TELE-COMANDO DE UM VEÍCULO SUBMARINO

Celso Antonio Frazão Soares

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

Aprovada por:

Prof. Jan L. Scieszko
(Presidente)

Prof. William M. Mansour

Prof. Marcelo de Almeida Santos Neves

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
OUTUBRO DE 1984

SOARES, CELSO ANTONIO FRAZÃO

Tele-Comando de um Veículo Submarinos (Rio de Janeiro) 1984. .

VIII, 116 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Mecânica, 1984)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Assunto .I. COPPE/UFRJ . II. Título (série)

A minha esposa Guaracira e minhas filhas Carla e Gisele, dedico o presente trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor William M. Mansour e Jan L. Scieszko pela orientação constante durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos professores da COPPE, que proporcionaram a complementação dos conhecimentos teóricos, indispensáveis a elaboração do presente trabalho.

A Daisy, pelo rápido e eficiente trabalho de datilografia.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

TELE-COMANDO DE UM VEÍCULO SUBMARINO

Celso Antonio Frazão Soares
Outubro de 1984

ORIENTADOR: Jan L. Scieszko
PROGRAMA: Engenharia Mecânica

O presente trabalho tem por objetivo, estabelecer um sistema de tele-comando de um veículo submarino axissimétrico, de forma a permitir uma interceptação com outro veículo em movimento, que se desloca em um plano paralelo a superfície do mar. A dinâmica e a cinemática deste veículo são analisadas, sendo efetuado depois um estudo sobre o giroscópio selecionado. Finalmente, será fornecido um anteprojeto para implementação do sistema, o que permitirá uma posterior avaliação dos dados coletados.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M. Sc.)

TELE-COMANDO DE UM VEÍCULO SUBMARINO

Celso Antonio Frazão Soares

CHAIRMAN: Jan L. Scieszko

Department: Mechanical Engineering Department

The main purpose of this work is to establish a telecommand system for an axisymmetric underwater vehicle to allow the interception of another vehicle, moving in a parallel plane to the sea surface.

The kinematic and dynamic performance of this vehicle will be analysed, and a study made of the selected gyroscope.

Finally a design implementation of the system will be produced, enabling practical data measurement to be made and evaluated.

ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O estudo de um veículo submarino telecomandado, abrangerá inicialmente a dinâmica deste veículo, relacionando,o empuxo de seus hélices, o ângulo e características das suas superfícies de controle com as variáveis físicas de aceleração e velocidade..

Características de vibrações e ruídos não serão analisados no estudo em pauta, deixando-os para estudá-los em uma ocasião posterior.

Os veículos submarinos telecomandados conhecidos, tem algumas das suas características mostradas no Quadro 1.1.

QUADRO 1.1 - Comparação entre veículos submarinos

	TP-MK-37	TP-MK-24	TP-14 MODIF.
Propulsão	Elétrica/ Bateria	Elétrica/ Bateria	Mecânica Alcool/água/ ar
Controle a fio	Sim	Sim	Sim
Quant.de Giroscópios	3	3	3
Quant.de Pêndulo	2	1	-
Tipo de sensor	Acústico	Acústico	-
Sistema do fio tipo	A	B	A
Custo por lançamento de Exercício	X	8X	X/5

O estudo em pauta, abrangerá a dinâmica do corpo telecomandado, sua cinemática, sua plataforma inercial, que nos fornecerá uma orientação constante para a guiagem do veículo.

A dinâmica do veículo considera um espaço tridimensional, separando o movimento em dois planos, o plano vertical e o plano horizontal. A trajetória no espaço será obtida compondo ponto a ponto as projeções dos planos respectivos, do mesmo modo que é feito para os sólidos, quando são fornecidas as suas projeções ortogonais.

Pela impossibilidade de um tanque de provas adequado, utiliza-se-ão fórmulas que irão fornecer valores aproximados das constantes necessárias ao estudo da dinâmica do corpo.

A cinemática estudará o movimento do veículo submarino, estabelecendo uma guiagem de ataque contra um alvo de superfície, analisando os métodos clássicos:

. Perseguição direta
. Perseguição com desvio
. Navegação com marcação constante
. Navegação proporcional
. Navegação de pontos em alinhamento (beam ride course)

Para o estudo cinemático e dinâmico deste veículo, torna-se necessário definir alguns sistemas de coordenadas ortogonais.

O Quadro 1.2 mostra os principais referenciais que poderão ser utilizados,para estudar o deslocamento de um corpo cilíndrico em um espaço tridimensional.

O sistema a fio tipo A, mostrado na Figura 1.1, caracteriza-se por duas bobinas (dispenser), sendo que uma será fixa na cularra do tubo e outra fixa no torpedo.

O sistema a fio tipo B, mostrado na Figura 1.2 difere do primeiro por não dispor de bobina de fio, (dispenser) fixo na culatra do tubo. Em lugar desta bobina, uma bobina lançada ao mar substituiria a bobina do tubo descrita no sistema anterior.

QUADRO 1.2 - Referenciais ortogonais

ÍNDICE	DENOMINAÇÃO	LOCALIZAÇÃO DE ORIGEM
I	Sistema Inercial	C.G. do submarino quando t=0 será fixo na superfície da terra
T	Sistema Alvo	Fixo no C.G. do alvo
S	Sistema Submarino	Fixo no C.G. do submarino
t	Sistema Torpedo	Fixo no C.G. de um torpedo ideal
h	Sistema Hidrodinâmico	Fixo no C.G. do torpedo
m	Sistema Manobra	Fixo na interseção dos eixos de
r	Sistema Profundor Direito	rotação dos lemes e de simetria do veículo
l	Sistema Profundor Esquerdo	Fixo no centro do rotor do giroscópio
G	Sistema Giroscópio	

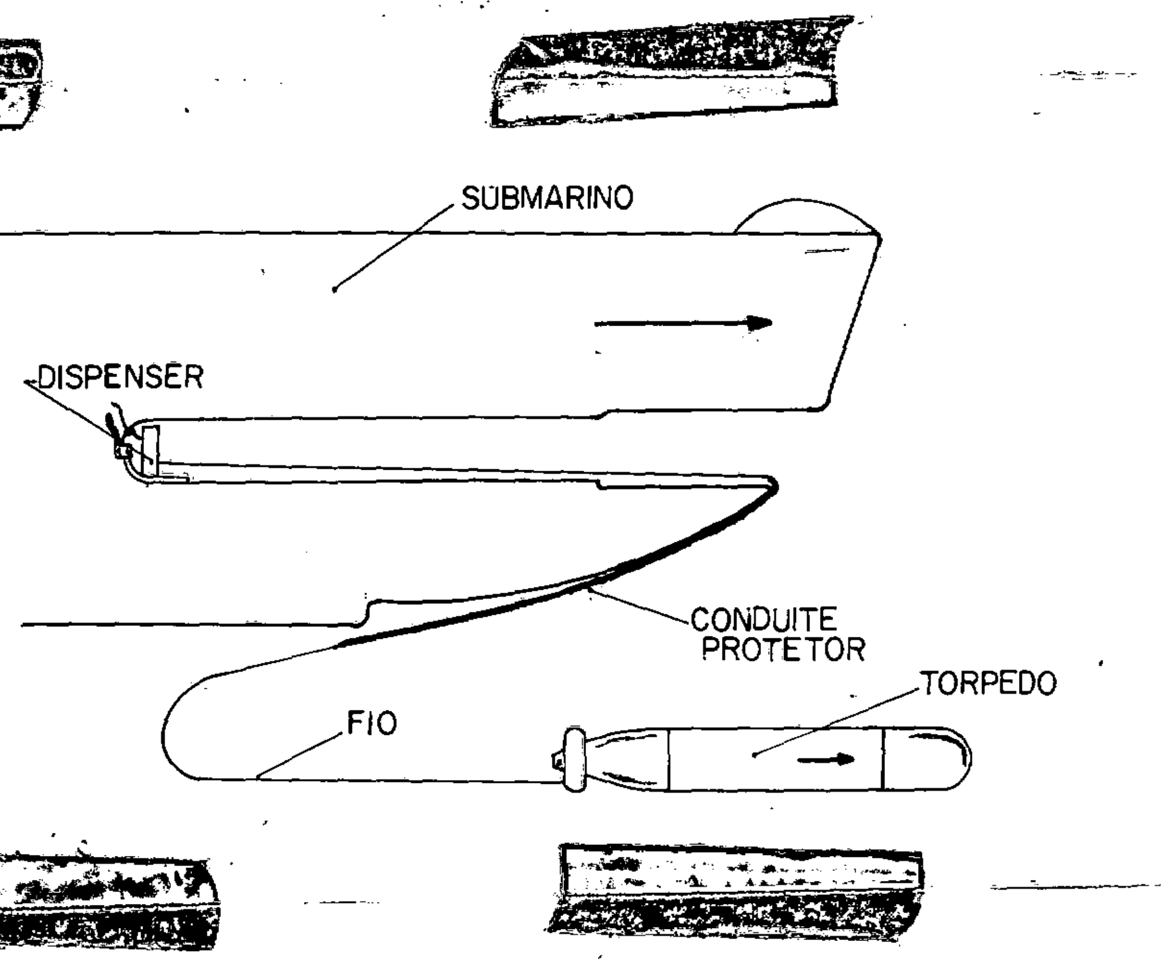


Fig. 1.1 - Sistema a fio tipo A

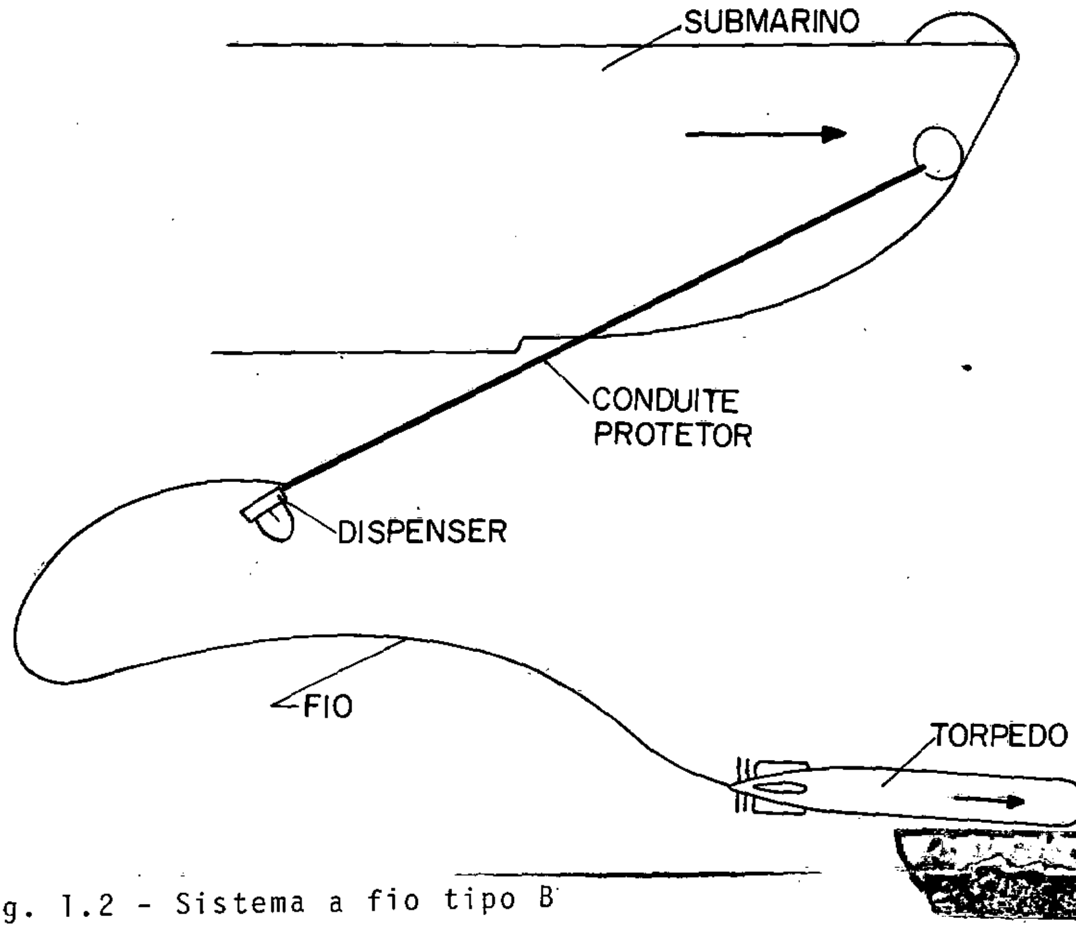


Fig. 1.2 - Sistema a fio tipo B

O torpedo ideal é rígido, com densidade constante em todo o corpo, sendo o seu centro de gravidade contido no seu eixo de simetria.

O sistema inercial, tem o vetor $\hat{i}_I$ em uma direção e sentido estabelecidos, o vetor $\hat{j}_I$ a sua direita e o vetor $\hat{k}_I$ completa o sistema dextrógiro.

O sistema alvo, tem o vetor $\hat{i}_T$ na direção do vetor velocidade do alvo, o vetor $\hat{j}_T$ na direção do centro de curvatura de trajetória do alvo e o vetor $\hat{k}_T$ completa o sistema dextrógiro.

O sistema submarino, tem o vetor $\hat{i}_S$ na direção do vetor velocidade do submarino, o vetor $\hat{k}_S$ aponta, para cima, e o vetor $\hat{j}_S$ completa o sistema dextrógiro.

O sistema torpedo, tem o vetor $\hat{i}_t$ coincidente com o eixo de simetria do torpedo, e direção para vante, o vetor $\hat{j}_t$ tem direção para bombordo, o eixo $\hat{k}_t$ tem direção paralela e eixo dos lemes e direção para a parte superior do torpedo.

O sistema hidrodinâmico, tem o vetor $\hat{i}_h$ na mesma direção e sentido do vetor velocidade do torpedo, o vetor $\hat{j}_h$ na mesma direção e sentido do vetor $\hat{j}_t$ e o vetor $\hat{k}_h$ completa o sistema dextrogiro.

O sistema manobra tem $\hat{i}_m$ pertencente ao plano que contem os lemes, confundindo-se com $\hat{i}_t$ quando o ângulo do leme é igual a zero, $\hat{k}_m$ têm a mesma direção e sentido que $\hat{k}_t$ e o vetor $\hat{j}_m$ completa o sistema dextrogiro.

Sistema profundor direito e sistema profundor esquerdo tem $\hat{i}_r$ e $\hat{i}_\ell$ pertencentes aos planos que contem os profundores direito e esquerdo respectivamente, $\hat{j}_r$ e $\hat{j}_\ell$ na mesma direção de $\hat{j}_t$ e apontando para boreste e bombordo respectivamente e os vetores $\hat{k}_r$ e $\hat{k}_\ell$ completam o sistema dextrogiro.

O sistema giroscópio será definido no Capítulo IV.

Serão obtidos também neste estudo, curvas elaboradas por processamento de dados, que relacionarão diversas variáveis envolvidas em um sistema de ataque de um veículo submarino contra um alvo de superfície em movimento.

Finalmente deverá ser fornecido dados que permitam a implementação do sistema de telecomando, em um protótipo, de forma a verificar o seu desempenho, comparando-o com os valores teóricos obtidos.

É importante frisar, que esta verificação final só será obtida, utilizando-se um sistema de rastreamento acústico inexistente no Brasil.

CAPÍTULO II

DINÂMICA DO TORPEDO

2.1 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O estudo apresentado a seguir considera as seguintes hipóteses básicas:

a) o torpedo comporta-se como um corpo rígido.

b) a massa do torpedo não varia no tempo, sendo desprezível a perda da massa com a queima do combustível.

O sistema do torpedo (x_t, y_t, z_t) definido no Capítulo I, é fixo no eixo de simetria do torpedo como mostra a Figura 2.1.

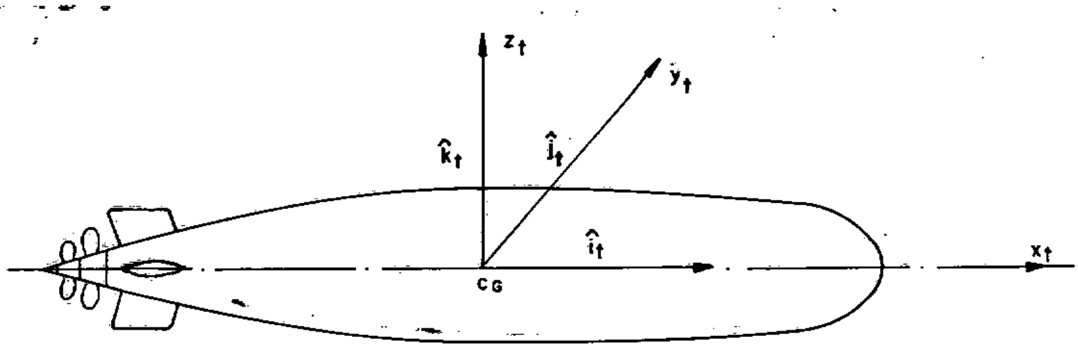


Fig. 2.1 - Sistema do torpedo (x_t, y_t, z_t)

Considera-se x_t, y_t, z_t, os eixos principais de inércia do torpedo.

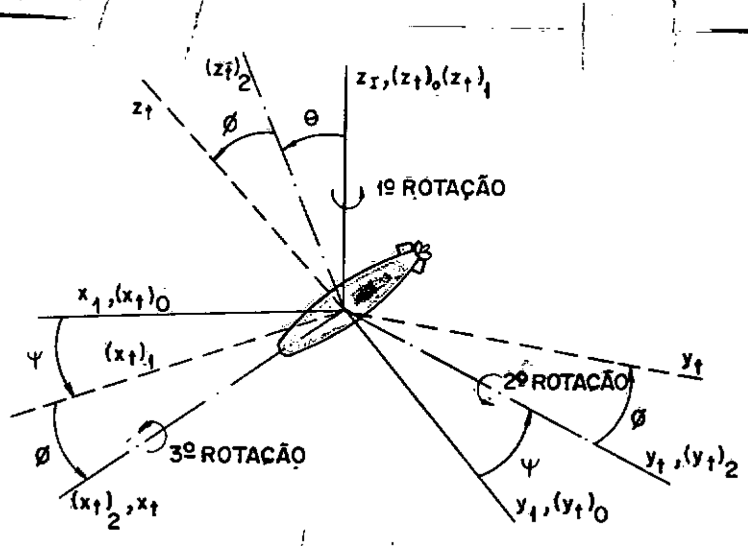
Considera-se, também, um sistema inercial tal que os seus eixos (x_I, y_I, z_I) serão selecionados de modo a coincidirem com os eixos respectivos do sistema torpedo, quanto $t=0$, conforme mostra a Figura 2.1.

Em um instante genérico, os eixos (x_t, y_t, z_t) serão obtidos por translação de origem 0_t e rotação dos eixos, Figura 2.2, de acordo com a seguinte ordem:

a) a rotação ψ^* em relação (z_t): precessão

b) a rotação Θ^* em relação a nova posição $(y_t)_1$: mutação

c) a rotação ϕ^* em relação a nova posição $(x_t)_2$: rotação própria (spin)



Figu.2.2 - Ângulos ψ^*, Θ^*, ϕ^* do torpedo

Pode-se expressar a velocidade angular do torpedo no sistema (x_t, y_t, z_t)

$$\vec{w}_t = p\hat{i}_t + q\hat{j}_t + r\hat{k}_t$$

$\vec{w}_t \rightarrow$ velocidade angular absoluta do torpedo.

Pela Figura 2.2 temos:

$$\begin{aligned} p &= -\dot{\psi}^* S\Theta^* + \dot{\phi}^* && \text{roll} \\ q &= \dot{\psi}^* X\ \phi^* C\ \phi^* - \dot{\Theta}^* C\ \phi^* && \text{pitch} \qquad (2.1) \\ r &= \dot{\psi}^* C\ \phi^* C\ \Theta^* + \dot{\Theta}^* S\ \psi^* && \text{yaw} \end{aligned}$$

As seguintes abreviaturas serão usadas seguidamente neste texto:

$Sa = \text{sen } a$

$Ca = \cos a$

$$\vec{V}_t = u\hat{i}_t + v\hat{j}_t + w\hat{k}_t \qquad (2.2)$$

$\vec{V}_t$ = vetor velocidade do torpedo

u = componente em relação a $\hat{i}_t$

v = componente em relação a $\hat{j}_t$

w = componente em relação a $\hat{k}_t$

Sabe-se que o movimento do torpedo é governado pela relação:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\,\vec{V}_t)$$

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}(\vec{H}_t) \tag{2.3}$$

$\vec{F}$ - resultante das forças externas que atuam no torpedo

$\vec{M}$ - somatório dos momentos em relação ao centro de massa do torpedo

$\vec{H}$ - vetor momento angular do torpedo

m - massa do torpedo

No sistema torpedo tem-se:

$$\vec{F} = X\hat{i}_t + Y\hat{j}_t + Z\hat{k}_t$$

$$\vec{M} = K\hat{i}_t + M\hat{j}_t + N\hat{k}_t$$

$$\vec{H} = H_x\,\hat{i}_t + H_y\,\hat{j}_t + H_k\,\hat{k}_t \tag{2.4}$$

2.2 - FORÇA E MOMENTO

Considera-se inicialmente, o centro de massa em um ponto do eixo de simetria, coincidente com a origem do sistema torpedo.

$$\vec{F} = m\,\frac{d}{dt}(u\hat{i}_t + v\hat{j}_t + w\hat{k}_t)$$

$$\vec{M} = \frac{d}{dt} (H_x \hat{i}_t + H_y \hat{j}_t + H_z \hat{k}_t)$$

sendo:

$H_x = I_x p$

$H_y = I_y q$

$H_z = I_z r$

I_x, I_y e I_z - momentos de inércias em relação aos eixos x_t, y_t e z_t respectivamente.

Pode-se calcular as expressões para $\vec{F}$ e $\vec{M}$ pelas seguintes relações:

$$\frac{d}{dt} (\vec{B}) = \dot{\vec{B}} + \vec{\Omega} \times \vec{B}$$

$\vec{B}$ - vetor arbitrário expresso no referencial que gira com velocidade angular $\vec{\Omega}$

$\dot{\vec{B}}$ - derivada de $\vec{B}$ em relação ao referencial móvel com velocidade angular $\vec{\Omega}$

Para um corpo axissimétrico tem-se:

$$X = m(\dot{u} + qw - rv)$$

$$Y = m(\dot{v} + ru - pw)$$

$$Z = m(\dot{w} + pv - qu)$$

$$K = I_x\dot{p} + (I_z - I_y)\, qr$$

$$M = I_y\dot{q} + (I_x - I_z)\, pr$$

$$N = I_z\dot{r} + (I_y - I_x)\, qp \qquad (2.5)$$

Considera-se agora que, o centro de massa não está contido no eixo longutidinal de simetria.

A posição do C.M., no sistema torpedo, será expressa pelas coordenadas x_g, y_g, z_g ou pelo vetor posição $\vec{r}_g$

$$\vec{r}_g = x_g\hat{i} + y_g\hat{j} + z_g\hat{k}$$

$$\vec{V}_g = \vec{V}_t + \vec{w}_t \times \vec{r}_g$$

$\vec{V}_g$ - vetor velocidade do centro de massa

$\vec{V}_t$ - vetor velocidade do sistema torpedo

$\vec{w}_t$ - vetor velocidade radial do sistema torpedo

Pela equação 2.3 tem-se:

$$\vec{F}_g = \frac{d}{dt}\, m\{(u + qz_g - ry_g)\,\hat{i}_t + (v + rx_g - pz_g)\,\hat{j}_t +$$

$$+ (w + py_g - qx_g)\,\hat{k}_t\} \qquad (2.6.a)$$

$\vec{F}_g$ - resultante das forças externas aplicadas no centro de massa. Pelo "teorema dos eixos paralelos" para momentos de inércia, segue:

$$\vec{H}_g = p\{I_x - m(y_g^2 + z_g^2)\}\ \hat{i}_t + q\{I_y - m(z_g^2 + x_g^2)\}\ \hat{j}_t + $$
$$+ r\{I_z - m(x_g^2 + y_g^2)\}\ \hat{k}$$

$\vec{H}_g$ - vetor momento angular em relação ao centro de massa.

Pela expressão 2.3

$$\vec{M}_g = \frac{d}{dt}(\vec{H}_g) \quad \text{ou} \quad \vec{M}_g = \vec{M}_t - \vec{r}_g \times \vec{F}_g$$

$\vec{M}_g$ - resultante dos momentos externos em relação ao centro de massa.

