(11)+Y(10)-Y(8)-Y(9)*Z2Y
YDOT( 8) = Y(9)*W2Y

```

```

YDOT( 7) = YDOT(9)+Y(8)-Y(6)-Y(7)*ZRY
YDOT( 6) = Y(7)*WRY
YERR      = YSPT-Y(6)
EROR      = YERR*GCY
YDOT( 5) = EROR*GFY-Y(5)*ZDY-Y(4)*WDY
YDOT( 4) = Y(5)
YDOT( 3) = EROR*GIY
YPID      = YDOT(5) + Y(5)*ZNY + Y(4)*WNY + Y(3)
YDOT(12) = YDOT(7)*WRY

```

C

```

ZDOT(11) = ZR2PI(Z5NR-Z(10))-Z(11)*Z1Z
ZDOT(10) = Z(11)*W1Z
ZDOT( 9) = ZR2PI(Z(10)-Z(8))+ZDOT(11)-Z(9)*Z2Z
ZDOT( 8) = Z(9)*W2Z
ZDOT( 7) = ZR2PI(Z(8)-Z(6))+ZDOT(9)-Z(7)*ZRZ
ZDOT( 6) = Z(7)*WRZ
ZERR      = ZR2PI(ZSPT-Z(6))*RTOD
EROR      = ZERR*GCZ/RTOD
ZDOT( 5) = EROR*GFZ-Z(5)*ZDZ-Z(4)*WDZ
ZDOT( 4) = Z(5)
ZDOT( 3) = EROR*GIZ
ZPID      = ZDOT(5) + Z(5)*ZNZ + Z(4)*WNZ + Z(3)
ZDOT(12) = ZDOT(7)*WRZ

```

C

```

AALARM = 0.02 * DPTH
VALARM = 0.05 * DPTH
AFAST = VSET/DPTH*100.0
IF (VSET.LT.AALARM) GOTO 1
IF (VSET.GE.AALARM.AND.VSET.LT.VALARM ) GOTO 2
IF (VSET.GE.VALARM) GOTO 3
2      IF (NUM.EQ.1) THEN
        WRITE (*,(' ALARME AMARELO!! AFASTAMENTO ATUAL = ',
*          F7.2,' % DA LAMINA DAGUA')) AFAST
        NUM = NUM + 1
        GOTO 4
        ENDIF
3      IF (NUM.EQ.1) THEN
        WRITE (*,(' ALARME VERMELHO!!! AFASTAMENTO ATUAL = ',
*          F7.2,' % DA LAMINA DAGUA')) AFAST
        NUM = NUM + 1
        GOTO 4
        ENDIF
        IF (NUM.GT.1.AND.NUM.LE.50) THEN
            NUM = NUM + 1
            GOTO 4
        ENDIF
1      NUM = 1
C
4      RETURN
      END

```

C

C

C

C

SUBROTINA FEEDFORWARD DE CONTROLE
DO TERMO INTEGRAL

ANEXO B

```

C
C
      SUBROUTINE FORWARD
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
$INCLUDE:'CNTCM.FOR'
C
      VIX = VIX + XDOT(6)*KPX - XERR*KIX + XDOT(12)*KDX
      VIY = VIY + YDOT(6)*KPY - YERR*KIY + YDOT(12)*KDY
      VIZ = VIZ + ZDOT(6)*KPZ + ZERR*KIZ
C
      XTAL = XPID - AWCX*FAX - VIX
      YTAL = YPID - AWCY*FAY - VIY
      ZTAL = ZPID - AWCZ*FAZ - VIZ
C
      RETURN
      END
C
C
      ROTINA DE DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA ENTRE OS THRUSTERS
      (thrust allocation logic)
C
C
C...assume a existência de apenas um propulsor na proa, outro na pôpa
C   e uma hélice principal .....
C
      SUBROUTINE TAL
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
      REAL LBOW,LAFT,BASE,ZMAX,ZMIN,ZBOW,ZAFT,YMAX,YMIN
      EQUIVALENCE (LBOW,XTH(5)),(LAFT,XTH(6)),(BASE,XTH(7))
      EQUIVALENCE (ZMAX,TMAX(5)),(ZMIN,TMIN(5))
      EQUIVALENCE (ZBOW,TMAX(6)),(ZAFT,TMAX(7))
C
      IF(HHMT.NE.6) GOTO 1
      CALL FORWARD
      GOTO 2
C
1     XTAL = XPID - AWCX*FAX
      YTAL = YPID - AWCY*FAY
      ZTAL = ZPID - AWCZ*FAZ
C
2     XCUT = 0.0
      YCUT = 0.0
      ZCUT = 0.0
C
C...CALCULO DO EMPUXO EM SURGE PARA SATISFAZER XTAL
C
      TALX = XTAL
      IF(TALX.GT.TMAX(3)) TALX = TMAX(3)
      IF(TALX.LT.TMIN(3)) TALX = TMIN(3)
      IF(TALX.NE.XTAL) XCUT = 1.0
      TCMO(3) = TALX
C
      IF(HHMT.EQ.3) YTAL = 0.0
      IF(HHMT.EQ.4) GOTO 30

```

