IPEN XV COPINAVAL Meeting
Montevideo - Uruguay
11 -14 Nov. 1997

INSTITUTO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL

"Proposta de Sistema de Medição de Pás de Hélice"

***Toshi-ichi Tachibana**
****Alexandre de Paula Januário**

RESUMO

O objetivo deste trabalho está em dar melhores condições técnicas para estaleiros de pequeno porte na confecção de hélices, visando o seu barateamento, havendo nesta etapa a preocupação com o controle dimensional das pás, para que haja a garantia do desempenho previsto no projeto do hélice.

ABSTRACT

The purpose of this paper is provide advances technical conditions to the small shipyard in the manufacture of the propeller, to aim at fail of it price, in this stage the preoccupation is relative to the blade dimension control, to guarantee the efficiency of in the propeller design.

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho consiste em dar melhores condições técnicas para estaleiros de pequeno porte na confecção de hélices, visando o seu barateamento, havendo nesta etapa a preocupação com o controle dimensional das pás, para que haja a garantia do desempenho previsto no projeto do hélice.

Uma vez projetado o hélice de uma embarcação, a qualidade deste projeto deverá ser mantida na etapa de confecção do hélice. Sabe-se que distorções geométricas de certa ordem alteram as características hidrodinâmicas dos hélices, piorando as eficiências resultantes e até as condições de cavitação.

Uma forma de garantir o desempenho do hélice construído, próximo daquele previsto num bom projeto é através da exigência de certas precisões de confecção. Tais precisões são definidas, em grande parte dos casos, a partir da norma n^0 484 da "*ISO (International Standard): Shipbuilding - Ship screw propellers - Manufacturing Tolerences*" Parte 1 (D maior que 2,5m) e Parte 2 ($0{,}80 \leq D \leq 2{,}5$m). Nesta norma, são utilizados quatro níveis de precisão que devem ser escolhidos de acordo com o tipo e a missão da embarcação: classe S - altíssima precisão, classe I - alta precisão, classe II - precisão média e classe III - tolerância alta.Assim o trabalho visa uma proposta de equipamento para medição das dimensões das pás, de acordo com os padrões requeridos.

2 – PARAMETROS DE MEDIÇÃO

Nos estágios iniciais de projeto as características principais dos hélices, são determinadas em função do casco, isto é,

*Prof. Dr - E-mail: tatibana@usp.br
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Morais, 2231 – Cep.: 05508-900
Tel.: 55-011-818-5350 - Fax.: 55-011-818-5717

** Mestrando - E-mail: alexjanu@usp.br
Dpto. de Engenharia Naval e Oceânica
São Paulo – São Paulo – Brasil

condições de calado, forma de popa pretendida, interação casco-hélice, etc. O desempenho esperado é normalmente estimado por meio de diagramas de "Séries Sistemáticas"de hélices quando não dispõe de recursos computacionais para cálculos racionais.
Determinadas as características geométricas do hélice são feitos ensaios em Tanque de Prova a fim de determinar o desempenho hidrodinâmico do hélice.
Desse programa de ensaios obtem-se os dados que deverão ser usados para o cálculo final do hélice.

2.1 – SISTEMA DE COORDENADAS E PARAMETROS A MEDIR

Para definição dos parâmetros de medição é apresentado o seguinte sistema de coordenadas (Figura 1), onde Z é no sentido do eixo do motor, X no sentido radial perpendicular ao eixo e θ o angulo na direção do eixo.

1° passo
Medir o deslocamento linear em X para r/R

2° Passo
O comprimento da corda C_R para qualquer X e igual a:

$$\theta_2 = \theta_1 - \theta \qquad [1]$$
$$C_R = ((\theta_2 * \pi)/180) * r \qquad [2]$$

3° Passo
Como obter a espessura do perfil ao longo da corda C_R para um dado r.
A espessura ao longo do perfil será medida na direção Z (figura. 3).
A partir do ponto BF variando θ, em mais um $\Delta\theta$ onde $\Delta\theta$ seja igual a 1° grau, até BA.

Exemplo:

$$\Delta\theta = 1 \qquad [3]$$
$$\theta_i = \theta + \Delta\theta \qquad [4]$$
$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta \qquad [5]$$
$$\theta_n = \theta_{n-1} + \Delta\theta \qquad [6]$$
$$\theta_n = \theta_1 + \theta \qquad [7]$$

Para obter a espessura t do perfil e a distância Y ao longo da corda C_R onde t e Y é igual a:

$$t_i = Y - (z_1 + z_2) \qquad [8]$$
$$Y_i = (\Sigma\Delta\theta/180) * X \qquad [9]$$

onde t_0 é o ponto na BF (borda de fuga) e t_n é o ponto na BA (borda de ataque).
As figuras 2, 3, 4 e 5 mostram todos os detalhes dos parâmetros utilizados acima.

3 - INSTRUMENTAÇÃO

Para medição dos parâmetros descritos anteriormente foram empregados os transdutores descritos a seguir.
Com 2 (dois) transdutores do tipo potenciômetrico para medir ângulo, situado nas extremidades do bosso, e 4 (quatro) do tipo linear LVDT (Transdutor de deslocamento linear) para medir deslocamento, ficando 2 (dois) na horizontal acima do potenciômetro e 2 (dois) na horizontal, conforme diagrama esquemático na figura. 6.
O potenciômetro n°1 mede o deslocamento angular no dorso e o potenciômetro n°2 mede o deslocamento angular na face. O *LVDT A* mede o raio do perfil cilíndrico no dorso, o *LVDT B* mede o raio do perfil cilíndrico na face, o *LVDT C* mede o deslocamento do *LVDT C* até a pá no dorso e o *LVDT D* mede o deslocamento do *LVDT D* até a pá na face.