M_t - momento resultante em relação a origem do sistema torpedo (x_t, y_t, z_t)

$$M_t = \vec{r}_g \times F_g + \frac{d}{dt}\,|\,p\{I_x - m(y_g^2 + z_g^2)\}\ \hat{i}_t + q\{I_y -$$
$$- m(z_g^2 + x_g^2)\}\ \hat{j}_t + r\{I_z - m(x_g^2 + y_g^2)\}\ \hat{k}_t| \qquad (2.6.b)$$

Desenvolvendo as equações (2.6.a) e (2.6.b), obtem-se a forma final da equação do movimento para um corpo axissimétrico, com centro de massa em um ponto fora do eixo de simetria, tem-se:

$$X = m\{\dot{u} + qw - rv - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})\}$$

$$Y = m\{\dot{v} + ru - pw + x_g(pq + \dot{r}) - y_g(p^2 + r^2) + z_g(qr - \dot{p})\}$$

$$Z = m\{\dot{w} + pv - qu + x_g(pr - \dot{q}) + y_g(qr + \dot{p}) - z_g(p^2 + q^2)\}$$

$$K = I_x\dot{p} + (I_z - I_y)\,qr + my_g\{(\dot{w} + pv - qu) + x_g(pr - \dot{q})\} -$$

$$- mz_g\{(\dot{v} + ru - pw) + x_g(pq + \dot{r})\} + my_g\,z_g(r^2 - q^2)$$

$$M = I_y\dot{q} + (I_x - I_z)\,rp + mz_g\,\{(\dot{u} + qw - rv) + y_g(qp - \dot{r})\} -$$

$$- mx_g\,\{(\dot{w} + pv - qu) + y_g(rq + \dot{p})\} + mz_g\,x_g(p^2 - r^2)$$

$$N = I_z\,\dot{r} + (I_y - I_x)\,pq + mx_g\,\{(\dot{v} + ru - pw) + z_g(rq - \dot{p})\} -$$

$$- my_g\,\{(\dot{u} + qw - rv) + z_g(pr + \dot{q})\} + mx_g\,y_g(q^2 - p^2)\} \qquad (2.7)$$

Verifica-se que as equações (2.5) podem ser encontradas a partir das equações (2.7), substituindo:

$$x_g = y_g = z_g = 0$$

As relações (2.7) serão usadas em caso da total simulação do modelo.

Sua forma linearizada pode ser usada como uma aproximação das forças hidrodinâmicas e para estabelecer controle necessário para dirigir o veículo.

2.3 - LINEARIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DINÂMICAS

É usual visualizar o movimento de um corpo no espaço em dois planos:

a) Movimento no plano vertical

Serão considerados os componentes das forças externas colineares aos eixos x_t e z_t e o momento referente às forças externas em relação ao eixo y_t. Tem-se, então, três equações:

b) Movimento no plano horizontal

Serão considerados os componentes das forças externas colineares aos eixos x_t e y_t, e o momento referente às forças externas em relação ao eixo z_t e x_t. Tem-se, então, quatro equações.

As variáveis e parâmetros de interesse no presente estudo, (plano vertical e horizontal) constam da Tabela 2.1.

Considera-se o centro de massa contido no plano $(x_t - z_t)$, logo $y_g = 0$.

	PLANO VERTICAL	PLANO HORIZONTAL
EQUAÇÕES VARIÁVEIS	$\vec{X}$, $\vec{Z}$, $\vec{M}$ u, w, q, $\dot{u}$, $\dot{w}$, $\dot{q}$, Θ^* e (X_t, Z_t)	$\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{K}$, $\vec{N}$ u, v, p, r, $\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{p}$, $\dot{r}$ ψ^*, ϕ^* e (X_t, Y_t)
Parâmetros	x_g, z_g	x_g

TABELA 2.1 - Movimento no plano vertical e horizontal

(X_t, Y_t, Z_t) - coordenadas de O_t em relação ao sistema inercial.

Considerando a Tabela 2.1, pode-se escrever usando a equação (2.7), as seguintes equações:

a) Movimento no plano vertical

$$X = m\{\dot{u} + qw - x_g q^2 + Z_g \dot{q}\}$$

$$Z = m\{\dot{w} - qu - x_g \dot{q} - z_g q^2\}$$

$$M = I_y \dot{q} - mx_g\{\dot{w} - qu\} + mz_g\{\dot{u} + qw\}$$

b) Movimento no plano horizontal

$$X = m\{\dot{u} - rv - x_g r^2\}$$

$$Y = m\{\dot{v} + ru + x_g \dot{r}\}$$

$$K = I_x \dot{p}$$

$$N = I_z \dot{r} + mx_g(\dot{v} + ru)$$

Estas relações não estão na forma linear, mas poder-se-ão tornar lineares, considerando incrementos para variáveis, como mostrado a seguir:

$\{X\}$ será substituído $\{X_0 + (\delta x)\}$

$\{\dot{u}\}$ será substituído $\{\dot{u}_0 + (\delta \dot{u})\}$

$\{qw\}$ será substituído $\{|(q_0 + (\delta q)| \; |w_0 + (\delta w)|\}$, etc.

O índice o refere-se ao ponto de operação e o produto entre dois incrementos será considerado desprezível.

Obtem-se, então, relações lineares com os incrementos:

(δx), (δy), (δk), (δu), ... e os valores de operação u_0, v_0,... etc.

Finalmente, estes incrementos serão considerados valores originais, $x(\delta x)$ por (x); $y(\delta y)$ por (y) ... etc. sendo que estes, referem-se a variações no entorno do ponto de operação.

Na condição de operação, em equilíbrio, considera-se todas as variáveis zero, exceto u que tem o valor de u_0.

Ter-se-ão, a seguir, as equações linearizadas:

a) Movimento no plano vertical

$$\vec{X} = m(\dot{u} + z_g \dot{q})$$

$$\vec{Z} = m(\dot{w} - qu_0 - x_g \dot{q}) \tag{2.8}$$

$$\vec{M} = I_y \dot{q} - mx_g(\dot{w} - qu) + mz_g \dot{u}$$

b) Movimento no plano horizontal

$$X = m\dot{u}$$

$$Y = m(\dot{v} + ru_0 + x_g\dot{r})$$

$$K = I_x\dot{p}$$

$$N = I_z \dot{r} + mx_g(\dot{v} + ru_0) \tag{2.9}$$

Considerando-se que o torpedo está estabilizado em roll, a relação $K = I_x\dot{p}$ somente será utilizada se desejarmos resultados mais precisos.

2.4 - FORÇAS HIDRODINÂMICAS E MOMENTOS

Na análise a seguir adota-se a notação:

$$B_s = \frac{\delta B}{\delta S}$$

B - função arbitrária de diversas variáveis, uma das quais é S.

Considerando:

$$B(a,\ c,\ s,\ \ldots)$$

temos a série de Taylor expandida no primeiro grau:

$$B = B_0 + (\delta a)\ B_a + (\delta c)\ B_c + (\delta c)\ B_s + \ldots$$

B_a, B_c, B_s são calculados usando $(a_o,\ c_o,\ s_o\ \ldots)$

(δa), (δc), (δs) são incrementos no ponto de operação.

Considerando $(B - B_o) = \delta B$

Pode-se escrever:

$$B = a\ B_a + c\ B_c + s\ B_s + \ldots$$

B, a, c, s na expressão anterior, são perturbações da posição de equilíbrio de B, a, c, s.

Uma análise da Tabela (2.1) mostra que X, Z, M para o movimento no plano vertical, é uma função das variáveis(X_t, Z_t, u, w, q, $\dot{u}$, $\dot{w}$, $\dot{q}$, Θ^*).

Analogamente (X, Y, K, N) para movimento no plano horizontal, é função das variáveis (X_t, Y_t, u, v, r, $\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{r}$,ψ^*)

onde ϕ;* p e $\dot{p}$ são nulos por serem considerados estabilidade em roll.

As forças externas e momentos representam forças hidrodinâmicas que dependem do conjunto de variáveis comentados anteriormente e outras, ainda não comentadas. Neste segundo conjunto considera-se as variáveis (δ, $\dot{\delta}$, $\ddot{\delta}$) sendo δ a deflexão da superfície de controle e (η, $\dot{\eta}$) sendo η a velocidade angular do propulsor.

O estudo a seguir deverá, necessariamente, incluir estas cinco últimas variáveis.

Pode-se, então, escrever as seguintes relações:

a) Movimento no plano vertical

$$\vec{X} = X_t\ Y_{X_t} + Z_t\ X_{Z_t} + (\delta u)\ X_u + XY_w + qX_q + \dot{u}X_{\dot{u}} + \dot{w}X_{\dot{w}} +$$

$$+ \dot{q}X_{\dot{q}} + \Theta^* X_{\Theta^*} + \delta X_\delta + \dot{\delta}X_{\dot{\delta}} + \dot{\delta}\dot{X}_{\dot{\delta}} + \eta X_\eta + \dot{\eta}X_{\dot{\eta}}$$

$$\vec{Z} = X_t\ Z_{X_t} + Z_t\ Z_{Z_t} + (\delta u)\ Z_u + wZ_w + qZ_q + \dot{u}Z_{\dot{u}} + \dot{w}Z_{\dot{w}} +$$

$$+ \dot{q}Z_{\dot{q}} + \Theta^* Z_{\Theta^*} + \delta Z_\delta + \dot{\delta}Z_{\dot{\delta}} + \ddot{\delta}Z_{\ddot{\delta}} + \eta Z_\eta + \dot{\eta}Z_{\dot{\eta}} \qquad (2.10)$$

$$\vec{M} = X_t\ M_{X_t} + Z_t\ M_{Z_t} + \delta u M_u + wM_w + qM_q + \dot{u}M_{\dot{u}} + \dot{w}M_{\dot{w}} + \dot{q}M_{\dot{q}} +$$

$$+ \Theta^* M_{\Theta^*} + \delta M_\delta + \ddot{\delta}M_\delta + \ddot{\delta}M_{\ddot{\delta}} + \eta M_\eta + \dot{\eta}M_{\dot{\eta}}$$

b) Movimento no plano horizontal

Recordando que no deslocamento considerado-se o roll é desprezível, pode-se escrever:

$$X = X_t\, X_{X_t} + Y_t\, X_{Y_t} + (\delta u)\, X_u + vX_v + rX_r + \dot{u}X_{\dot{u}} + \dot{v}X_{\dot{v}} + \dot{r}X_{\dot{r}} +$$

$$+ \psi^* X_{\psi^*} + \delta X_\delta + \dot{\delta} X_{\dot{\delta}} + \ddot{\delta} X_{\ddot{\delta}} + \eta X_\eta + \dot{\eta} X_{\dot{\eta}}$$

$$Y = X_t\, Y_{X_t} + Y_t\, Y_{Y_t} + (\delta u)\, Y_u + vY_v + rY_r + \dot{u}Y_{\dot{u}} + \dot{v}Y_{\dot{v}} + \dot{r}Y_{\dot{r}} +$$

$$+ \psi^* Y_{\psi^*} + \delta Y_\delta + \dot{\delta} Y_{\dot{\delta}} + \ddot{\delta} Y_{\ddot{\delta}} + \eta Y_\eta + \dot{\eta} Y_{\dot{\eta}} \qquad (2.11)$$

$$N = X_t\, N_{X_t} + Y N_{Y_t} + (\delta u)\, N_u + vN_v + rN_r + \dot{u}N_{\dot{u}} + \dot{v}N_{\dot{v}} + \dot{r}N_{\dot{r}} +$$

$$+ \psi^* N_{\psi^*} + \delta N_\delta + \dot{\delta} N_{\dot{\delta}} + \ddot{\delta} N_{\ddot{\delta}} + \eta N_\eta + \dot{\eta} N_{\dot{\eta}}$$

Os valores X_{X_t}, Y_{Y_t}, X_u, $X_{\dot{u}}$, ... etc. são as derivadas hidrodinâmicas e devem ser determinadas experimentalmente, usando modelos reduzidos.

2.5 - EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

As equações de movimento do torpedo são obtidas pelas equações (2.8) e (2.10) para o movimento no plano vertical e pelas equações (2.9) e (2.11) para o movimento no plano horizontal. Na análise a seguir, considera-se pequenas e suaves variações de ângulos, considera-se também neste período desprezíveis as derivadas hidrodinâmicas:

$X_{\dot{\delta}}$, $X_{\ddot{\delta}}$, $Y_{\dot{\delta}}$, $Y_{\ddot{\delta}}$, $Z_{\dot{\delta}}$, $Z_{\ddot{\delta}}$, $M_{\dot{\delta}}$, $M_{\ddot{\delta}}$, $N_{\dot{\delta}}$, $N_{\ddot{\delta}}$.

Considerando-se que as duas hélices do torpedo giram com sentido oposto e velocidade constante, serão desprezíveis as derivadas hidrodinâmicas a seguir:

X_{η}, $X_{\dot{\eta}}$, Y_{η}, $Y_{\dot{\eta}}$, Z_{η}, $Z_{\dot{\eta}}$, M_{η}, $M_{\dot{\eta}}$, N_{η}, $N_{\dot{\eta}}$

Serão desprezíveis, também, algumas das "derivadas hidrodinâmicas" simbolizadas X_{x_t}, Y_{y_t} e ψ.* Caso seja considerado o movimento retilíneo uniforme nos deslocamentos do torpedo, pode-se desprezar também:

X_{x_t}, $Y_{\dot{x}_t}$, Z_u, X_{y_t} + Y_{y_t}, X_{ψ}^*, Y_{ψ}^*, N_{x_t}, N_{y_t}, N_{ψ}^*, M_{x_t}.

Simplificando as equações

a) Movimento no plano vertical

Das equações 2.8 e 2.10 tem-se:

$$(Z_t)\ X_{z_t} + (\delta u)\ X_u + (\dot{u})\ \{X_{\dot{u}} - m\} + (w)\ X_w + (\dot{w})\ X_{\dot{w}} + (q)\ X_q +$$

$$+ (\dot{q})\ \{X_{\dot{q}} - mZ_q\} + (\Theta^*)X_{\Theta^*} = -\ \delta X_{\delta}$$

$$(Z_t)\ Z_{z_t} + (\delta u)\ Z_u + (\dot{u})\ Z_{\dot{u}} + (w)\ Z_w + (\dot{w})\ \{Z_{\dot{w}} - m\} +$$

$$+ (q)\ \{Z_q + mu_o\} + (\Theta^*)Z_{\Theta^*} = -\ \delta Z_\delta$$

$$(Z_t)\ M_{Z_t} + (\delta u)\ M_u + (\dot{u})\ \{M_{\dot{u}} - mZ_q\} + (w)\ M_w + w\{M_{\dot{w}} - mx_g\} +$$

$$+ (q)\ \{M_q - mx_g\ u_o\} + (\dot{q})\ \{M_{\dot{q}} - I_y\} + (\Theta^*)M_{\Theta^*} = -\ \delta M_\delta$$

De acordo com a Figura (2.3) e lembrando que os ângulos são pequenos, obtem-se

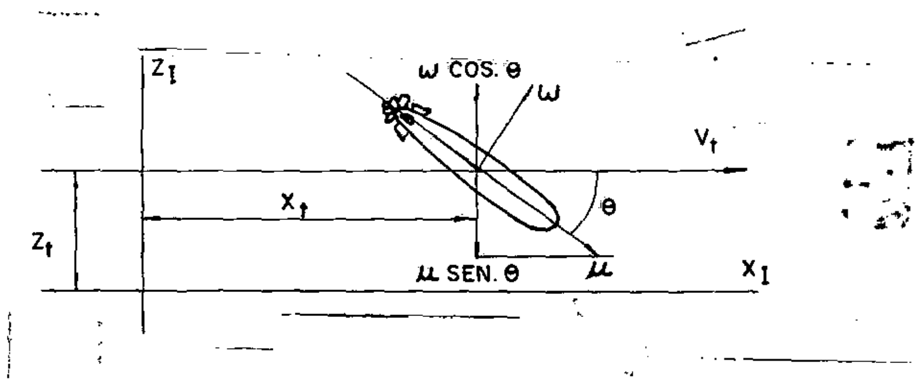


Fig. 2.3 - Movimento no plano vertical

$$\dot{Z}_t = w - u_o\ \Theta^* \text{ como}$$

$$\dot{\Theta}^* = q$$

Segue:

$$\ddot{Z}_t = \dot{w} - u_o q$$

As equações do movimento podem agora ser escritas na forma matricial abaixo:

$$\begin{vmatrix} X_{\dot{w}} & X_{\dot{q}} - mZ_g & 0 \\ Z_{\dot{w}} - m & Z_{\dot{q}} + mx_g & 0 \\ M_{\dot{w}} + mx_g & M_{\dot{q}} - I_y & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} \{\ddot{Z}_t\} \\ \{\ddot{\Theta}^*\} \\ \{\ddot{u}\} \end{matrix} +$$

$$\begin{vmatrix} X_w & X_{\dot{w}}\, u_o + X_q & X_{\dot{u}} - m \\ Z_w & Z_{\dot{w}}\, u_o + X_q & Z_{\dot{u}} \\ M_w & M_{\dot{w}}\, u_o + M_q & M_{\dot{u}} - mZ_g \end{vmatrix} \begin{matrix} \{\dot{Z}_t\} \\ \{\dot{\Theta}^*\} \\ \{\dot{u}\} \end{matrix} +$$

$$\begin{vmatrix} X_{z_t} & X_{\Theta*} + u_o X_w & X_u \\ Z_{z_t} & Z_{\Theta*} + u_o Z_w & Z_u \\ M_{z_t} & M_{\Theta*} + u_o M_w & M_u \end{vmatrix} \begin{matrix} \{Z_t\} \\ \{\Theta^*\} \\ \{(\delta u)\} \end{matrix} = - \delta \begin{matrix} \{X_\delta\} \\ \{Z_\delta\} \\ \{M_\delta\} \end{matrix} \qquad (2.12)$$

Para definir a trajetória no plano vertical torna-se necessário determinar 24 derivadas hidrodinâmicas.

b) Movimento no plano horizontal

Das relações (2.9) e (2.11) obtem-se:

$$(\delta u)\, X_u + (v)\, X_v + (r)\, X_r + (\dot{u})\, \{X_{\dot{u}} - m\}\, (\dot{v})\, X_{\dot{v}} + (\dot{r})\, X_{\dot{r}} = -\delta X_\delta$$

$$(\delta u)\, Y_u + (v)\, Y_v + (r)\, \{Y_r - mu_o\} + (\dot{u})\, Y_{\dot{u}} + (\dot{v})\, \{Y_{\dot{v}} - m\} + (\dot{r})$$

$$\{Y_{\dot{r}} - mx_g\} = -\, \delta Y_\delta$$

$$(\delta u)\, N_u + (v)\, N_v + (r)\, \{N_r - u_o\, mx_g\} + (\dot{u})\, N_{\dot{u}} + \dot{v}\{N_{\dot{v}} - mx_g\} + (\dot{r})$$

$$\{N_{\dot{r}} - I_z\} = -\, \delta N_\delta \tag{2.13}$$

Escrevendo na forma matricial:

$$\begin{vmatrix} X_{\dot{u}} - m & X_{\dot{v}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}}-m & Y_{\dot{r}}-mx_g \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}}-mx_g & N_{\dot{r}}-Iz \end{vmatrix} \begin{matrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{v}\} \\ \{\dot{r}\} \end{matrix} =$$

$$= - \begin{vmatrix} X_u & X_v & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_r-mu_o \\ N_u & N_v & N_r-u_o\, mx_g \end{vmatrix} \begin{matrix} \{(\delta u)\} \\ \{v\} \\ \{r\} \end{matrix} \quad - \delta \begin{matrix} \{X_\delta\} \\ \{Y_\delta\} \\ \{N_\delta\} \end{matrix}$$

Estas relações são necessárias para determinar-se a trajetória no plano horizontal. Torna-se necessário para estas equações determinar-se 21 derivadas hidrodinâmicas.

2.6 - DERIVADAS HIDRODINÂMICAS

Como já afirmamos anteriormente, as derivadas hidrodinâmicas devem ser determinadas experimentalmente. A literatura conhecida mostra poucas informações sobre fórmulas experimentais ou empíricas, para a sua determinação.

As referências 1, 11, 15 fornecem valores e fórmulas para alguns coeficientes básicos, para o movimento no plano horizontal. Não encontramos nada para o movimento no plano vertical.

Desde que o estudo seja conduzido para o plano horizontal, pode-se escrever:

		referência
$X_{\dot{u}} = - mk_1$		(15)
$Y_{\dot{u}} = 0$	por simetria	
$N_{\dot{u}} = 0$	por simetria	
$X_u = -k_s\ C_D$		(15)
$Y_u = 0$	por simetria	
$Y_v = - \dfrac{\rho_a S_c u_o}{2} \{\dfrac{\pi\ D}{L} + C_D\} - \rho_a S_f u_o (\dfrac{\partial C_L}{\partial\ \beta})$		(11)
$X_{\dot{v}} = 0$	por simetria	
$Y_{\dot{v}} = - m$		(11)
$N_{\dot{v}} = 0$		(11)

$X_v = 0$ (11)

$X_{\dot{r}} = 0$ por simetria

$Y_{\dot{r}} = 0$ por simetria

$N_{\dot{r}} = -.8 I_Z$ desprezível

$X_r = 0$ (11)

$N_u = 0$ por simetria

$Y_r = - mk_1 + \ell_p \, Y_v$ por simetria

$N_v = k_1 m + (\ell_p + \ell_f) Y_v$ (11)

$N_r = - m\overline{x} + (\ell_o^2 + \ell_f^2) Y_v$ (11)

K_1, K_2 - lamb's - coeficiente de inércia, longitudinal e lateral (adimensional)

K_S - coeficiente geométrico determinado experimentalmente (N.sec/m)

C_D - coeficiente de fricção (adimensional)

S_c - superfície molhada do torpedo sem os estabilizadores (m^2)

D_t - diâmetro máximo do torpedo (m)

L_t - comprimento do torpedo (m)

S_f - superfície molhada dos estabilizadores no plano $(x_t - z_t)$(m^2)

ℓ_p - distância do ponto de aplicação da força lateral para a origem (m)

ℓ_f - distância dos estabilizadores a origem (m)

ℓ_o = valor médio do coeficiente prismático do torpedo

$\overline{x}$ = x_g(m)

C_L - coeficiente de lift

β_a - ângulo de ataque de superfície de controle plano $(x_r - y_r)$

ρ_a - densidade da água (kg/m³)

As outras derivadas hidrodinâmicas devem ser calculadas usando um modelo para o torpedo, em tanque de provas ou túnel de cavitação.

2.7 - MOVIMENTO NO PLANO HORIZONTAL

Substituindo os valores das derivadas hidrodinâmicas nas relações (2.13), obtem-se as equações:

$$\dot{u} = \alpha_{11}\, u + \alpha_{10}\, \delta$$

$$\dot{v} = \alpha_{22}\, v + \alpha_{23}\, r + \alpha_{20}\, \delta$$

$$\dot{r} = \alpha_{32}\, v + \alpha_{33}\, r + \alpha_{30}\, \delta$$

sendo:

$$d_1 = m(k_1 + 1)$$

$$d_2 = m(mx_g^2 - 3.6I_z)$$

$$d_3 = 3.6I_z - mx_g^2$$

$$\alpha_{11} = -K_S p_a C_D/d_1 \qquad ; \alpha_{10} = X_\delta/d_1$$

$$\alpha_{22} = (mx_g\ N_v - 1.8I_z\ Y_v)/d_2$$

$$\alpha_{23} = \{mx_g\ (N_r - u_o mx_g) - 1.8I_z(Y_r - mu_o)\}/d_2$$

$$\alpha_{20} = (mx_g\ N_\delta - 1.8I_z\ Y_\delta)/d_2$$

$$\alpha_{32} = (2N_v - x_g\ Y_v)/d_3$$

$$\alpha_{33} = \{2(N_r - u_o mx_g) - x_g(Y_r - mu_o)\}/d_3$$

$$\alpha_{30} = (2N_\delta - x_g\ Y_\delta)/d_3 \qquad (2.14)$$

As relações 2.14 são suficientes para definir a trajetória do torpedo no plano horizontal. Eles podem ser resolvidos numericamente ou na forma completa quando δ for fornecido.

