

ATAIR RIOS NETO
JOSÉ JAIME DA CRUZ

931

PROPOSTA DE PILOTO AUTOMÁTICO DE EMBARCAÇÕES
COM EMPREGO DE CONTROLE ESTOCÁSTICO

Pi. 223

VI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE
MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA

Veracruz y Cd. de México, 16 al 22 de Septiembre de 1979

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento computacional para pilotagem automática de embarcações de superfície em movimento plano pelo emprego dos recursos oferecidos pela Teoria de Controle Moderno, considerando-se o fenômeno modelado como de natureza estocástica. Através de um procedimento seqüencial para a determinação da lei de controle estocástico de sistemas dinâmicos não lineares descritos por equações de estado, aplicado ao caso particular de embarcações de superfície, procura-se fazer com que uma trajetória pré-estabelecida seja percorrida. O modelo matemático adotado é baseado nas derivadas hidrodinâmicas, com uma aproximação contendo termos de até terceira ordem. O ângulo de leme é a variável de controle, constituindo-se no elemento utilizado para a correção da rota. Os resultados numéricos apresentados para efeito de teste do procedimento foram obtidos através de simulação digital.

ABSTRACT

The aim of this work is to obtain a computational procedure for the automatic piloting of surface ships executing a motion in an horizontal plane, by using the tools of Modern Control Theory, taking the modeled phenomenon as being of stochastic nature. A sequential procedure for determining the stochastic control law of nonlinear dynamic systems given by state equations is applied to the particular case of surface ships, where a prescribed path must be gone through. The mathematical model adopted is based upon the hydrodynamic derivatives and it contains terms until the third order. The rudder angle is the control variable which is the element utilized for course correction. The numerical results presented to check the procedure were obtained through digital simulation.

1. INTRODUÇÃO

No procedimento exposto a seguir é tratado o problema de desenvolvimento do "software" correspondente a um piloto automático de embarcações de superfície. Compreende-se como tal o procedimento de, a partir da estimativa do estado da embarcação, gerar-se sequencialmente uma série de sinais capazes de controlar a trajetória da mesma, procurando fazer com que o navio se desloque sobre uma trajetória pré-estabelecida e paralelamente a ela.

O modelo adotado para representar a dinâmica da embarcação é um modelo de estados, apresentado na referência [1], cuja variável de controle é o ângulo de leme.

O sinal de controle consiste das correções necessárias em ângulo de leme, calculadas em função dos desvios observados em relação à trajetória desejada.

Pelo fato de a determinação do controle ser um procedimento bastante simples em sua forma, pretende-se que seja possível utilizá-lo em tempo real com um microprocessador a bordo da embarcação e instrumentação adequada, permitindo a automação de operações tais como navegação em canais, entrada em eclusas, etc...

As conveniências e inconveniências da pilotagem automática são discutidas amplamente na literatura, não sendo aqui apresentadas por não se enquadrarem no escopo do trabalho.

A simulação digital tem se mostrado eficiente em suas

aplicações [3] e foi aqui adotada para teste do procedimento, sendo apresentados alguns resultados obtidos para um navio mercante da classe Mariner.

Todas as grandezas deste trabalho, exceto quando há referência explícita em contrário, supõem-se adimensionalizadas em relação a uma base ρ , L, V.

2. MODELO DINÂMICO DA EMBARCAÇÃO

2.1. Considerações Preliminares

O modelo matemático adotado para a embarcação consiste de um modelo de estados apresentado por Abkowitz [1] e refere-se a movimento plano.

Tal modelo leva em consideração ações externas do meio bem como efeitos de profundidade e sucção devido a proximidade com as margens do canal.

O modelo matemático consiste de equações diferenciais de primeira ordem (equações de estado), não lineares, cujos coeficientes são determinados experimentalmente.

O procedimento mais usual para a determinação desses coeficientes hidrodinâmicos utiliza resultados de ensaios realizados com modelos cativos, através do Mecanismo de Movimento Plano. O modelo é submetido a um movimento e, através dos registros de esforços no casco, podem-se determinar os coeficientes hidrodinâmicos.

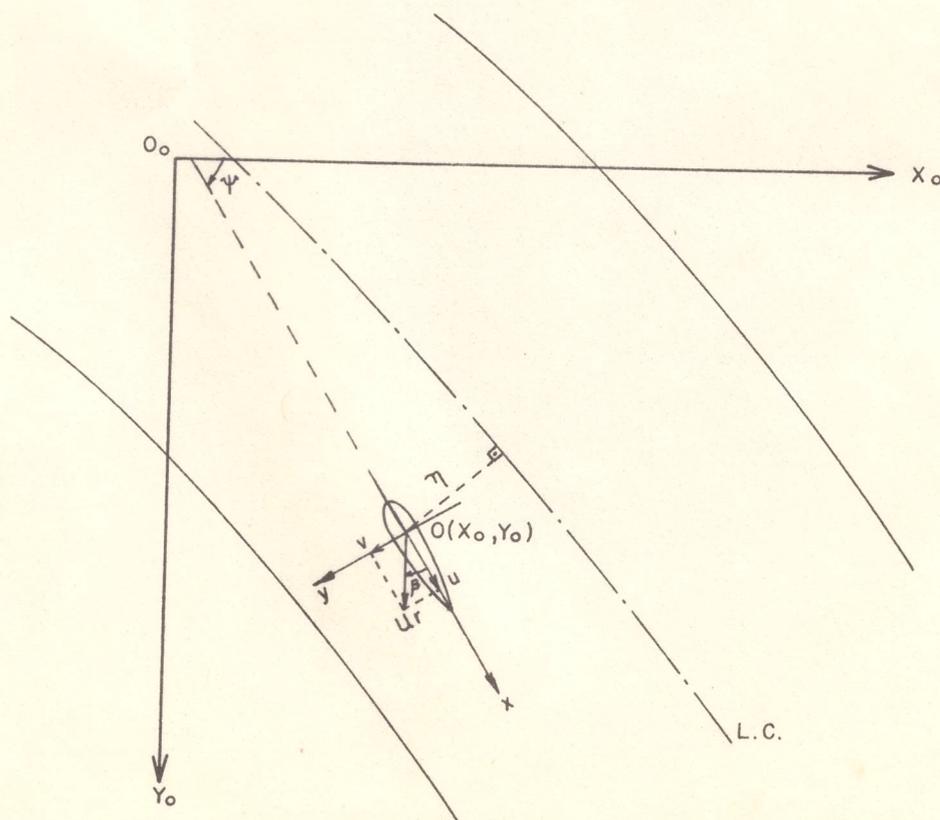
Uma técnica mais recente consiste de um procedimento de Identificação de Parâmetros baseado na Teoria de Controle Moderno, segundo o qual são determinados os coeficientes hidrodinâmicos a partir de observações de movimentos do modelo reduzido ou da embarcação em escala real [4,5] .

O modelo matemático adotado tem se mostrado bastante eficiente em suas aplicações [3,6] .

2.2. Equações do Movimento do Navio

Considere-se um sistema de coordenadas Oxy , orientado positivamente e fixo ao navio.

Seja ainda um outro sistema de mesma orientação $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ fixo em relação à terra, no qual se pretende estudar o movimento do navio (fig. 1).