3.1 TRANSDUTOR DIFERENCIAL VARIÁVEL LINEAR (LVDT)

O LVDT é um transdutor eletrônico que fornece uma saída elétrica proporcionando o deslocamento de um núcleo móvel. A Figura. 7 mostra o arranjo físico de um LVDT.
Três bobinas estão igualmente espaçadas sobre uma forma cilíndrica. Um núcleo magnético em forma de haste é colocado axialmente no interior desse conjunto, orientando a trajetória do fluxo magnético.

00002

Energizando-se o centro ou a bobina primária com corrente alternada , é induzida uma tensão nas duas bobinas externas. Na configuração do transdutor LVDT, figura. 8, as bobinas externas ou secundárias são conectadas opostamente em séries de modo que as duas tensões induzidas sejam de fases opostas. Assim, a saída resultante do transformador é a diferença entre essas duas tensões. Para uma posição central do núcleo em forma de haste a tensão de saída é nula. Esta é a posição nula ou ponto de equilíbrio. Tirando-se o núcleo do ponto de equilíbrio, a tensão induzida aumenta na bobina para onde o núcleo é movimentado, causando a diminuição da tensão na bobina oposta, o que produz uma tensão diferencial. O movimento do núcleo em sentido oposto, além do ponto de equilíbrio, produz uma característica semelhante de tensão linear com fase deslocada de 180°. A figura. 8 mostra um gráfico de tensão de saída pela posição do núcleo dentro do limite linear do transdutor. A curva é uma linha reta que atravessa a origem ou ponto nulo se forem usados os sinais de + ou - para indicar as fases opostas. Se as tensões forem plotadas como quantidades positivas sem levar em consideração a fase, a curva será um V como a da Figura.9.

O condicionador eletrônico usado em conjunto com o LVDT para recuperar a informação, é detector sensível à fase, e tem a seguinte configuração, tal desenho pode ser visto na figura 10.

3.2 TRANSDUTOR POTENCIÔMETRICO

O potenciômetro é um método baseado na idéia de opor duas diferenças de potenciais para que se cancelem e não haja fluxo de corrente resultante. A figura.11 mostra o potenciômetro básico. Uma diferença de potencial variável é produzida entre o extremo de um resistor e um cursor que se move ao longo do resistor, fluindo uma corrente constante através do resistor. Quando essa diferença de potencial é aplicada em oposição à diferença de potencial que está sendo medida, não fluirá corrente entre elas quando tiverem o mesmo valor. O valor da diferença de potencial em que isso ocorre está relacionado com a diferença de potencial e, é convertida em um deslocamento angular que pode ser diretamente indicado.

A escala de deslocamento pode ser calibrada em termos de diferença de potencial aplicando-se diferenças de potenciais conhecidas para serem medidas pelo instrumento. As diferenças de potenciais padrão geralmente são obtidas pelas pilhas especialmente projetadas, ou outros sistemas que nos forneça tensão constante. Se o resistor no potenciômetro tiver resistência constante por milímetro de comprimento, então o deslocamento (L) do cursor a partir de uma extremidade será diretamente proporcional à diferença de potencial:

$$V \propto L \text{ OU } V = Kl \qquad [10]$$

onde k é uma constante. Com a diferença de potencial padrão (V_S) e um deslocamento (L_S).

$$V_S \propto L_S \text{ ou } V_S = kL_S \qquad [11]$$

$$\text{Assim, } (V/V_S) = (L/L_S) \qquad [12]$$

3.4 - CALIBRAÇÃO

A calibração deve ser feita muito próxima das condições de uso real, incluindo a mesma fixação, o mesmo ambiente e a mesma tensão de excitação e freqüência.

A calibração será feita estabelecendo-se dois pontos tão distantes quanto possível, porém dentro da escala que realmente vai ser usada. São necessárias duas quantidades ou posições de referência externas bem conhecidas.

Para a calibração dos potenciômetro e dos LVDT`s, foram estabelecidas essas variações que são mostradas a seguir, e que podem ser alteradas de acordo com as necessidades dimensionais do hélice.

00003

Potenciômetro

θ	mV
0^0	Y
90^0	2Y
180^0	4Y

LVDT (A) e (B)

X	mV
1R	10X mV
0,95R	9X mV
0,90R	9X mV
0,50R	5X mV
0,2R	2X mV

LVDT (C) e (D)

Z	mV
d(100cm)	10Z mV
d(50cm)	5Z mV
d(1cm)	1Z mV

3.5 - SENSIBILIDADE

A sensibilidade nominal é geralmente dada em termos de tensão (milivolts ou volts) por mícrons de deslocamentos do núcleo por volt de entrada (comumente escreve-se mV/μm/volt entrada). A tensão de saída real para um dado deslocamento do núcleo é determinado multiplicando-se a sensibilidade pelo deslocamento em mícrons e então multiplicando-se este produto pela tensão de entrada.