Aplicando a transformada de Laplace nas relações, obtem-se as seguintes funções de transferência, relacionando u, v, r para um δ conhecido. As relações serão dadas por:

$$\frac{U(s)}{\delta(s)} = \frac{K_u}{1+\tau_u S}$$

$$\frac{V(s)}{\delta(s)} = \frac{K_v(1 + Z_v S)}{1 + (\frac{2\xi}{w_n})S + (\frac{1}{w_n^2})\ S^2}$$

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K_r(1 + Z_r\ S)}{1 + (\frac{2\xi}{w_n})\ S + (\frac{1}{w_n})\ S^2}$$

sendo:

$$d_4 = \alpha_{30}\ \alpha_{23} - \alpha_{20}\ \alpha_{33}$$

$$d_5 = \alpha_{20}\ \alpha_{32} - \alpha_{30}\ \alpha_{22}$$

$$w_n = \sqrt{-\ \alpha_{23}\ \alpha_{32}}$$

$$\xi = (\frac{1}{2}\ w_n)\ \{(\alpha_{22} + \alpha_{33})/\alpha_{23}\ \alpha_{32}\}$$

$$K_v = -\ d_4/\alpha_{23}\ \alpha_{32}$$

$$Z_v = \alpha_{20}/d_4$$

$$K_r = -\ d_5/\alpha_{23}\ \alpha_{32}$$

$$Z_r = \alpha_{30}/d_5 \qquad (2.15)$$

A Figura 2.4 mostra em um diagrama de bloco a dinâmica de um torpedo no plano horizontal:

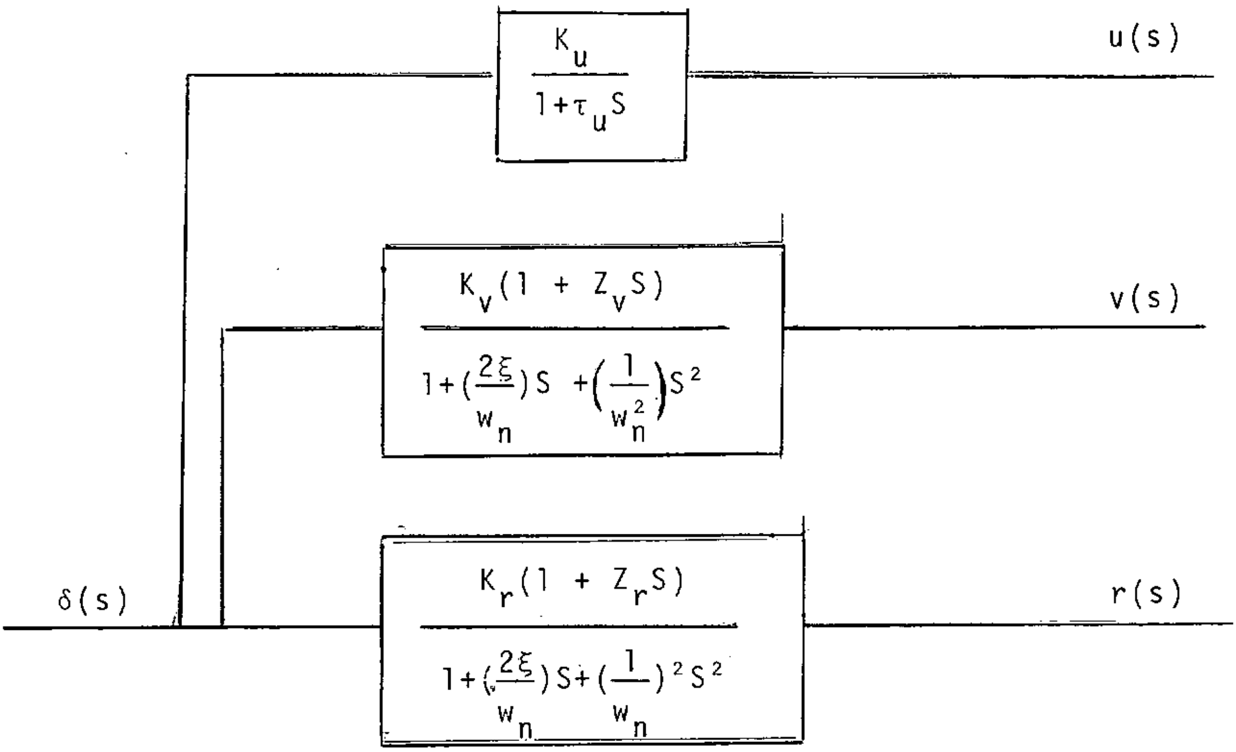


Fig. 2.4 - Dinãmica do torpedo no plano horizontal

CAPÍTULO III

GUIAGEM

3.1 - TIPOS BÁSICOS DE GUIAGEM

Serão considerados no presente capítulo dois tipos de guiagem do torpedo, que irão assegurar a aproximação torpedo alvo.

Estes dois tipos de guiagem serão descritos sucintamente a seguir:

a) Navegação proporcional

Considerando a geometria da navegação mostrada na Figura 3.1, tem-se, neste tipo de guiagem, a seguinte regra:

$$\phi_t = a\phi + \phi_o$$

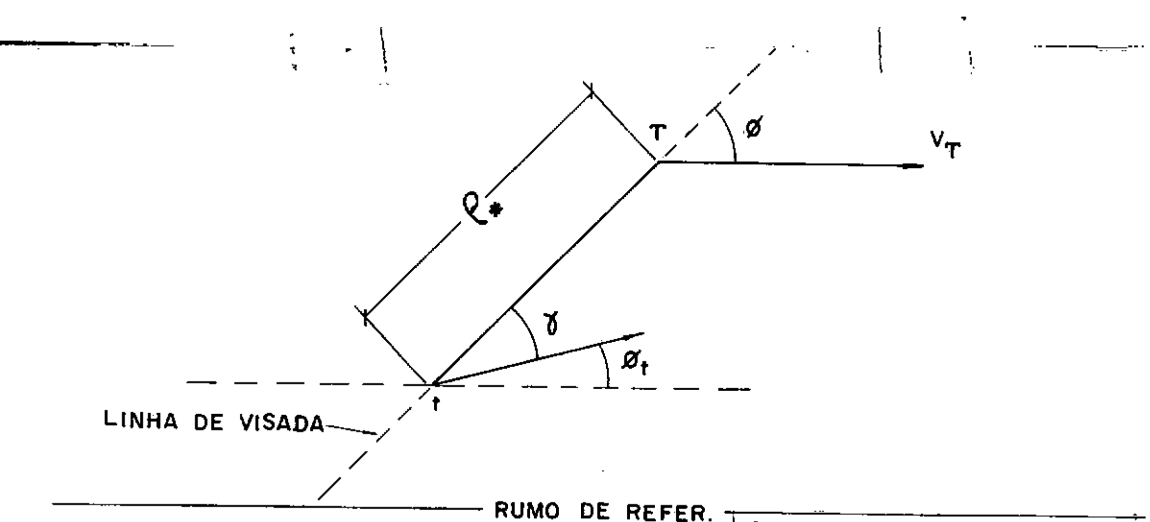


Fig. 3.1 - Nagevação proporcional

Esta navegação é também chamada de navegação de colisão.

A linha de visada mantem uma direção constante no espaço.

b) Navegação de póntos em alinhamento

O torpedo pode ser dirigido de tal modo que o seu centro de gravidade sempre fique contido em uma linha reta traçada de um ponto de controle, que pode ser o submarino lançador, ao alvo.

A Figura 3.2 mostra graficamente este tipo de navegação.

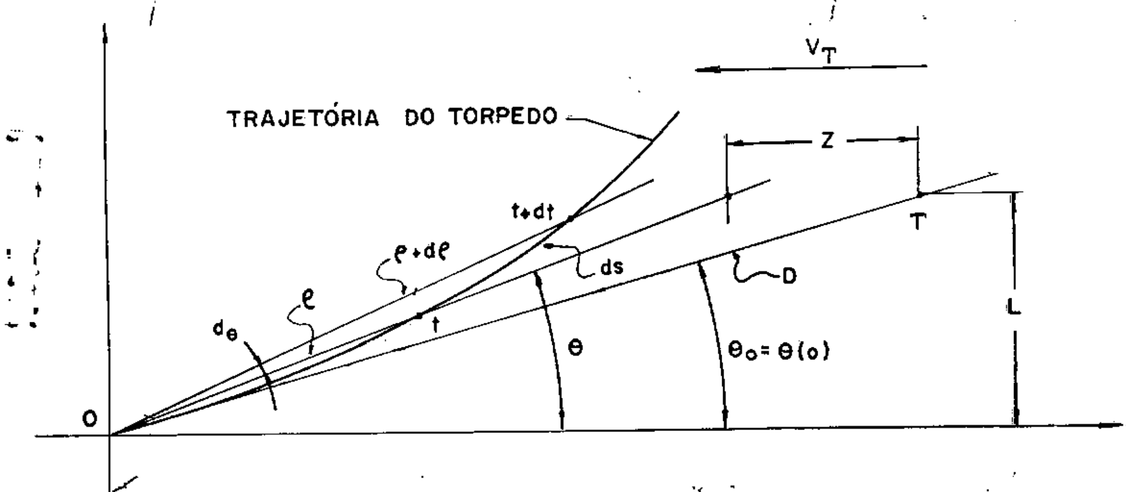


Fig. 3.2 - Navegação de pontos em alinhamento

a - constante de navegação

ϕ_o - é o valor inicial de ϕ

Tem-se então os seguintes casos particulares:

i - navegação de perseguição direta.

Considera-se:

$a = 1$

$\phi_o = 0$

Nesta navegação o vetor velocidade $\vec{V}_t$ está sempre apontado para o alvo T.

ii - navegação de perseguição com desvio:

$a = 1$

$\phi_o = \text{constante}$

Neste caso o ângulo $\vec{V}_t$ e a linha de visada é mantido fixo.

iii - navegação da marcação constante

$\phi = \text{constante}$

A seguir será desenvolvida neste estudo a navegação de pontos em alinhamento para a guiagem do torpedo.

Esta escolha foi motivada pela inexistência da cabeça acústica no torpedo MK14, e pela exigência tática do submarino não usar sonar ativo, mas manobras de ataque.

3.2 - EQUAÇÃO DE TRAJETÓRIA

Considerando o intervalo de tempo (t) para(t+dt) pode-se escrever:

$$(dS)^2 = (\rho d\Theta)^2 + (d\rho)^2$$

ρ - distância do torpedo ao ponto de controle

dS - distância percorrida pelo torpedo de (t) a (t+dt)

Θ - ângulo que o vetor posição do torpedo faz com $\vec{V}_T$, vetor velocidade do alvo.

$$\left(\frac{dS}{d\Theta}\right)^2 = \rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\Theta}\right)^2 \qquad (3.1.a)$$

Conhece-se que:

$$V_t = \frac{dS}{dt} \qquad (3.1.b)$$

$$Z_1 = V_T t$$

Z_1 - distância percorrida pelo alvo de $t = 0$ ao ponto de colisão.

$$V_{T_f} = L(\cotg\ \Theta_0 - \cotg\Theta_f) \qquad (3.1.c)$$

L - distância mínima entre o vetor V_T e o ponto de controle.

D - distância entre o torpedo e o alvo no instante $t = 0$

Diferenciando (3.1.c) tem-se:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{V_T\ \mathrm{sen}^2\Theta}{L} \qquad (3.1.d)$$

Pelas equações (3.1.a), (3.1.b) e (3.1.d) obtem-se a seguinte equação diferencial:

$$\left(\frac{d\rho}{d\Theta}\right)^2 + \rho^2 = L^2\left(\frac{V_t}{V_T}\right)^2 \frac{1}{\mathrm{sen}^4\Theta} \qquad (3.1)$$

A equação acima fornece em coordenadas polares a trajetória do torpedo.

A solução desta equação pode ser obtida numericamente ou por série de potência. Esta solução será fornecida no anexo C.

3.3 - RELAÇÃO TEMPO-ÂNGULO DE VISADA

Pela equação 3.1.c tem-se:

$$t_n = \frac{L}{V_T}\,(\text{cotg}\ \Theta_o - \text{cotg}\ \Theta) \qquad (3.2)$$

t_n - tempo transcorrido do instante $t = 0$ até o instante em que o torpedo atinge um ponto pré-estabelecido

t_f - tempo transcorrido do instante $t = 0$ ao instante do impacto

$$t_f = \frac{L}{V_T}\,(\text{cotg}\ \Theta_o - \text{cotg}\ \Theta_f) \qquad (3.3)$$

Conhece-se que:

$$\text{cotg}\ \Theta_f = \frac{\sqrt{\rho_f^2 - L^2}}{L}$$

ρ_f - valor absoluto do vetor posição do ponto de impacto

Logo,

$$t_f = \frac{L}{V_T}\,\left(\text{cotg}\ \Theta_o - \sqrt{\left(\frac{\rho_f}{L}\right)^2 - 1}\right) \qquad (3.4)$$

3.4 - VELOCIDADE RADIAL

Procura-se obter a velocidade radial em função de V_T, V_t, Θ, L, ρ. Para tal, obtem-se da Figura 3.3:

$$\text{tg}\ \phi = \frac{dy}{dx} = \frac{\frac{d}{d\Theta}(\rho\ \text{sen}\ \Theta)}{\frac{d}{d\Theta}(\rho\ \cos\ \Theta)} = \frac{\rho'\,\text{sen}\Theta + \rho\ \cos\ \Theta}{\rho'\cos\Theta - \rho\ \text{sen}\ \Theta} \qquad (3.5.a)$$

O símbolo ' indica derivada em relação a Θ.

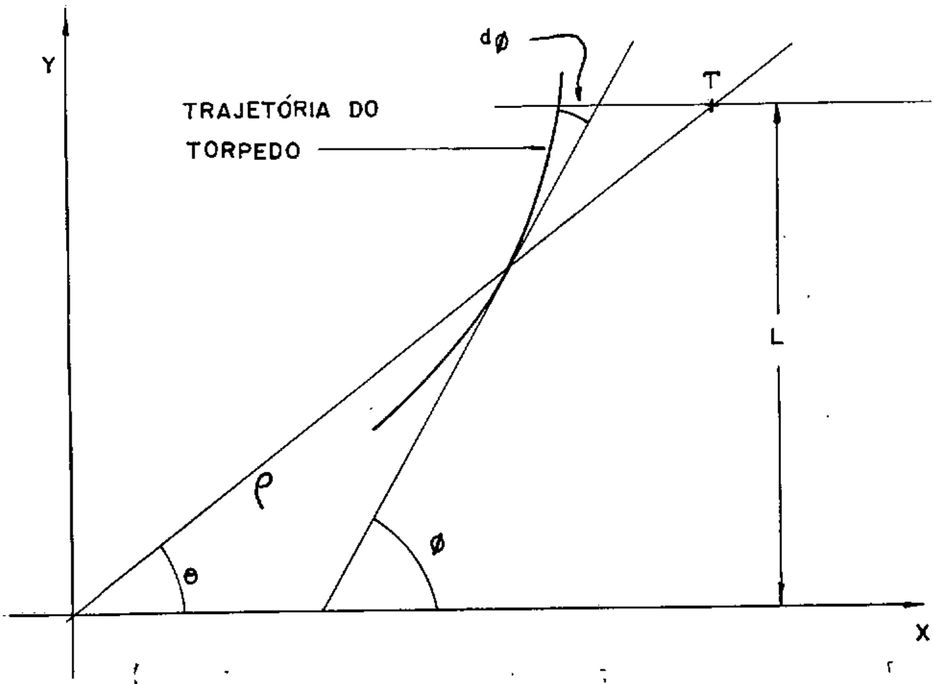


Fig. 3.3 - Velocidade radial

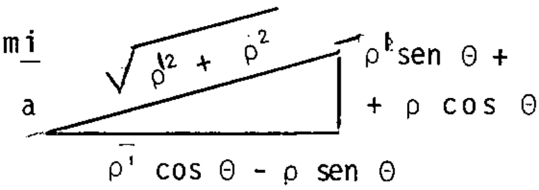
Derivando (3.5.a) em relação a Θ obtem-se:

$$\frac{d\phi}{d\Theta} = \frac{\rho^2 + 2\rho'^2 - \rho\rho''}{(\rho'\cos\Theta - \rho\,\mathrm{sen}\Theta)^2}\,(\cos^2\phi) \qquad (3.5.b)$$

Substituindo (3.1.d) em (3.5.b) tem-se:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{V_T\ \mathrm{sen}^2\Theta}{L} \times \frac{\rho^2 + 2\rho'^2 - \rho\rho''}{(\rho'\cos\Theta - \rho\,\mathrm{sen}\Theta)^2}\,(\cos^2\phi) \qquad (3.5.c)$$

Usa-se a equação (3.3.a) para construir o triângulo mostrado ao lado, que permite escrever a equação (3.5.c) na forma a seguir:



$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{V_T \operatorname{sen}^2\theta}{L} \times \frac{\rho^2+2\rho'^2-\rho\rho''}{p'^2+\rho^2} \qquad (3.5.d)$$

Usando-se a equação 3.1, derivando-se obtêm-se as relações mostradas a seguir:

$$\rho^2 + \rho'^2 = L^2 \left(\frac{V_t}{V_T}\right)^2 \frac{1}{\operatorname{sen}^4\theta}$$

$$\rho' = \sqrt{L^2 \left(\frac{V_t}{V_T}\right)^2 \frac{1}{\operatorname{sen}^4\theta} - \rho^2}$$

$$\rho^2 + \rho\rho'' = 2\rho^2 + 2L^2 \left(\frac{V_t}{V_T}\right)^2 \left\{\frac{\rho \operatorname{cotg}\theta}{\operatorname{sen}^4\theta \sqrt{\frac{L^2}{\operatorname{sen}^4\theta}\left(\frac{V_t}{V_T}\right)^2 - \rho^2}}\right\}$$

Substituindo as três expressões anteriores na equação 3.5.d têm-se:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2V_T \operatorname{sen}^2\theta}{L} \left\{1 + \frac{\rho \operatorname{cotg}\theta}{\sqrt{L^2 \left(\frac{V_t}{V_T}\right)^2 \frac{1}{\operatorname{sen}^4\theta} - \rho^2}}\right\} \qquad (3.5)$$

A equação acima fornece a cada instante o valor que velocidade radial do torpedo deverá ter para se manter na trajetória pré-estabelecida.

Lineariza-se a equação anterior de modo a obter uma equação do tipo:

$$\dot{\phi} = a_1 + a_2\rho$$

Considerando:

$$b_1 = \cot g\Theta$$

$$b_2 = L^2\left(\frac{V_t}{V_T}\right)\frac{1}{\operatorname{sen}^4\Theta}$$

$$c_2 = \frac{2V_T \operatorname{sen}^2\Theta}{L}$$

Pode-se escrever a relação:

$$\frac{b_1 \rho}{\sqrt{b_2-\rho^2}} = \frac{b_1}{\sqrt{b_2}} \frac{\rho}{\sqrt{1 - \frac{\rho^2}{b_2}}}$$

Considerando $\frac{\rho^2}{b_2}$ um valor pequeno, pode-se afirmar que:

$$\frac{b_1 \rho}{\sqrt{b_2}\sqrt{1 - \frac{\rho^2}{b_2}}} \cong \frac{b_1 \rho}{\sqrt{b_2}}$$

Logo:

$$\dot{\phi} = C_2(1 + \frac{b_1}{\sqrt{b_2}} \rho)$$

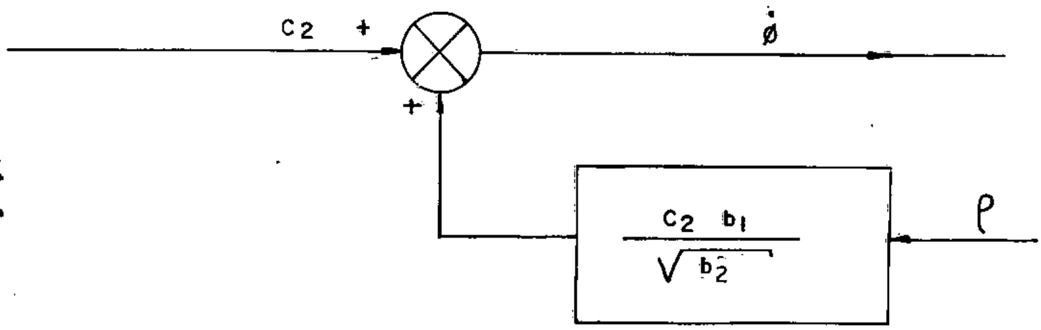


Fig. 3.4 - Diagrama de blocos de velocidade radial

3.5 - ACELERAÇÃO LATERAL

Conhecendo a aceleração centrífuga do torpedo, tem-se pela Figura 3.4:

$$a_{ct} = \rho_c \ \dot{\phi}^2$$

$$a_{ct} = V_t \ \dot{\phi}$$

a_{ct} - aceleração centrífuga

ρ_c - raio instantâneo de curvatura

$\dot{\phi}$ - velocidade radial

$\vec{V}_t$ - velocidade tangencial

λ - ângulo de rotação do torpedo em um intervalo de tempo Δt

$a_{\ell t}$ - aceleração lateral do torpedo

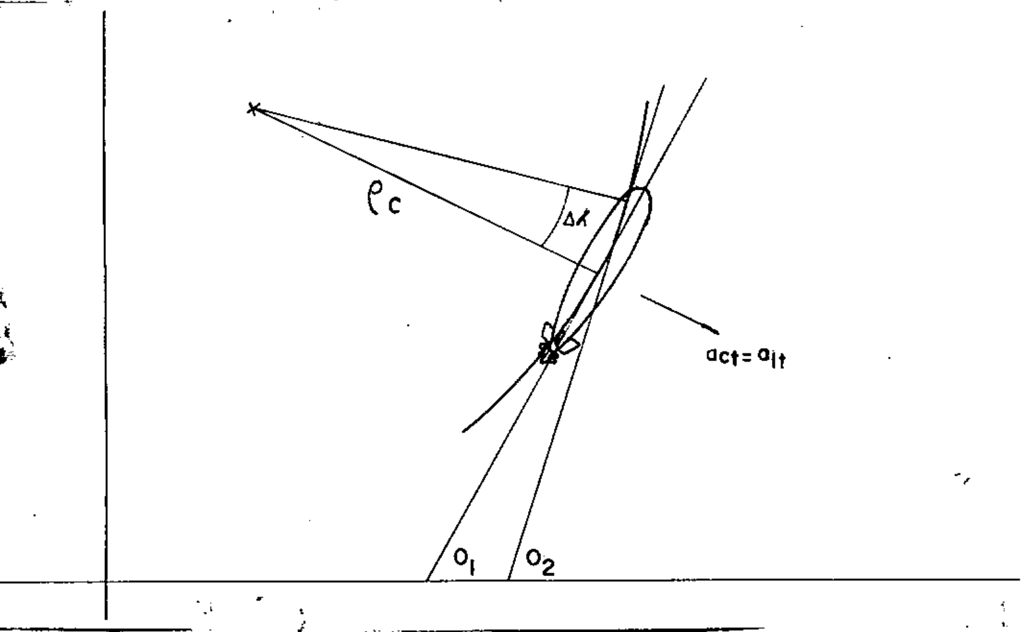


Fig. 3.5 - Aceleração lateral do torpedo

$$\Delta\lambda = \phi_2 - \phi_1 = \Delta\phi$$

Observa-se que em intervalos pequenos tem-se:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\phi}{dt}$$

Sabe-se:

$$a_{\ell t} = a_{ct}$$

$$a_{\ell t} = \rho_c \, \dot{\phi}^2$$

$$a_{\ell t} = V_t \, \dot{\phi} \qquad (3.6)$$

$a_{\ell t}$ - aceleração lateral do torpedo

a_{ct} - aceleração centrífuga do torpedo

3.6 - MODELO ADIMENSIONAL

Considera-se as seguintes quantidades adimensionais:

$$\rho^* = \frac{\rho}{L}; \quad \tau = \frac{g}{V_T}\, t; \quad \alpha = \frac{Lg}{V_T^2}$$

$$p = \frac{V_t}{V_T}; \quad a_{t\ell} = \frac{a_{t\ell}}{g}; \quad \tau_f = \frac{g t_f}{V_T}$$

$$\rho_f^* = \frac{\rho_f}{L}; \quad \Omega = \frac{w V_T}{g} \qquad (3.7)$$

As relações básicas neste tipo de guiagem são dados por:

Trajetória do torpedo

$$\left(\frac{d\rho^*}{d\Theta}\right)^2 + \rho^{*2} = p^2 \, \frac{1}{\operatorname{sen}^4\Theta} \qquad (3.8)$$

Tempo de corrida

$$\tau_n = \alpha(\mathrm{cotg}\Theta_o - \mathrm{cotg}\Theta) \qquad (3.9)$$

$$\tau_f = \alpha(\mathrm{cotg}\Theta_o - \sqrt{\rho_f^{*2} - 1}) \qquad (3.10)$$

Velocidade radial

$$\frac{d\phi}{d\tau} = \frac{2\ \mathrm{sen}^2\Theta}{\alpha} \left| 1 + \frac{\rho^*\ \mathrm{cotg}\Theta}{\sqrt{p^2\ \dfrac{1}{\mathrm{sen}^4\Theta} - \rho^*}} \right| \qquad (3.11)$$

3.7 - CURVAS CARACTERÍSTICAS

Utilizando-se as relações (3.7) a (3.11) e considerando:

$$\Theta_o = \mathrm{sen}^{-1}(\frac{L}{D})$$

$$P = \frac{v_t}{V_T}$$

sendo:

Θ_o - ângulo inicial de visada

D - distância de lançador ao alvo

V_t - velocidade do torpedo

V_T - velocidade do alvo

Computando-se os dados e estimando D = 1000 m, obtem-se as curvas características das Figuras 3.5 a 3.8, que mostram ataque de um torpedo contra um alvo em movimento, relacionando diversas variáveis envolvidas no sistema.