```

C
C...CALCULO DOS EMPUXOS EM SWAY E YAW PARA SATISFAZER YTAL E ZTAL COM
C  PRIORIDADE PARA O MOMENTO
C
      IF(ZTAL.GT. ZMAX) GOTO 10
      IF(ZTAL.LT.-ZMAX) GOTO 20
C
      TALY = YTAL
      YMIN = (ZTAL-ZAFT) / LBOW
      IF(ZTAL.LT.-ZMIN) YMIN = -(ZBOW+ZTAL) / LAFT
      YMAX = (ZTAL+ZAFT) / LBOW
      IF(ZTAL.GT.ZMIN) YMAX = (ZBOW-ZTAL) / LAFT
      IF(YTAL.GT.YMAX) TALY = YMAX
      IF(YTAL.LT.YMIN) TALY = YMIN
C
      TCMD(1) = (TALY*LAFT+ZTAL) / BASE
      TCMD(2) = (TALY*LBOW-ZTAL) / BASE
      IF(TALY.NE.YTAL) YCUT = 1.0
      RETURN
C
C...ALOCAÇÃO DO MÁXIMO MOMENTO DISPONÍVEL, CASO A EXIGÊNCIA DE MOMENTO
C  ULTRAPASSE A CAPACIDADE INSTALADA
C
10  TCMD(1) = TMAX(1)
      TCMD(2) = TMIN(1)
      ZCUT = 1.0
      YCUT = 1.0
      RETURN
C
20  TCMD(1) = TMIN(1)
      TCMD(2) = TMAX(2)
      ZCUT = 1.0
      YCUT = 1.0
      IF(1.EQ.1) RETURN
C
C...CALCULO DO EMPUXO NECESSÁRIO PARA SATISFAZER APENAS ZTAL
C
30  TCMD(1) = YTAL
      TCMD(2) = 0.0
      RETURN
      END

```

ROTINA DA DINÂMICA DOS THRUSTERS

```

C
      SUBROUTINE THRST
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
      REAL C(3,8),F(3)
      EQUIVALENCE (F,FTX),(C,DCOS)
C
2    DO 10 I = 1,3
          F(I) = 0.0
          DO 10 J = 1,NTHR

```

```

          F(I) = F(I)+TFOR(J)*C(I,J)
10      CONTINUE
C
      CALL ROTAT(X(3)-AWCX*FAX,(Y(3)-AWCY*FAY)/6.0,Z(1),FTN,FTE,0.0)
      NTSS = NTSS+(FTN-NTSS)*TAUN
      ETSS = ETSS+(FTE-ETSS)*TAUE
      ZTSS = ZTSS+(Z(3)-AWCZ*FAZ-ZTSS)*TAUZ
      CALL POLAR(NTSS,ETSS,FTOT,FDIR)
C
      DO 20 I = 1,NTHR
      RATE = TCMD(I)-TFOR(I)
      IF(ABS(RATE).GT.17000.0) RATE = SIGN(17000.0,RATE)
      TFOR(I) = TFOR(I) + RATE*DT
      IF(TFOR(I).GT.TMAX(I)) TFOR(I) = TMAX(I)
      IF(TFOR(I).LT.TMIN(I)) TFOR(I) = TMIN(I)
      RATE = ZR2PI(ACMD(I)-TDIR(I))
      IF(ABS(RATE).GT.RMAX) RATE = SIGN(RMAX,RATE)
      TDIR(I) = ZR2PI(TDIR(I)+RATE*DT)
20      CONTINUE
C
      RETURN
      END

```

ROTINA PARA CÁLCULO DA DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO

```

C
      SUBROUTINE SHIP
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'
C
      FEX = FAX+FCX+FWX
      FEY = FAY+FCY+FWY
      FEZ = FAZ+FCZ+FWZ
C
      FVX = FTX+FEX+MASS*Y(2)*Z(2)-BX*X(2)
      FVY = FTY+FEY-MASS*X(2)*Z(2)-BY*Y(2)
      FVZ = FTZ+FEZ-BZ*Z(2)*ABS(Z(2))
C
      XDOT(2) = FVX/MASX
      YDOT(2) = (FVZ*A26-FVY*MASZ) / DISC
      ZDOT(2) = (FVY*A62-FVZ*MASY) / DISC
C
      CALL ROTAT(X(2),Y(2),Z(1),XDOT(1),YDOT(1),0.0)
      ZDOT(1) = Z(2)
C
      RETURN
      END

```

ROTINA DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA

```

C
      SUBROUTINE INT
$INCLUDE:'SIMCM.FOR'

```

ANEXO B

```

REAL XDIN(20),YDIN(20),ZDIN(20)
C
IF(XCUT.EQ.1.0) XDOT(3) = 0.0
IF(YCUT.EQ.1.0) YDOT(3) = 0.0
IF(ZCUT.EQ.1.0) ZDOT(3) = 0.0
C
DO 10 I = 1,12
  X(I) = X(I) + (XDOT(I)+XDIN(I))*DT/2.0
  Y(I) = Y(I) + (YDOT(I)+YDIN(I))*DT/2.0
  Z(I) = Z(I) + (ZDOT(I)+ZDIN(I))*DT/2.0
  XDIN(I) = XDOT(I)
  YDIN(I) = YDOT(I)
  ZDIN(I) = ZDOT(I)
10 CONTINUE
C
DO 20 I = 6,10,2
  Z(I) = ZR2PI(Z(I))
20 CONTINUE
Z(1) = ZR2PI(Z(1))
C
CALL ROTAT(X(1),Y(1),0.0,XVES,YVES,Z(1))
ZVES = ZR360(Z(1)*RTOD)
XFLT = X(6)
YFLT = Y(6)
ZFLT = ZR360(Z(6)*RTOD)
C
CALL POLAR(XVES-XSPT,YVES-YSPT,VSET,SDIR)
TIME = TIME + DT
C
RETURN
END

```

FUNÇÃO ÍNDICE PARA LISTAGEM DOS RESULTADOS

C.....A função LIST(I) retorna o INDEX(I) do parâmetro desejado, na ordem
C.....estabelecida no arquivo de common "SIMCM". INDEX(I) e o índice
C arranjo COMN, que é equivalente à definição de common na subrotina
C OUTPUT. Na primeira vez em que esta função é chamada, o arquivo de
C common "SIMCM" é aberto e os nomes das variáveis, até a variável -
C "RTOD" ou as primeiras 100 variáveis (o que acontecer primeiro),
C são lidas e armazenadas no arranjo local, tipo character, COMN. O
C índice inicial de cada variável nomeada é armazenada no arranjo lo-
C cal INDX. Após, o nome da variável desejada na listagem de tela ou

C impressora e na listagem de arquivo, são comparadas ao arranjo lo-
 C cal COMN para determinar o INDEX(I) apropriado. Esta rotina assume
 C que todas as variáveis na definição de common, até a variável RTOD
 C são de tipo REAL. Se a definição de common for modificada, é nece-
 C ssário manter o formato no qual todas as variáveis até a variável
 C "RTOD" devem ser REAL, o nome começa na coluna 17 e a dimensão, que
 C deve ser escalar, inicia na coluna 24 e não pode ser maior que 99.