4 - TRATAMENTO DOS DADOS - DESENHO DA PÁ EXPANDIDA.

Neste item será fornecido o modo de desenhar a pá expandida a partir dos dados obtidos.

Para cada arquivo que representa um X (raio do perfil cilíndrico), segue-se os seguintes procedimentos: figura.5.

1 - Traçar a corda

$$ar = [((\theta + \theta_1) - 90^o)/180] * X \quad [13]$$

$$w = C_R - ar \quad [14]$$

2 - Traçar o perfil ao longo da corda.

1°) Dispor ao longo da corda os φ_{face} (perfil da face) do ponto BF até $t_{máx}$ e de $t_{máx}$ até BA.

onde:

P > 0

$$\varphi_{face} = V_1 * (t_{máx} - t_n) \quad [15]$$

φ_{face} do ponto BF até $t_{máx}$.

Onde V_1 é um valor constante obtido da tabela 1.

P < 0

$$\varphi_{face} = V_2 * (t_{máx} - t_0) \quad [16]$$

φ_{face} do ponto $t_{máx}$ até BA.

Onde V_2 é um valor constante tirado da tabela 2.

2°) Dispor as espessuras ao longo da corda.

onde:

$$\varphi_{dorso\ i} = \varphi_{face\ i} + t_i, \text{ para cada } Y_i. \quad [17]$$

Y_i.(distância entre os LVDT's (C) e (D)) Figura 4.

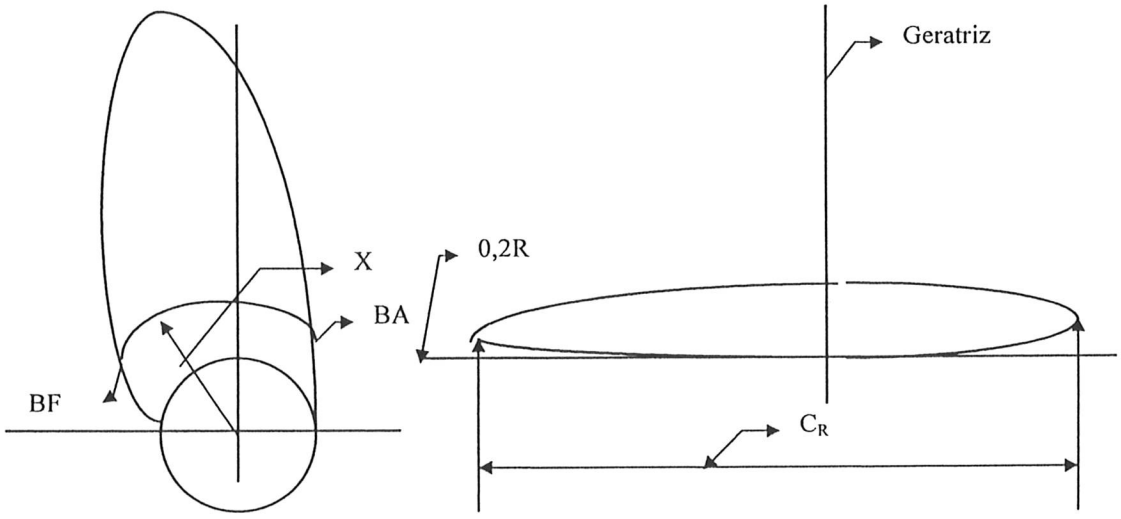
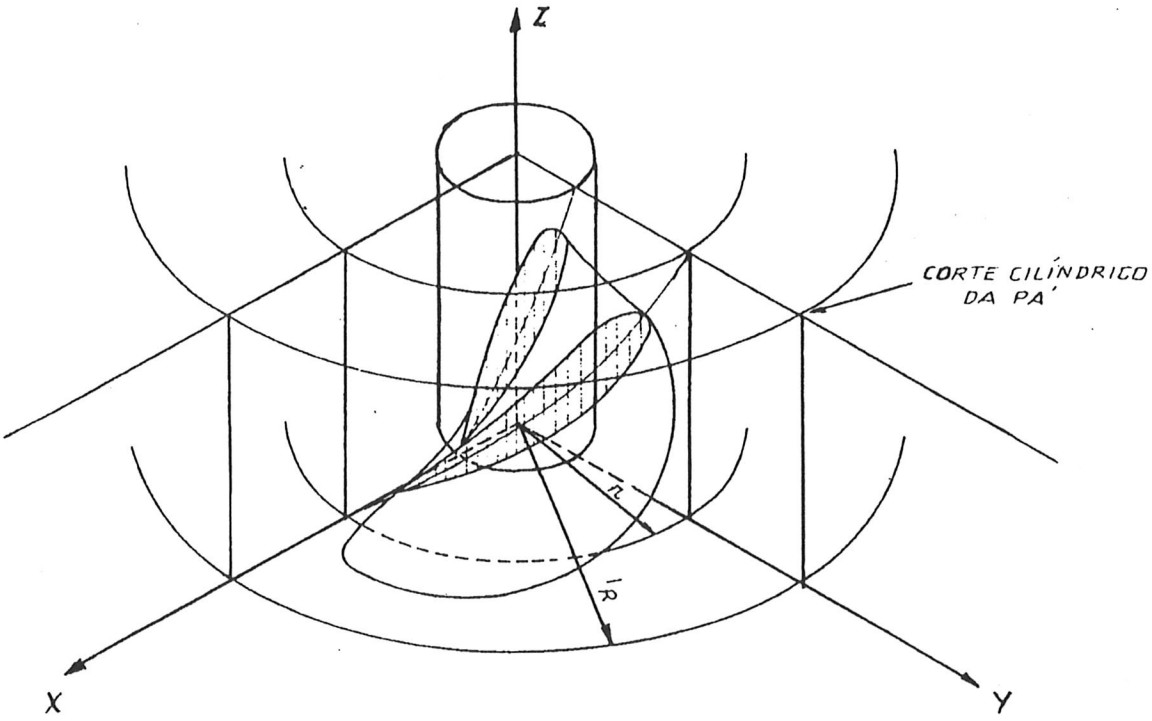
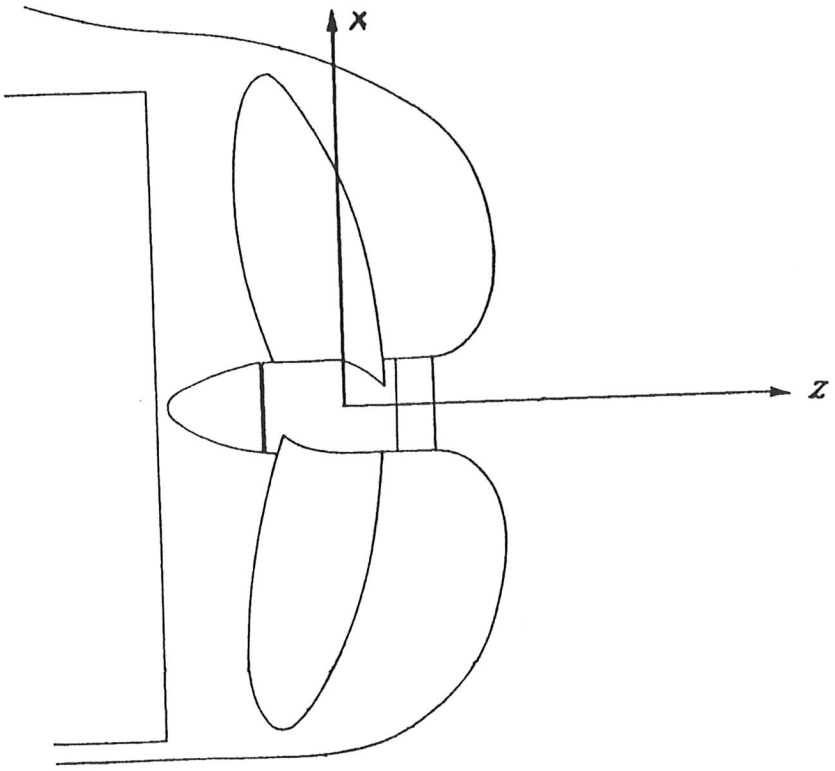