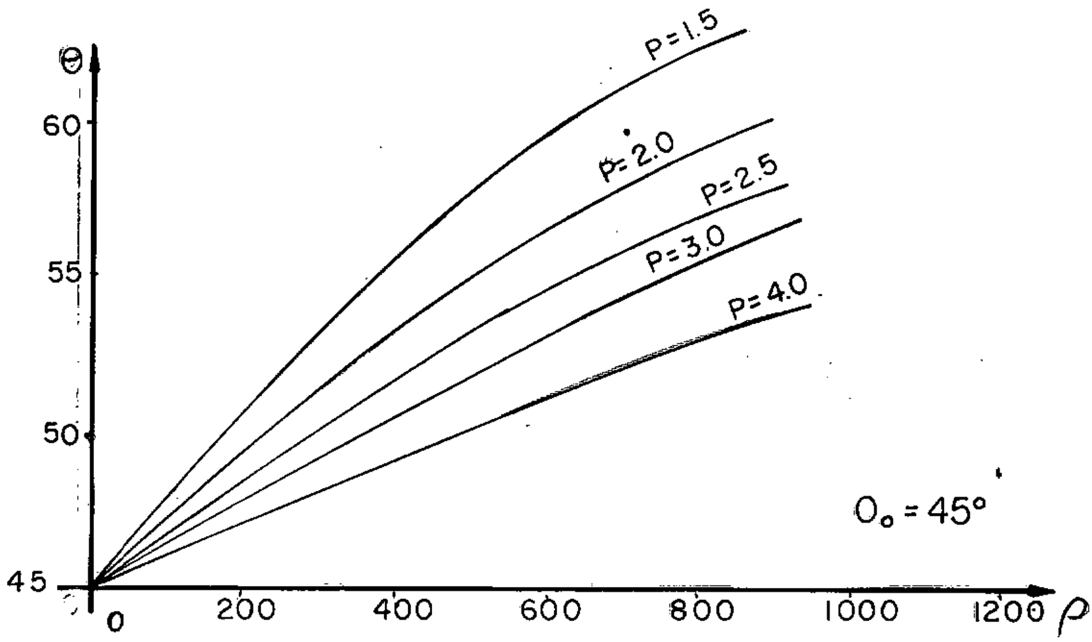


Fig. 3.5 - Curvas características, Θ_0 constante, P variável

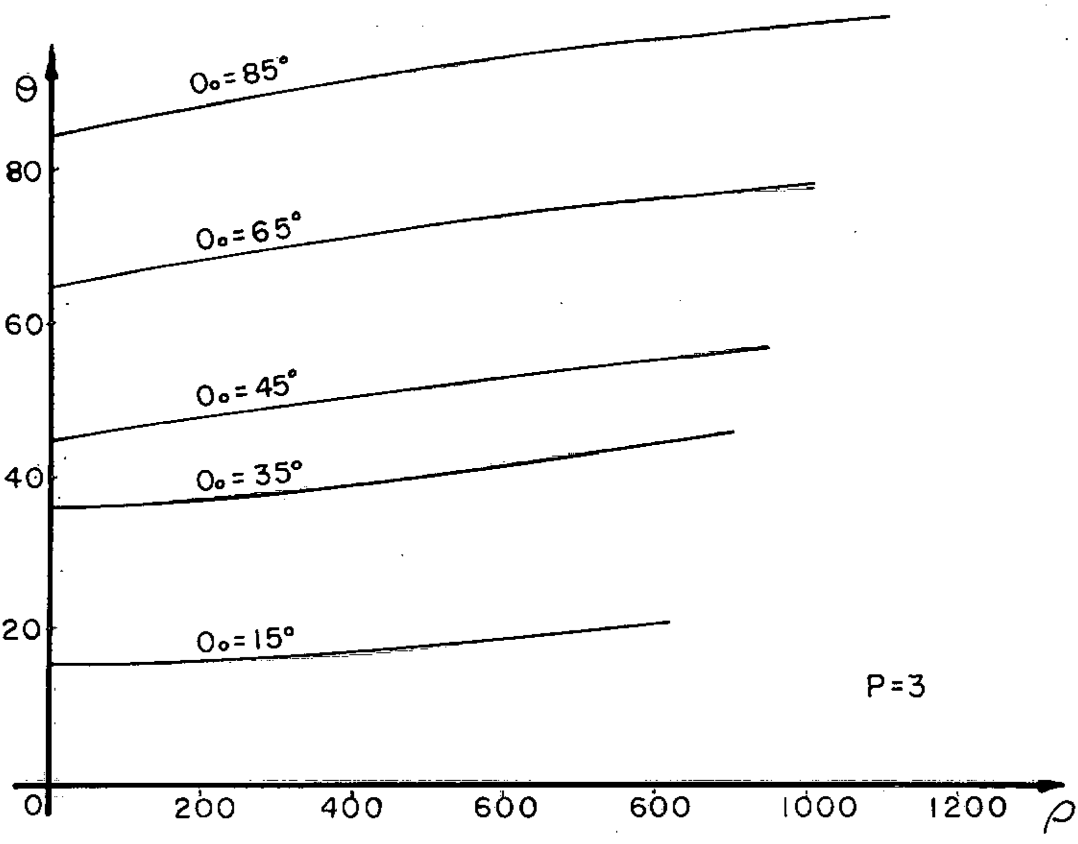


Fig. 3.6 - Curvas características, Θ_0 variável, P constante

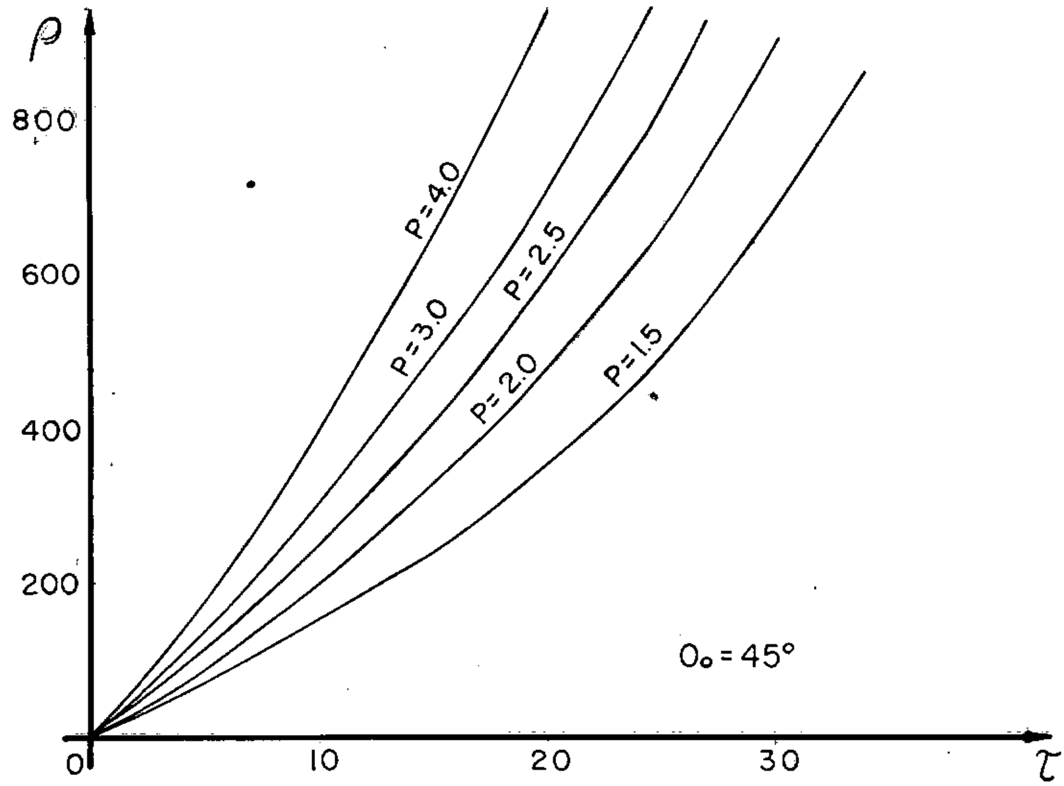


Fig. 3.7 - Curvas características, Θ_0 constante P variável

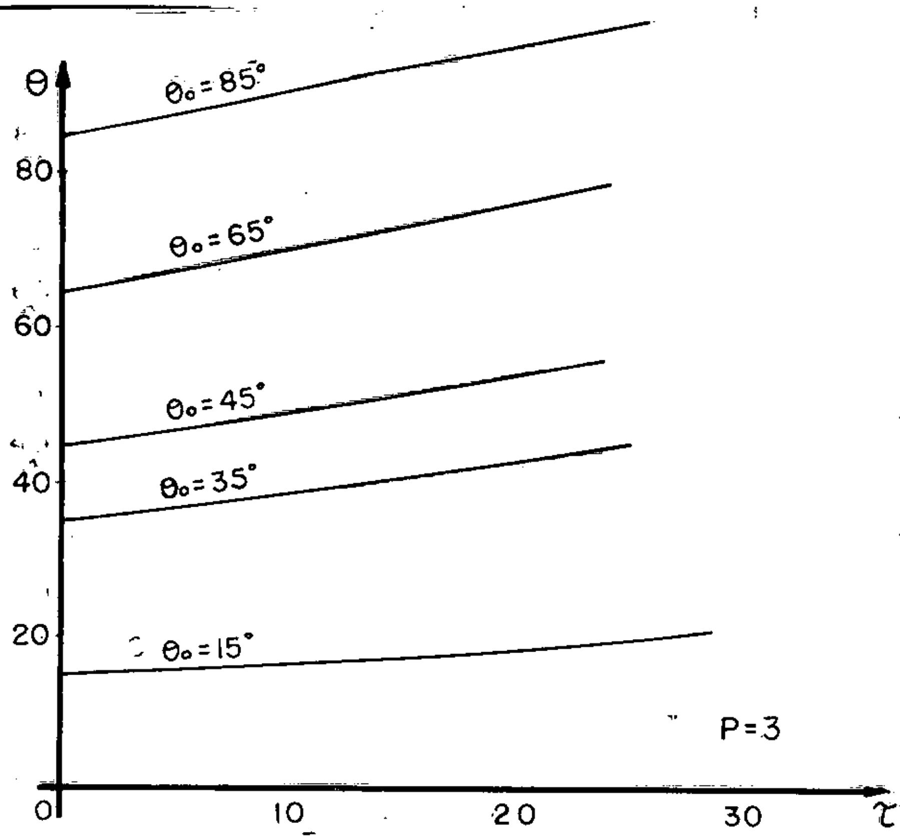


Fig. 3.8 - Curvas características, Θ_0 variável, P constante

CAPÍTULO IV

GIROSCÓPIO E SISTEMA DE CONTROLE

4.1 - CONCEITOS BÁSICOS

Chama-se plataforma inercial, um sistema que fornece informações precisas de orientação, permitindo a determinação do ângulo de pitch, yaw e roll de um corpo em movimento.

A plataforma inercial deste estudo será formada por 3 "single axis gyro", semelhantes ao giroscópio mostrado na Figura 4.1.

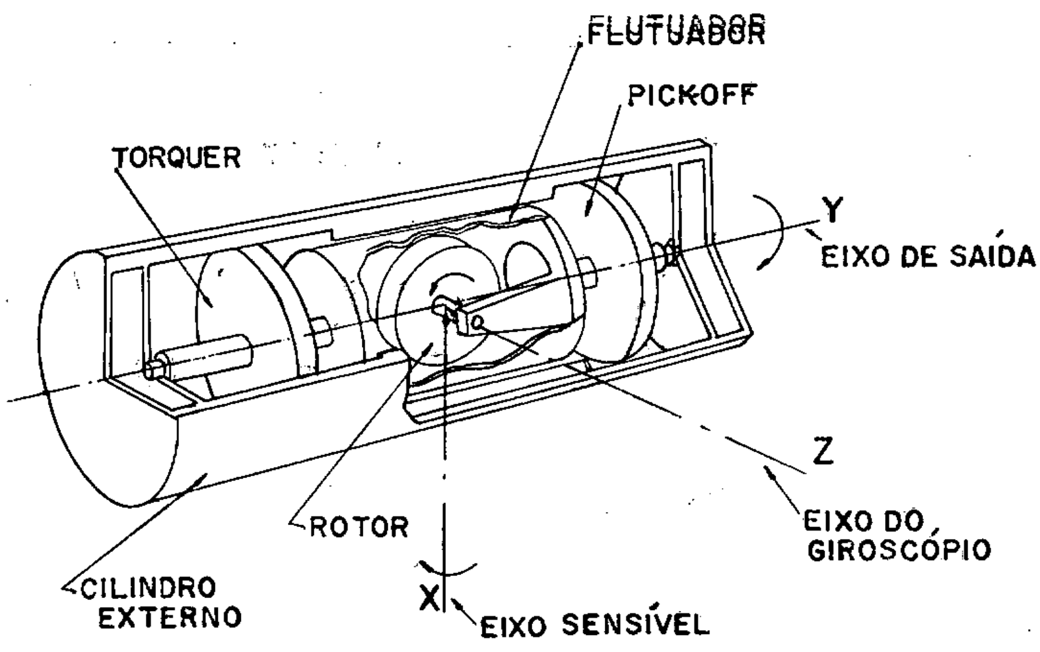


Figura 4.1 - Giroscópio, "single axis gyro"

Estuda-se inicialmente o giroscópio que será utilizado a seguir. Este giroscópio, pode ser compreendido analisando-o através de dois sistemas de eixos ortogonais:

O primeiro a ser considerado, sistema G, está fixo no flutuador do giroscópio e o outro, sistema P está fixo na plataforma. Estes dois sistemas poderão ser visualizados melhor pela Figura 4.2.

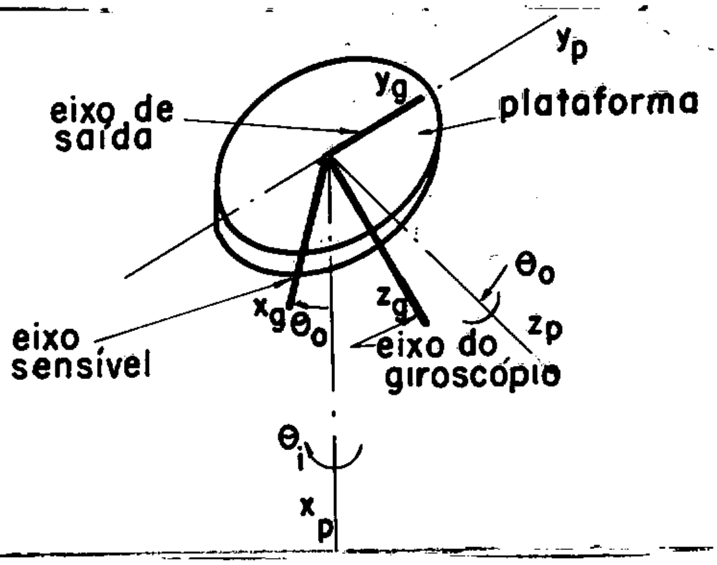


Figura 4.2 - Sistemas de eixos ortogonais "G" e "P"

Pode-se escrever:

$$\{\vec{W}\}_G = \{\vec{W}\}_P + \{\vec{W}\}_{G/P}$$

$\{W\}_G$ - velocidade angular do rotor do giroscópio em relação ao "eixo sensível"

$\{W\}_P$ - velocidade angular de plataforma, em relação ao seu eixo de rotação

O sistema "G" será posicionado de forma que o eixo y_G coincida com o eixo longitudinal do cilindro externo do giroscópio, pertencendo portanto a um plano paralelo ao plano da plataforma; z_G coincide com o eixo do giroscópio x_G completa o sistema dextrogero.

Considera-se o eixo y_G colinear ao eixo y_P. A deflexão real Θ_o, destes dois eixos, será referida como um sinal de erro ε_y, do giroscópio.

4.2 - MODELO MATEMÁTICO

Considera-se:

$$\{\vec{W}\}_{G/P} = \begin{matrix} 0 \\ \dot{\Theta}_o \\ 0 \end{matrix} = \begin{matrix} 0 \\ \dot{\varepsilon}_y \\ 0 \end{matrix}$$

$$\{\vec{W}\}_P = W_{xP}\ \hat{i}_P + W_{yP}\ \hat{j}_P + W_{zP}\ \hat{k}$$

$\hat{i}_P$, $\hat{j}_P$, $\hat{k}_P$ são vetores unitários respectivamente aos eixos $\vec{x}_P$, $\vec{y}_P$, $\vec{z}_P$

Expressando $\{W\}_P$ no sistema "G" tem-se:

$$\underset{\text{Expresso no sistema "G"}}{\{\vec{W}\}_P} = \begin{vmatrix} \cos\Theta_o & 0 & -\text{sen}\,\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\,\Theta_o & 0 & \cos\Theta_o \end{vmatrix} \begin{matrix} W_{xP} \\ W_{yP} \\ W_{zP} \end{matrix}$$

Expressando também, a velocidade angular do flutuador, no sistema "G", tem-se:

$$\begin{matrix} W_{xG} \\ W_{yG} \\ W_{zG} \end{matrix} = \begin{matrix} 0 \\ \dot{\Theta}_o \\ 0 \end{matrix} + \begin{vmatrix} \cos \Theta_o & 0 & -\text{sen } \Theta_o \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \Theta & 0 & \cos \Theta_o \end{vmatrix} \begin{matrix} W_{xP} \\ W_{yP} \\ W_{zP} \end{matrix} \qquad (4.1)$$

A plataforma tem por definição apenas um grau de liberdade expresso pela rotação em relação ao eixo x_ρ.

$$W_{xP} = \dot{\Theta}_i$$

$$W_{yP} = 0$$

$$W_{zP} = 0$$

Considerando 4.1 pode-se escrever:

$$W_{xG} = \dot{\Theta}_i \cos \Theta$$

$$W_{yG} = \dot{\Theta}_o$$

$$W_{zG} = \Theta_o \dot{\Theta}_i \qquad (4.2)$$

Expressa-se o momento angular:

$$H_{xG} = I_{iG} W_{xG} = I_{iG} \dot{\Theta}_i$$

$$H_{yG} = I_o W_{yG} = I_o \dot{\Theta}_o$$

$$H_{zG} = I_r W_{zG} + H_r = I_r \Theta_o \dot{\Theta}_i + H_r \qquad (4.3)$$

H_{xG}, H_{yG}, H_{zG} - componentes de momento angular do flutuador no sistema Giroscópio

I_{ig}, I_o, I_r - momento de inércia do flutuador em relação aos eixos: x_G sensível, y_G de saída, z_G do giroscópio

$\vec{H}_r$ - vetor momento angular do rotor do giroscópio $H_r = I_r W_r$

$\vec{W}_r$ - vetor velocidade angular do rotor

Usa-se as equações de Euler desenvolvidas no Apêndice A (A-34):

$$M_p - I_p \ddot{\Theta}_i = I_{iG} \ddot{\Theta}_i + H_r \dot{\Theta}_o + (I_r - I_o) \Theta_o \dot{\Theta}_o \dot{\Theta}_i \qquad (4.4)(a)$$

$$M_o - (C \dot{\Theta}_o + K \Theta_o) = I_o \ddot{\Theta}_o - H_r \dot{\Theta}_i - (I_r - I_{iG}) \Theta_o \dot{\Theta}_i^2 \qquad (4.4)(b)$$

$$M_r = I_r \frac{d}{dt} (\Theta_o \dot{\Theta}_i) + (I_o - I_{iG}) \dot{\Theta}_o \dot{\Theta}_i + \dot{H}_r \qquad (4.4)(c)$$

$$M_i = M_p - I_p \ddot{\Theta}_i$$

$$M_o^* = M_o - (C \dot{\Theta}_o + K \Theta_o)$$

M_i - momento aplicado no flutuador em relação ao eixo sensível, x_G.

M_o^* - momento externo em relação ao eixo de saída, y_G.

M_r - momento em relação ao eixo do giroscópio, z_G.

M_p - momento aplicado à plataforma

I_p - momento de inércia de plataforma

C - coeficiente de viscosidade do fluído que mergulha o flutuador

K_g - coeficiente de elasticidade

M_o - momento transmitido ao torquer

4.3 - CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

Examinando-se as equações acima pode-se afirmar:

a) Quando W_r for mantido constante por um motor síncrono o termo $\dot{H}_r$ de (4.4c) será desprezível.

b) Em aplicações práticas considera-se:

* $(I_o, I_{iG}) << I_r$

* $I_p >> I_{iG}$

* Despreza-se: $\dot{\Theta}_o \dot{\Theta}_i$, $\dot{\Theta}_i^2$, $\dot{\Theta}_o \ddot{\Theta}_i$

Logo a equação (4.4c) será identicamente nula.

c) Pode-se simplificar, pelas considerações do item "b" as equações (4.4a) e (4.4b)

$$M_p = I_p \ddot{\Theta}_i + H_r \dot{\Theta}_o \qquad (4.5a)$$

$$M_o = (I_o \ddot{\Theta}_o + C \dot{\Theta}_o + K \Theta_o) - H_r \dot{\Theta}_i \qquad (4.5b)$$

d) Aplicando-se transformada de Laplace e equação (4.5b)

$$M_o(S) = (I_o S^2 + C S + K_g)\Theta_o(S) - H_r S \Theta_i(S) \qquad (4.6)$$

e) Quando o torquer não recebe corrente, $M_o(S) = 0$, pode-se afirmar:

* Quando o coeficiente de viscosidade é o dominante

$$\Theta_o(S) \cong (\frac{H_r}{C}) \Theta_i(S) \qquad (4.7)$$

Neste caso a rotação de saída, Θ_o será diretamente proporcional a rotação da entrada Θ_i em relação ao eixo sensível.

Chama-se este tipo de giroscópio "Integration Gyro".

* Quando o coeficiente de elasticidade é o dominante tem-se:

$$\Theta_o(S) = \frac{H_r}{K_g} S \Theta_i(S) \qquad (4.8)$$

Neste caso a rotação de saída, Θ_o será diretamente proporcional a velocidade angular em relação ao eixo sensível.

Chama-se este tipo de giroscópio "rate gyro".

O terceiro tipo de giroscópio, o "Rate Integration Gyro" será considerado quando o coeficiente elástico, K tende a zero. O estudo em pauta basear-se-a neste tipo de giroscópio, pelo seu largo emprego em navegação e guiagem.

4.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS

Considera-se o "Rate Integration Gyro":

I - A saída $S\ \Theta_o(S)$ terá a notação da velocidade angular W_o

II - A entrada, pelo eixo sensível poderá ser de dois modos:

* $S\ \Theta_i(S) \rightarrow W_i$

$M_o(S)$ Momento do torque que deve ser ajustado de forma que:

$$M_o(S) = - H_r\ \dot{\Theta}_o^* = - H_r\ W_o^* \qquad (4.9)$$

W_o^* introduzida para fornecer outra orientação ao giroscópio

III - Considerando-se o valor de K_g muito pequeno pode-se representar a equação (4.6) no diagrama da Figura (4.3).

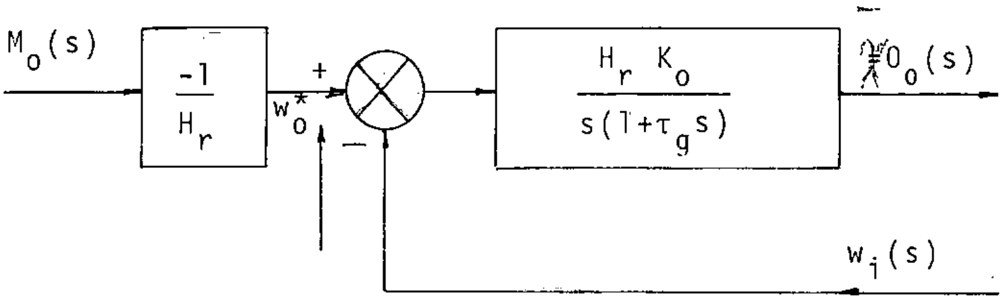


Figura 4.3 - Diagrama de blocos do "Rate Integration Gyro"

K_o - $1/C$ (N.m sec)$^{-1}$

τ_g - constante de tempo do giroscópio

$$\tau_g = \frac{I_o}{C}\ S$$

Os coeficientes C, I_o, H_r, τ_g,, K_o são, de um modo geral, fornecidos pelo fabricante do giroscópio.

IV - Usa-se $W_o^* = 0$ quando desejamos estabelecer um sistema para referência, como nas aplicações em plataforma inerciais.

V - Em navegação inercial e muitas outras aplicações, $W_o^* \neq 0$, em virtude de contínua reorientação de plataforma, durante a nagevação.

VI - Usando-se o giroscópio para permitir uma navegação inercial ou para fornecer uma referência inercial, a malha da Figura (4.3) deve ser adequadamente fechada.

4.6 - PLATAFORMA INERCIAL

Considera-se a plataforma inercial, mostrada na Figura (4.4), instalada em veículo submarino propulsado. Este veículo, tem liberdade para girar em torno de três eixos ortogonais, sendo necessário que a plataforma mantenha a sua orientação no espaço, a despeito dos momentos perturbadores, causados pela velocidade angular do veículo, em relação ao eixo "Z", desprezando os momentos perturbadores em relação aos outros eixos.

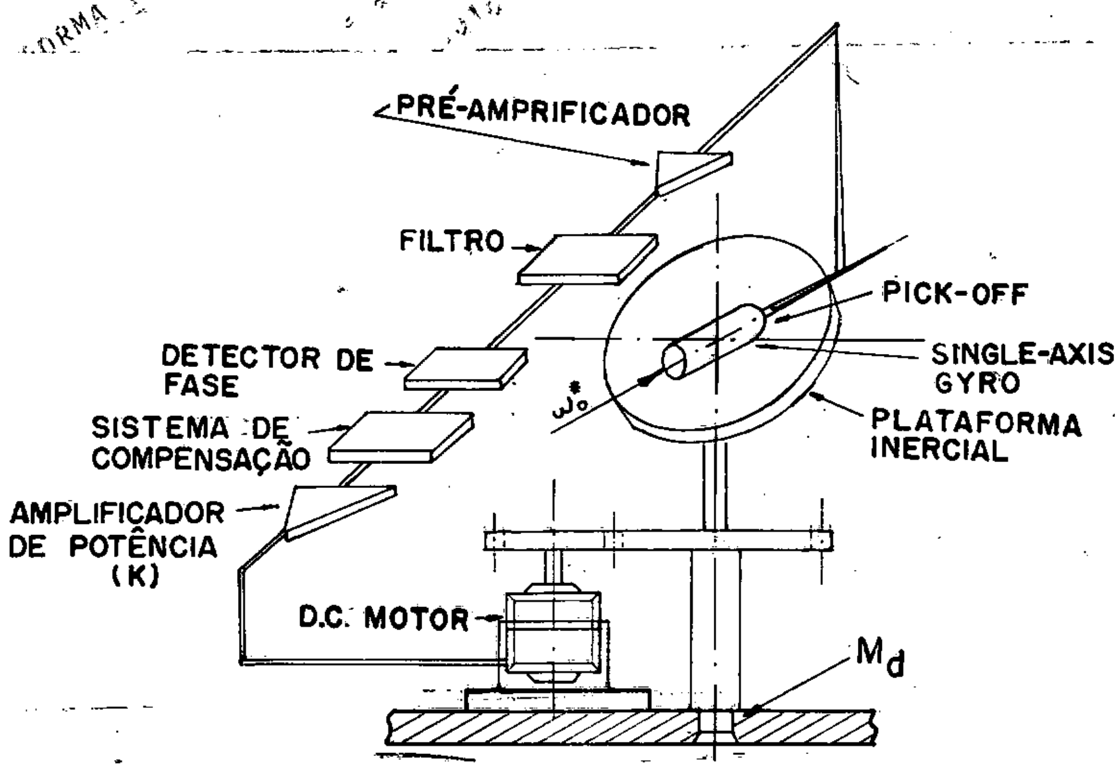


Figura (4.4) - Single axis plataform

Observando-se a Figura (4.4), "single axis plataform", tem-se que o sinal de saída gerado pelo "pick off" passa através de um sistema eletrônico (pré-amplificador, filtro detetor de fase, sistema de compensação e amplificador de saída) sendo em seguida enviado ao servomotor que movimenta a plataforma, mantendo uma orientação constante.