(fig. 1)

A fim de representar o movimento da embarcação no plano, três equações são necessárias [3] :

$$\begin{aligned} X' &= m (\dot{u} - r.v - x_G.r^2) \\ Y' &= m (\dot{v} + r.v + x_G.\dot{r}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$N' = I_z.\dot{r} + m.x_G . (\dot{v} + ru)$$

onde X' e Y' são forças atuantes sobre o navio segundo os eixos Ox e Oy , respectivamente, N' é o momento atuante segundo o eixo Oz , m é a massa do navio, u e v são, respectivamente, as componentes da velocidade absoluta do ponto O segundo os eixos Ox e Oy , r é a velocidade angular da embarcação, x_G é a abscissa do centro de gravidade do navio referida ao eixo Ox e I_z é o momento de inércia do navio em relação ao eixo Oz . Pontos sobre as variáveis denotam derivadas em relação ao tempo.

As forças X' e Y' , e o momento N' são de origem hidrodinâmica e dependem do movimento do navio no meio fluido, da ação de lemes e das condições de operação dos propulsores.

De maneira simbólica, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} X' &= X' (X_0, Y_0, u, v, \dot{u}, \dot{v}, r, \dot{r}, \delta, \dot{\delta}, \dots) \\ Y' &= Y' (X_0, Y_0, u, v, \dot{u}, \dot{v}, r, \dot{r}, \delta, \dot{\delta}, \dots) \\ N' &= N' (X_0, Y_0, u, v, \dot{u}, \dot{v}, r, \dot{r}, \delta, \dot{\delta}, \dots) \end{aligned} \quad (2.2)$$

X_0 e Y_0 são as coordenadas do ponto O , expressas em

relação ao sistema $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ e δ é o ângulo de leme.

Como as funções (2.2) são em geral contínuas e diferenciáveis, é possível desenvolvê-las em série de Taylor em torno de um ponto de equilíbrio, que pode corresponder, por exemplo, à situação de movimento retilíneo e uniforme do navio. Substituiu-se então a expansão segundo Taylor em (2.1) e, considerando apenas termos até terceira ordem (já que os termos de ordem superior acarretariam um trabalho adicional considerável para calculá-los, dado seu grande número, e não implicariam em aumento substancial de precisão), após algum manuseio algébrico, obtém-se:

$$s_\ell = \sum_{i=1}^5 A_i^\ell s_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij}^\ell s_i s_j + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 C_{ijk}^\ell s_i s_j s_k + D^\ell \quad (2.3)$$

$$\ell = 1, 2, 3$$

sendo $s_1 = \Delta u$, $s_2 = v$, $s_3 = r$, $s_4 = \eta$, $s_5 = \delta$.

Δu é a perturbação em relação à condição de equilíbrio da componente de velocidade do ponto O segundo O_x .

$$u = u_0 + \Delta u = 1 + \Delta u$$

η é a distância do ponto O à linha de centro do canal.

Os coeficientes A_i^ℓ , B_{ij}^ℓ , C_{ijk}^ℓ e D^ℓ são funções das derivadas hidrodinâmicas da embarcação e constam das referências [3,6,7], sendo alguns deles nulos por razões físicas ou de simetria.

As equações (2.3) podem ser escritas simbolicamente,

da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\dot{s}_1 &= g_1 (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5) \\ \dot{s}_2 &= g_2 (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5) \\ \dot{s}_3 &= g_3 (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5)\end{aligned}\tag{2.4}$$

Para completar o modelo de estados, devem ser introduzidas as equações seguintes, de natureza cinemática:

$$\begin{aligned}\dot{Y}_0 &= (1 + \Delta u) \cdot \text{sen } \psi + v \cdot \text{cos } \psi \\ \dot{X}_0 &= (1 + \Delta u) \cdot \text{cos } \psi - v \cdot \text{sen } \psi \\ \dot{\psi} &= r\end{aligned}\tag{2.4'}$$

sendo ψ o ângulo de rumo da embarcação.

Reescrevendo (2.4) e (2.4') em termos do vetor de estados $X^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]$ = $[\Delta u \ v \ r \ Y_0 \ X_0 \ \psi]$ e da variável de controle $u = \delta$, e lembrando que

$$s_4 = \eta = \eta (x_5, x_4)$$

tem-se:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1 (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u) \\ \dot{x}_2 &= f_2 (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u)\end{aligned}$$

$$\dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u)$$

$$\dot{x}_4 = (1 + x_1) \cdot \text{sen } x_6 + x_2 \cdot \text{cos } x_6 \quad (2.5)$$

$$\dot{x}_5 = (1 + x_1) \cdot \text{cos } x_6 - x_2 \cdot \text{sen } x_6$$

$$\dot{x}_6 = x_3$$

As equações de estado (2.5) podem ser escritas de forma compacta como:

$$\dot{X} = F(X, u) \quad (2.6)$$

Portanto, através das equações de estado (2.5), é possível prever o comportamento da embarcação em função do ângulo de leme atuante.

A máquina do leme é caracterizada por dois parâmetros : sua velocidade máxima de acionamento (V_{LEME}) e o máximo ângulo de leme (δ_{MAX}).

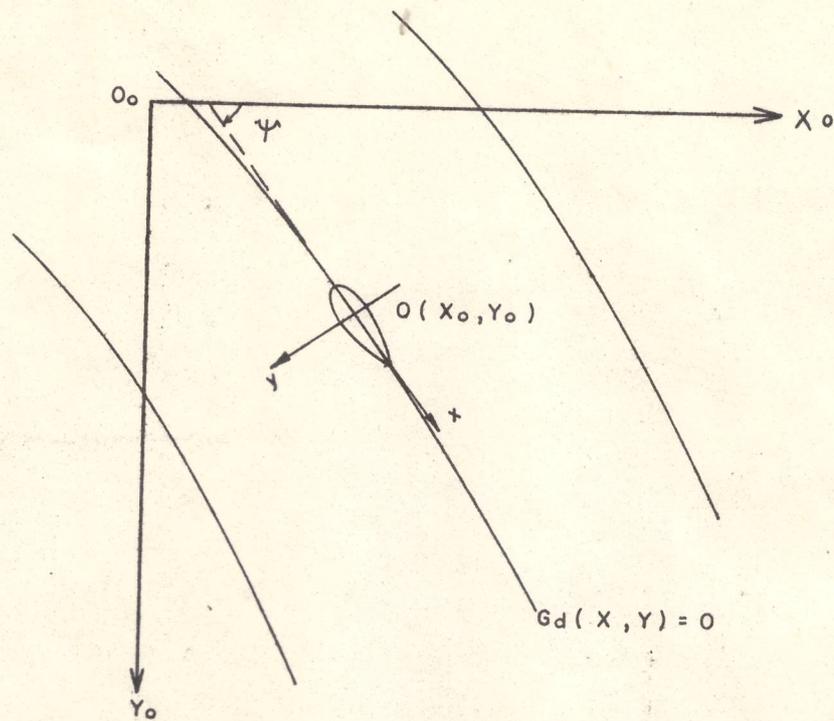
3. OBJETIVO DE CONTROLE

Considerar-se-ã como objetivo a ser atingido através da ação de controle o fato de a embarcação navegar sobre uma trajetória desejada e paralela a ela em todos os instantes.

Seja a trajetória desejada descrita por uma equação implícita do tipo

$$G_D (X, Y) = 0$$

(3.1)



(fig. 2)

A condição de o navio estar em cada instante sobre a trajetória desejada pode ser expressa simplesmente como:

$$G_D (X_0, Y_0) = 0 \quad (3.2)$$

A condição de o navio estar paralelo à trajetória desejada também pode ser representada de maneira simples por:

$$\frac{\partial}{\partial X_0} G_D (X_0, Y_0) \cdot \cos \psi + \frac{\partial}{\partial Y_0} G_D (X_0, Y_0) \cdot \sin \psi = 0 \quad (3.3)$$

Entretanto, as condições (3.2) e (3.3) são de caráter estático. É interessante considerar que elas não apenas sejam satisfeitas em um dado instante, mas que apresentem a tendência de continuarem se verificando em instantes sucessivos.