Figura 2





00005

Figura 1 – Sistemas de Coordenadas

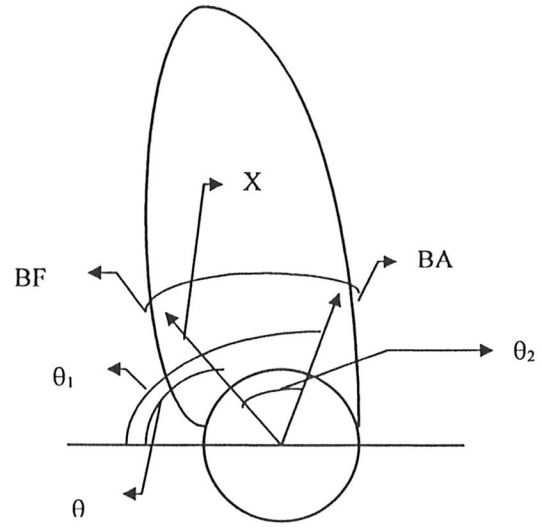


Figura 3

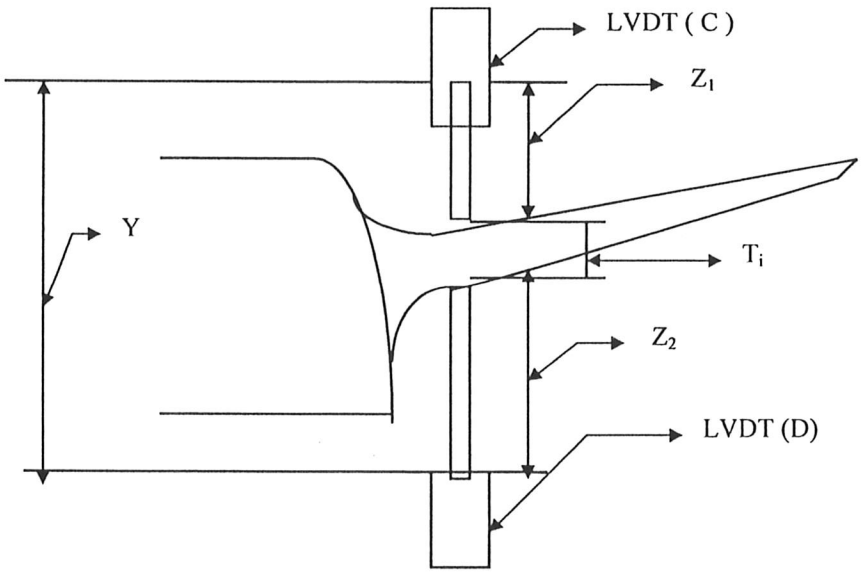


Figura 4

00006

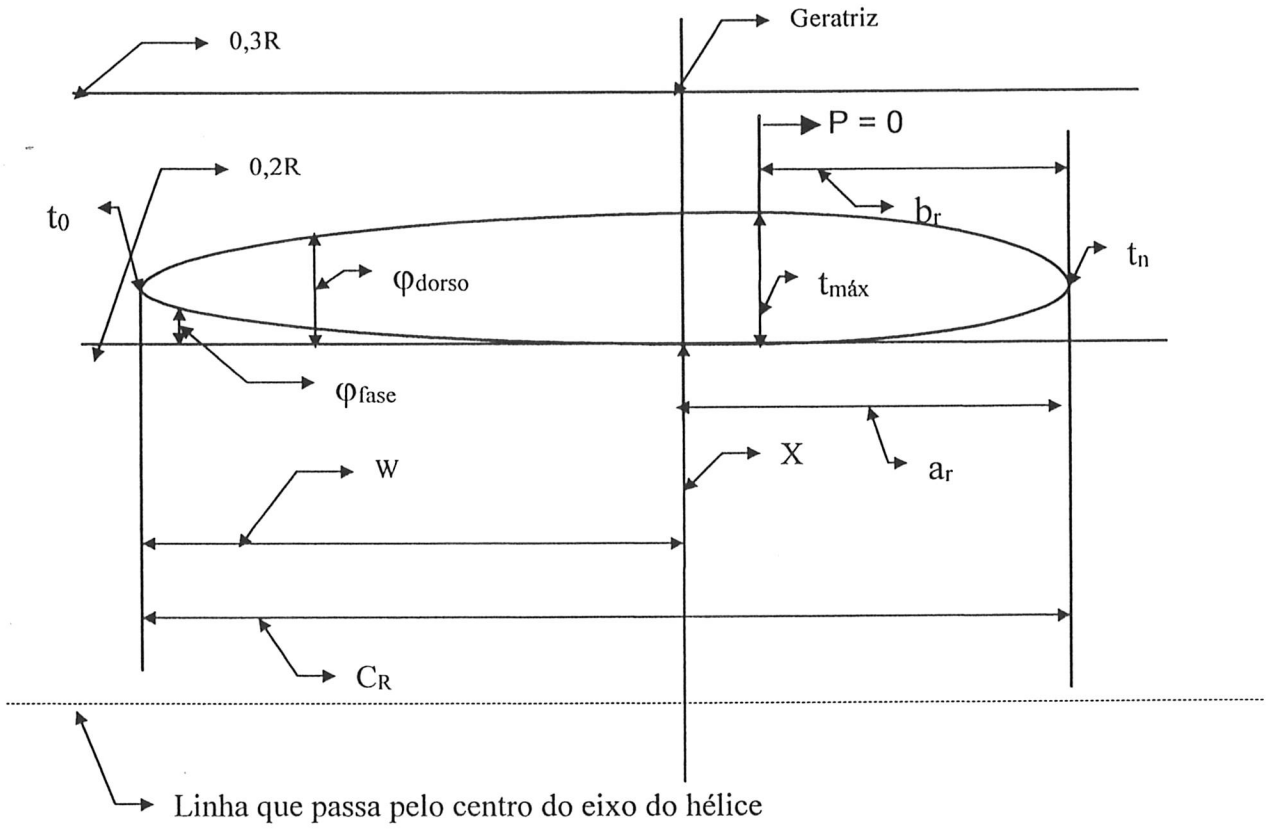
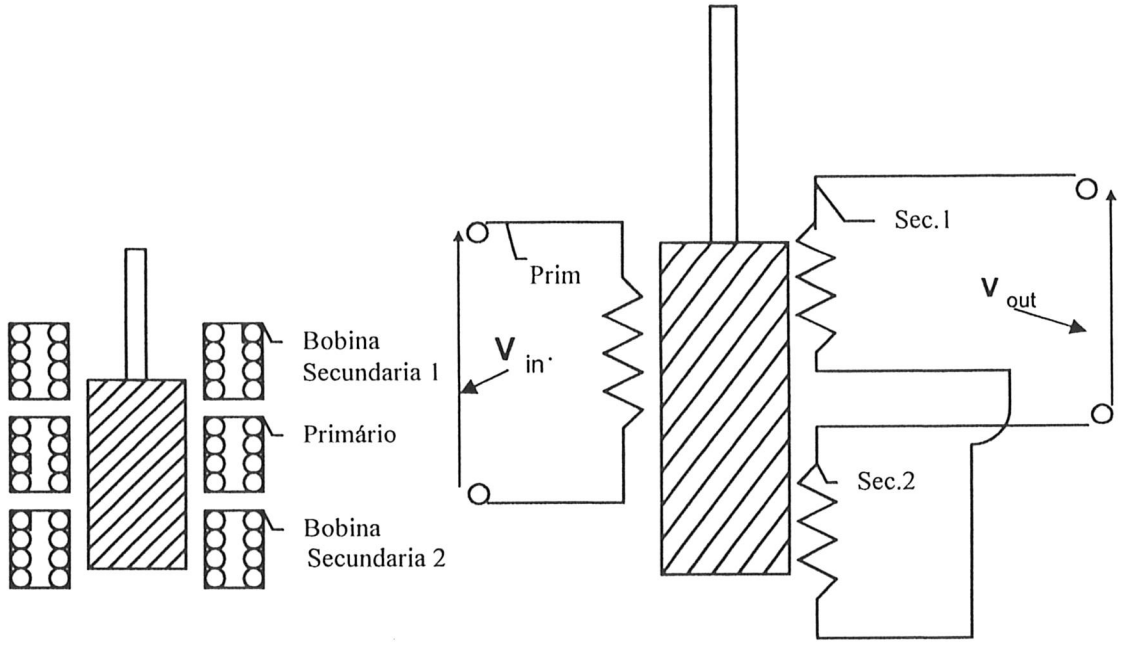