```

C.....
C
C      FUNCTION LIST(NAME)
C      CHARACTER COMN(100)*6,NAME*10,TITL*6,NUMB*2,CARD*80
C      INTEGER INDX(100),FLAG/0/,K/0/
C
C      IF(FLAG.EQ.1) GOTO 30
C      OPEN(50,FILE='SIMCM.FOR')
C      DO 10 N = 1,100
C
C          | SALTA SOBRE AS LINHAS DE COMENTÁRIOS
C      8  READ (50,'(A)') CARD
C          IF (CARD(1:1).EQ.'C') GOTO 8
C          IF(K.EQ.0) K = 1
C          J = J + K
C          READ (CARD,'(16X,A6,1X,I2)') COMN(N),K
C          IF(COMN(N).EQ.'RTOD') GOTO 20
C          INDX(N) = J
C      10 CONTINUE
C      20  N = N - 1
C          FLAG = 1
C          CLOSE (50)
C
C      30  DO 40 I = 1,6
C          IF(NAME(I:I).EQ.'(') GOTO 50
C      40 CONTINUE
C      50  TITL = NAME(1:I-1)
C          NUMB = NAME(I+1:I+3)
C          IF(NUMB(1:1).LT.'0'.OR.NUMB(1:1).GT.'9') NUMB(1:1) = ' '
C          IF(NUMB(2:2).LT.'0'.OR.NUMB(2:2).GT.'9') NUMB(2:2) = ' '
C          READ (NUMB,'(BN,I2)') K
C          IF(K.GT.0) K = K -1
C
C      LIST = 0
C      DO 60 I = 1,N
C          IF(TITL.EQ.COMN(I)) GOTO 70
C      60 CONTINUE
C          RETURN
C
C      70  LIST = INDX(I) + K
C          RETURN
C      END

```

C
 C
 C ROTINA DE TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS

C...rotina para girar o sistema de coordenadas "IN", no qual o eixo

C "XIN" está em "AIN" radianos, para o sistema "OUT", no qual o eixo
C "XOUT" está em "AOUT" radianos.....

C
C SUBROUTINE ROTAT(XIN,YIN,AIN,XOUT,YOUT,AOUT)

C
C ALFA = AOUT - AIN
C SINA = SIN(ALFA)
C COSA = COS(ALFA)

C
C XOUT = XIN*COSA+YIN*SINA
C YOUT = YIN*COSA-XIN*SINA

C
C RETURN
C END

C
C
C ROTINA DE CONVERSÃO PARA COORDENADAS POLARES

C
C
C....Rotina para converter valores retangulares "XVAL" e "YVAL" em
C valores polares "VALU" à um ângulo "ALFA", em radianos, referenciados
C a "XVAL".....

C.....
C SUBROUTINE POLAR(XVAL,YVAL,VALU,ALFA)

C
C VALU = SQRT(XVAL*XVAL+YVAL*YVAL)
C ALFA = 0.0
C IF(XVAL.NE.0.0.OR.YVAL.NE.0.0) ALFA = ATAN2(YVAL,XVAL)

C
C RETURN
C END

C
C
C ROTINA LIMITADORA DE ÂNGULO (000 - 360)

C
C
C FUNCTION ZR360(ALPHA)
C DATA DEGRE/360.0/

C
C 10 IF(ALPHA.GE.0.0) GOTO 20
C ALPHA = ALPHA + DEGRE
C GOTO 10

C
C 20 IF(ALPHA.LT.DEGRE) GOTO 30
C ALPHA = ALPHA - DEGRE
C GOTO 20

C
C 30 ZR360 = ALPHA
C
C END

C
C
C ROTINA LIMITADORA DE ÂNGULO (-PI ATE +PI)