Usando-se a equação (4.5a) e considerando o momento perturbador e o atrito tem-se:

$$M_p = I_p \ddot{\Theta}_i + H_r \dot{\Theta}_o + M_d + b \dot{\Theta}_i \qquad (4.10)$$

$$e_m = R\ i + k_1 \dot{\Theta}_i$$

$$M_p = k_2\ i$$

b - coeficiente atrito viscoso (N.m.s)

e_m, i - voltagem (volts), corrente (A) na armadura do motor

k_1 - coeficiente de força contra eletromotriz (volt/rad.s)

k_2 - coeficiente de torque (N.m/amp)

M_p - torque de servomotor (N.m)

M_d - momento perturbador (N.m)

R - resistência da armadura do servomotor (ohms)

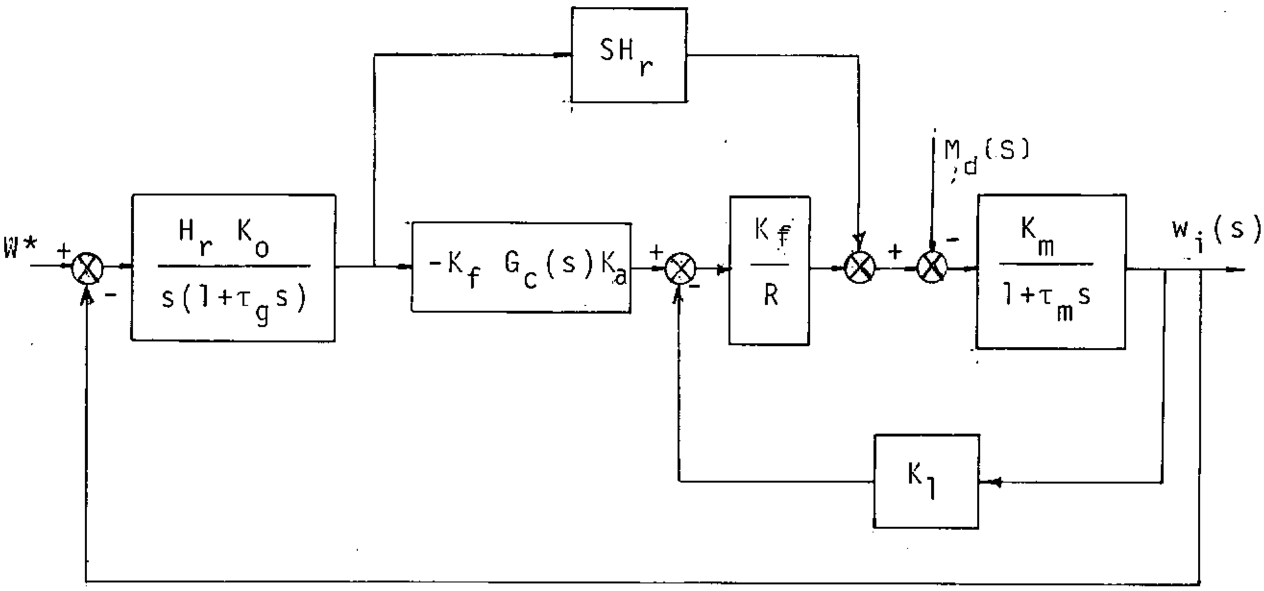


Figura (4.5) - Diagrama de blocos "single axis plataform"

K_m - constante de torque 1/b

τ_m - constante de tempo do motor Ip/b

K a - ganho do amplificador de potência

$G_c(s)$ - função de transferência do "compensating network"

K_f - ganho fixo de malha

H_r - momento angular do giroscópio $I_r\ W_r$

Pode-se simplificar o diagrama de blocos da Figura (4.5), obtendo-se o diagrama da Figura (4.6).

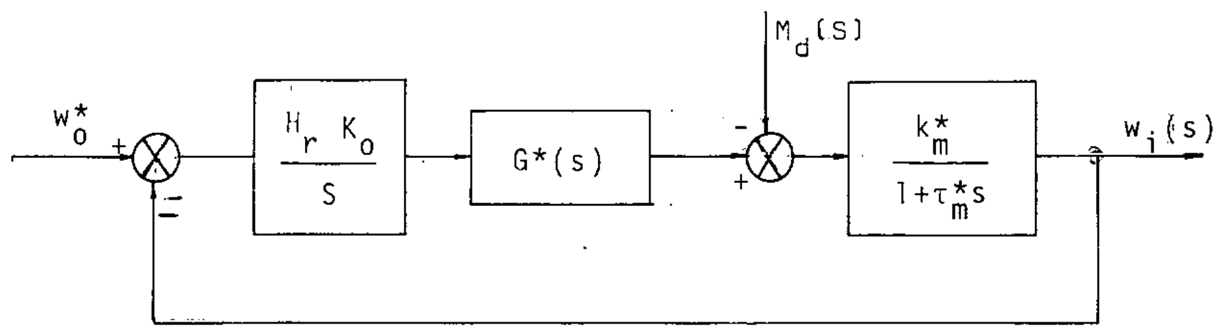


Figura 4.6 - Diagrama de blocos "single axis plataform"

$$G^* = - K_f \, K_a G_c(S)/(1 + \tau_g \, S)$$

$$k_m^* = K_m \, R/(K_m \, K_1 \, K_2 + R)$$

$$\tau_m^* = \tau_m \, R/(K_m \, K_1 \, K_2 + R) \qquad (4.11)$$

Considera-se o polo $(-1/\tau_m^*)$ desprezível, em aplicações práticas.

$$\frac{K_m^*}{1+\tau_m^* \, S} = \frac{K_m^*/\tau_m^*}{S} = \frac{1}{I_p \, s}$$

Simplificando-se ainda mais o diagrama da Figura (4.6).

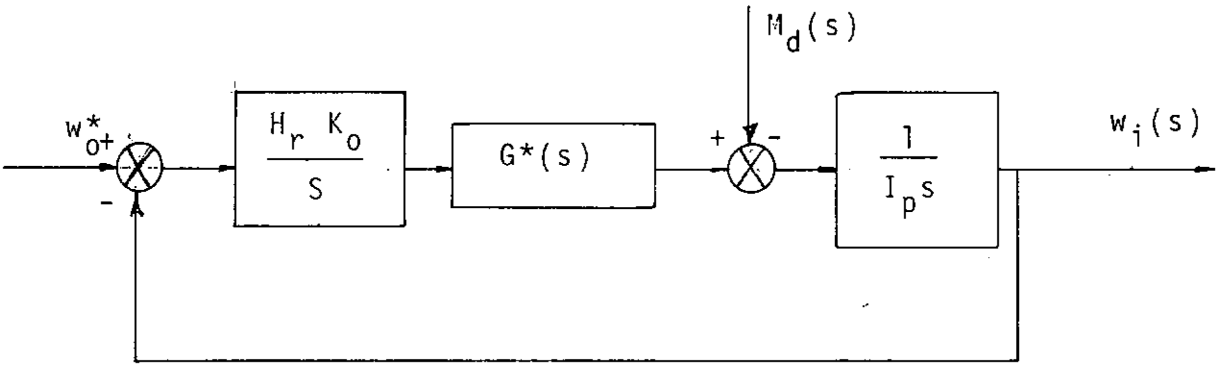


Figura (4.7) - Diagrama de blocos simplificado "single axis plataform

Considerando-se a equação (4.11), tem-se:

$$\frac{\Theta_o(S)}{W_o^* - W_i} = \frac{H_r K_o}{S(1 + \tau_g S)} \qquad (4.12)$$

A equação anterior é conhecida como equação de erro do giroscópio podendo-se escrever:

$$\varepsilon_o(S) = \frac{H_r K_o}{S(1 + \tau_g S)} \left[W_o^*(S) - W_i(S)\right] \qquad (4.13)$$

$\varepsilon_o(S) = \Theta_o(S) =$ sinal de erro do giroscópio

4.6 - CONTROLE DO VEÍCULO

Pode-se fazer o controle de Yaw, pitch e roll de um veículo submarino, usando-se 3 giroscópios tipo "single axis gyro".

A Figura (4.8) mostra uma forma de dispor estes giroscópios, considerando o sistema torpedo.

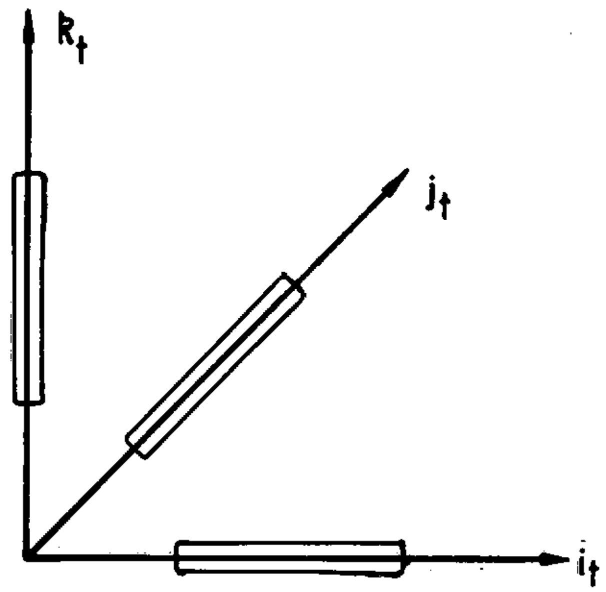


Figura (4.8) - Disposição de três giroscópios

O giroscópio de controle de Yaw será fixo no torpedo e terá seu eixo y_G colinear com o eixo x_t como mostra a Figura (4.9). Os outros dois giroscópios, para controle do roll e pitch, ficarão também fixos nos eixos "y_t" e "z_t" respectivamente.

O giroscópio para controle de Yaw, tem o seu eixo sensível colinear ao eixo "z_t" e recebe sinais externos que possibilitam um telecomando do torpedo. Estes sinais, aplicados no torquer do giroscópio, simulam um movimento no eixo sensível, obrigando ao pick-off comandar os lemes, reorientando ou corrigindo o rumo do veículo submarino.

A equação (4.10) torna-se:

$$M_t = I_t S^2 \Theta_i + H_r S \Theta_o + \delta_m(S) \frac{K_r(1 + Z_r S)}{(1 + (\frac{2\xi}{w_n})S + (\frac{1}{W_n})^2 S^2} \qquad (4.14)$$

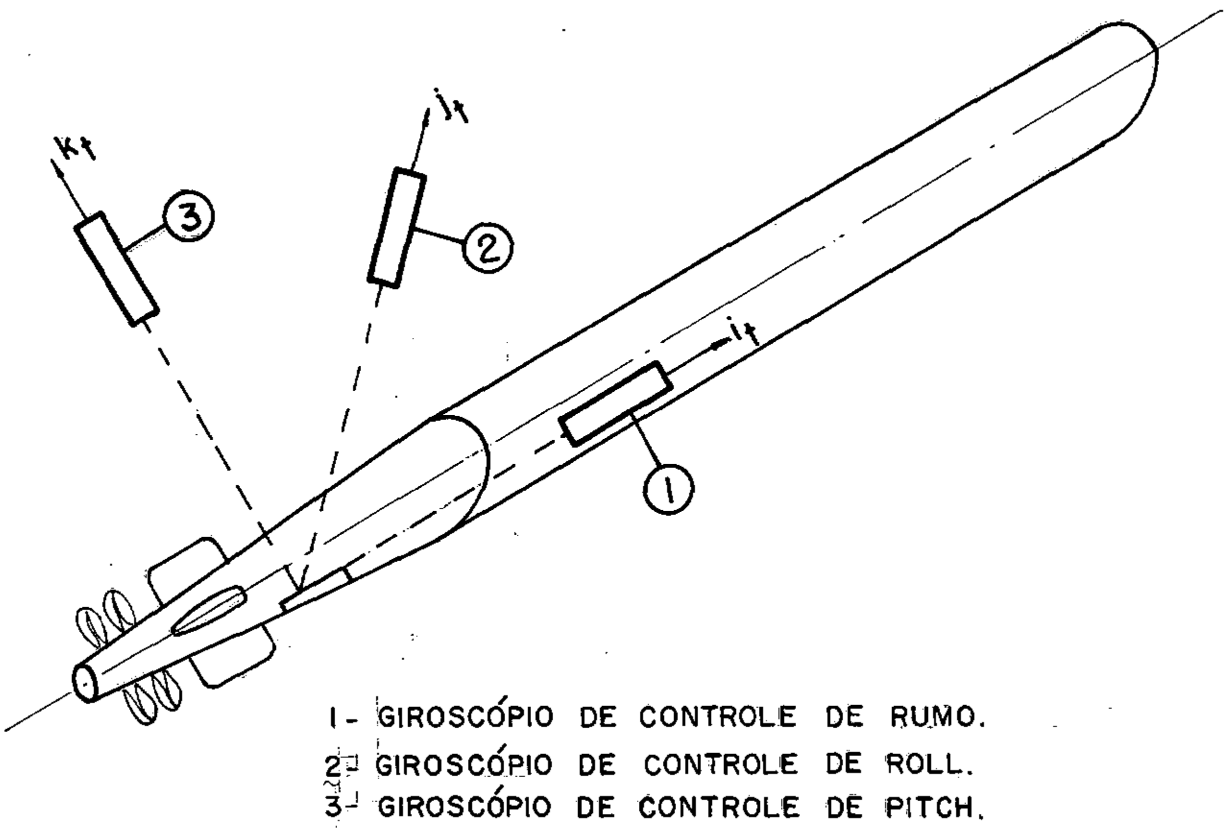
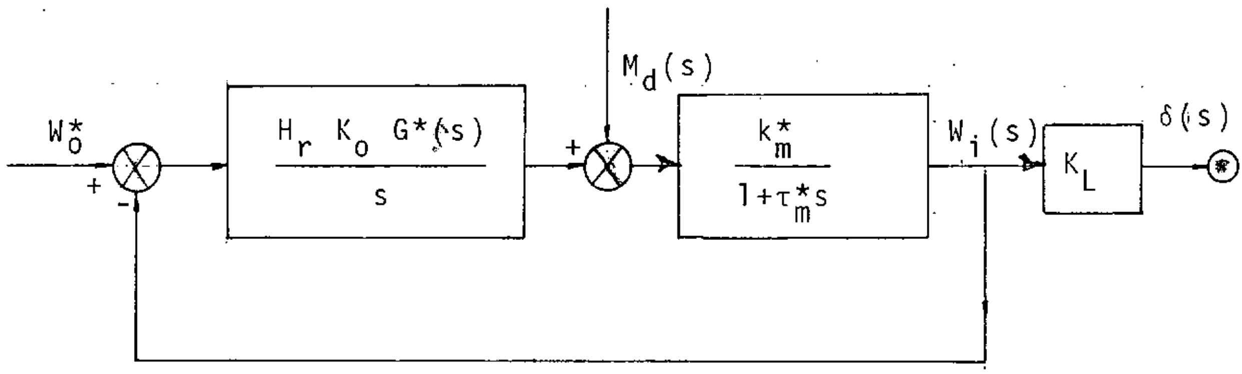


Figura (4.9) - Sistema de controle



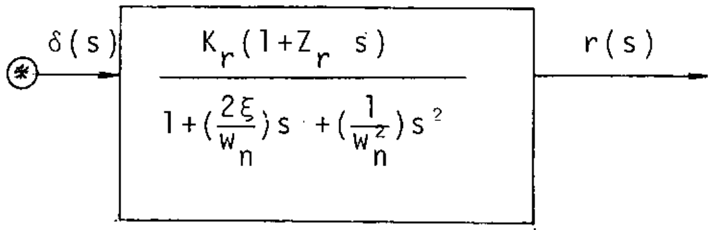


Figura 4.10 - Diagrama de blocos - Sistema de controle de Yaw

Para o controle de pitch e roll utiliza-se as superfícies de controle horizontais denominados profundores. Estas superfícies terão um comando duplo. O comando de pitch, igual para os profundores de bombordo e boreste, tendo como referência o giroscópio fixo no torpedo cujo eixo "y_G" será colinear ao eixo "z_t". O comando de roll, será traduzido em uma deflexão nos profundores de bombordo e boreste, tendo como referência o giroscópio cujo eixo "y_G" será colinear ao eixo "y_t". A Figura (4.11) mostra o diagrama de blocos do sistema controle de pitch e roll.

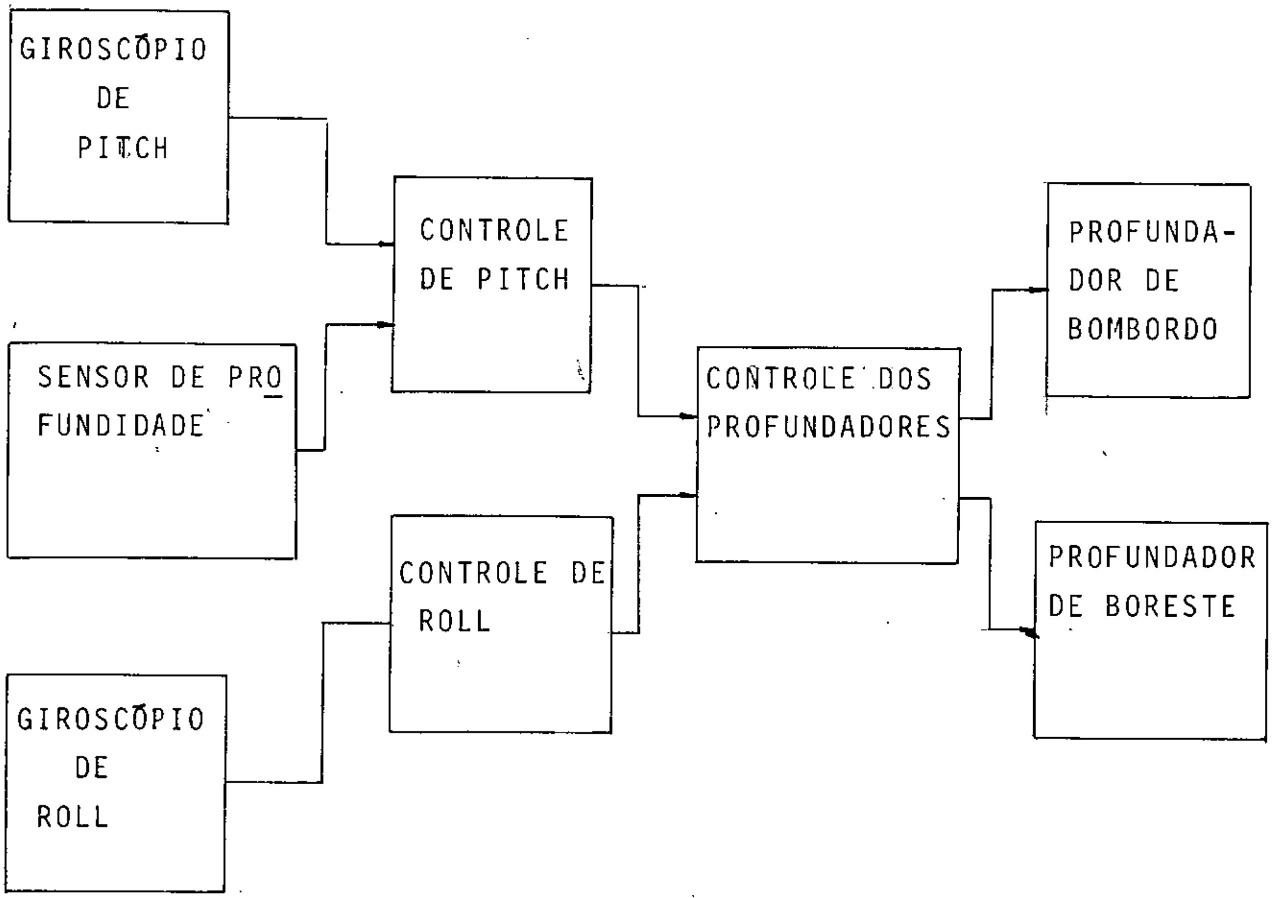


Figura (4.11) - Diagrama de blocos - Sistema de controle de pitch e roll

CAPÍTULO V

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

5.1 - APLICAÇÕES

O controle de um veículo submarino poderá ter diversas utilizações a saber:

1. Equipamento para pesquisa submarina;
2. Equipamento para trabalhos submarinos;
3. Equipamento militar de dissimulação e defesa;
4. Equipamento militar de exercício ou adestramento (alvo); e
5. Equipamento militar de ataque (torpedo)

Com a expansão da pesquisa submarina, utilização do mar e sua plataforma continental como fonte de obtenção de alimentos e materias primas, a primeira e segunda das aplicações acima seriam beneficiados com o sistema em estudo.

O sistema de controle e posicionamento desenvolvido,,possibilitaria a aproximação do veículo telecomandado, de outro objeto, fixo ou em movimento, por um processo que poderia ser automatizado.

A terceira e a quarta das aplicações relacionadas, serviriam como um equipamento militar para defesa, permitindo um adestramento eficaz e uma simulação de falsos ecos que confundiriam os sistemas de escuta e procura acūstica.

A principal característica destes dois equipamentos tratados, no parágrafo anterior, está na não exigência de trajetórias precisas, uma vez que a faixa de variação de trajetória, é grande, principalmente se comparada com uma arma de interseptação.

A quinta aplicação comentada será a escolhida para o presente capítulo. Tal escolha foi pautada na exigência de trajetória bem determinada, que utilizará, a dinâmica do Capítulo II de modo a manter o veículo em uma trajetória estabelecida, a cinemática do Capítulo III, tendo a referência de uma plataforma inercial, do Capítulo IV.

Por motivos econômicos utilizar-se-á o torpedo de corrida reta marca 14 modelo 3, instalando um tele-comando , obtendo-se então um protótipo para teste.

5.2 - CURVA DE CORREÇÃO

Os lançamentos com o protótipo irão proporcionar a verificação da precisão das fórmulas da seção 2.6, permitindo, um melhor controle a malha aberta, barateando assim o sistema do torpedo.

Recapitulando as equações 2.15:

$$\frac{U(s)}{\delta(s)} = \frac{K_u}{1 + \tau_u S}$$

$$\frac{V(s)}{\delta(s)} = \frac{K_v(1+Z_v S)}{1 + (\frac{2}{w_n})S + (\frac{1}{w_n^2})S^2}$$

$$\frac{r(s)}{(s)} = \frac{K_r(1+Z_r S)}{1 + (\frac{2}{w_n})S + (\frac{1}{w_n^2})S^2}$$

Pode-se deduzir o diagrama de blocos da Figura 5.1

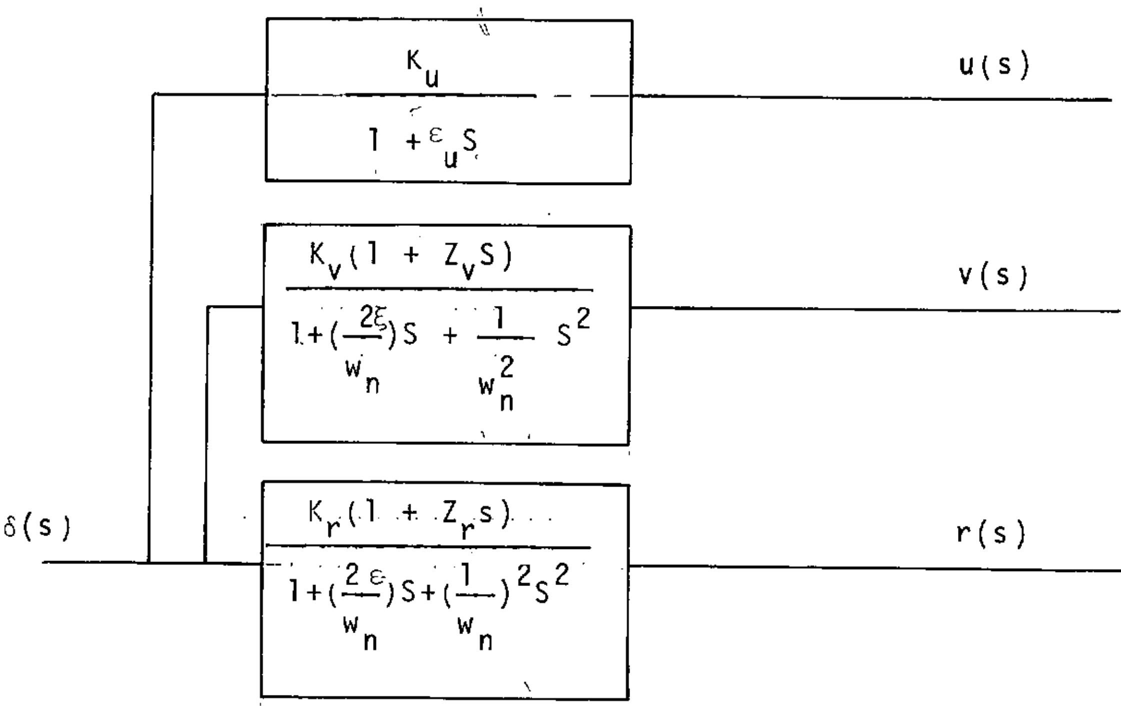


Fig. 5.1 - Dinâmica do torpedo no plano horizontal

Um dos testes a ser efetuado no protótipo consta da Figura 5.2.