Figura 5 – Definição geométrica do perfil da pá.



00007

Figura. 7 – Transdutor Linear Variável (LVDT)

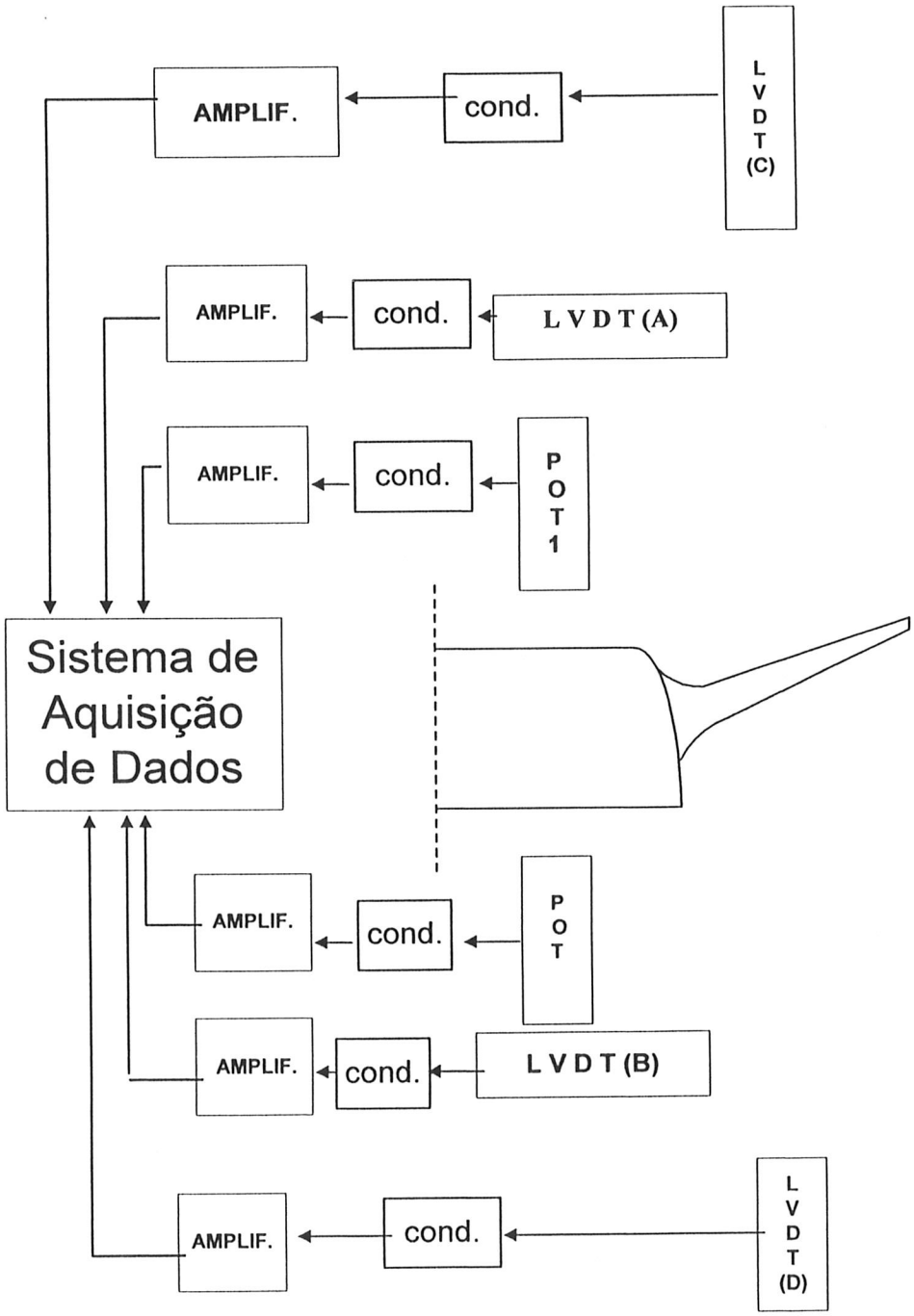


Figura 6 - Diagrama Esquemático

00008

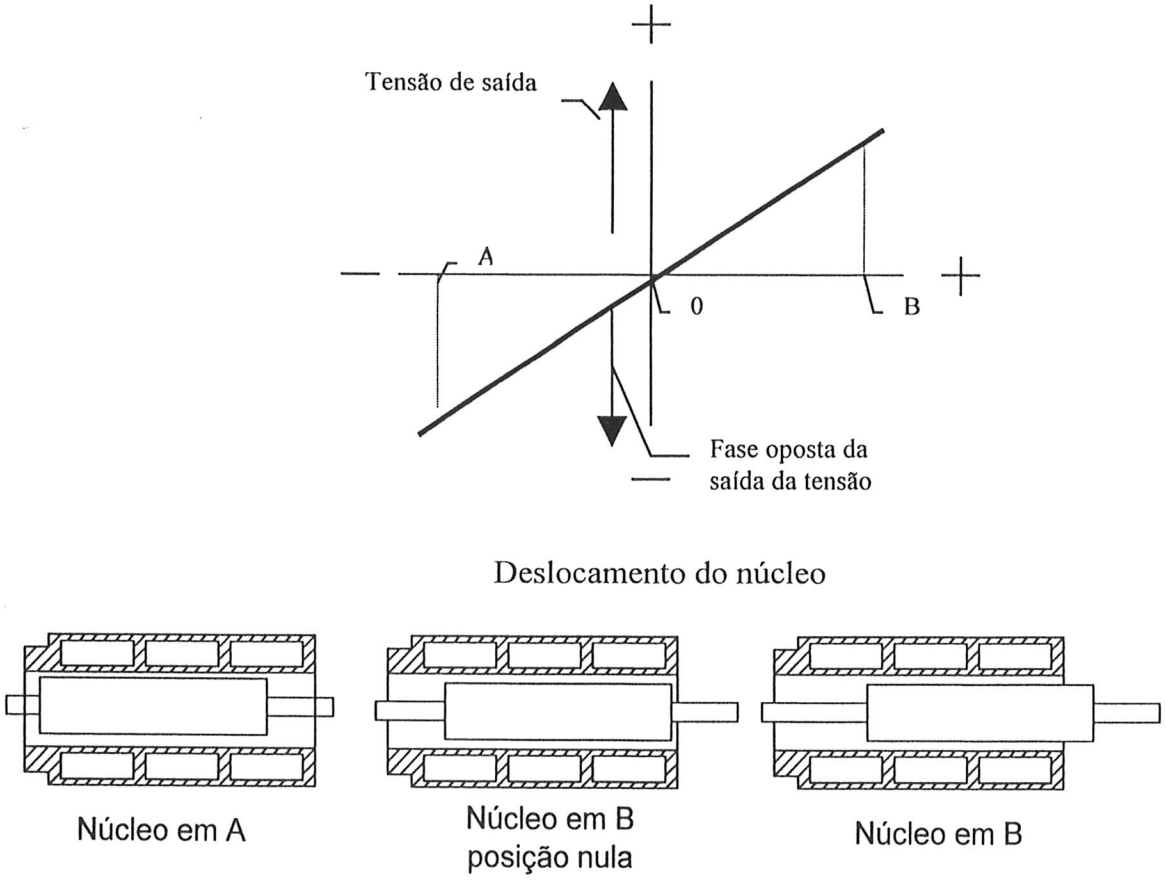


Figura 8 - Saída de fase do LVDT em função da posição do núcleo; gráfico linear.