```
C
      FUNCTION ZR2PI(ALPHA)
C
10    IF(ALPHA.LE.3.141592) GOTO 20
      ALPHA = ALPHA - 6.28318
      GOTO 10
C
20    IF(ALPHA.GT.-3.141592) GOTO 30
      ALPHA = ALPHA + 6.28318
      GOTO 20
C
30    ZR2PI = ALPHA
C
      END
```

ARQUIVO COMMON DAS VARIÁVEIS EMPREGADAS NO SIMULADOR
(SIMCM.FOR)

Variáveis selecionáveis

C	REAL	TIME			TEMPO DE SIMULAÇÃO
C	REAL	XDOT	(20)		PRIMEIRA DERIVADA DO VETOR DE ESTADO X
C	REAL	YDOT	(20)		PRIMEIRA DERIVADA DO VETOR DE ESTADO Y
C	REAL	ZDOT	(20)		PRIMEIRA DERIVADA DO VETOR DE ESTADO Z
C	REAL	X	(20)		VETOR DE ESTADO X
C	REAL	Y	(20)		VETOR DE ESTADO Y
C	REAL	Z	(20)		VETOR DE ESTADO Z
C	REAL	XVES			POSICÃO ATUAL EM X DO CG EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	YVES			POSICÃO ATUAL EM Y DO CG EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	ZVES			APROAMENTO ATUAL DO NAVIO (GRS)
C	REAL	XSNR			POSICÃO MEDIDA EM X EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	YSNR			POSICÃO MEDIDA EM Y EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	ZSNR			APROAMENTO MEDIDO DO NAVIO (RAD)
C	REAL	XFLT			POSICÃO FILTRADA EM X EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	YFLT			POSICÃO FILTRADA EM Y EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	ZFLT			APROAMENTO FILTRADO (GRS)
C	REAL	XSPT			POSICÃO DESEJADA EM X EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	YSPT			POSICÃO DESEJADA EM Y EM COORDENADAS DE NAVIO (PÉS)
C	REAL	ZSPT			APROAMENTO DESEJADO (GRS)

C	REAL	XERR		ERRO CONTROLADOR EIXO X (PÉS)
C	REAL	YERR		ERRO CONTROLADOR EIXO Y (PÉS)
C	REAL	ZERR		ERRO CONTROLADOR EIXO Z (RAD)
C	REAL	VSET		AFASTAMENTO RADIAL DO NAVIO (PÉS)
C	REAL	SDIR		DIREÇÃO DO AFASTAMENTO DO NAVIO (GRS)
C	REAL	HSPT		REFERÊNCIA PARA APROAMENTO NO MODO HHMT
C				(GRAUS)
C	REAL	XPID		FORÇA EM X CALCULADA P/ CONTROLADOR (LBS)
C	REAL	YPID		FORÇA EM Y CALCULADA P/ CONTROLADOR (LBS)
C	REAL	ZPID		MOMENTO DE APROAMENTO CALCULADO
C				PELO CONTROLADOR (LBS-PÉ)
C	REAL	XTAL		FORÇA EM X A ALOCAR (LBS)
C	REAL	YTAG		FORÇA EM Y A ALOCAR (LBS)
C	REAL	ZTAG		MOMENTO A ALOCAR (LBS-PE)
C	REAL	XCUT		FLAG DE CORTE DO EMPUXO EM X (0=OK)
C	REAL	Y CUT		FLAG DE CORTE DO EMPUXO EM Y (0=OK)
C	REAL	ZCUT		FLAG DE CORTE EM Z (0=OK)
C	REAL	TCMD	(8)	EMPUXOS COMANDADOS P/ CONTROLADOR (LBS)
C	REAL	TMIN	(8)	EMPUXOS MÍNIMOS DOS PROPULSORES (LBS)
C	REAL	TMAX	(8)	EMPUXOS MÁXIMOS DOS PROPULSORES (LBS)
C	REAL	TFOR	(8)	EMPUXOS FORNECIDOS P/ PROPULSORES (LBS)
C	REAL	XTH	(8)	POSIÇÃO EM X DOS PROPULSORES NO NAVIO
C				(PÉS)
C	REAL	YTH	(8)	POSIÇÃO EM Y DOS PROPULSORES NO NAVIO
C				(PÉS)
C	REAL	ACMD	(8)	AZIMUTES COMANDADOS PARA OS PROPULSORES
C				(RAD)
C	REAL	TDIR	(8)	DIREÇÕES DOS EMPUXOS FORNECIDOS (RAD)
C	REAL	DCOS	(24)	COSSENO DIRETORES DO CONJUNTO DE PROP.

C			C(3,8)
C	REAL	FTX	FORÇA DOS PROPULSORES EM X EM COORDENADAS
C			DE NAVIO (LBS)
C	REAL	FTY	FORÇA DOS PROPULSORES EM Y EM COORDENADAS
C			DE NAVIO (LBS)
C	REAL	FTZ	MOMENTO DOS PROPULSORES (LBS-PÉ)
C	REAL	AVEL	VELOCIDADE DO VENTO (PÉS/S)
C	REAL	ADIR	DIREÇÃO DE ONDE VEM O VENTO (GRS)
C	REAL	FAX	FORÇA DO VENTO SOBRE O NAVIO EM X (LBS)
C	REAL	FAY	FORÇA DO VENTO SOBRE O NAVIO EM Y (LBS)
C	REAL	FAZ	MOMENTO DO VENTO SOBRE O NAVIO (LBS-PÉ)
C	REAL	CVEL	VELOCIDADE DA CORRENTE MARINHA (PÉS/S)
C	REAL	CDIR	DIREÇÃO DE ONDE VEM A CORRENTE (GRS)
C	REAL	FCX	FORÇA DE CORRENTE SOBRE O NAVIO EM X (LBS)