Sendo assim, uma maneira conveniente de representar essa tendência é acrescentar às condições (3.2) e (3.3) a validade simultânea de suas derivadas em relação ao tempo.

Derivando (3.2) vem:

$$\frac{\partial}{\partial X_0} G_D(X_0, Y_0) \cdot \left[(1+\Delta u) \cdot \cos \psi - v \cdot \text{sen} \psi \right] + \frac{\partial}{\partial Y_0} G_D(X_0, Y_0) \cdot \left[(1+\Delta u) \cdot \text{sen} \psi + v \cdot \cos \psi \right] = 0 \quad (3.4)$$

De (3.3), tem-se:

$$\begin{aligned} & \left[- \frac{\partial}{\partial X_0} G_D(X_0, Y_0) \cdot \text{sen} \psi + \frac{\partial}{\partial Y_0} G_D(X_0, Y_0) \cdot \cos \psi \right] \cdot r + \\ & + \left[\frac{\partial^2}{\partial X_0^2} G_D(X_0, Y_0) \cdot \cos \psi + \frac{\partial^2}{\partial Y_0 \partial X_0} G_D(X_0, Y_0) \cdot \text{sen} \psi \right] \cdot \left[(1+\Delta u) \cdot \cos \psi - v \cdot \text{sen} \psi \right] + \\ & + \left[\frac{\partial^2}{\partial X_0 \partial Y_0} G_D(X_0, Y_0) \cdot \cos \psi + \frac{\partial^2}{\partial Y_0^2} G_D(X_0, Y_0) \cdot \text{sen} \psi \right] \cdot \left[(1+\Delta u) \cdot \text{sen} \psi + v \cdot \cos \psi \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

As condições (3.2) a (3.5) podem ser escritas de maneira simbólica em função do vetor de estados $X^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$ como

$$h(X) = 0 \quad (3.6)$$

onde $h^T(X) = [h_1(X) \quad h_2(X) \quad h_3(X) \quad h_4(X)]$, sendo que os h_i ,

$i = 1, 2, 3, 4$ correspondem respectivamente aos lados esquerdos das igualdades (3.2) a (3.5).

Observando-se porém as condições (3.3) e (3.4), nota-se que, para que ambas sejam satisfeitas, é necessário que o ângulo de abatimento (drift) β seja nulo, o que é uma restrição demasia

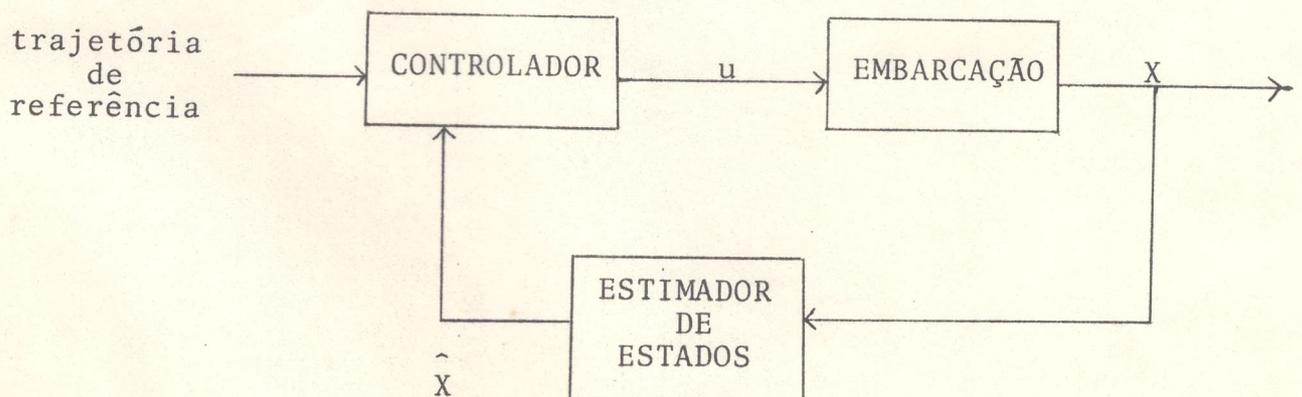
do forte. Preferiu-se optar então por um procedimento que consiste em impor a condição (3.3) como ela se apresenta, enfraquecendo porém a condição (3.4), para a qual considera-se aceitável uma margem de tolerância, representada por uma variável aleatória ω de média zero e variância P_ω .

$$h(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \\ 0 \end{bmatrix} \triangleq \epsilon \quad (3.6')$$

$$R_\epsilon \triangleq E \begin{bmatrix} \epsilon \\ \cdot \\ \epsilon^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

4. DETERMINAÇÃO DO CONTROLE

Pode-se esquematizar o sistema em estudo sob a forma de diagrama de blocos da seguinte maneira:



Neste trabalho, nossa atenção está concentrada preferencialmente sobre o bloco "controlador", sendo que neste ítem será apresentado o procedimento de determinar o controle a aplicar na em

barcação a partir do conhecimento da estimativa do estado e da trajetória de referência que se pretende seja seguida.

Em face da natureza digital do controlador em questão, considerar-se-á a análise do problema em tempo discreto, sendo (t_k, t_{k+1}) um intervalo típico de discretização e propagação do modelo.

Considere-se que o filtro de Kalman em sua forma extendida, quando aplicado ao sistema no instante t_k , levando em conta as observações efetuadas até t_k (representadas aqui por θ_k), forneça uma estimativa \hat{X}_k do estado [2] :

$$\hat{X}_k = E \left[X_k \mid \theta_k \right] \quad (4.1)$$

com dispersão:

$$P_k = E \left[(X_k - \hat{X}_k) \cdot (X_k - \hat{X}_k)^T \mid \theta_k \right] \quad (4.2)$$

Definindo \bar{X} como um vetor de estados que satisfaça:

$$\dot{\bar{X}} = F (\bar{X}, \bar{u}) \quad (4.3)$$

onde \bar{u} é suposto constante no intervalo (t_k, t_{k+1}) e igual a \hat{u}_{k-1} , valor efetivo do controle no intervalo anterior:

$$\bar{u} \triangleq \bar{u}_k = \hat{u}_{k-1} \quad (4.4)$$

Seja a condição inicial de \bar{X} em t_k a seguinte:

$$\bar{X}_k = \hat{X}_k \quad (4.5)$$

Pode-se, portanto realizar uma expansão em série de Taylor de (2.6) em torno da trajetória de referência (\bar{X}, \bar{u}) :

$$\dot{X} - \dot{\bar{X}} = \frac{\partial F}{\partial X} \bigg|_{\bar{X}, \bar{u}} \cdot (X - \bar{X}) + \frac{\partial F}{\partial u} \bigg|_{\bar{X}, \bar{u}} \cdot (u - \bar{u}) + \sigma \quad (2) \quad (4.6)$$

Retendo apenas os termos lineares, obtemos:

$$\delta \dot{X} = \frac{\partial F}{\partial X} \bigg|_{\bar{X}, \bar{u}} \cdot \delta X + \frac{\partial F}{\partial u} \bigg|_{\bar{X}, \bar{u}} \cdot \delta u \quad (4.7)$$

que é válida para δX e δu suficientemente pequenos.

