

JOÃO MORO  
OCTAVIO MAIZZA NETO

932

PROJETO DE UM "PILOTO DE RUMO"

Pi. 224

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

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

## RESUMO

### PROJETO DE UM "PILOTO DE RUMO"

O trabalho analisa o projeto de um controle automático (PILOTO DE RUMO) a ser utilizado no caso de se desejar manter - um navio genérico, definido pelo seu modelo matemático, num ru mo pré-fixado, a uma velocidade avante constante, mesmo que es te navio esteja sujeito a perturbações externas, tais como vento e corrente.

Como variável de controle é considerado o ângulo de deflexão do leme,  $\delta$ . As conclusões obtidas fundamentam-se na - teoria de controle e considerações de desempenho real do navio.

## ABSTRACT

### DESIGN OF AN "AUTOMATIC PILOT"

This research analysés the design of an automatic control (automatic pilot) to be utilized in case it is desired to keep a given ship, defined by a mathematical model, on a fixed course, with constant forward speed, even when it is subjected to external stimulus such as wind and ocean streams. The control variable is the angle of rudder deflection,  $\delta$ .

The automatic control design is based both on Theory of Control and on characteristics of the actual performance of ships.

AUTORES: Octavio Maizza Neto - Engenheiro Mecânico - EPUSP

Jóao Moro - Engenheiro Naval - EPUSP

O trabalho analisa o projeto de um controle automático a ser utilizado no caso de se desejar manter um navio genérico, definido pelo seu modelo matemático (1), num rumo pré-fixado, a uma velocidade avante constante, mesmo que este navio esteja sujeito a perturbações externas, tais como vento e corrente (3).

O problema pode ser visualizado na figura 1.

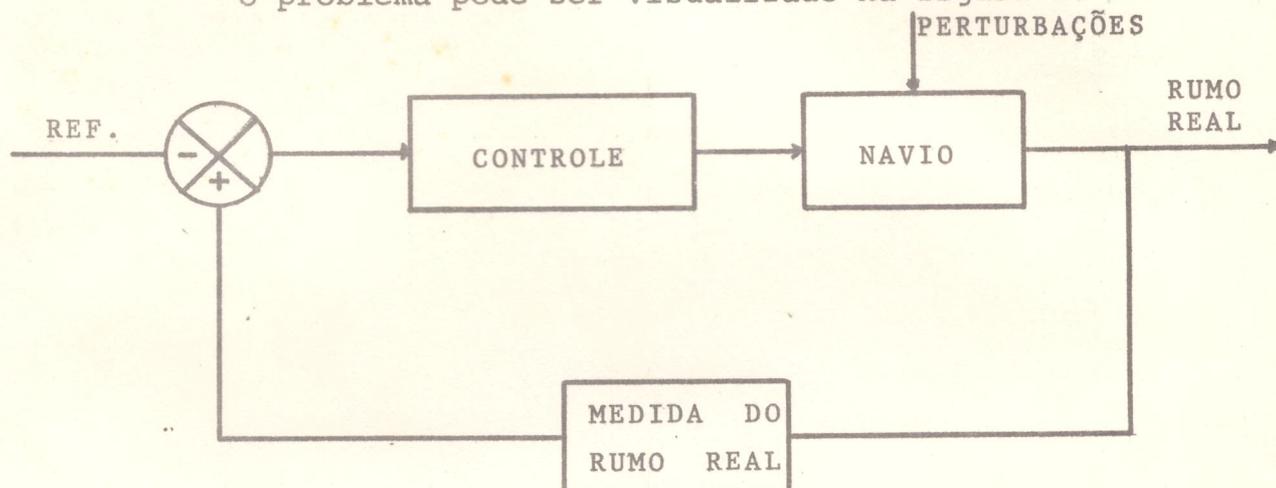


Figura 1 - Diagrama de bloco da formulação do problema.  
(Block diagram for the problem formulation)

O navio será representado por um conjunto de equações dinâmicas, representando o movimento plano. Considerações sobre o controle são apresentadas a seguir e a sistemática de projeto é implementada para um caso específico.

## 2. Modelo Matemático do Navio

As equações linearizadas do movimento do navio, no plano horizontal, são da forma (1):

$$- X_u(u-u_1) + (m-X_{\dot{u}})\dot{u} = 0 \quad |1|$$

$$- Y_v\dot{v} + (m-Y_{\dot{v}})\dot{v} - (Y_r - m u_1)r - (Y_{\dot{r}} - m x_G)\dot{r} = 0 \quad |2|$$

$$- N_v v - (N_{\dot{v}} - m x_G) \dot{v} - (N_r - m x_G u_1) r + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} = 0$$

|3|

utilizando-se o sistema de referência mostrado na figura 2 e a notação abaixo convencionalada.