C	REAL	FCY	FORÇA DE CORRENTE SOBRE O NAVIO EM Y (LBS)
C	REAL	FCZ	MOMENTO DE CORRENTES (LBS-PÉ)
C	REAL	WHGT	ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA (PÉS)
C	REAL	WDIR	DIREÇÃO DE ONDE VEM AS ONDAS (GRS)
C	REAL	FWX	FORÇA DE DERIVA DE ONDAS EM X NO NAVIO
C			(LBS)
C	REAL	FWY	FORÇA DE DERIVA DE ONDAS EM Y NO NAVIO
C			(LBS)
C	REAL	FWZ	MOMENTO DE DERIVA DE ONDAS (LBS-PÉ)
C	REAL	FEX	FORÇA TOTAL DO AMBIENTE NO EIXO X (LBS)
C	REAL	FEY	FORÇA TOTAL DO AMBIENTE NO EIXO Y (LBS)
C	REAL	FEZ	MOMENTO AMBIENTAL TOTAL (LBS-PÉ)
C	REAL	FVX	FORÇA TOTAL EM X SOBRE O NAVIO (LBS)
C	REAL	FVY	FORÇA TOTAL EM Y SOBRE O NAVIO (LBS)
C	REAL	FVZ	MOMENTO TOTAL SOBRE O NAVIO (LBS-PÉ)

C	REAL	NTSS		FORÇA AMBIENTAL EM REGIME
C				PERMANENTE SEGUNDO O NORTE (LBS)
	REAL	ETSS		FORÇA AMBIENTAL EM REGIME
C				PERMANENTE SEGUNDO O LESTE (LBS)
	REAL	ZTSS		MOMENTO AMBIENTAL EM REGIME
C				PERMANENTE (LBS-PÉ)
	REAL	TAUN		CONSTANTE DE TEMPO DO
C				FILTRO DE FORÇAS DE NORTE (S)
	REAL	TAUE		CONSTANTE DE TEMPO DO
C				FILTRO DE FORÇAS DE LESTE (S)
	REAL	TAUZ		CONSTANTE DE TEMPO DO
C				FILTRO DE MOMENTOS (S)
	REAL	FTOT		MAGNITUDE DA FORÇA TOTAL SOBRE O NAVIO
C				(LBS)
	REAL	FDIR		DIREÇÃO DA RESULTANTE SOBRE O NAVIO (RAD)
C				
	REAL	RATE		TAXA DE MUDANÇA DE APROAMENTO (RAD/S)
C				
	REAL	RMAX		MÁXIMA TAXA DE MUDANÇA DE APROAM.(RAD/S)
C				
	REAL	GHCM		GANHO DO MODO DE CONTROLE DE APROAMENTO
C				
	REAL	JX		ÍNDICE DE DESEMPENHO PARA O EIXO X
C				
	REAL	JY		ÍNDICE DE DESEMPENHO PARA O EIXO Y
C				
	REAL	JZ		ÍNDICE DE DESEMPENHO PARA O EIXO Z
C				
C				
C	fim das variáveis		selecionáveis
C				
	REAL	RTOD		FATOR DE CONVERSÃO DE RADIANS PARA GRAUS
C				
	REAL	XM		NÚMERO DE PARTIÇÕES DO ESPECTRO DE ONDA
C				
	REAL	W (60)		FREQUÊNCIAS DO ESPECTRO DE ONDA (BRETSCH)
C				
	REAL	A		FATOR DE AMPLITUDE DE ONDA
C				
	REAL	TFIN		TEMPO FINAL DE SIMULAÇÃO (S)
C				
	REAL	TPRT		TEMPO DE IMPRESSÃO (S)
C				
	REAL	PINT		INTERVALO TEMPO DE IMPRESSÃO (S)
C				
	REAL	TLOG		

C			TEMPO DE REGISTRO EM ARQUIVO (S)	
	REAL	LINT		
C			INTERVALO TEMPO DE REGISTRO EM ARQUIVO (S)	
	REAL	DT		
C			INTERVALO DE TEMPO PARA INTEGRAÇÃO (S)	
	REAL	PROF		
C			LÂMINA D'ÁGUA (PÉS)	
	REAL	MASS		
C			MASSA DESLOCADA PELO NAVIO (LBM)	
	REAL	MASX		
C			MASSA TOTAL DO NAVIO EM X (LBM)	
	REAL	MASY		
C			MASSA TOTAL DO NAVIO EM Y (LBM)	
	REAL	MASZ		
C			MASSA TOTAL DO NAVIO EM Z (LBM-PÉS ²)	
	REAL	A11		
C			MASSA ADICIONAL EM X (LBM)	
	REAL	A22		
C			MASSA ADICIONAL EM Y (LBM)	
	REAL	A26		
C			MASSA DE ACOPLAMENTO ENTRE	
C			YAW E SWAY (LBM-PÉS ²)	
	REAL	A62		
C			MASSA DE ACOPLAMENTO SWAY/YAW (LBM-PÉS ²)	
	REAL	KZZ		
C			RAIO DE GIRAÇÃO SOBRE O EIXO Z (PÉS)	
	REAL	DISC		
C			DISCRIMINANTE (A26*A62-MASY*MASZ)	
	REAL	BX		
C			AMORTECIMENTO VISCOZO PARA EIXO X	
	REAL	BY		
C			AMORTECIMENTO VISCOZO PARA EIXO Y	
	REAL	BZ		
C			AMORTECIMENTO ROTACIONAL NO	
C			EIXO Z (LBS-PÉ)/(RAD/S) ²	
	REAL	XHH		
C			LOCAÇÃO DO PONTO DE REFERÊNCIA. EM X	
			(PÉS)	
	REAL	YHH		
C			LOCAÇÃO DO PONTO DE REFERÊNCIA. EM Y	
			(PÉS)	
	REAL	AWCX		
C			FATOR DE COMPENSAÇÃO ATIVA DE VENTO EIXO X	
	REAL	AWCY		
C			FATOR DE COMPENSAÇÃO ATIVA DE VENTO EIXO Y	
	REAL	AWCZ		
C			FATOR DE COMPENSAÇÃO ATIVA DE VENTO APROAM.	
	REAL	EDC (3,3,37)		
C			COEF. DE ARRASTO AMBIENTAIS NORMALIZADOS	
	REAL	ADF (3)		
C			FATORES DE ARRASTO DE VENTO (X-Y-Z)	
	REAL	CDF (3)		
C			FATORES DE ARRASTO DE CORRENTES (X-Y-Z)	