Seja $\phi (...)$ a matriz de transição de estados associada à equação dinâmica (4.7), determinada através da integração de

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi(t, t_k) = \frac{\partial F}{\partial X} \bigg|_{\bar{X}, \bar{u}} \cdot \phi(t, t_k) \quad (4.8)$$

com a condição inicial $\phi(t_k, t_k) = I$.

Seja ainda a matriz $\Gamma (...)$ definida por

$$\Gamma(t, t_k) \triangleq \int_{t_k}^t \phi(t, \tau) \cdot \frac{\partial F}{\partial u} \bigg|_{\bar{X}, \bar{u}} d\tau \quad (4.9)$$

Dessa forma, a integração de (4.7), considerando δu constante no intervalo (t_k, t_{k+1}) , fornece:

$$\delta X_{k+1} = \phi(t_{k+1}, t_k) \cdot \delta X_k + \Gamma(t_{k+1}, t_k) \cdot \delta u_k \quad (4.10)$$

onde
$$\delta X_{k+1} = X_{k+1} - \bar{X}_{k+1} \quad (4.11)$$

$$\delta X_k = X_k - \bar{X}_k \quad (4.12)$$

$$\delta u_k = u_k - \bar{u}_k \quad (4.13)$$

Em resumo, \bar{X}_{k+1} seria o estado atingido se o controle \bar{u}_k fosse aplicado ao sistema durante o intervalo (t_k, t_{k+1}) , a partir do estado inicial \bar{X}_k . Idem para X_{k+1} , u_k e X_k .

Seria de todo conveniente que se conseguisse determinar u_k capaz de transferir o sistema do estado atual X_k , desconhecido, ao estado X_{k+1} obedecendo (3.6') no instante t_{k+1} :

$$h(X_{k+1}) = \epsilon \quad (4.14)$$

Linearizando em torno de \bar{X}_{k+1} , temos:

$$h(X_{k+1}) = h(\bar{X}_{k+1}) + \left. \frac{dh}{dX} \right|_{\bar{X}_{k+1}} (X_{k+1} - \bar{X}_{k+1}) = \epsilon$$

Definindo:

$$H_{k+1}^* \triangleq \left. \frac{dh}{dX} \right|_{\bar{X}_{k+1}} \quad (4.15)$$

temos:
$$H_{k+1}^* \cdot \delta X_{k+1} = -h(\bar{X}_{k+1}) + \epsilon \quad (4.16)$$

Multiplicando ambos os membros de (4.10) por H_{k+1}^* e usando a igualdade (4.16) obtem-se:

$$-h (\bar{X}_{k+1}) + \varepsilon = H_{k+1}^* \cdot \phi(t_{k+1}, t_k) \cdot \delta X_k + H_{k+1}^* \cdot \Gamma(t_{k+1}, t_k) \cdot \delta u_k \quad (4.1)$$

Definindo:

$$Z_{k+1} \triangleq H_{k+1}^* \cdot \Gamma(t_{k+1}, t_k) \cdot \bar{u}_k - h (\bar{X}_{k+1}) \quad (4.1)$$

$$H_{k+1} \triangleq H_{k+1}^* \cdot \Gamma(t_{k+1}, t_k) \quad (4.1)$$

tem-se que (4.17) pode ser reescrita como:

$$Z_{k+1} = H_{k+1} \cdot u_k + \eta_{k+1} \quad (4.2)$$

onde η_{k+1} apresenta:

$$E \left[\eta_{k+1} \mid \theta_k \right] = 0 \quad (4.2)$$

$$E \left[\eta_{k+1} \cdot \eta_{k+1}^T \mid \theta_k \right] = R_{k+1} = H_{k+1}^* \cdot \phi(t_{k+1}, t_k) \cdot P_k \cdot \phi^T(t_{k+1}, t_k) \cdot H_{k+1}^{*T} + R_\varepsilon \quad (4.2)$$

O problema então se resume em determinar o "melhor" u_k (o qual será designado por \hat{u}_k) que satisfaça (4.20).

Uma das formas de se conseguir isso é através da estimativa pelo critério dos mínimos quadrados ponderado [8] em que conhecida uma estimativa a priori \tilde{u}_k de u_k , tal que:

$$E \left[u_k \right] = \tilde{u}_k \quad (4.2)$$

$$E \left[(u_k - \tilde{u}_k)^2 \right] \triangleq q_k \quad (4.2)$$

determina-se o valor \hat{u}_k de u_k que minimiza a forma quadrática

$$J = \frac{1}{2} \left[\frac{(u_k - \tilde{u}_k)^2}{q_k} + (Z_{k+1} - H_{k+1} \cdot u_k)^T \cdot R_{k+1}^{-1} \cdot (Z_{k+1} - H_{k+1} \cdot u_k) \right] \quad (4.25)$$

o que ocorre para

$$\hat{u}_k = \frac{H_{k+1}^T \cdot R_{k+1}^{-1} \cdot Z_{k+1} + \frac{\tilde{u}_k}{q_k}}{H_{k+1}^T \cdot R_{k+1}^{-1} \cdot H_{k+1} + \frac{1}{q_k}} \quad (4.26)$$

Adota-se:

$$\tilde{u}_k = \hat{u}_{k-1} \quad (4.27)$$

isto é, a estimativa a priori do ângulo de leme no intervalo (t_k, t_{k+1}) é tomada como sendo igual ao ângulo efetivamente aplicado à embarcação no intervalo anterior.

Para que a dinâmica da máquina do leme, aqui caracterizada por sua máxima velocidade de acionamento V_{LEME} , não invalide a hipótese de ser o ângulo do leme a variável de controle, toma-se:

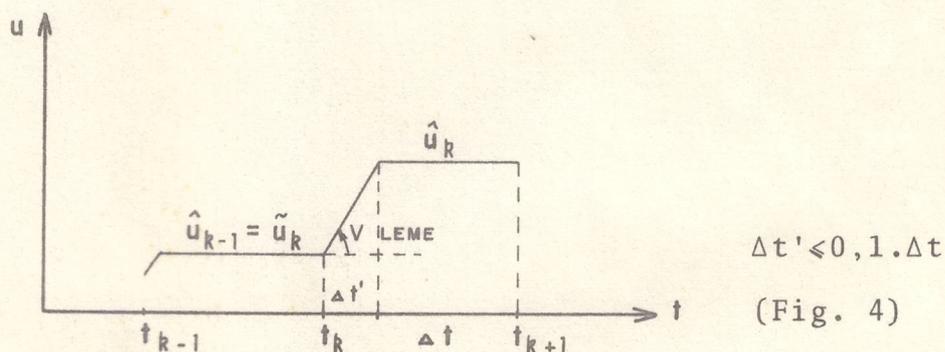
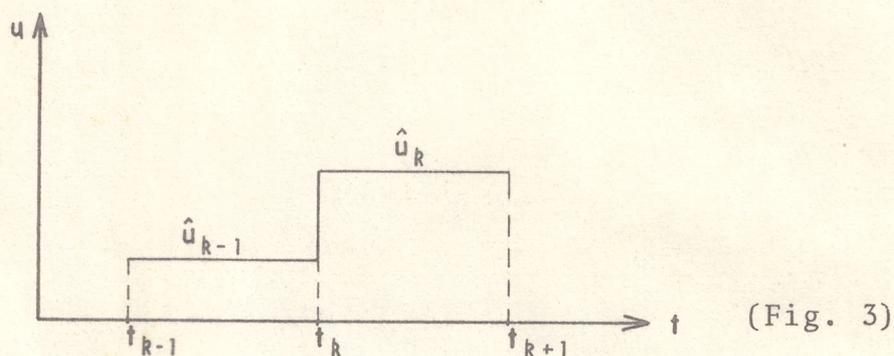
$$q_k = (\alpha \cdot 0,1 \cdot V_{LEME} \cdot \Delta t)^2, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (4.28)$$

com α escolhido de acordo com a desigualdade de Tchebycheff

$$P \left\{ |u_k - \tilde{u}_k| \geq 0,1 \cdot V_{LEME} \cdot \Delta t \right\} \leq \alpha^2 \quad (4.29)$$

Em palavras, estabelece-se uma faixa em torno de \tilde{u}_k tal que, com probabilidade $(1-\alpha^2)$, o novo ângulo de leme a aplicar

permaneça dentro dessa faixa; dessa forma garante-se também a aproximação assumida de que o ângulo do leme é constante durante cada intervalo, pois está-se aproximado a seqüência representada pelo gráfico da fig. 3 por aquela representada na fig. 4.