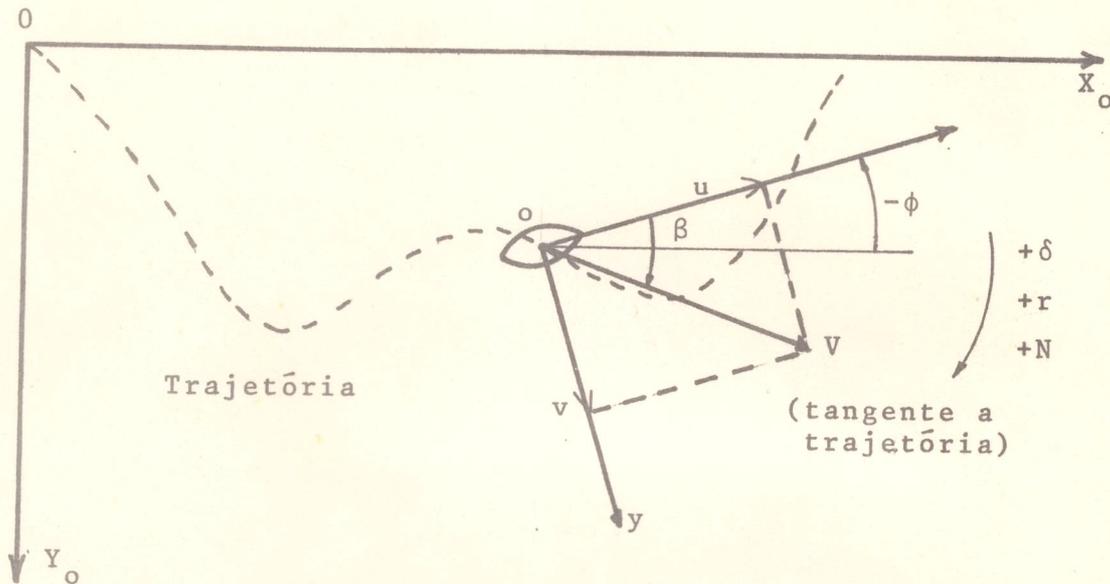


Figura 2 - Sistemas de Referência  
(Coordinate Systems)

- sistema  $OX_0Y_0$  fixo na terra;
- sistema  $oxy$  fixo no navio com origem na secção mestra;
- $(X, Y)$  - componentes da força resultante agindo em  $o$ , nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente;
- $m$  - massa do navio;
- $N$  - componente do momento resultante na direção  $z$ ;
- $I_z$  - momento de inercia em relação ao eixo  $z$ ;
- $V$  - velocidade resultante do navio relativo ao sistema  $OX_0Y_0$ ;
- $(u, v)$  - componentes de  $V$  nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente;
- $r$  - velocidade angular na direção  $z$ ;

- $\phi$  - ângulo que o eixo ox forma com o eixo  $OX_0$ ;  
 $x_G$  - distância do centro de gravidade do navio a seção mestra;  
 $\delta$  - ângulo do Leme;  
 $u_1$  - valor inicial de  $u$ , na configuração de equilíbrio  
 $\frac{\partial Y}{\partial v} = Y_v; \frac{\partial N}{\partial r} = N_M; \dots; \frac{\partial u}{\partial t} = \dot{u}; \text{ etc...}$

Considerando-se que o navio navegará a uma velocidade constante ( $u=u_1; \dot{u}=0$ ) as equações do movimento do navio adimensionalizadas e levando-se em consideração as forças do leme, passam a ter a forma:

$$- Y'_v v' + (m' - Y'_\dot{v}) \dot{v}' - (Y'_r - m') r' - (Y'_\dot{r} - m' x'_G) \dot{r}' = Y'_\delta \delta \quad |4|$$

$$- N'_v v' - (N'_\dot{v} - m' x'_G) \dot{v}' - (N'_r - m' x'_G) r' + (I'_z - N'_\dot{r}) \dot{r}' = N'_\delta \delta \quad |5|$$