```

REAL WDF1 (3)
C                                     | FATORES LINEARES DE DERIVA
C                                     | DE ONDA (X-Y-Z)
REAL WDF2 (3)
C                                     | FATORES QUADRÁTICOS DE DERIVA
C                                     | DE ONDA (X-Y-Z)
INTEGER NTHR
C                                     | NÚMERO DE PROPULSORES USADOS PELO SISTEMA
INTEGER HHMT
C                                     | FLAG DO MODO DE CONTROLE DE
C                                     | APROAMENTO (0=AUTO,1=HHMT)
INTEGER LUPT
C                                     | UNIDADE LÓGICA DO DISPOSITIVO
C                                     | DE SAÍDA (TELA OU IMPRESSORA)
INTEGER NRPT
C                                     | NÚMERO DE VARIÁVEIS DE SAÍDA P/ IMPRESSORA
INTEGER PRTL (16)
C                                     | ÍNDICES COMMON DA LISTA DE
C                                     | VARIÁVEIS A SEREM IMPRESSAS
INTEGER NLOG
C                                     | NÚMERO DE VARIÁVEIS NA LISTA
C                                     | DE SAÍDA PARA ARQUIVO
INTEGER LOGL (20)
C                                     | ÍNDICES COMMON DA LISTA DE
C                                     | VARIÁVEIS DE SAÍDA PARA ARQUIVO
INTEGER AFLG
C                                     | FLAG PARA VENTO VARIÁVEL (0=LIGADO,1=DESL)
INTEGER WFLG
C                                     | FLAG PARA ONDA VARIÁVEL (0=LIGADO,1=DESL)
INTEGER CFLG
C                                     | FLAG PARA CORRENTE VÁRIAVEL (0=LIG,1=DESL)
CHARACTER HDNG*80
C                                     | CABEÇALHO DA CORRIDA ESCOLHIDA
CHARACTER CORR*10
C                                     | NOME DO ARQUIVO CORR
CHARACTER OUTF*10
C                                     | NOME DO ARQUIVO DE SAÍDA
CHARACTER WNDF*10
C                                     | NOME DO ARQUIVO DE VENTO VARIÁVEL
CHARACTER WVEF*10
C                                     | NOME DO ARQUIVO DE ONDAS VARIÁVEIS
CHARACTER CNTF*10
C                                     | NOME DO ARQUIVO DE CORRENTEZA VARIÁVEL
CHARACTER PFMT*80
C                                     | DECLARAÇÃO DE FORMATO PARA
C                                     | SAÍDA PARA IMPRESSORA

```

C..... variáveis selecionáveis

```

C
COMMON /SIMCM/ TIME,XDOT ,YDOT ,ZDOT ,X ,Y ,Z
* ,XVES ,YVES ,ZVES ,XSNR ,YSNR ,ZSNR
* ,XFLT ,YFLT ,ZFLT ,XSPT ,YSPT ,ZSPT
* ,XERR ,YERR ,ZERR ,VSET ,SDIR ,HSPT

```



```

*      ,XPID  ,YPID  ,ZPID      ,XTAL  ,YTAL  ,ZTAL
*      ,XCUT  ,YCUR  ,ZCUT
*      ,TCMD  ,TMIN  ,TMAX      ,TFOR
*      ,XTH   ,YTH   ,          ,ACMD   ,TDIR  ,DCOS
*      ,FTX   ,FTY   ,FTZ      ,AVEL  ,ADIR
*      ,FAX   ,FAY   ,FAZ      ,CVEL  ,CDIR
*      ,FCX   ,FCY   ,FCZ      ,WHGT  ,WDIR
*      ,FWX   ,FWY   ,FWZ      ,FEX   ,FEY   ,FEZ
*      ,FVX   ,FVY   ,FVZ      ,NTSS  ,ETSS  ,ZTSS
*      ,TAUN  ,TAUE  ,TAUZ      ,FTOT  ,FDIR
*      ,RATE  ,RMAX  ,GHCM      ,JX    ,JY    ,JZ

```

```

C
C
C
C..... variáveis não selecionáveis
C

```

```

COMMON /SIMCM/ RTOD,TFIN ,TPRT ,PINT ,TLOG ,LINT ,DT
*      ,PROF  ,MASS      ,MASX  ,MASY  ,MASZ
*      ,A11   ,A22   ,A26   ,A62   ,KZZ   ,DISC
*      ,BX    ,BY    ,BZ    ,XHH   ,YHH   ,A
*      ,AWCX  ,AWCY  ,AWCZ  ,EDC   ,ADF   ,CDF
*      ,WDF1  ,WDF2  ,NTHR  ,HHMT  ,LUPT  ,NPRT
*      ,PRTL  ,NLOG  ,LOGL  ,AFLG  ,WFLG  ,CFLG
*      ,CORR  ,OUTF  ,WDF   ,WVEF  ,CNTF  ,PFMT
*      ,HDNG  ,W     ,XM

```