5. ALGORITMO UTILIZADO

O procedimento foi testado através da simulação digital do movimento da embarcação. Para tal foi utilizado o computador DEC-PDP-15/77 (DOS) com 32k palavras de memória, existente na Divisão de Engenharia Naval do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A.

Para o intervalo típico de discretização (t_k, t_{k+1})

pode-se esquematizar o procedimento através dos seguintes passos:

- i) estimar o estado \bar{X}_k e a matriz P_k - o processo de estimação do estado a partir das observações efetuadas foi simulado através de uma incerteza associada ao estado, representada pela matriz P_k .
- ii) propagar o estado \bar{X} , a partir da condição inicial $\bar{X}_k = \hat{X}_k$, com o controle $\bar{u}_k = \hat{u}_{k-1}$, integrando as equações dinâmicas (2.5) e obtendo o estado propagado \bar{X}_{k+1} .
- iii) calcular $\phi(t_{k+1}, t_k)$ e $\Gamma(t_{k+1}, t_k)$, conforme (4.8) e (4.9).
- iv) calcular H_{k+1}^* , conforme (4.15)
- v) calcular $h(\bar{X}_{k+1})$
- vi) calcular Z_{k+1} , conforme (4.18)
- vii) calcular H_{k+1} , conforme (4.19)
- viii) calcular R_{k+1} , conforme (4.22)
- ix) calcular \hat{u}_k , conforme (4.26)
- x) considerando a dinâmica da máquina do leme, aplicar o controle \hat{u}_k ao sistema simulado dado por (2.5), a partir do estado X_k , até atingir o instante t_{k+1} .

6. RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados testes do procedimento para um navio mercante da classe Mariner, cujos coeficientes hidrodinâmicos constam da referência [9], tendo como características principais:

| | |
|-----------------------|-----------|
| comprimento | 160 m |
| calado | 15 m |
| boca | 22 m |
| velocidade | 15 nós |
| deslocamento | 16000 ton |
| ângulo de leme máximo | 35° |

Os resultados obtidos são apresentados graficamente nas figuras 5a, 5b, 6a, 6b, 7a e 7b.

Nas figuras 5a, 6a e 7a tem-se, respectivamente, trajetórias desejadas senoidal, elipsoidal e parabólica. Correspondentemente, nas figuras 5b, 6b e 7b, tem-se as histórias de leme calculadas.

Para a trajetória senoidal, as condições iniciais da embarcação foram tomadas como sendo:

$$\Delta u = 0$$

$$v = 0$$

$$r = 0$$

$$X_0 = 0$$

$$Y_0 = 0$$

$$\psi_0 = 60^\circ$$

$$\delta_0 = 0$$

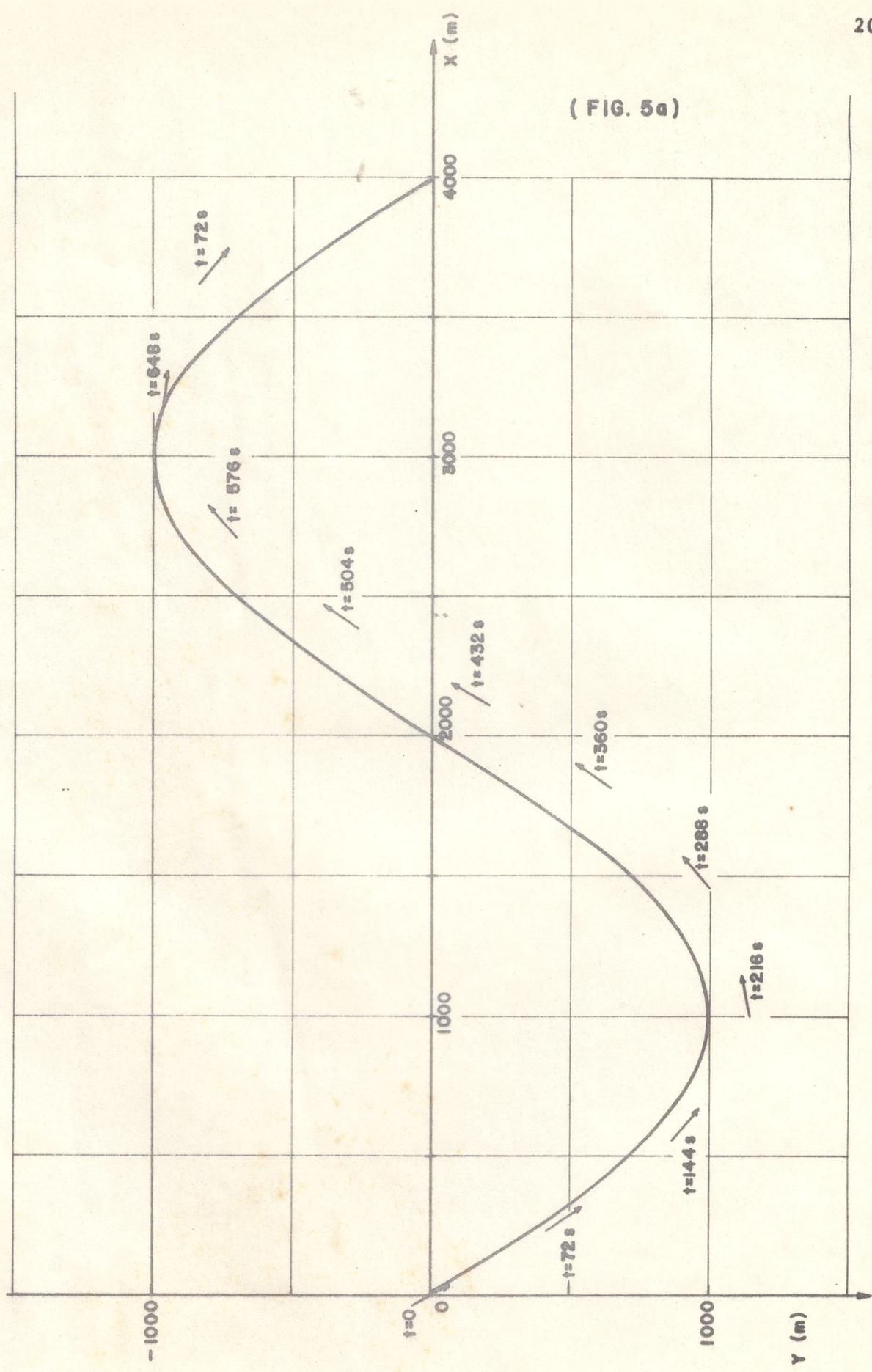
Quanto à trajetória elipsoidal, usou-se:

$$\Delta u = 0 \qquad v = 0 \qquad r = 0$$

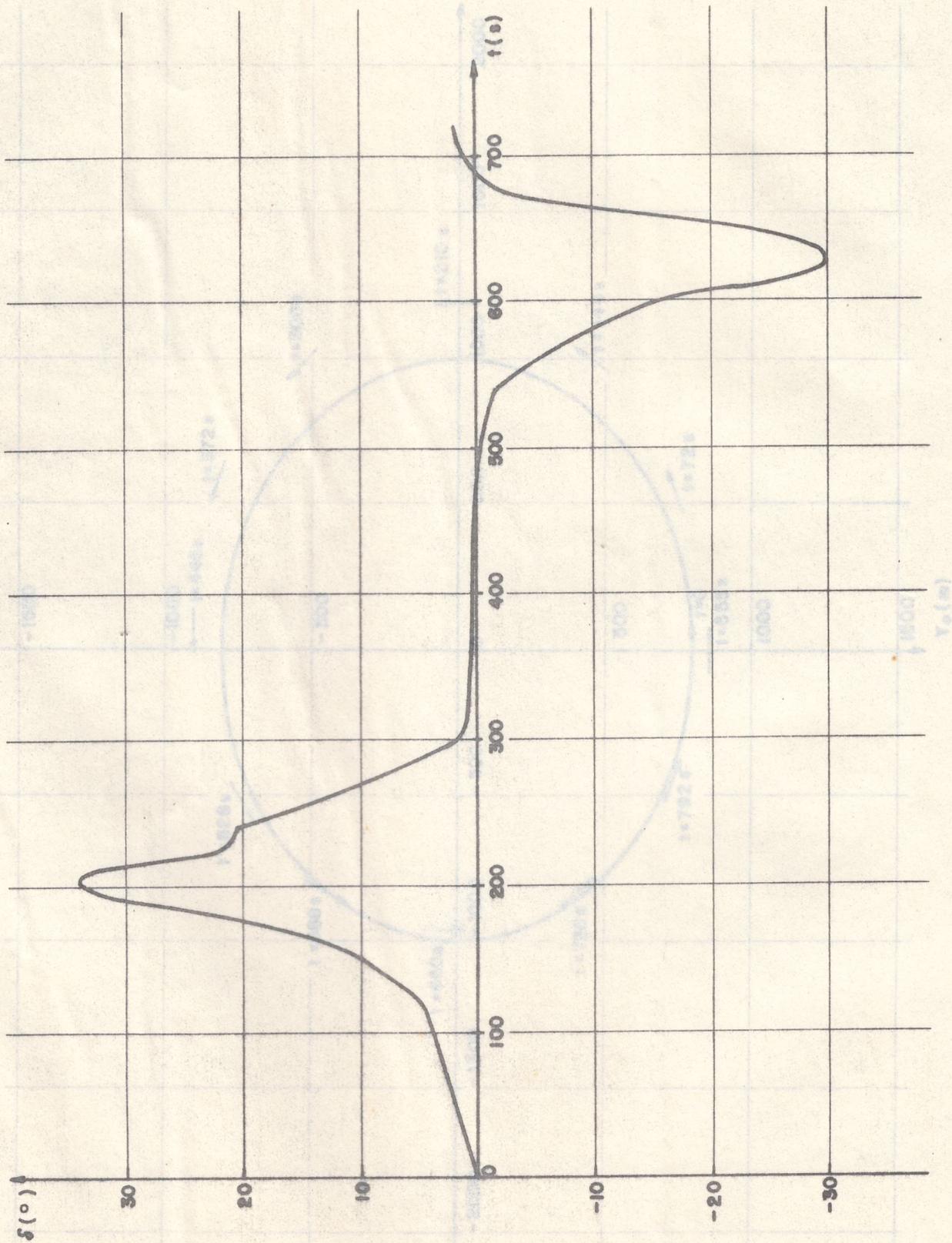
$$X_0 = 0 \qquad Y_0 = 800\text{m} \qquad \psi_0 = 0$$

$$\delta_0 = 0$$

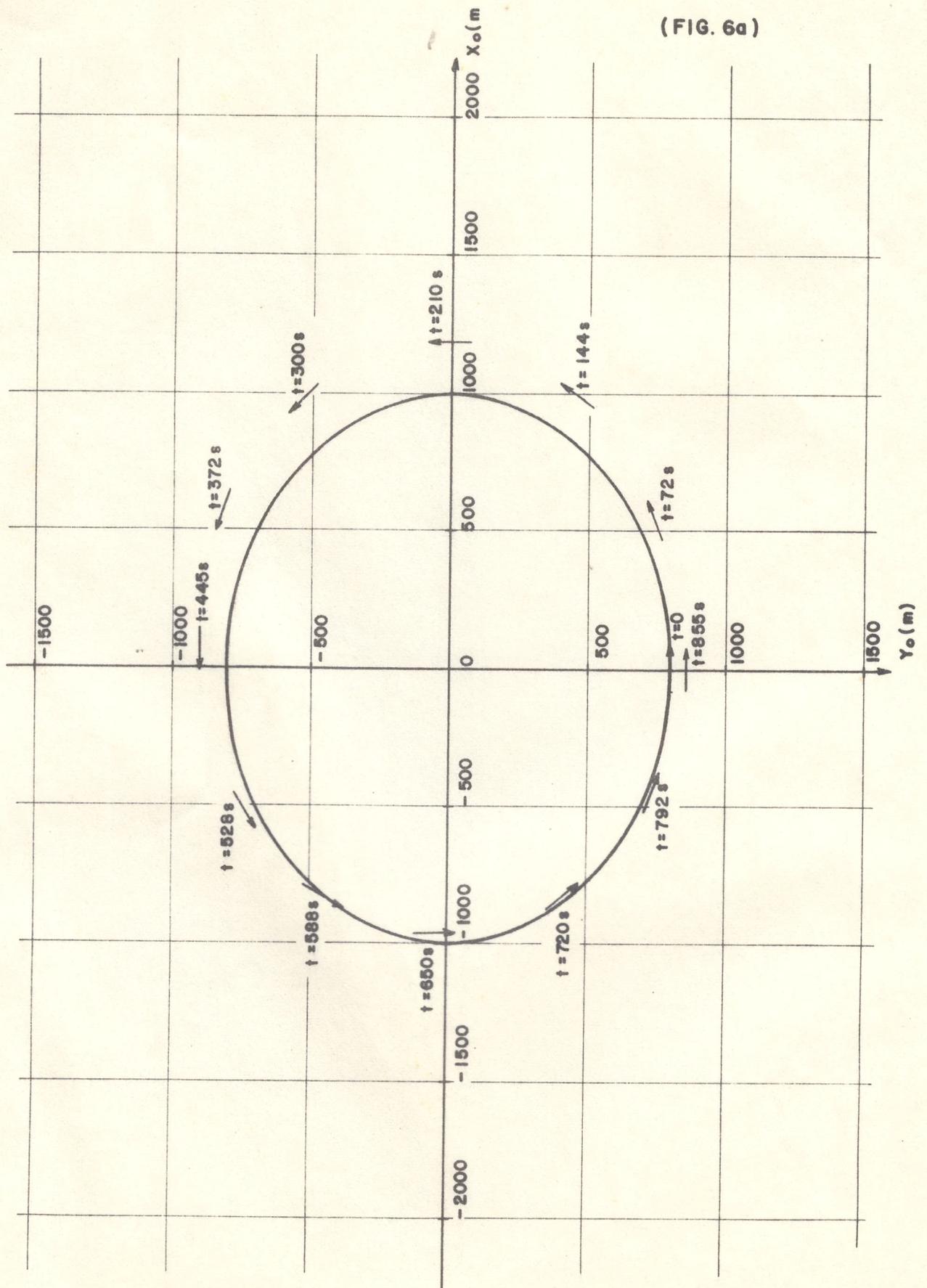
Para a trajetória parabólica as condições iniciais foram nulas.