As equações |4| e |5| podem ser escritas na forma:

$$\dot{x}_1 = A_2^* x_1 + A_2^* x_2 + B_1^* U \quad |6|$$

$$\dot{x}_2 = A_3^* x_1 + A_4^* x_2 + B_2^* U \quad |7|$$

onde:

$$x_1 = v', \quad x_2 = r'; \quad U = \delta; \quad \dot{x}^1 = \dot{v}'; \quad \dot{x}^2 = \dot{r}'$$

e

$$A_1^* = \frac{|N'_v (m' x'_G - Y'_\dot{r}) - Y'_v (I'_z - N'_\dot{r})|}{D}$$

$$A_2^* = \frac{|(N'_r - m' x'_G) (m' x'_G - Y'_\dot{r}) - (Y'_r - m') (I'_z - N'_\dot{r})|}{D}$$

$$B_1^* = \frac{|N'_\delta (m' x'_G - Y'_\dot{r}) - Y'_\delta (I'_z - N'_\dot{r})|}{D}$$

$$A_3^* = \frac{Y'_v (m' n'_G - N'_v) - N'_v (m' - Y'_v)}{D}$$

$$A_4^* = \frac{|(Y'_r - m') (m' n'_G - N'_v) - (N'_r - m' x'_G) (m' - Y'_v)|}{D}$$

$$B_2^* = \frac{Y'_v (m' x'_G - N'_v) - N'_v (m' - Y'_v)}{D}$$

$$D = |(m' x'_G - Y'_r) (m' n'_G - N'_v) - (I'_z - N'_r) (m' - Y'_v)|$$

O sistema a ser controlado pode, então, ser representado na forma matricial por:

$$\dot{x} = A^*x + Bu \quad |I|$$

com:

$$x = \text{col} |x_1, x_2|$$

$$A^* = \begin{vmatrix} A_1^* & A_2^* \\ A_3^* & A_4^* \end{vmatrix}$$

$$B = \text{col} |B_1^*, B_2^*|$$

### 3. Escolha do Controle

Um determinado navio em movimento em um dado fluido é submetido a esforços hidrodinâmicos que, genericamente, são funções das velocidades lineares  $u$  e  $v$ , da velocidade angular  $r$ , das correspondentes acelerações  $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$  e  $\dot{r}$ , do angulo de deflexão do leme  $\delta$ , da velocidade de deflexão  $\dot{\delta}$ , e da posição do navio indicada pelas coordenadas  $X_0$  e  $Y_0$  referentes ao sistema  $OX_0Y_0$  fixo e pela orientação do eixo  $ox$  em relação a  $OX_0$ , representada

Como neste trabalho não são consideradas manobras em águas restritas, é considerado desprezível o efeito da velocidade de deflexão do leme,  $\dot{\delta}$ .

Nestas condições, o estado considerado fica caracterizado pelas variáveis  $u$ ,  $v$ ,  $r$  e  $\delta$ .

Lembrando-se que o navio navegará a uma velocidade avan<sub>te</sub> constante ( $u=u_1; \dot{u}=0$ ) e que o ângulo de deflexão do leme,  $\delta$ , é uma grandeza que pode ser manipulada diretamente ou através de algum sistema intermediário, enquanto que  $v$  e  $r$  são respostas do sistema (navio) e podem ser influenciadas ou alteradas por mudança na variável  $\delta$ , tem-se:

$v$  e  $r$  variáveis de estado

$\delta$  variável de controle

O esquema de atuação a resposta do navio pode ser visualizado na figura 3.

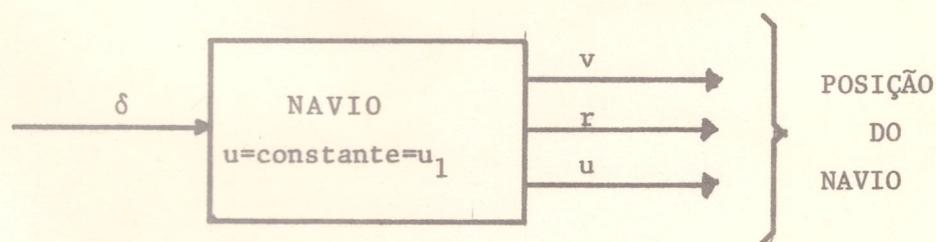


Figura 3 - Atuação e Resposta de Sistema  
(System Input and Output)

Além das equações |6| e |7| será incluída uma equação que define o rumo tomado pelo navio  $\phi$ , explicitamente, já que  $\phi$  é a principal variável a ser controlada.

O sistema |I| terá a seguinte forma:

$$\dot{x} = Cx + DU \quad |II|$$

onde:

$$x \equiv \text{col} |x_1, x_2, x_3| \doteq \text{col} |v, r, \phi|$$

$$C = \begin{vmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \\ C_7 & C_8 & C_9 \end{vmatrix} \doteq \begin{vmatrix} A_1^* & A_2^* & 0 \\ A_3^* & A_4^* & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$D = \text{col} |D_1, D_2, D_3| \doteq \text{col} |B_1^*, B_2^*, 0|$$

É fato que para se manter a estabilidade desejada no sistema, isto é, ter-se o desvio de rumo num valor mínimo, pode-se dispor da atuação no elemento de controle (ângulo de deflexão do leme,  $\delta$ ).