```

C-----
C           ARQUIVO COMMON DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE
C                               (CNTCM.FOR)
C-----
C
C           REAL WCX
C.....FREQUÊNCIA DE CORTE DO CONTROLADOR EM X
C           REAL WNX
C.....FREQUÊNCIA DO NUMERADOR DO FILTRO
C
C           AVANÇO-ATRASSO DO EIXO X
C
C           REAL WDX
C.....FREQUÊNCIA DO DENOMINADOR DO
C
C           FILTRO AVANÇO-ATRASSO EM X
C
C           REAL WRX
C.....FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSA-BAIXAS EM X
C           REAL W1X
C.....FREQUÊNCIA DO PRIMEIRO FILTRO NOTCH EM X
C           REAL W2X
C.....FREQUÊNCIA DO SEGUNDO FILTRO NOTCH EM X
C           REAL ZNX
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO NUMERADOR
C
C           DO FILTRO AVANÇO-ATRASSO DO EIXO X
C           REAL ZDX
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO DENOMINADOR
C
C           DO FILTRO AVANÇO-ATRASSO DO EIXO X
C           REAL ZRX
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C
C           FILTRO PASSA-BAIXAS DO EIXO X
C           REAL Z1X
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C
C           FILTRO NOTCH No 1 NO EIXO X
C           REAL Z2X
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C
C           FILTRO NOTCH No 2 NO EIXO X
C           REAL GCX
C.....GANHO PROPORCIONAL DO CONTROLADOR EM X
C           REAL GIX
C.....GANHO INTEGRAL DO CONTROLADOR EM X
C           REAL GFX
C.....GANHO DERIVATIVO DO CONTROLADOR NO EIXO X
C
C           REAL WCY
C.....FREQUÊNCIA DE CORTE DO CONTROLADOR EM Y
C           REAL WNY
C.....FREQUÊNCIA DO NUMERADOR DO FILTRO
C
C           AVANÇO-ATRASSO DO EIXO Y
C
C           REAL WDY

```

C.....FREQUÊNCIA DO DENOMINADOR DO
C FILTRO AVANÇO-ATRASSO EM Y
 REAL WRY
C.....FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSA-BAIXAS EM Y
 REAL W1Y
C.....FREQUÊNCIA DO PRIMEIRO FILTRO NOTCH EM Y
 REAL W2Y
C.....FREQUÊNCIA DO SEGUNDO FILTRO NOTCH EM Y
 REAL ZNY
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO NUMERADOR
C DO FILTRO AVANÇO-ATRASSO DO EIXO Y
 REAL ZDY
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO DENOMINADOR
C DO FILTRO AVANÇO-ATRASSO DO EIXO Y
 REAL ZRY
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C FILTRO PASSA-BAIXAS DO EIXO Y
 REAL Z1Y
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C FILTRO NOTCH No 1 NO EIXO Y
 REAL Z2Y
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C FILTRO NOTCH No 2 NO EIXO Y
 REAL GCY
C.....GANHO PROPORCIONAL DO CONTROLADOR EM Y
 REAL GIY
C.....GANHO INTEGRAL DO CONTROLADOR EM Y
 REAL GFY
C.....GANHO DERIVATIVO DO CONTROLADOR NO EIXO Y
C REAL WCZ
C.....FREQUÊNCIA DE CORTE DO CONTROLADOR EM Z
 REAL WNZ
C.....FREQUÊNCIA DO NUMERADOR DO FILTRO
C AVANÇO-ATRASSO DO EIXO Z
 REAL WDZ
C.....FREQUÊNCIA DO DENOMINADOR DO
C FILTRO AVANÇO-ATRASSO EM Z
 REAL WRZ
C.....FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSA-BAIXAS EM Z
 REAL W1Z
C.....FREQUÊNCIA DO PRIMEIRO FILTRO NOTCH EM Z
 REAL W2Z
C.....FREQUÊNCIA DO SEGUNDO FILTRO NOTCH EM Z
 REAL ZNZ
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO NUMERADOR
C DO FILTRO AVANÇO-ATRASSO DO EIXO Z
 REAL ZDZ
C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO DENOMINADOR

C DO FILTRO AVANÇO-ATRÁS DO EIXO Z

REAL ZRZ

C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C FILTRO PASSA-BAIXAS DO EIXO Z

REAL Z1Z

C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C FILTRO NOTCH No 1 NO EIXO Z

REAL Z2Z

C.....COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO DO
C FILTRO NOTCH No 2 NO EIXO Z

REAL GCZ

C.....GANHO PROPORCIONAL DO CONTROLADOR EM Z

REAL G1Z

C.....GANHO INTEGRAL DO CONTROLADOR EM Z

REAL GFZ

C.....GANHO DERIVATIVO DO CONTROLADOR NO EIXO Z

C

C

	COMMON / CNTCM / WCX	,WNX	,WDX	,WRX	
*			,W1X	,W2X	
*			,ZNX	,ZDX	,ZRX
*			,Z1X	,Z2X	
*			,GCX	,G1X	,GFY
*		,WCY	,WNY	,WDY	,WRY
*			,W1Y	,W2Y	
*			,ZNY	,ZDY	,ZRY
*			,Z1Y	,Z2Y	
*			,GCY	,G1Y	,GFY
*		,WCZ	,WNZ	,WDZ	,WRZ
*			,W1Z	,W2Z	
*			,Z1Z	,Z2Z	,ZRZ
*			,GCZ	,G1Z	,GFZ

	1	2	3	4	5	6	
1	1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234						
2	1	INÍCIO DO ARQUIVO DE DADOS					
3	2	TÍTULO	TESTE DO SIMULADOR DE DPS				
4	3	TFIN =	500.0	PINT =	1.0	LUPT =	1
5	4	LINT =	1.00	LOG FILE =	LOG.DAT		
6	5	XVES =	0.0	YVES =	0.0	ZVES =	45.0
7	6	XSPT =	0.0	YSPT =	0.0	ZSPT =	00.0
8	7	AVEL =	20.0	ADIR =	0.00	WIND FILE =	
9	8	WGHT =	3.281	WDIR =	45.0	WAVE FILE =	
10	9	CVEL =	1.00	CDIR =	90.0	CRNT FILE =	
11	10	TIME	XVES	YVES	ZVES	PROF =	3281.0
12	11	(F6.1,3(F7.1)				HHMT =	0
13	12	TIME	XERR	YERR	ZERR	XDOT(3)	YDOT(3)
						ZDOT(3)	

LINHA 1 - A subrotina de leitura do programa principal, ENTRA, começa a ler o arquivo de dados da corrida após encontrar a palavra INÍCIO começando na coluna 1.