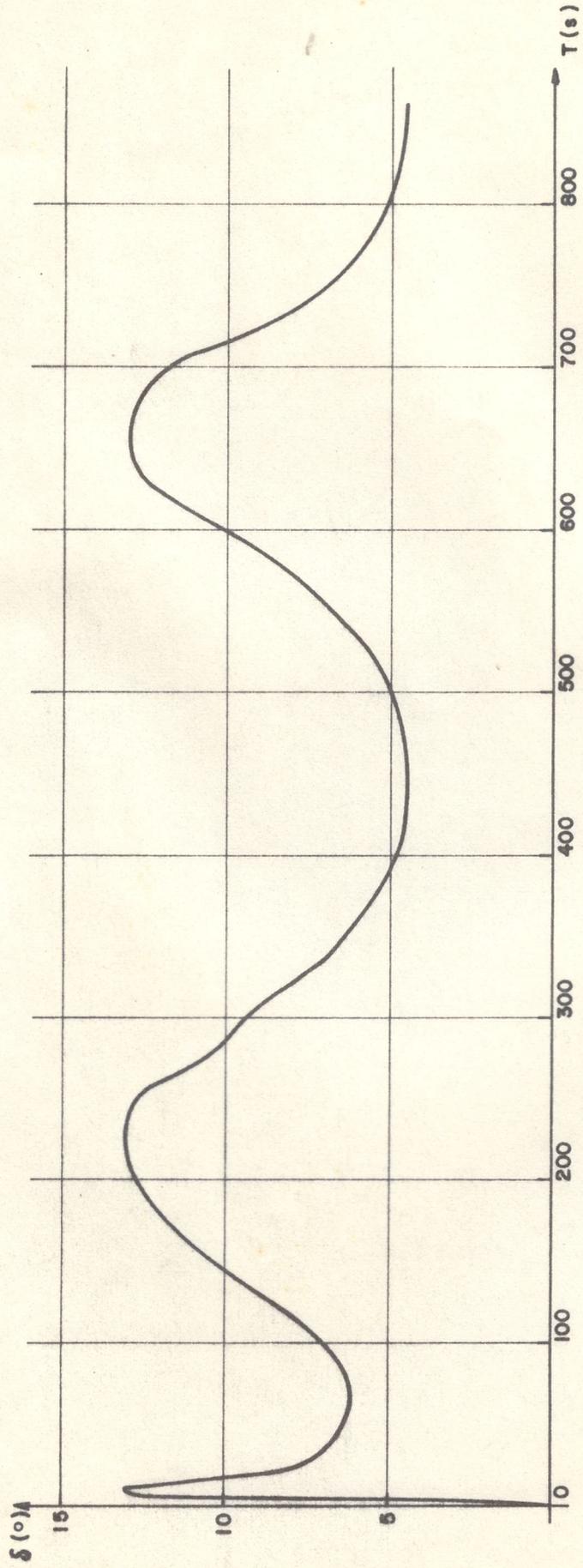
(FIG. 5b)



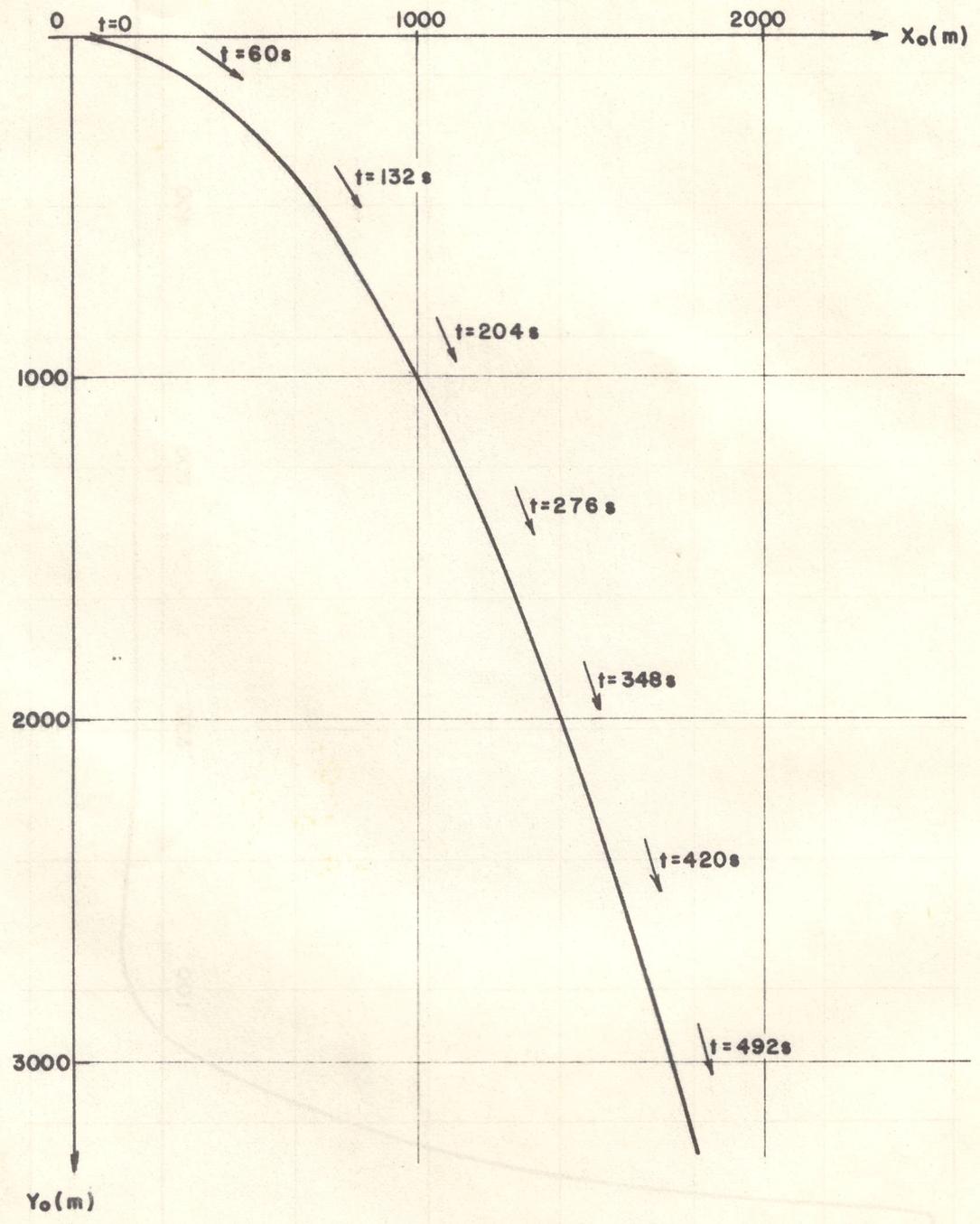
(FIG. 6a)