O diagrama de blocos do sistema com o qual vai se operar pode ser visto na figura 4

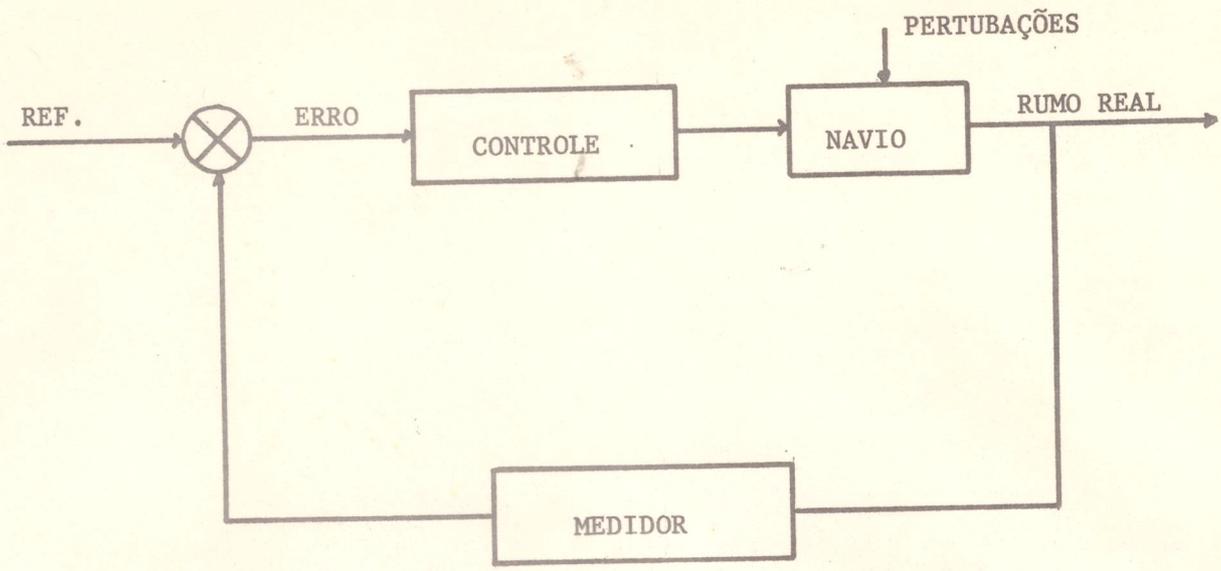


Figura 4 - diagrama de blocos do sistema  
(Block diagram for the system)

Para o estabelecimento de um controle que satisfaça o problema, será analisada a ação efetiva da variável de controle  $\delta$  a fim de se determinar a lei de variação para manter o navio no rumo pré-fixado

Ao ser iniciada uma perturbação que desvie o navio do seu rumo de referência, se o leme for manobrado de maneira a se ter um ângulo de deflexão qualquer, ou uma série de ângulos, no mesmo sentido de variação do rumo do navio, como mostrado na figura 5, verifica-se que o mesmo tenderá a retornar a sua direção inicial ao final de um tempo finito, dependendo das condições de operação e da atuação do leme.