LINHA 2 - O título da corrida é colocado na segunda linha do arquivo e deve possuir, no máximo, 65 caracteres devendo estar presente, mesmo que em branco, entre as colunas 8-72.

LINHA 3 - O tempo final deve ser colocado nas colunas 8-17. O intervalo de impressão, em segundos, deve ficar nas colunas 25-34. O dispositivo de saída deve ser definido nas colunas 42-51: indicando-se o número 1 obter-se-á como saída a tela do monitor, o número 6 dirige os dados para a impressora.

LINHA 4 - O intervalo de tempo, em segundos, escolhido para registro dos dados deve ser colocado nas colunas 8-17. O nome do arquivo de registro deve ficar nas colunas 30-39.

LINHA 5 - A posição inicial em X da embarcação, em pés, está nas colunas 8-17. A posição inicial em Y, em pés, nas colunas 25-34. O aproamento inicial, em graus, nas colunas 42-51. A profundidade da lâmina d'água, em pés, nas colunas 59-68.

LINHA 6 - A posição desejada para X, em pés, deve ser indicada nas colunas 8-17. A referência para Y, em pés, nas colunas 25-34. A referência para o aproamento está nas colunas 42-51. O flag do modo de controle de

aproamento está nas colunas 59-68.

- LINHA 7 - A velocidade inicial do vento, em nós, deve ser colocada nas colunas 8-17. A direção inicial DE ONDE o vento provém, em graus, nas colunas 25-34. O nome do arquivo de vento variável deve estar nas colunas 47-56. Se apenas um ambiente com vento constante for escolhido, o nome deste arquivo deve ser deixado em branco.
- LINHA 8 - A altura inicial das ondas, em pés, está nas colunas 8-17. A direção inicial DE ONDE as ondas provém, em graus, deve ser introduzida nas colunas 25-34. O nome do arquivo de onda variável nas colunas 47-56. Se o ambiente escolhido tiver ondas constantes, o nome do arquivo deve ser deixado em branco.
- LINHA 9 - A velocidade inicial da correnteza, em nós, deve ser digitada nas colunas 8-17. A direção inicial, DE ONDE a correnteza provém, em graus, nas colunas 25-34. O nome do arquivo de correnteza variável, se houver, deve ser introduzido nas colunas 47-56, em caso de correnteza constante, deve ser deixado em branco.
- LINHA 10 - O título da saída desejada, tanto para a tela quanto para a impressora, pode ser introduzido até 80 caracteres. Os nomes do título devem corresponder aos nomes das variáveis do arquivo COMMON para que sejam reconhecidos pelo programa.
- LINHA 11 - A declaração de FORMAT que corresponde ao título da listagem de saída, deve ser introduzida até 80 caracteres, começando e terminando com parênteses.
- LINHAS 12-14 - Até 20 variáveis podem ser incluídas na listagem para o arquivo de registro e devem ser fornecidas até 7 por linha e com 10 espaços por nome. O nome deve ser consistente com a definição do arquivo COMMON correspondente à variável. Não é necessário o preenchimento das 3 linhas, apenas o suficiente para atender o número de variáveis desejado.

ANEXO C

FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DO SISTEMA EXISTENTE

1 - Termo Proporcional :

$$K_{pxy} = 0.4753 M_{xy} [0.0002155 + (0.9569 / H)] \quad (A.1)$$

$$K_{pz} = 0.00234 M_z \quad (A.2)$$

Onde:

H = Profundidade da lâmina d'água (pés)

M_{xy} = Massa total no eixo X ou Y (Lbm)

M_z = Momento de inércia segundo o eixo Z (Lbm-pés²)

2 - Termo Integral :

$$I(s) = \frac{0.1 W_c}{s} \quad (A.3)$$

Onde :

$$W_{cxy} = 0.0585 \sqrt{(0.0002155 H + 0.9569)} \sqrt{200 / H} \quad (\text{rad/s})$$

$$W_{cz} = 0.058 \quad (\text{rad/s})$$

3 - Filtro Avanço-Atraso :

$$D(s) = \frac{W_d^2 (s^2 + 2\zeta_n W_n s + W_n^2)}{W_n^2 (s^2 + 2\zeta_d W_d s + W_d^2)} \quad (A.4)$$

Onde :

$$W_{nxy} = 1.5 W_{cxy} \quad (\text{rad/s})$$

$$W_{nz} = 1.4 W_{cz} \quad (\text{rad/s})$$

$$W_{dxy} = W_{nxy} [2.5 - 0.2 (1 - \sqrt{200 / H})] \quad (\text{rad/s})$$

$$W_{dz} = 2.8 W_{nz} \quad (\text{rad/s})$$

$$\zeta_{nxy} = 1.05$$

$$\zeta_{nz} = 1.1$$

$$\zeta_{dxy} = 0.50 + 0.1 (1.0 - \sqrt{200 / H})$$

$$\zeta_{dz} = 0.5$$

4 - Filtro Passa-Baixas :

$$PB(s) = \frac{W_{PB}^2}{s^2 + 2\zeta_{PB} W_{PB} s + W_{PB}^2} \quad (A.5)$$

Onde :

$$W_{PB} = 1.0 - (1.0 - \sqrt{200 / H}) \quad (\text{rad/s})$$

$$\zeta_{PB} = 0.5$$

5 - Filtros de Ondas do Mar :

$$FO1(s) = \frac{s^2 + W_{o1}^2}{s^2 + W_{o1}s + W_{o1}^2} \quad (A.6)$$

$$FO2(s) = \frac{s^2 + W_{o2}^2}{s^2 + W_{o2}s + W_{o2}^2} \quad (A.7)$$

Onde :

$$W_{o1} = 0.3129 \quad (\text{rad/s})$$

$$W_{o2} = 0.6258 \quad (\text{rad/s})$$

6 - Dinâmica do Navio :

$$N(s) = \frac{\mu_c}{s^2} \quad (A.8)$$

Onde :

$$\mu_{cx} = 0.1377 \quad (\text{pés/s}^2)$$

$$\mu_{cy} = 0.1486 \quad (\text{pés/s}^2)$$

$$\mu_{cz} = 0.002983 \quad (\text{rad/s}^2)$$