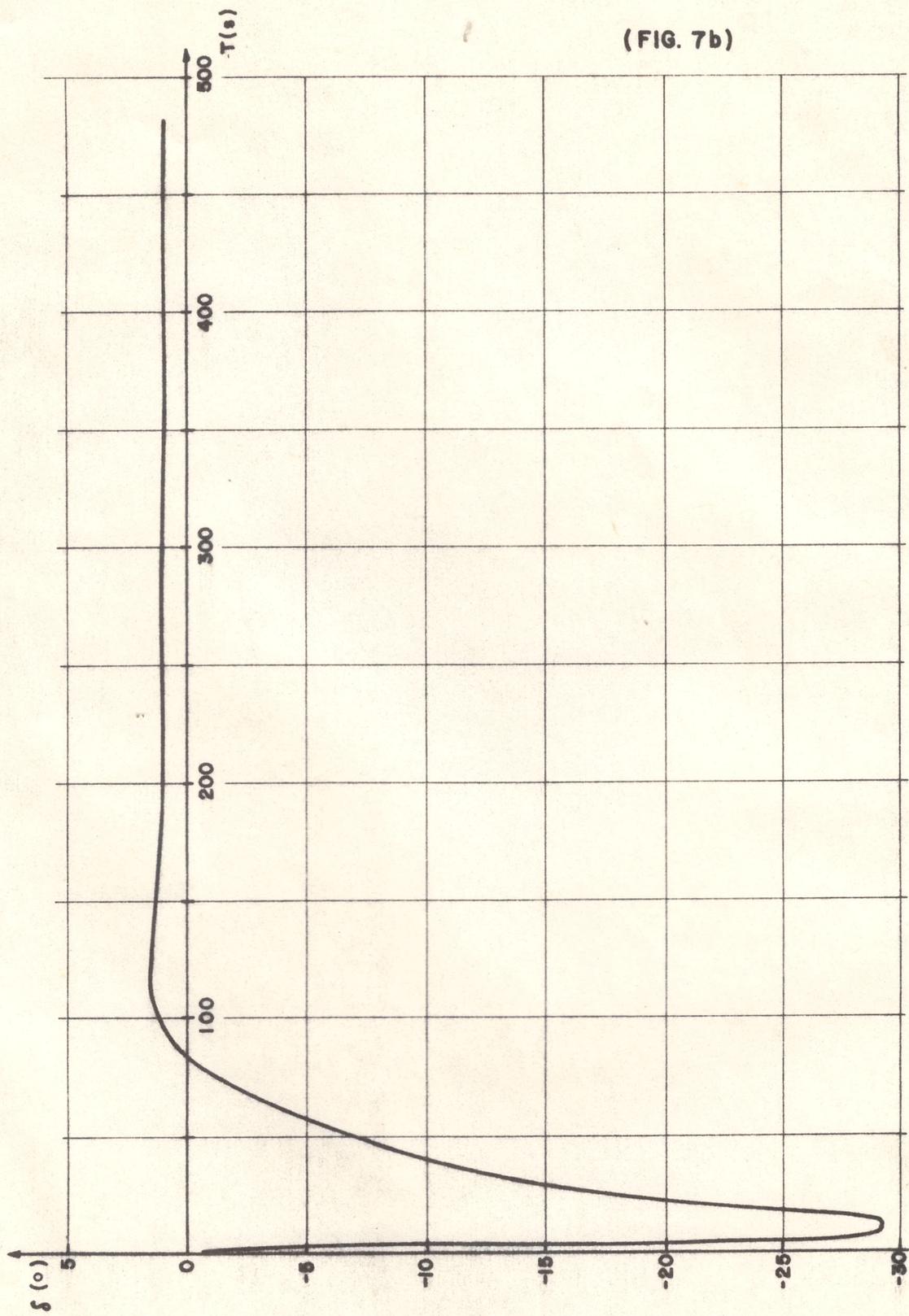


(FIG. 6b)



(FIG. 7a)





7. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Este trabalho contém resultados preliminares de pesquisa desenvolvida pelos autores e ainda em fase de conclusão [12].

Sabe-se que os coeficientes do modelo matemático adotado para a embarcação referem-se a uma determinada profundidade e configuração da secção transversal do canal [10]. Este aspecto constitui uma dificuldade à implementação de um tal controlador a bordo da embarcação, pois seria necessário ajustar os coeficientes do modelo a cada ambiente.

Sendo assim, para levar em conta desvios do modelo matemático em relação à realidade, bem como efeitos de agentes externos atuantes sobre a embarcação, tais como ventos e correntes, sem a necessidade de instrumentação adicional para medir sua intensidade e sentido, este trabalho, em sua forma final, deverá tratar tais elementos como acelerações não modeladas, a serem estimadas juntamente com o estado, durante o processo de observação [11,12].

Tais acelerações não modeladas serão representadas por um processo de Gauss-Markov de primeira ordem e a estimação será através do filtro estendido de Kalman.

A adoção desse enfoque baseia-se no fato de o mesmo ter se mostrado bastante eficiente no tratamento de sistemas dinâmicos formalmente semelhantes [11].

Finalmente, cumpre ressaltar que os resultados obti

dos dentro do estágio atual do presente trabalho já podem ser con
siderados bastante satisfatórios.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Marinha do Brasil, cujo apoio a projeto
de pesquisa proporcionou em parte a obtenção dos presentes resulta
dos.

Agradecemos também ao Instituto de Pesquisas Tecnoló
gicas do Estado de São Paulo S/A, pelas facilidades computacionais
oferecidas através da Divisão de Engenharia Naval.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01) ABKOWITZ, M. A. - "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles";
M.I.T. Press, 1969
- 02) JAZWINSKY, A. H. - "Stochastic Processes and Filtering Theory";
Academic Press, 1970
- 03) LEONE, P.C., SOTELO, J.J., CRUZ, J.J. - "Simulação de Manobras
de Navios de Superfície"; Relatório interno I.P.T. nº 7306,
1973.
- 04) BRINATI, H.L., NETO, A.R.- "Application of the Extended Kalman
Filtering Technique to Ship Maneuverability Identification"
IV Congresso Panamericano de Engenharia Naval, Lima, Peru,
1976.
- 05) BRINATI, H.L.- "System Identification Applied to Maneuvering
Trials"; M.I.T., Engineer Thesis, Dept. of Ocean Engineering,
1973.
- 06) LEONE, P.C., SOTELO, J.J., CRUZ, J.J.- "A Maneuverability Study
of a River Pusher - Barge System"; III Congresso Panamerica-
no de Engenharia Naval e Transportes Marítimos, Buenos Aires,
Argentina, 1973.
- 07) SOTELO, J.J.- "Aplicação de Controle Ótimo na Modelagem do Tri-
noneiro"; E.P.U.S.P., Dissertação de Mestrado, Depto. de En-
genharia Naval, 1976.

- 08) BRYSON, A.E., HO, Y.C.- "Applied Optimal Control"; John Wiley & Sons, 1975.
- 09) CHISLETT, M.S., STRØM-TEJSEN, J.- "Planar Motion Mechanism Tests and Full-Scale Steering and Manoeuvring Predictions for a MARINER Class Vessel"; Hydro-Og Aerodynamisk Laboratorium, Lyngby, Denmark, 1965.
- 10) EDA, H.- "Directional Stability and Control of Ships in Restricted Channels"; Trans. SNAME, n° 2, 1971.
- 11) NETO, A.R., TAPLEY, B.D.- "Estimating the State of Nonlinear Dynamical Systems in the Presence of Unmodeled Accelerations" Proc. of the 3rd Brazilian Congress of Mechanical Engineering, paper n° D-9, Rio de Janeiro, 1975.
- 12) CRUZ, J.J.- "Pilotagem automática em movimento plano de embarcações de superfície com emprego de controle estocástico"; Dissertação de Mestrado a ser apresentada à Escola Pilitécnica da Universidade de São Paulo, sob a orientação do Prof. Dr. Atair Rios Neto.