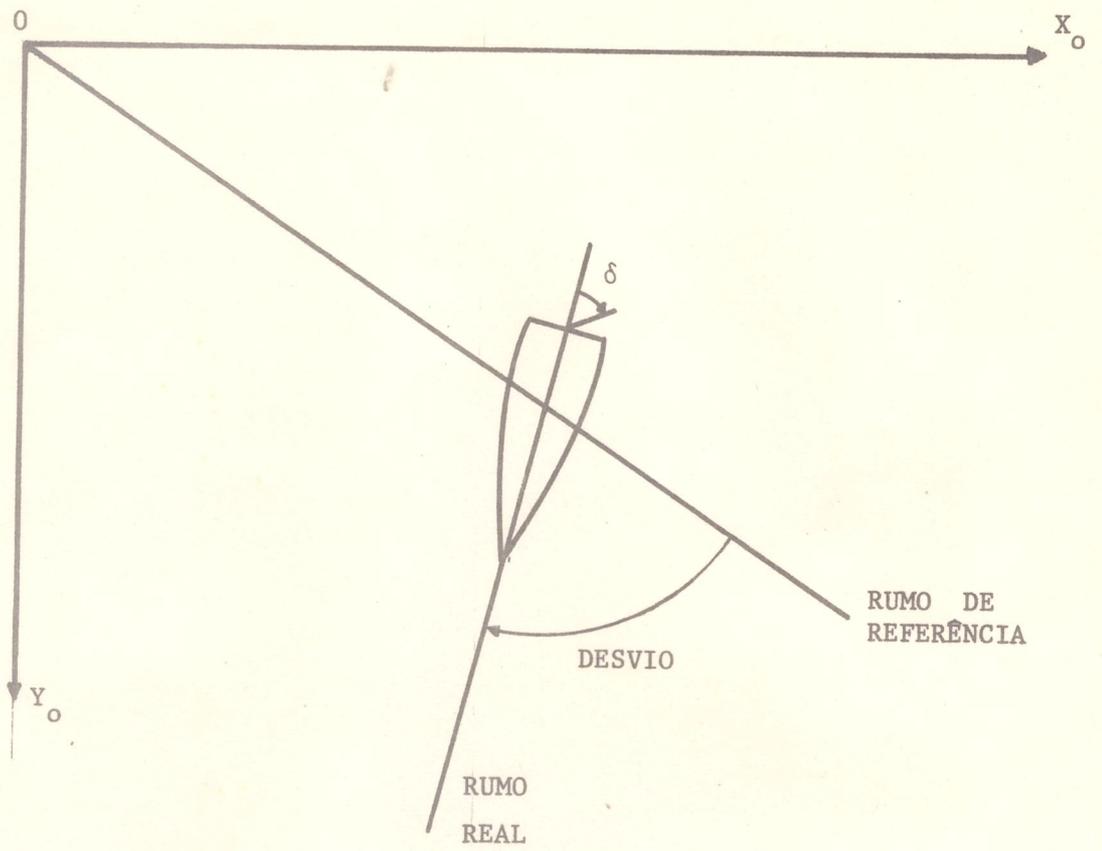


Figura 5 - Desvio de Rumo e Deflexão do Leme

Os controles básicos a serem pesquisados são do

tipo:

- proporcional (P);
- derivativo (D);
- integral (I);
- combinação dos três últimos.

Foi adotado o controle do tipo proporcional derivativo (PD) pelas seguintes razões:

- a) Uma parcela da deflexão do leme para corrigir o rumo é proporcional ao desvio.
- b) Uma segunda parcela é proporcional à variação do desvio com o tempo por isso pode reduzir uma correção significativa antes que a magnitude deste erro se torne grande demais.

O sinal de atuação para manter o rumo de referência do navio será:

$$\text{SINAL} = K \cdot \text{ERRO} + K \cdot T_d \frac{d(\text{ERRO})}{dt} \quad |8|$$

onde:

K é o ganho do controle proporcional;

T<sub>d</sub> é o ganho de controle derivativo e significa o intervalo de tempo no qual a variável da ação avança o efeito do ganho do controle proporcional;

$$\text{ERRO} = x_3 - \phi_r;$$

$\phi_r$  é o rumo de referência do navio

Supondo-se rumo de referência  $\phi=0$  e substituindo-se os valores adequados na equação |8| obter-se:

$$\delta = K x_3 + K T_d x_2 \quad |9|$$

Substituindo-se |9| no sistema |II|, chega-se ao sistema final:

$$\dot{x} = Ax$$

onde:

$$x = \text{col} |x_1, x_2, x_3| \doteq \text{col} |v, r, \phi|$$

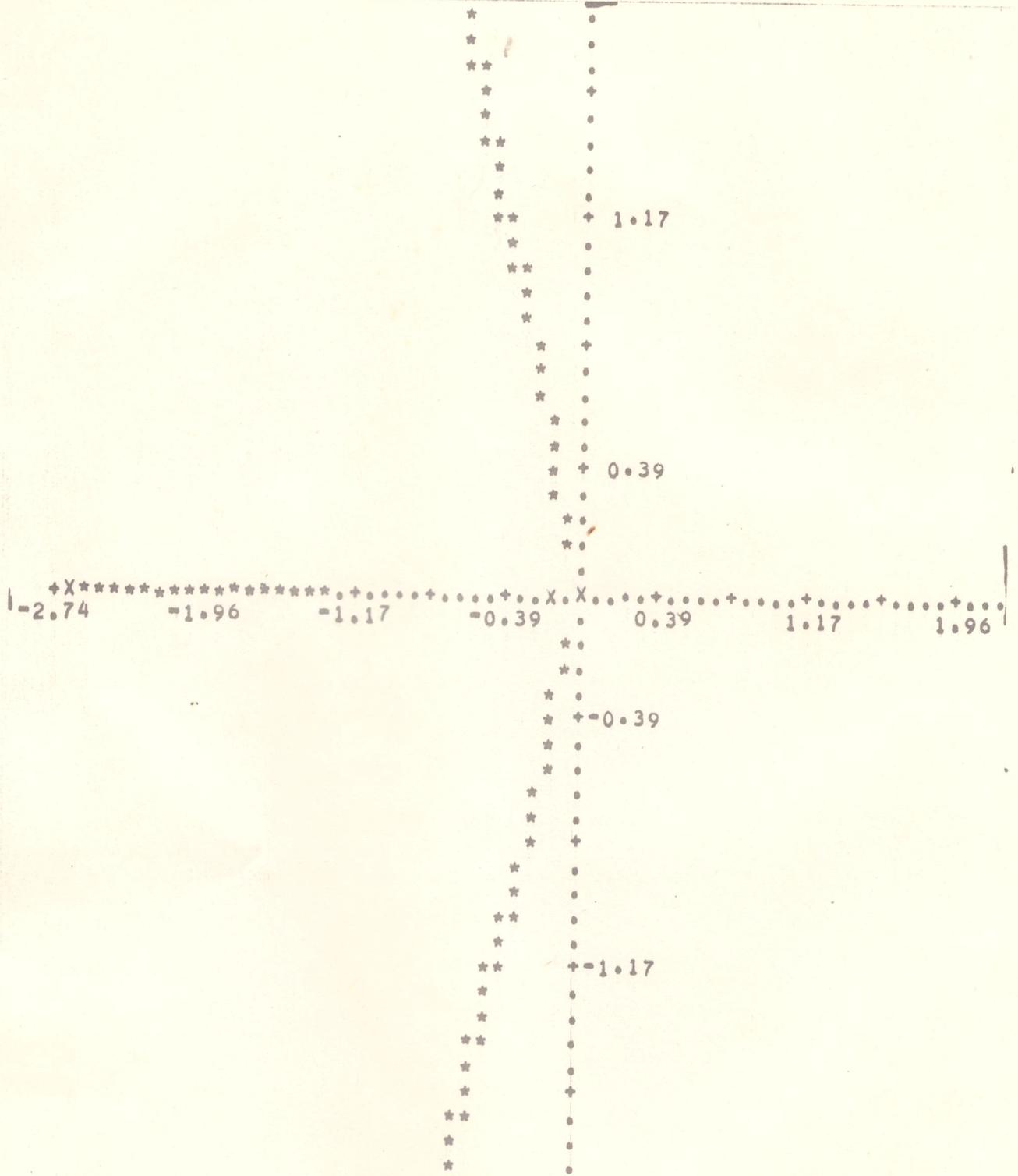


Figura 6 - Região dos Auto-valores ( $T_d=0$ )  
(Eigenvalues position in the complex plane)