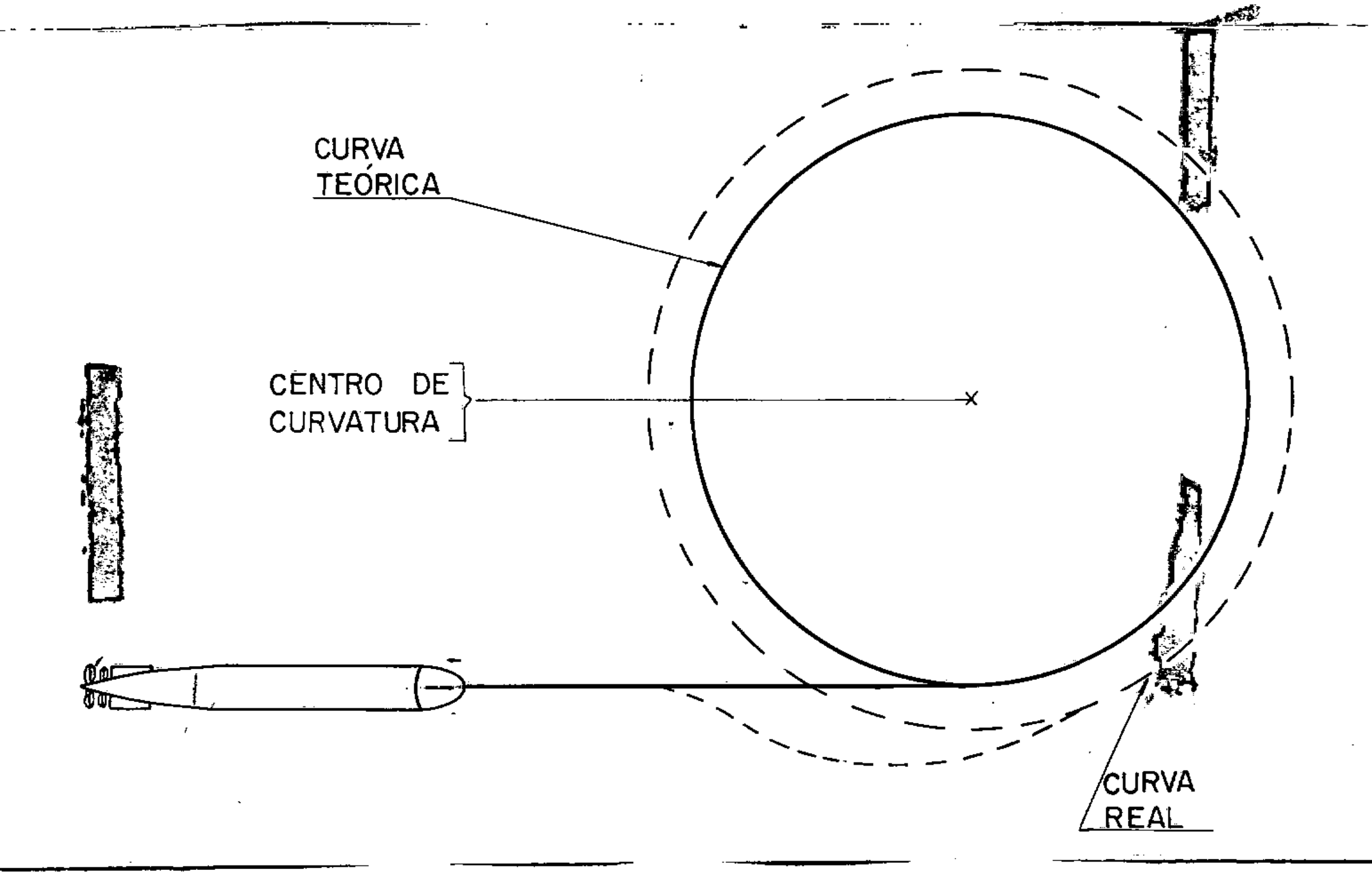


Fig. 5.2 - Teste I do protótipo

O teste I tem por finalidade obter valores reais das variáveis u, v, r. O objetivo principal desta experiência reside na obtenção de curvas de erros relacionadas com a variável δ.

Com estas curvas e conhecendo δ, pode-se determinar o erro e corrigi-lo, independente da realimentação do sistema.

O teste II a ser efetuado tem a finalidade de verificar o desempenho do protótipo, na trajetória de pontos em alinhamento, "Beam Rider Course". A Figura 5.3 mostra sucintamente este teste

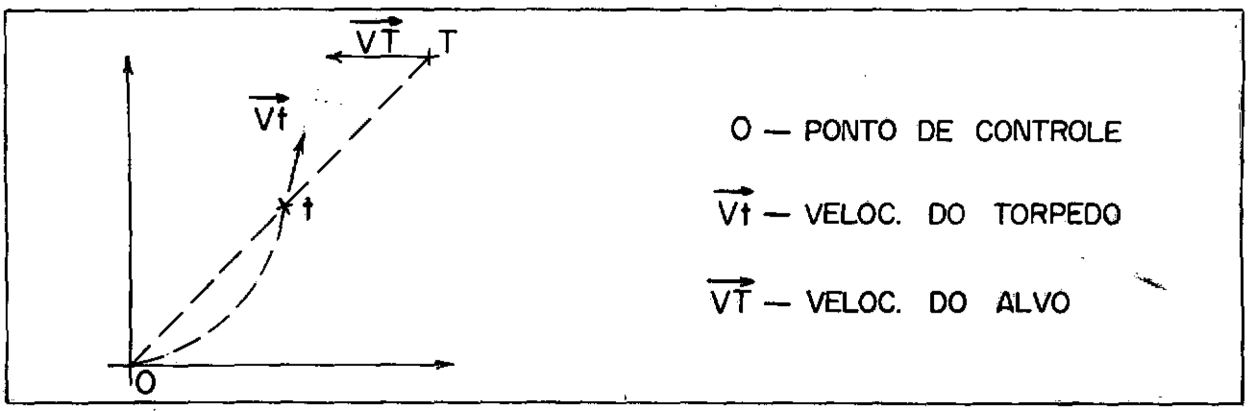


Figura 5.3 - Teste II do protótipo

5.3 - CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo será obtido de um veículo submarino de corrida reta existente, transformando-o em um veículo telecomandado, com velocidade e alcance aceitáveis, de forma a ser testado e permitir uma aplicação militar.

A transformação em pauta, não poderá acarretar modificações na localização do centro de gravidade original, evitando, deste modo variações na estabilidade do torpedo, quando em movimento.

A transformação, será basicamente:

a) troca de giroscópio existente por uma plataforma inercial, composta de três "single-axis-gyro" dispostos ortogonalmente.

b) instalação de circuitos eletrônicos, para receber sinais externos de comando e controlar os movimentos dos lemes e profundores.

c) instalação de servo-motores e dispositivos de ar comprimido com potência suficiente para movimentar as superfícies de controle.

d) adaptação de um sistema de fio isolado externamente ou, fibra ótica, que sirva de meio para transmissão de sinais, de uma central fixa ou móvel e o veículo tele-comandado.

O diaframa de blocos deste veículo tele-comandado, consta da Figura 5.4.

A substituição do giroscópio existente por uma plataforma inercial possibilitará, além da maior precisão, o registro do rumo durante a corrida, melhor controle nas variações de pitch e roll. Este controle, permitirá uma trajetória mais tensa e corrida mais precisa.

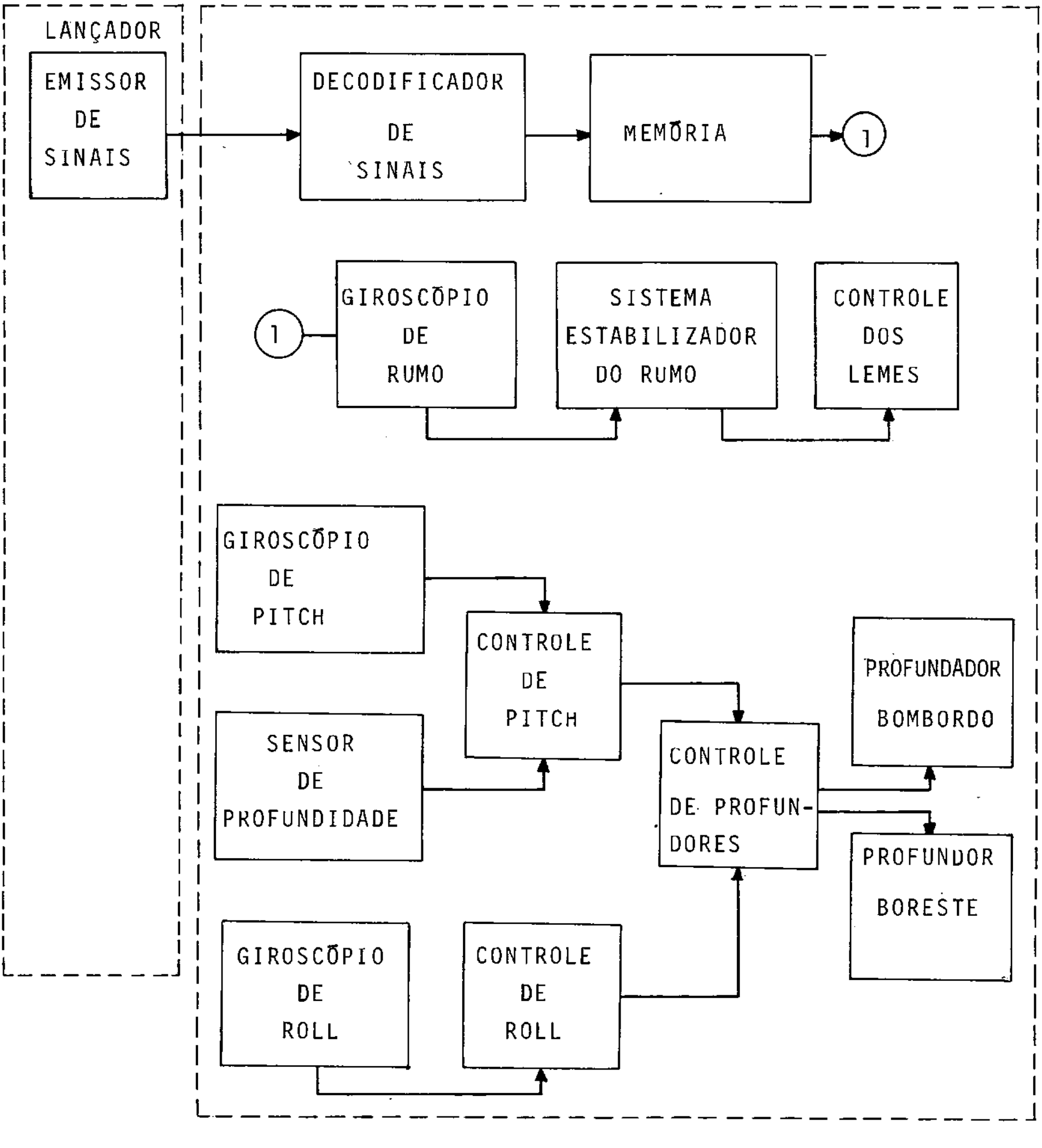


Fig. 5.4 - Diagrama de blocos

Os circuitos eletrônicos serão simples e controlarão os lemes em uma das cinco posições:

. Leme e meio;

. Leme 1ª posição BB;

. Leme todo a BB;

. Leme 1ª posição BE;

. Leme todo a BE.

O esquema do circuito de controle, de lemes,consta da Figura 5.6.

O sinal elétrico ou de luz monocromática indicará o valor do rumo pela largura de faixa da onda.

Os servo-motores ou dispositivos de ar comprimido comandados por"spur valve"comandarão superfícies de controle.

Este sistema substituirá o sistema original que fornece apenas três posições aos lemes; a meio, todo a Boreste ou todo a Bombordo. Com esta modificação o rumo que variava senoidamente, apresentará um amortecimento, proporcional à sua deflexão.Com um amortecimento eficaz teremos uma trajetória mais rígida e consequentemente um tiro mais preciso.

O inconveniente desta substituição será a inclusão de peças frágeis e cujo preço e custo de manutenção será superior ao original.

O sistema de plataforma inercial consta do Capítulo IV deste estudo, sendo mostrado na Figura 5.5, o diagrama de blocos do "Single axis Plataform".

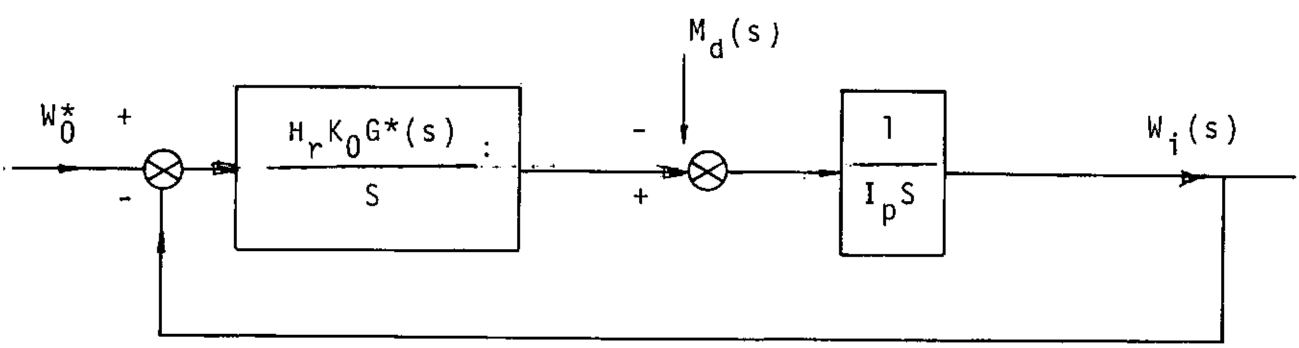


Fig. 5.5 - Diagrama de blocos do "Single-axisgyro"

O termo W_0^* será diferente de zero apenas no giroscópio de rumo que recebe sinais externos.

O ângulo de roll não será modificado sendo que os comandos para mudar a profundidade de corrida, serão introduzidos no pressostato indicador da profundidade. O giroscópio de pitch será utilizado apenas para uma posterior estabilização do veículo na profundidade determinada, não recebendo, como o giroscópio de roll sinais externos.

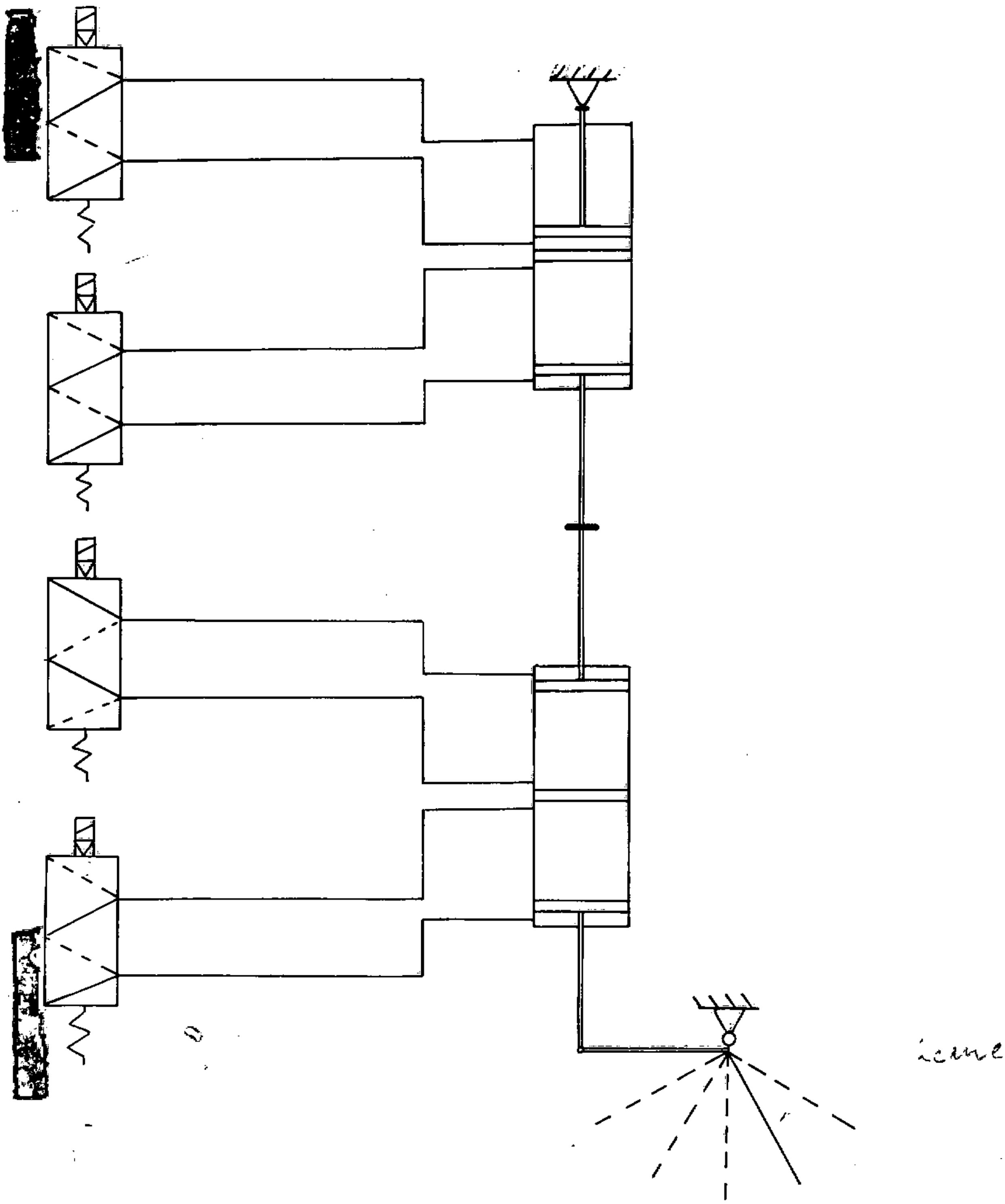


Fig. 5.6 - Circuito pneumático de controle de lemes

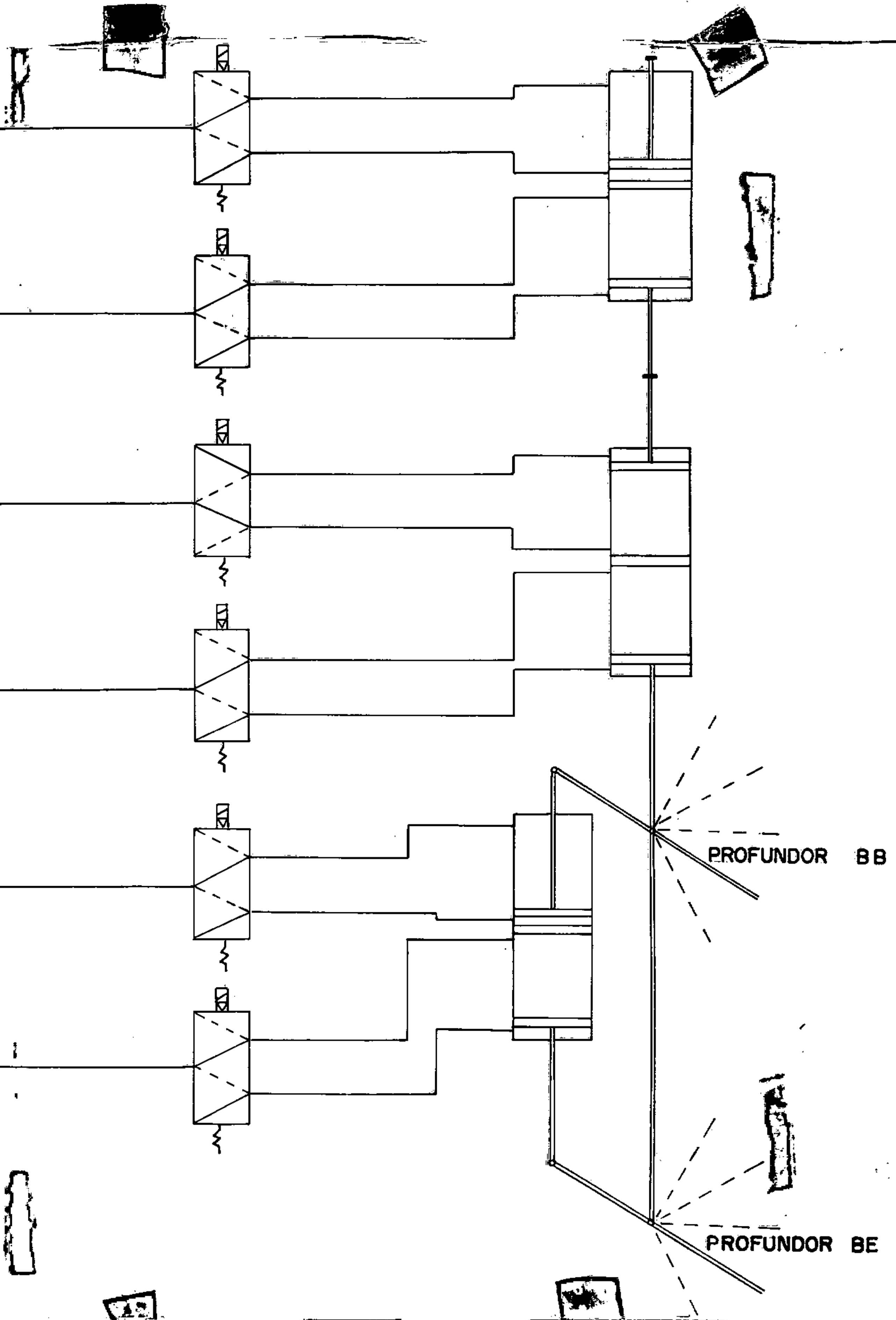


Fig. 5.7 - Circuito pneumático do controle dos profundores

As dimensões reduzidas das superfícies de controle verticais do protótipo não serão modificadas tendo em vista que a manobrabilidade deste protótipo é superior a vários alvos de superfície. Caso fosse tentado uma ampliação destas superfícies, uma das consequências seria a desestabilização do torpedo.

O giroscópio de roll indicará a ocorrência de movimentos de rotação em relação ao eixo de simetria.

O giroscópio de pitch também emitiria sinais para controle dos profundores.

Pela Figura 5.4 observa-se que os sinais para correção e controle destes movimentos (roll e pitch) se superpõem para comandar os dois profundores em diferentes inclinações. A Figura 5.7 mostra esquema de um circuito pneumático para controle e comando dos profundores.

O sistema de fio instalado no torpedo será do tipo A como definido no Capítulo 1.

A Figura 5.8 mostra as duas bobinas de fio a serem instaladas no tubo e no torpedo, sendo importante frizar que o fio desenrola-se de dentro para fora, em virtude de ser esta, a forma que permite a maior velocidade de saída.