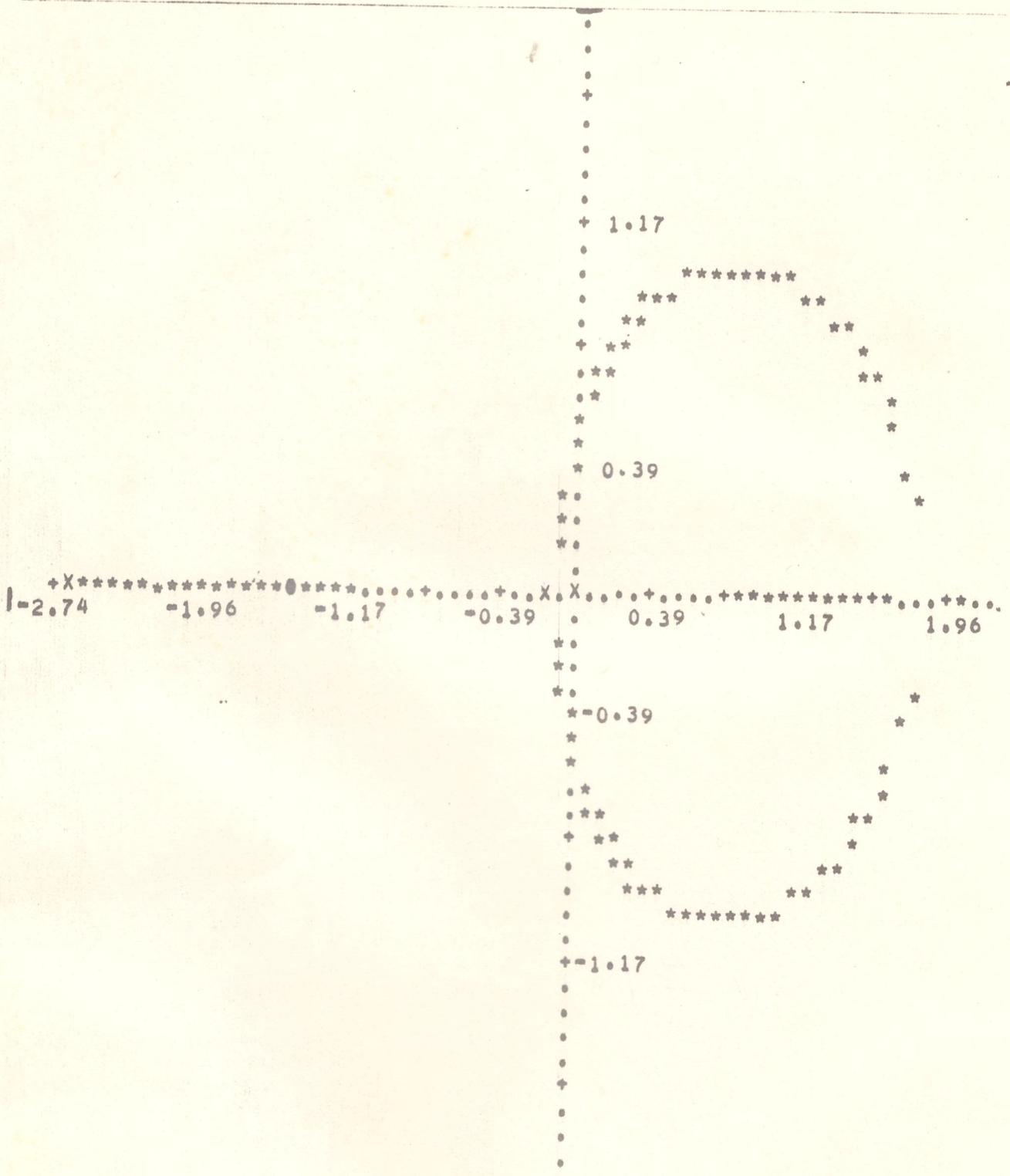


Figura 7 - Região dos auto-valores ( $T_d = -1,3427$ )  
(Eigenvalues position in the complex plane)