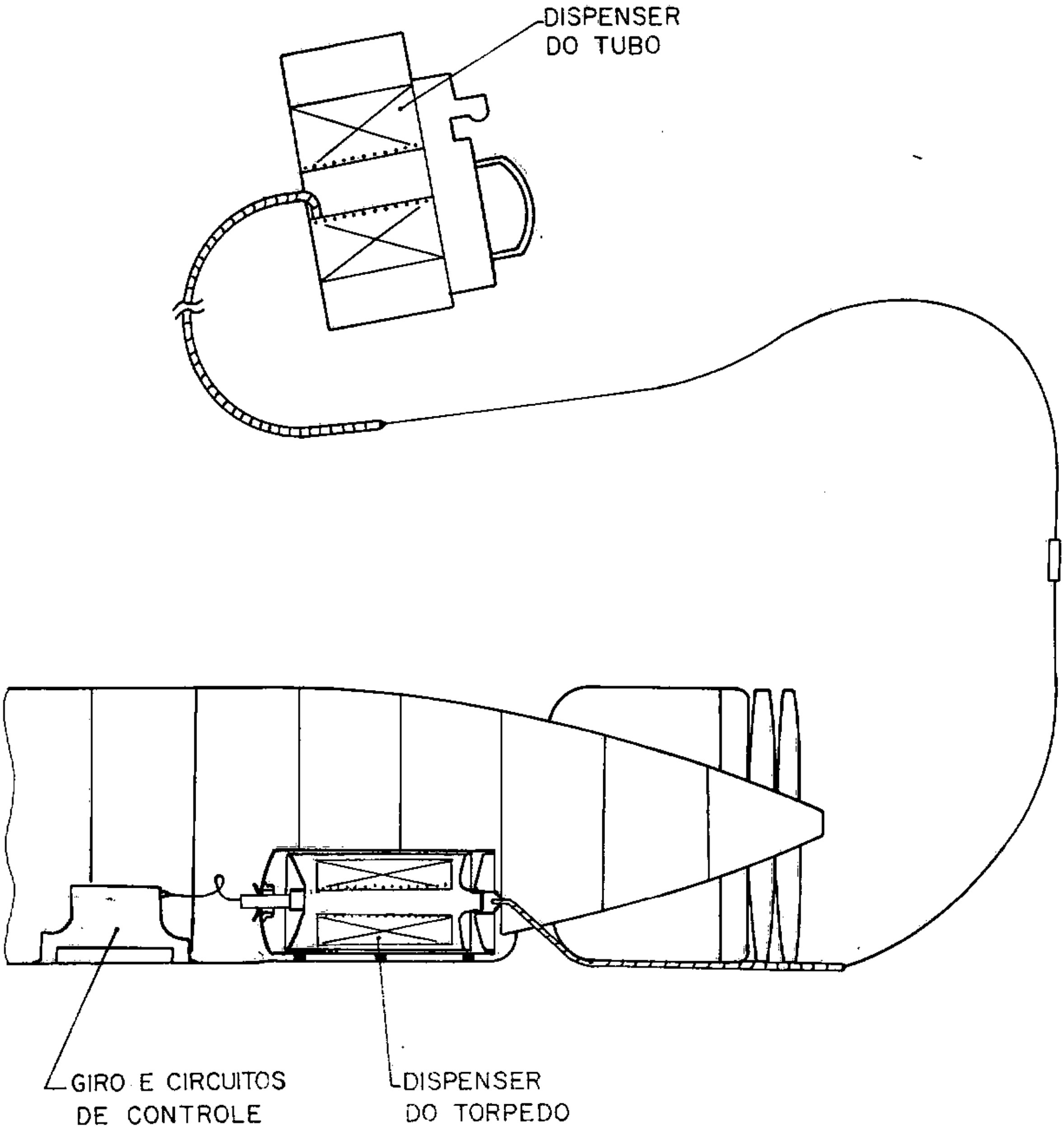


Fig. 5.8 - Bobinas de fio para comando

Fig. 5.9 - Corte longitudinal do protótipo

A Figura 5.9 mostra o corte esquemático em um protótipo, proporcionando detalhes, para a instalação dos equipamentos eletrônicos que efetuarão o telecomando.

5.4 - LANÇAMENTO POR SUBMARINO

O lançamento por submarino poderá utilizar impulsão em tubos de 21 polegadas ou lançamentos "Swimming out" em tubos de diâmetro superior a 23 polegadas. Neste último caso, um especial cuidado deve ser tomado para evitar que a baixa velocidade de saída do tubo, possa causar o excessivo mergulho do torpedo, e sua posterior perda.

O lançamento por impulsão deve ser executado conforme tabelas de lançamento do navio, em um tubo testado e calibrado antes do lançamento.

Por analogia a outros veículos tele-comandados,instala-se na culatra do tubo lançador uma bobina de 2 km de fio e no torpedo uma outra bobina com 6 km de fio. Um tubo flexível, fixo na culatra do tubo lançador protegerá o fio, condutor de sinais, nas proximidades do submarino, evitando que o atrito com a comporta e partes do submarino, possa desencapá-lo, avariando-o.

A Figura 5.10 mostra um corte esquemático do tubo de um submarino indicando duas fases do lançamento do torpedo.

A atitude do lançador por ocasião do disparo, poderá, conforme o caso, indicar valores fora da realidade, como um tiro torpédico de lançador com trim para baixo. Neste caso a profundidade a ser adquirida pelo torpedo (saco), será maior que a prevista para condições normais. Os registradores devem ser ligados pouco antes da partida do protótipo, de modo a permitir uma gravação de todas e fases de lançamento, evitando computar-se valores irreais.

A melhor forma para o lançamento do protótipo será "Swimming Out", por apresentar menores acelerações. Contudo, no Brasil, tem-se condições de efetuar somente o lançamento por impulsão, que será o utilizado, mesmo com os inconvenientes apontados anteriormente.

5.5 - TESTES DE ACEITAÇÃO

A distribuição de pesos em qualquer veículo que se movimenta, imerso em um meio fluído, pode acarretar modificações na sua estabilidade, tornando-o mais estável ou menos estável, com tendência a sinuseio no plano vertical. No caso particular do torpedo, de um modo geral, tem-se o centro de empuxo coincidente, ou um pouco mais avante ao centro de gravidade, com isto consegue-se amplitudes pequenas no movimento senoidal.

Comparando-se o peso de peças retiradas com o peso das seções instaladas, constata-se que as peças instaladas tem um peso superior, acarretando um deslocamento do C.G. para ré.

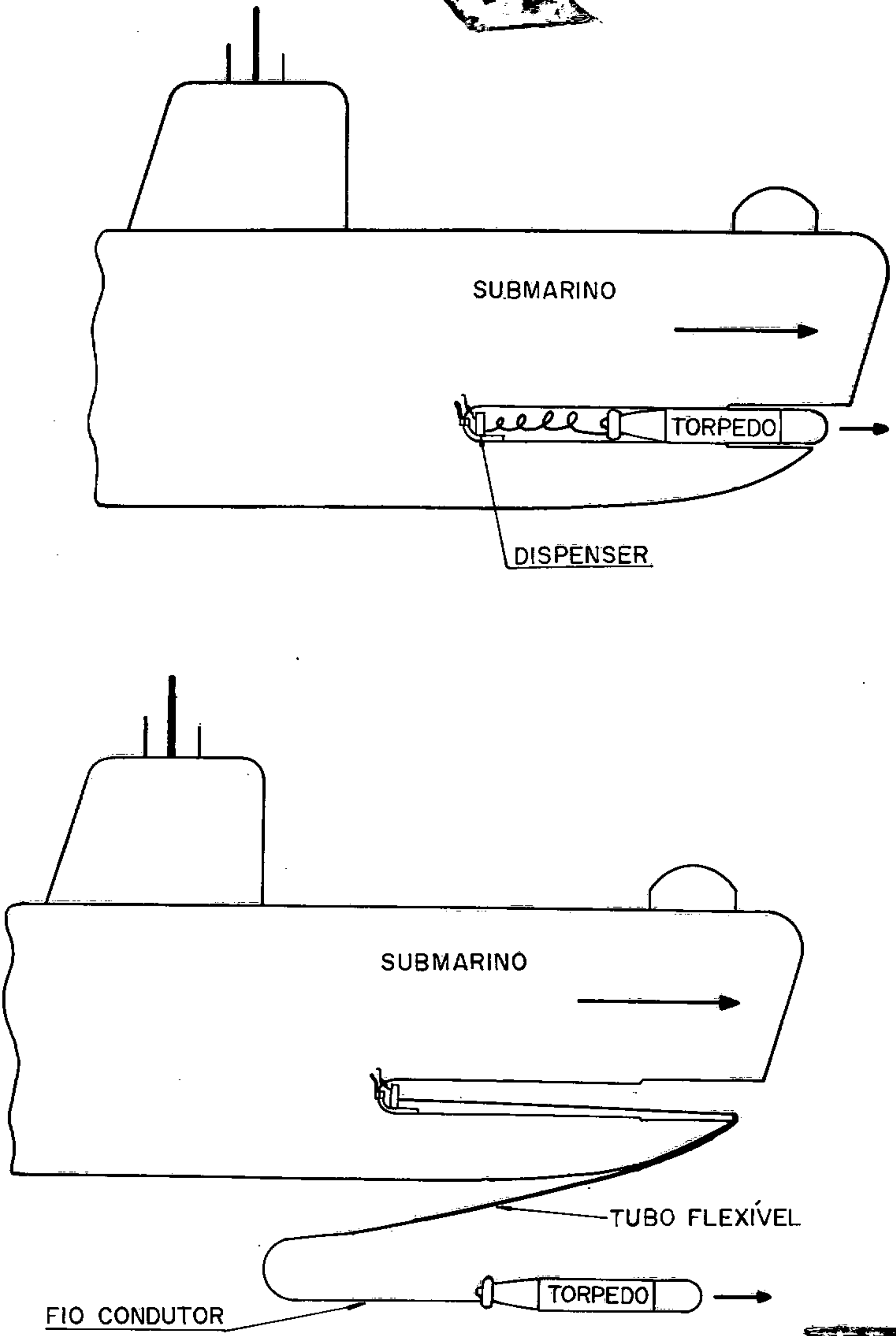


Fig. 5.10 - Fases do lançamento

Tal deslocamento será considerado desprezível, assim como a pequena saliência no cone de ré, no local onde foi instalado o "dispenser".

A implementação deste sistema em um torpedo MK-14, permitirá testá-lo em exercícios, verificando se a sua navegação "Beam Rider Course", dirigirá efetivamente o torpedo sem cabeça acústica, contra um alvo. Neste deslocamento, apenas o sonar do veículo lançador, funcionando em passivo, obterá as informações do alvo e manterá o torpedo em rumo de colisão.

Os testes para verificação final do sistema serão efetuados em um local dotado com sensores de rastreamento, de modo a permitir o acompanhamento total de corrida, possibilitando uma análise e correção do sistema.

ANEXO A

A.1 - MOVIMENTO DE UMA PARTÍCULA

Seja X, Y, Z um sistema de eixos ortogonais com origem O, fixo em um espaço inercial.

Seja $\vec{r}$ o vetor posição do ponto A, como mostrado na Figura 1.

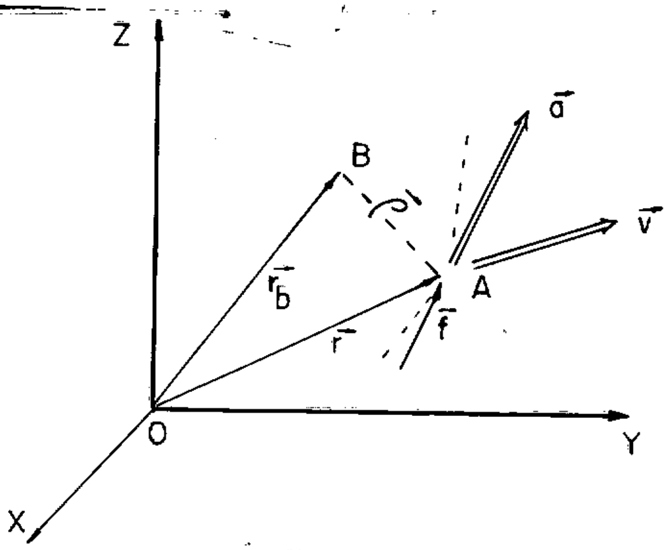


Figura A.1 - Dinâmica de uma partícula

A partícula "A", de massa m, está submetida a uma força externa $\vec{f}$. Esta partícula movimenta-se no espaço, traçando uma curva que fornece a variação do módulo e direção de $\vec{r}$ em determinado espaço de tempo.

$$\vec{v} = \frac{d}{dt}\vec{r} = \dot{\vec{r}} \tag{A.1}$$

$$\vec{a} = \frac{d}{dt}\vec{v} = \dot{\vec{v}} = \ddot{\vec{r}} \tag{A.2}$$

$$l = m\vec{v} = m\dot{\vec{r}} \tag{A.3}$$

$$\vec{f} = m\vec{a} = \frac{d}{dt}(m\dot{\vec{r}}) = \dot{\vec{\ell}} \qquad (A.4)$$

$$\vec{m}_o = \vec{r} \times \frac{d}{dt}(m\dot{\vec{r}}) \qquad (A.5)$$

h_o - momento angular de uma partícula em relação a O:

$$\vec{h}_o = \vec{r} \times \vec{\ell} = \vec{r} \times m\dot{\vec{r}} \qquad (A.6)$$

$$\dot{\vec{h}}_o = \dot{\vec{r}} \times m\dot{\vec{r}} + \vec{r} \times \frac{d}{dt}(m\dot{\vec{r}}) = \vec{r} \times \frac{d}{dt}(m\dot{\vec{r}}) \qquad (A.7)$$

$$\vec{m}_o = \dot{\vec{h}}_o \qquad (A.8)$$

Para um ponto arbitrário B, tem-se:

$$\vec{r} = \vec{r}_B + \vec{\rho} \qquad (A.9)$$

$\vec{\rho}$ - vetor posição da partícula X em relação ao ponto B.

$$\vec{m}_B = \vec{\rho} \times \vec{f} = \vec{\rho} \times m\ddot{\vec{r}}$$

$$\vec{m}_B = \frac{d}{dt}(\vec{\rho} \times m\dot{\vec{r}}) - \dot{\vec{\rho}} \times m\dot{\vec{r}} \qquad (A.10)$$

$$\vec{h}_B = \vec{\rho} \times m\dot{\vec{r}}$$

$$\dot{\vec{h}}_B = \vec{m}_B + \dot{\vec{\rho}} \times m\dot{\vec{r}}$$

$$\vec{m}_B = \dot{\vec{h}}_B + m(\dot{\vec{r}}_B \times \dot{\vec{r}}) \qquad (A.11)$$

Se pelo menos uma das relações abaixo for satisfeita:

a) O ponto B está fixo no espaço inercial. $\vec{r}_B = 0$

b) Os pontos A e B têm a mesma velocidade. $\dot{\vec{r}}_B = \dot{\vec{r}}$

c) A velocidade de A e B são paralelas. $\dot{r}_B // \dot{\vec{r}}$

$$\vec{m}_B = \dot{\vec{h}}_B \tag{A.12}$$

A.2 - MOVIMENTO DE UM SISTEMA DE PARTÍCULAS

Considera-se um sistema de n-partículas como mostra a Figura (2.A) e um referencial inercial como definido na seção anterior.

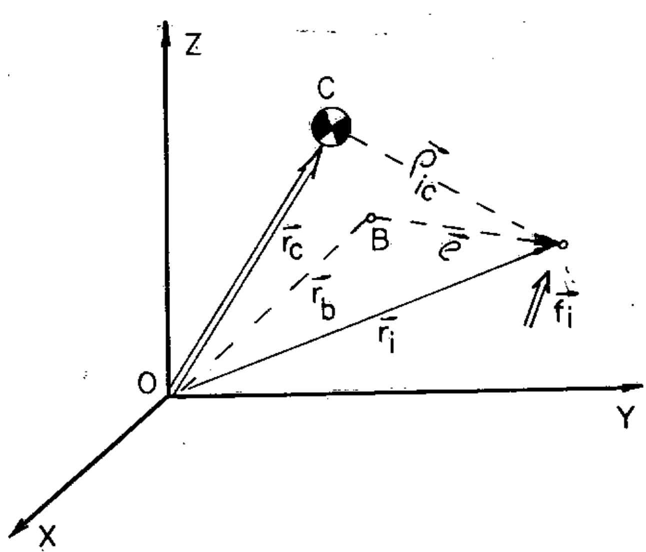


Figura A.2 - Dinâmica de um sistema de partículas

m_i, $\vec{r}_i$, $\vec{f}_i$ simbolizam a massa, o vetor posição, a força externa de n-partículas (i = 1, 2, 3, ..., n).

$\vec{f}_{ij}$ simboliza as forças internas entre as partículas i e j respectivamente

Para um sistema de n-partículas tem-se:

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{f}_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \vec{f}_{ij} = \sum_{i=1}^{n} m_i \ddot{\vec{r}}_i \qquad (A.13)$$

Por hipótese considera-se as forças internas em equilíbrio:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} m_i \ddot{\vec{r}}_i = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^{n} m_i \dot{\vec{r}}_i \qquad (A.14)$$

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} (\vec{L}) \qquad (A.15)$$

F - resultante das forças externas

L - resultante dos momentos lineares

$$m\vec{r}_c = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i \qquad (A.16)$$

$\vec{r}_c$ - vetor posição do ponto C (Centro de Massa do Sistema)

$$\vec{r}_i = \vec{r}_c + \vec{\rho}_{ic} \qquad (A.17)$$

$$\vec{M}_o = \sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i \times \frac{d}{dt} (m_i \dot{\vec{r}}_i) \tag{A.18}$$

M_o - momento resultante das forças externas

$$\vec{H}_o = \sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i \times m\dot{\vec{r}}_i + \sum_{i=1}^{n} \vec{r}_i \times \frac{d}{dt} (m\vec{r}_i)$$

$$\vec{M}_o = \dot{\vec{H}}_o \tag{A.19}$$

Considere-se o vetor posição $\vec{r}_B$ conforme mostra a Figura (A.2).

$$\vec{r}_i = \vec{r}_B + \vec{\rho}_i \tag{A.20}$$

$$M_B = \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^{n} \vec{\rho}_i \times m_i \vec{r}_i \right) - \sum_{i=1}^{n} \vec{\rho}_i \times m_i \dot{\vec{r}}_i \tag{A.21}$$

M_B - momento resultante das forças externas em relação ao ponto B.

$$\dot{\vec{H}}_B = \vec{M}_B - \dot{\vec{r}}_B \sum_{i=1}^{n} m_i \dot{\vec{r}}_i$$

$$\dot{\vec{r}}_B = \dot{\vec{r}}_c \tag{A.22}$$

$$\vec{M}_c = \dot{\vec{H}}_c$$

$$\Omega = \Omega_x \hat{i} + \Omega_y \hat{j} + \Omega_z \hat{k}$$

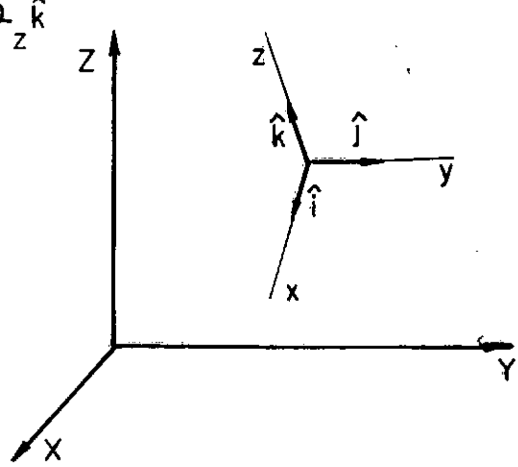


Figura 3.A - Referencial móvel

A.3 - DINÂMICA DE UM CORPO RÍGIDO

Considera-se um corpo rígido como um sistema de partículas em que o vetor posição de uma partícula em relação as outras não varia e que as forças internas satisfaçam a condição:

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \vec{f}_{ij} = 0$$

A condição acima permite que as equações da seção A.2 sejam aplicáveis a um corpo rígido:

$$\vec{F} = m\ddot{\vec{r}}_c$$

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}\vec{H} \qquad (A.23)$$

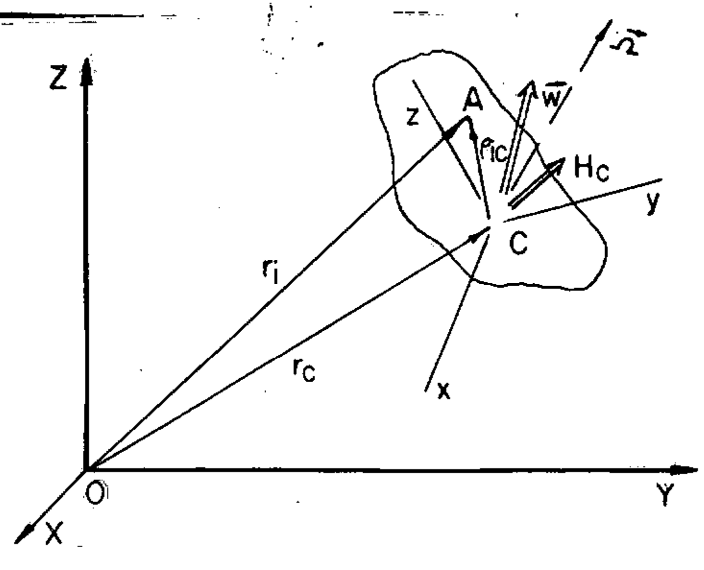


Figura A.4 - Movimento de um corpo rígido

Na Figura A.4 consideramos:

X, Y, Z - sistema de eixos ortogonais fixo no espaço inercial

x, y, z - sistema de eixos ortogonais móvel, cuja origem O está localizada no centro de massa do corpo rígido

$\vec{\Omega}$ - velocidade angular do referencial móvel x, y, z

$\vec{W}$ - velocidade angular do corpo rígido

$\vec{\Omega} = \vec{W}$ - se o referencial móvel estiver fixo no corpo.

$$\vec{v}_i = \dot{\vec{r}}_i = \dot{\vec{r}}_c + \vec{W} \times \vec{\rho}_{ic} \qquad (A.24)$$

$$\vec{h}_i = m_i \dot{\vec{r}}_i = m_i \dot{\vec{r}}_c + m_i \vec{W} \times \vec{\rho}_{ic} \qquad (A.25)$$

$$\vec{h}_c = \vec{\rho}_{ic} \times m_i \dot{\vec{r}}_i$$

$$\vec{h}_c = \vec{\rho}_{ic} \times m_i \dot{\vec{r}}_c + \vec{\rho}_{ic} \times (m_i \vec{W} \times \vec{\rho}_{ic}) \tag{A.26}$$

h_c - momento angular da partícula i em relação a c

$$\vec{H}_c = \Sigma \vec{h}_c = (\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{\rho}_{ic}) \times \dot{\vec{r}}_c + \sum_{i=1}^{n} \vec{\rho}_{ic} \times (m_i \vec{W} \times \vec{\rho}_{ic})$$

H_c - momento angular de um corpo rígido em relação a c.

$$\vec{H}_c = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{\rho}_{ic} \times (\vec{W} \times \vec{\rho}_{ic}) \tag{A.27}$$

$$\vec{H}_c = H_x \hat{i} + H_y \hat{j} + H_z \hat{k}$$

$$\vec{\rho}_{ic} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$$

$$\vec{W} = W_x \hat{i} + W_y \hat{j} + W_z \hat{k} \tag{A.28}$$

$$H_x = I_{xx} W_x - I_{xy} W_y - I_{zx} W_z$$

$$H_y = I_{yy} W_y - I_{yz} W_z - I_{xy} W_x$$

$$H_z = I_{zz} W_z - I_{zx} W_x - I_{yz} W_y \tag{A.29}$$

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^{n} m_i (y^2 + z^2)$$

$$Y_{yy} = \sum_{i=1}^{n} m_i (x^2 + z^2)$$

$$I_{zz} = \sum_{i=1}^{n} m_i (x^2 + y^2)$$

$$Y_{xy} = \sum_{i=1}^{n} m_i \; x_Y \qquad (A.30)$$

$$I_{yz} = \sum_{i=1}^{n} m_i \; y_Z$$

$$I_{xz} = \sum_{i=1}^{n} m_i \; x_Z \qquad (A.31)$$

$$\dot{\vec{H}} = (\dot{H}_x + \Omega_y H_z - \Omega_z H_y)\hat{i} + (\dot{H}_y + \Omega_z H_x - \Omega_x H_z)\hat{j} +$$

$$+ (\dot{H}_z + \Omega_x H_y - \Omega_z H_x)\hat{k} \qquad (A.32)$$

Considerando $\vec{M}$, $\vec{F}$ e $\ddot{\vec{r}}_c$ na forma

$$\vec{M} = M_x\hat{i} + M_y\hat{j} + M_z\hat{k}$$

$$\vec{F} = F_x\hat{i} + F_y\hat{j} + F_z\hat{k}$$

$$\ddot{\vec{r}}_c = a_x\hat{i} + a_y\hat{j} + a_z\hat{k} \qquad (A.33)$$

$$M_x = \frac{d}{dt}(I_{xx} W_x - I_{xy} W_y - \dot{I}_{zx} W_z) + \Omega_y(I_{zz} W_z - I_{zx} W_x -$$

$$- I_{yz} W_y) - \Omega_z(I_{yy} W_y - I_{yz} W_z - I_{zy} W)$$

$$M_y = \frac{d}{dt}(I_{yy} W_y - Y_{yz} W_z - I_{xy} W_x) + \Omega_z(I_{xx} W_x - I_{xy} W_y -$$

$$- I_{zx} W_z) - \Omega_x(I_{zz} W_z - I_{zx} W_x - I_{yz} W_y)$$

$$M_z = \frac{d}{dt}(I_{zz} W_z - I_{zx} W_x - I_{yz} W_y) + \Omega_x(I_{yy} W_y - I_{yz} W_z -$$

$$- I_{xy} W_x) - \Omega_y(I_{xx} W_x - I_{xy} W_y - I_{zx} W_z) \qquad (A.34)$$

A.4 - SISTEMA DE COORDENADAS FIXO NO CORPO EM MOVIMENTO

Seja x, y, z um sistema de coordenadas fixo no corpo rígido e movimentando-se com ele.

$$\vec{W} = \vec{\Omega}$$

A letra B indicará que a variável está referida ao sistema móvel fixo no corpo rígido.

$$(M_x)_B = I_{xx} \dot{W}_x - (I_{yy} - I_{zz}) W_y W_z - I_{xy}(\dot{W}_y - W_x W_z) -$$

$$- I_{yz}(W_y^2 - W_z^2) - I_{zx}(\dot{W}_z + W_x W_y)$$

$$(M_y)_B = I_{yy} \dot{W}_y - (I_{zz} - I_{xx}) W_z W_x - I_{yz}(\dot{W}_z - W_y W_x) -$$

$$- I_{zx}(W_z^2 - W_x^2) - I_{xy}(\dot{W}_x + W_y W_z)$$

$$(M_z)_B = I_{zz} \dot{W}_z - (I_{xx} - I_{yy}) W_x W_y - I_{zx}(\dot{W}_x - W_z W_y) -$$

$$- I_{xy}(W_x^2 - W_y^2) - I_{xy}(\dot{W}_y - W_z W_x) \qquad (A.35)$$

Caso o sistema de eixos x, y, z seja escolhido de modo que os produtos de inércia sejam nulos tem-se:

$$I_{xz} = I_{yz} = I_{zx} = 0$$

O sistema de eixos ortogonais será denominado, sistema de "Eixos Principais de Inércia" e os momentos de inércia em relação a estes eixos (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) serão denominados, "momentos principais de inércia" (I_x, I_y, I_z).