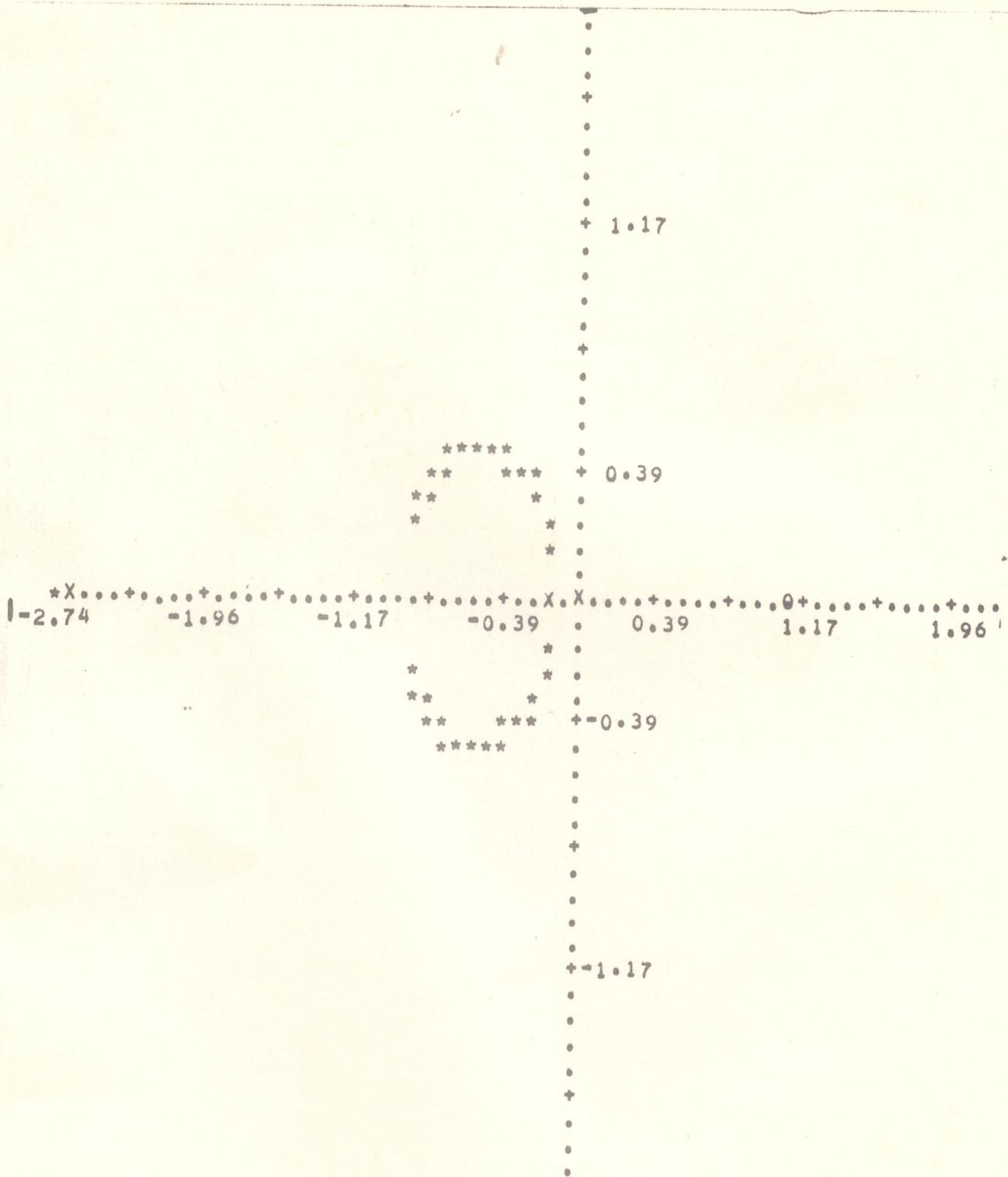


Figura 8 - Região dos auto-valores ( $T_d = 1,25379$ )  
(Eigenvalues position in the complex plane)

$$A = \begin{vmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_4 & A_5 & A_6 \\ A_7 & A_8 & A_9 \end{vmatrix} \doteq \begin{vmatrix} A_1^* & (A_2^* + K T_d B_1^*) & K B_1^* \\ A_3^* & (A_4^* + K T_d B_2^*) & K B_2^* \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Os valores de K e T<sub>d</sub> escolhidos serão tais que os autovalores da matriz A se encontrem na região correspondente a ξ = 0,707 no plano complexo.

#### 4. Determinação de K e T<sub>d</sub>.

Com o procedimento estabelecido, os valores de K e T<sub>d</sub> foram determinados para o navio Mariner (4). Para este navio os valores das matrizes A\* e B são dados a seguir:

$$A^* = \begin{vmatrix} -0,76944 & -0,33442 \\ -3,38925 & -2,09400 \end{vmatrix}$$

$$B = \text{col} \begin{vmatrix} 4,3247 & -41,235 \end{vmatrix}$$

Inicialmente manteve-se T<sub>d</sub> nulo e com a variação do ganho K obteve-se o gráfico dos autovalores da matriz A (figura 6). Este caso (T<sub>d</sub> = 0) corresponde ao controle tipo proporcional.

A figura 6 mostra que: para um controle tipo proporcional o sistema é sempre estável; para o valor de T<sub>d</sub> duas alternativas devem ser estudadas (T<sub>d</sub> < 0 e T<sub>d</sub> > 0)

As figuras 7 e 8 mostram os gráficos dos autovalores de matriz A com a variação de K e  $T_d$  assumindo respectivamente os valores  $T_d = -1,3427$  e  $T_d = 1,25379$ .

Da figura 7 tem-se:

- a) Um dos autovalores tende para a origem quando K cresce.
- b) Para  $K > 0,01$ , o sistema torna-se instável.
- c) os valores de K e  $T_d$  que levam os autovalores à região correspondente a  $\xi = 0,707$  são  $T_d = -1,3427$  e  $K \approx 0,001$ . Estes valores resultariam em um tempo de acomodação muito elevado (2).

Da figura 8 tem-se:

- a) Um dos autovalores tende para  $-\infty$  quando K cresce.
- b) O sistema é sempre estável.
- c) os valores de K que levam os autovalores à região correspondente a  $\xi = 0,707$  são  $K \approx 0,001$  e  $K \approx 0,034$ .

O valor correspondente a  $K \approx 0,001$  resulta em um tempo de acomodação elevado.

Os valores escolhidos são então

$$K = 0,034 \text{ e } T_d = 1,25379$$

## 5. Conclusões

Apesar de ter-se determinado o controle para um determinado navio, o trabalho não perde sua generalidade.

O método pode ser aplicado a qualquer navio do qual se conheça os valores das derivadas hidrodinâmicas de primeira ordem.

Como as figuras 6,7, e 8 são obtidas pelo uso de computador, o tempo necessário para determinar os valores de K e  $T_d$  é relativamente curto.

REFERÊNCIAS

- (1) Mandel, P. Ship Maneuvering and Control.  
In: Principles of naval architecture. New York,  
SNAME, 1967, Chaptas VIII.
- (2) Ogata. Instrumentation and Control & Series.
- (3) The Journal of the Society of Naval Architects of Japan  
vol. 7, 1971
- (4) Transactions, vol. 61 , 1953