As equações (A.35) podem ser simplificadas:

$$(M_x)_B = I_x \dot{W}_x - (I_y - I_z) W_y W_z$$

$$(M_y)_B = I_y \dot{W}_y - (I_z - I_x) W_z W_x$$

$$(M_z)_B = I_z \dot{W}_z - (I_x - I_y) W_x W_y \qquad (A.36)$$

As equações A.36 são conhecidas como equações de Euler.

A.5 - SISTEMA DE COORDENADAS EM MOVIMENTO

Estuda-se agora um sistema de coordenadas móveis, que satisfaça as condições:

a) A origem do sistema móvel fica no centro de massa do corpo rígido

b) $\vec{\Omega} \neq \vec{W}$

c) Os momentos e produtos de inércia do corpo rígido em relação ao sistema móvel ficam invariáveis.

A letra G indicará que a variável está referida a este sistema.

Das equações (A.34) e (A.35) obtem-se para este sistema móvel, as relações:

$$(M_x)_G = I_{xx}\,\dot{W}_x - I_{xy}\,\dot{W}_y - I_{xz}\,\dot{W}_z - \Omega_z(I_{yy}\,W_y - I_{yz}\,W_z -$$

$$- I_{yx}\,W_x) + \Omega_y(I_{zz}\,W_z - I_{zx}\,W_x - I_{zy}\,W_y)$$

$$(M_y)_G = I_{yy}\,\dot{W}_y - I_{yz}\,\dot{W}_z - I_{yx}\,\dot{W}_x - \Omega_x(I_{zz}\,W_z - I_{xz}\,W_x -$$

$$- I_{zy}\,W_y) + \Omega_z(I_{xx}\,W_x - I_{zy}\,W_y - I_{xz}\,W_z)$$

$$(M_z)_G = I_{zz}\,\dot{W}_z - I_{zx}\,\dot{W}_x - I_{zy}\,\dot{W}_y - \Omega_y(I_{xx}\,W_x - I_{xy}\,W_y -$$

$$- I_{xz}\,W_z) + \Omega_x(I_{yy}\,W_y - I_{yz}\,W_z - I_{yx}\,W_x) \qquad (A.37)$$

Caso x, y, z sejam os eixos principais de inércia do corpo, as equações de Euler (A.36) serão escritas na forma abaixo:

$$I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$$

$$(M_x)_G = I_x\,\dot{W}_x - \Omega_z\,I_y\,W_y + \Omega_y\,I_z\,W_z$$

$$(M_y)_G = I_y \dot{W}_y - \Omega_x I_z W_z + \Omega_z I_x W_x$$

$$(M_z)_G = I_z \dot{W}_z - \Omega_y I_x W_x + \Omega_z I_y W_y \qquad (A.38)$$

ANEXO B

B.1 - VELOCIDADE ANGULAR NO SISTEMA B

No sistema B em estudo os eixos coordenados (x, y, z) estão fixos no corpo e determinam no instante inicial o ponto O, origem do sistema.

O ponto O, que coincide com o centro de massa do corpo, está fixo no espaço inercial, não impedindo o movimento de rotação do corpo rígido.

As equações (A.35), (A.36) e (A.37) do anexo A são as equações do movimento que poderão ser empregados neste caso. Utiliza-se também as relações:

$$W_x = \dot{\psi} \ , \ W_y = \dot{\Theta} \ , \ W_z = \dot{\phi} \qquad (B.1)$$

sendo ψ, Θ, ϕ conhecidos como ângulos de Euler.

Os dois sistemas, o fixo (X, Y, Z) e o móvel (x, y, z) estão coincidentes inicialmente.

A posição de um corpo rígido poderá ser determinada em três rotações do sistema de coordenadas móveis.

A primeira rotação com ângulo ψ, será aplicada em relação ao eixo Z, sendo o vetor velocidade angular:

$$\vec{W}_1 = 0\bar{i}_1 + 0\bar{j}_1 + \dot{\psi}k_1 \qquad (B.2)$$

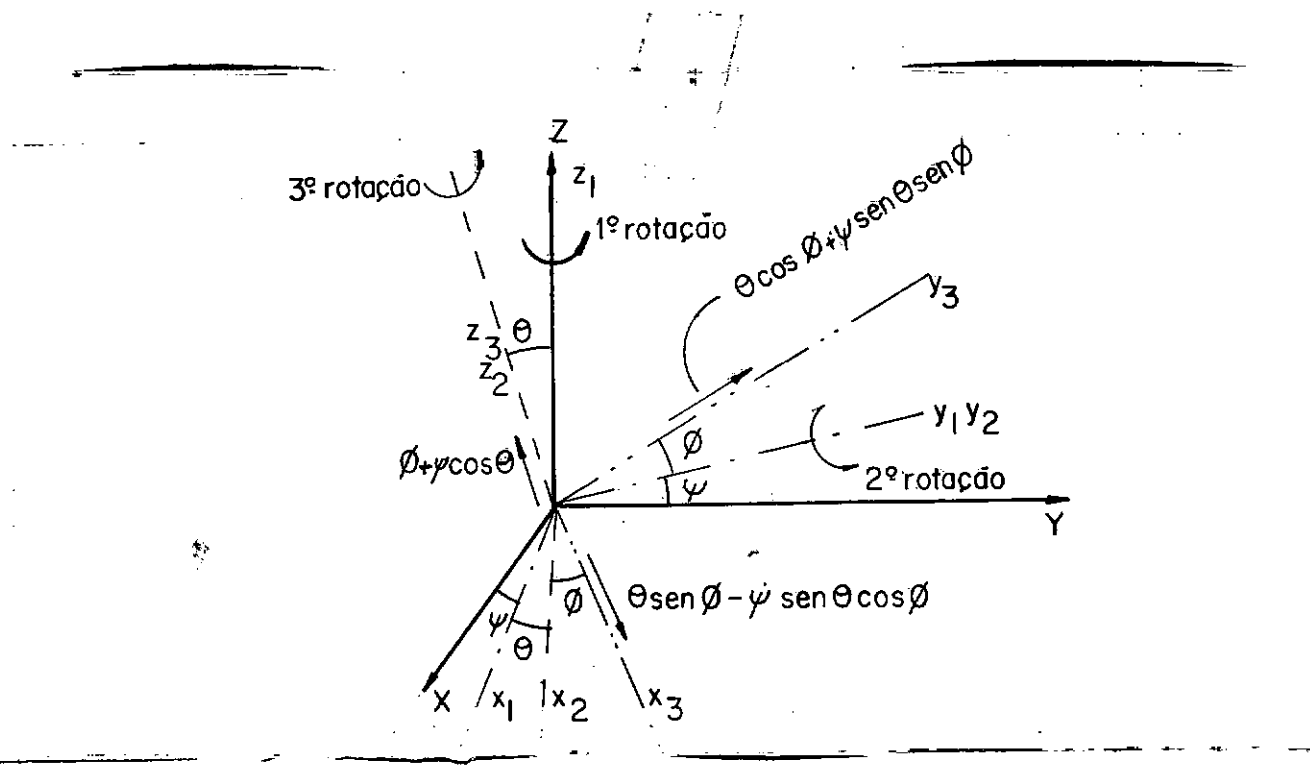


Figura B.1 - Condição inicial dos sistemas (X, Y, Z) e (x, y, z)

A segunda rotação, com um ângulo Θ, será aplicada em relação ao eixo y_1, sendo o vetor velocidade angular referente a estas duas posições:

$$\vec{W}_2 = (\dot{\psi}\ \mathrm{sen}\ \Theta)\ \hat{i}_2 + \dot{\Theta}\hat{j}_2 + \dot{\psi}\cos\Theta\hat{k}_2 \qquad \text{(B.3)}$$

A terceira rotação, com um ângulo ϕ, será aplicada em relação a z_2, sendo o vetor velocidade angular $\vec{W}$ do corpo:

$$W = (\dot{\Theta}\ \mathrm{sen}\ \phi - \dot{\psi}\ \mathrm{sen}\ \Theta\cos\phi)\ \hat{i} + (\dot{\Theta}\cos\phi + \dot{\psi}\ \mathrm{sen}\ \Theta\ \mathrm{sen}\ \phi)\hat{j} +$$

$$+ (\dot{\phi} + \dot{\psi}\cos\Theta)\hat{k} \qquad \text{(B.4)}$$

A mudança na ordem das rotações acarretará resultados incorretos, como pode ser verificado fácilmente.

B.3 - EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Considera-se os eixos móveis sendo os eixos principais de inércia do corpo rígido. Estuda-se o sistema B e sistema G de coordenadas.

O eixo Z será escolhido de tal forma que confundir-se-a com o eixo de simetria. Logo:

a) Simetria no sistema B

$$I_x = I_y = I$$

Substituindo-se (B.4) em (A.36), segue:

$$(M_x)_B = I_z(\dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \Theta)\,(\dot{\Theta} \cos \phi + \dot{\psi} \operatorname{sen} \Theta \operatorname{sen} \phi) +$$

$$+ I\{\ddot{\Theta} \operatorname{sen} \phi - \ddot{\psi} \operatorname{sen} \Theta \cos \phi - 2\,\dot{\psi}\,\dot{\Theta} \cos \Theta \cos \phi -$$

$$- \dot{\psi}^2 \operatorname{sen} \Theta \cos \Theta \operatorname{sen} \phi\}$$

$$(M_y)_B = - I_z(\dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \Theta)\,(\dot{\Theta} \operatorname{sen} \phi - \dot{\psi} \operatorname{sen} \Theta \cos \phi) +$$

$$+ I\{\ddot{\Theta} \cos \phi + \ddot{\psi} \operatorname{sen} \Theta \operatorname{sen} \phi + 2\,\dot{\psi}\,\dot{\Theta} \cos \Theta \operatorname{sen} \phi -$$

$$- \dot{\psi}^2 \operatorname{sen} \Theta \cos \Theta \cos \phi\}$$

$$(M_z)_B = I_z(\ddot{\phi} + \ddot{\psi} \cos \Theta - \dot{\psi}\,\dot{\Theta} \operatorname{sen} \Theta) \qquad (B.7)$$

A seguinte ordem de rotações será usada ($Z \rightarrow Y \rightarrow X$) com os ângulos ($\psi \rightarrow \Theta \rightarrow \phi$) respectivamente.

B.2 - VELOCIDADE ANGULAR NO SISTEMA G

Usa-se o sistema G quando o corpo rígido tem simetria radial. Neste caso escolhe-se OZ para eixo de simetria, sendo suficiente apenas duas rotações no sistema de coordenadas:

ψ - rotação em relação ao eixo Z

Θ - rotação em relação ao eixo y_1

$$(\Omega_x)_G = - \dot{\psi} \text{ sen } \Theta$$

$$(\Omega_y)_G = \dot{\Theta}$$

$$(\Omega_z)_G = \dot{\psi} \cos \Theta \qquad (B.5)$$

A velocidade ângulo $(\vec{W})_G$ de um corpo rígido é idêntica a $(\vec{\Omega})_G$, somada ao termo referente a componente Z:

$$(W_z)_G = \dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \Theta \qquad (B.6)$$

A letra G indica o sistema caracterizado por $\vec{\Omega} \neq \vec{W}$, momentos e produtos de inércia do corpo inconvenientes em relação a sistema de coordenadas "G".

b) Pela simetria no sistema G:

$$(M_x)_G = I_z(\dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \Theta)\, \dot{\Theta} - I(\ddot{\psi} \operatorname{sen} \Theta + 2\, \dot{\Theta}\, \dot{\psi} \cos \Theta)$$

$$(M_y)_G = I_z(\dot{\phi} + \dot{\psi} \cos \Theta)\, \dot{\psi} \operatorname{sen} \Theta + I(\ddot{\Theta} - \dot{\psi}^2 \operatorname{sen} \Theta \cos \Theta)$$

$$(M_z)_G = I_z(\ddot{\phi} + \ddot{\psi} \cos \Theta - \dot{\psi}\, \dot{\Theta} \operatorname{sen} \Theta) \qquad (B.8)$$

As expressões (B.8) poderão ser encontradas também substituindo-se o valor de $\phi = 0$ nas equações (B.7).

B.4 - MOMENTO ANGULAR

A velocidade angular de um corpo rígido pode ser expressa por:

$$\vec{W} = W_x \hat{i} + W_y \hat{j} + W_z \hat{k} \qquad (B.9)$$

Se x, y, z foram posicionados de tal forma a tornarem-se os eixos principais de inércia do corpo, pela equação (A.29) tem-se:

$$\vec{H} = I_x W_x \hat{i} + I_y W_y \hat{j} + I_z W_z \hat{k} \qquad (B.10)$$

De acordo com (A.23) e (A.34):

$$\vec{M} = \frac{d}{dt} \vec{H} = \dot{\vec{H}} + \vec{\Omega} \times \vec{H} \qquad (B.11)$$

Se o eixo móvel está fixo ao corpo, então $\vec{\Omega} = \vec{W}$. (B.11) torna-se:

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}\vec{H} = \dot{\vec{H}} + \vec{W} \times \vec{H} \qquad (B.12)$$

Caso sejam satisfeitas as condições de (B.10):

$$\vec{H} = (I_x \dot{W}_x)\hat{i} + (I_y \dot{W}_y)\hat{j} + (I_z \dot{W}_z)\hat{k} \qquad (B.13)$$

Pode-se afirmar:

a) $\vec{H}$ e $\vec{W}$ são dois vetores que geralmente diferem em módulo e sentido.

b) A velocidade da ponta do vetor representado por $\vec{H}$ será igual em módulo ao momento $\vec{M}$ da força externa em relação a O.

c) Se não há força externa atuando no corpo se M = 0:

$$M = 0 = \frac{d}{dt}\vec{H}$$

ANEXO C

SOLUÇÃO DE EQUAÇÃO DIFERENCIAL POR SÉRIE DE POTÊNCIA

Seja a equação diferencial:

$$\left(\frac{d\rho}{d\Theta}\right)^2 + \rho^2 = L^2\left(\frac{V_t}{V_T}\right)^2 \frac{1}{\operatorname{sen}^4\Theta}$$

É uma equação diferencial de segunda ordem não linear insolúvel no intervalo fechado pelos métodos ordinários.

Expandindo-se ρ por série de Taylor tem-se:

$$\rho = \rho_o + \rho_o'(\Theta - \Theta_o) + \rho_o''\frac{(\Theta-\Theta_o)^2}{2!} + \rho_o''' \frac{(\Theta-\Theta_o)^3}{3\,!} + \ldots \qquad (C.1)$$

ρ' - derivada de ρ em relação a $\rho(\frac{d\rho}{d\Theta})$

ρ_o - condição inicial de ρ.

Θ_o - condição inicial de Θ

A determinação de ρ exige o cálculo de ρ_o, ρ_o', ρ_o'', ρ_o''' a partir de uma condição inicial, neste caso tem-se as condições iniciais:

$$\rho_o = 0$$

$$\Theta_o = \tan^{-1} m \qquad (C.2)$$

Considerando-se

$$K = P \times L \tag{C.3}$$

Substituindo-se (C.2) e (C.3) em (C.1) tem-se a segunda condição de contorno.

$$(\rho_0')^2 = K^2 \csc^4\Theta$$

$$\rho_0' = K \csc^2\Theta \tag{C.4}$$

Considerando-se (C.2) tem-se:

$$\csc^2 \Theta_0 = m^{-2}(m^2 + 1)$$

$$\rho_0' = K\, m^{-2}(m^2 + 1) \tag{C.5}$$

Diferenciando-se novamente (A.1) e aplicando as condições de contorno tem-se a terceira condição de contorno:

$$\rho_0'' = - \frac{2 K^2 \csc^4\Theta_0 \cot\Theta_0}{K \csc^2\Theta_0}$$

$$\rho_0'' = - 2 K \csc^2 \Theta_0 \cot \Theta_0$$

$$\rho_0'' = 2 K\, m^{-3}(m^2 + 1) \tag{C.6}$$

Por raciocínio idêntico:

$$\rho_o''' = -2\,K(-2\,csc^2\,\Theta_o\,cot^2\,\Theta_o - csc^4\,\Theta_o)$$

$$\rho_o''' = -K|csc^2\,\Theta_o(-4\,cot^c\,\Theta_o - 2\,csc^2\,\Theta)|$$

$$\rho_o''' = K\,m^{-4}(1 + m^2)(6 + 2m^2) \qquad (C.7)$$

Continuando-se obtem-se os valores:

Sendo:

$$C = K\,m^{-2}(1 + m^2) \qquad (C.8)$$

$$\rho_o = 0$$

$$\rho_o' = C$$

$$\rho_o'' = -2C\,m^{-1}$$

$$\rho_o''' = C\,m^{-2}(6 + 2\,m^2)$$

$$\rho_o^{IV} = -C\,m^{-3}(24 + 16\,m^2)$$

$$\rho_o^{V} = C\,m^{-4}(120 + 120\,m^2 + 21\,m^4)$$

$$\rho_o^{VI} = -C\,m^{-5}(720 + 960\,m^2 + 282\,m^2) \qquad (C.9)$$

Substituindo-se (C.8) e (C.9) na equação (C.1)tem-se:

$$\rho = K\, m^{-2}(1 + m^2) \left| (\Theta - \Theta_0) - m^{-1}(\Theta - \Theta_0)^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{m^{-2}(6 + 2m^2)\,(\Theta - \Theta_0)^3}{3\,!} - \ldots \right| \qquad (C.10)$$

A equação (C.10) fornece a solução de equação diferencial em pauta por série de potências.

SIMBOLOGIA

a_{ct} - aceleração centrífuga do torpedo

$a_{\ell t}$ - aceleração lateral do torpedo

b - coeficiente de atrito viscoso (giroscópio)

C_D - coeficiente de fricção

C_L - coeficiente de lift

C - coeficiente de viscosidade

D - distância do torpedo ao alvo no instante t = 0

D_t - diâmetro máximo do torpedo

e_m - voltagem na armadura do motor

$\vec{F}$ - resultante força externa que atuam no torpedo

G - índice que representa o sistema giroscópio

G_c - função de transferência

$\vec{H}$ - vetor momento angular

H_r - momento angular do giroscópio

H_x, H_y, H_z - componente do momento angular em relação a $\bar{i}_t$

h - índice que representa o sistema hidrodinâmico

I - índice que representa o sistema inercial

I_{ig}, I_o, I_r - momento de inercia do flutuador (giroscópio) em re lação a x_G, y_G, z_G

$\bar{i}$ - vetor unitário pertencente ao eixo x

i - corrente na armadura do motor

$\bar{j}$ - vetor unitário pertencente ao eixo y

K - componente do momento resultante em relação a $\bar{i}_t$

K_p - coeficiente geométrico determinado experimentalmente

K_1, K_2 - coeficiente de Lamb (longitudinal e transversal)

K_g - coeficiente de elasticidade do giroscópio

K_a - ganho do amplificador

K_f - ganho fixo da malha

K_m - constante de torque (1/b)

K_o - inverso do coeficiente de viscosidade (1/c)

k_1 - coeficiente da força contra eletro motriz

k_e - coeficiente de torque (N.m/Amp)

$\bar{k}$ - vetor unitário pertencente ao eixo Z

L_t - comprimento do torpedo

L - distância do vetor V_T ao ponto de controle no instante t=0

ℓ - índice que representa o sistema profundor esquerdo

C_p - distância do ponto de aplicação da força lateral e origem 0_t

C_f - distância do centro de pressão dos estabilizadores a origem (O_t)

C_0 - valor médio de prismatia coeficiente do torpedo

$\vec{M}$ - momento resultante

M - componente do momento resultante em relação a $\bar{j}_t$

M_t - momento resultante em relação a origem (O_t) do sistema torpedo

M_i - momento aplicado no flutuador através de eixo sensível

M_o^* - momento externo em relação ao eixo de saída

M_r - momento em relação ao eixo do giroscópio z_G

M_p - momento aplicado na plataforma inercial

M_o - momento transmitido ao torque motor

M_{pl} - torque do servo motor

M_d - momento perturbador

m - índice que representa o sistema manobra

N - componente do momento resultante em relação a $\bar{k}_t$

O - origem de sistema de coordenadas ortogonais

p - valor do componente de velocidade radial em relação a $\bar{i}_t$

q - valor do componente de velocidade radial em relação a $\bar{j}_t$

R - resistência da armadura do motor

r - índice que representa o sistema profundor direito

r - componente da velocidade radial em relação a $\hat{k}_t$

$\vec{r}_g$ - vetor posição do C.M. do torpedo em relação a O_t

S_c - superfície molhada do torpedo sem os estabilizadores

S_f - superfície molhada dos lemes

S - índice que representa o sistema submarino

T - índice que representa o sistema alvo

t - índice que representa o sistema torpedo

u - componente da velocidade do torpedo em relação a $\bar{i}_t$

$\vec{V}_t$ - vetor velocidade do torpedo

$\vec{V}_T$ - vetor velocidade do alvo

v - componente da velocidade do torpedo em relação a j_t

X - componente de resultante das forças externas na direção $O_t\ x_t$

X_t - coordenadas de O_t em relação ao sistema inercial

x_g - coordenadas do C.M. do torpedo em relação a O_t

$\vec{W}$ - vetor velocidade angular

$(\vec{W})_G$ - vetor velocidade angular do motor

$(\vec{W})_P$ - vetor velocidade angular da plataforma

$\vec{W}_r$ - vetor velocidade angular do rotor do giroscópio

W_0^* - velocidade angular introduzida para fornecer outra orientação ao giroscópio

Y - componente da resultante das forças externas na direção $0_t\ y_t$

Y_t - coordenada de 0_t em relação ao sistema inercial

y_g - coordenada do C.M. do torpedo em relação a 0_t

Z - componente da resultante das forças externas na direção $0_t\ z_t$

Z_t - coordenada de 0_t em relação ao sistema inercial

Z_1 - distância percorrida pelo alvo em um instante t

z_g - coordenada do C.M. do torpedo em relação ao sistema inercial

β_a - Beta - ângulo de ataque do profundor

γ - gama - ângulo que o vetor V_t forma com a linha de visada

δ - delta - ângulo de ataque do leme

ψ^* - rotação em relação ao eixo z_t

Θ^* - rotação em relação ao eixo y_t ângulos de Euler

ϕ^* - rotação em relação ao eixo x_t

Θ - teta - ângulo entre vetor posição do torpedo e vetor $\vec{V}_T$

ϕ - Phi - ângulo de visada

ϕ_t - ângulo que o vetor $\vec{V}_t$ forma com o vetor $\vec{V}_T$

λ - Lambda - ângulo de rotação do torpedo em um instante Δt

$\vec{\rho}$ - Ro - vetor posição do torpedo em relação ao ponto de controle

ρ_a - densidade de água

ρ_c - raio instantâneo de curvatura

τ_g - Tau - constante de tempo do giroscópio

τ_m - constante de tempo do motor

BIBLIOGRĀFIA

1. ABOKOWITZ, MARTIN A. - *Stability and Motion Control of Ocean Vehicles*. Cambridge, The MIT Press, 1969.

2. D'AZZO - HOUPIS - *Linear Control Systems Analysis and Design*.

3. DORF, RICHARD C. - *Modern Control Systems*. s.l., Addison Wesley, 1976.

4. KENNETH - *Inertial Navigation Britting*. Cambridge, S. ed., 1971.

5. LOCKE, ARTHUR S. - *Guidance*. Princeton, D'Van Nostrand, 1957.

6. MANDEL, PHILIP. - *Water Air Interface Vehicles*. Cambridge, MIT Press, 1973.

7. MARTINS FILHO, PROTASIO DUTRA - *Investigação sobre a Automatização de Aparelhos de Governo*. Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 1978. Tese.

8. MEIROVITCH, LEONARD - *Methods of Analitical Dynamics*. New York, McGraw-Hill, 1970.

9. MERIAN, JAMES L. - *Dynamics*. New York, John Wiley, 1966.

10. MITSUTOMI, T. - *Translations on Aeronautical and Navigation Electronics*. s.n.t.

11. Principles of Naval Architecture. S.l., SNAME, 1967.

12. ROARK, R. J. & YOUNG, W. C. - *Formulas for Stress and Strain*. s.l., s. ed., 1975.

13. STRUMPF, ALBERT - *Equation for Motion of a Submerged Body*. s.l., Wilt Narying Neass Stevens Institute, Davidson Laboratory, 1960. Report nº 771.

14. TENOT, A. - *Gyroscopie. Scientifique et Technique*, Albert Blanchard, 1964.

15. VEIGA, J. P. C. - *Hidrodinâmica Básica e Aplicada*. São Paulo, UPUSP, 1980.