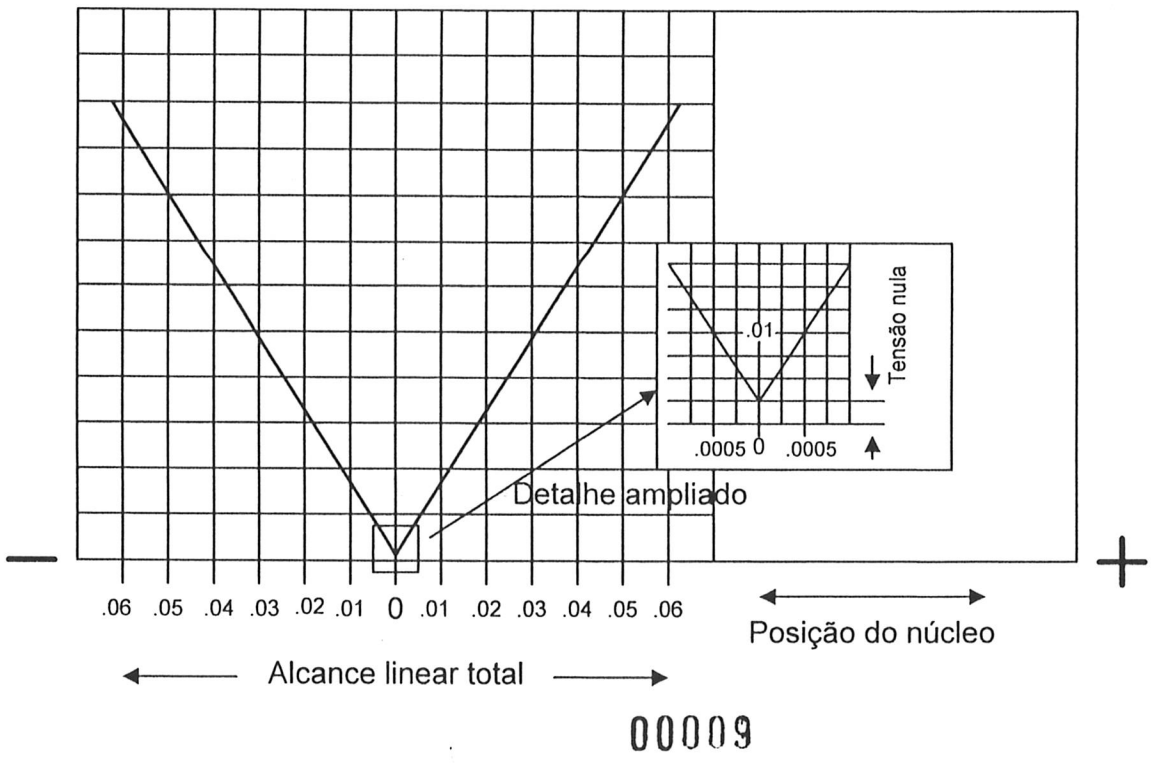


Figura 9 - Gráfico V Amplitude absoluta da tensão de saída do LVDT em função da posição

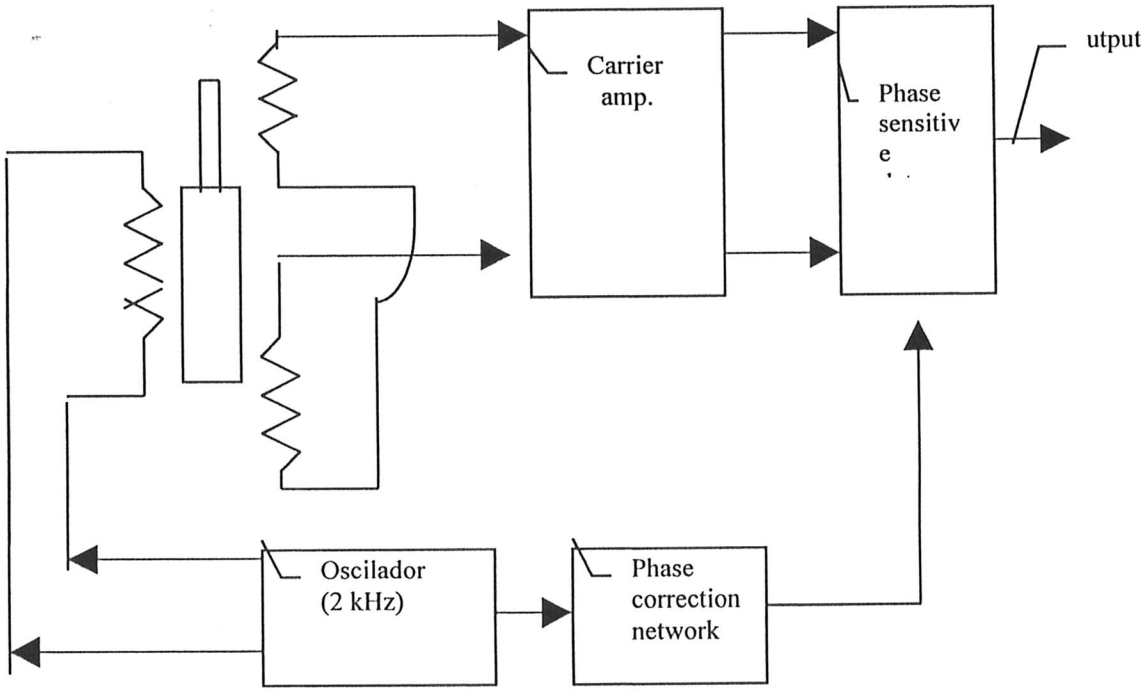


Figura.10 - Condicionador do LVDT

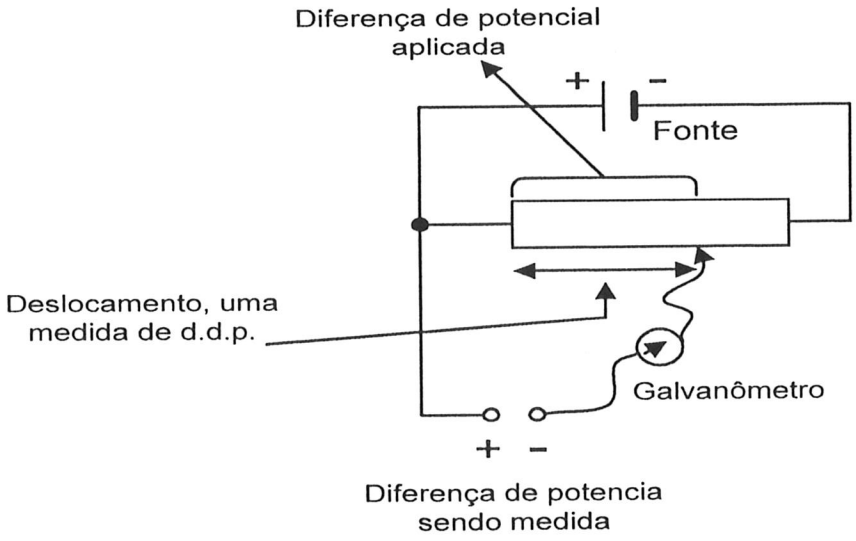


Figura. 11 - Potenciômetro Básico

00010

Tabela - 1 [3]

Passo

r/R	-1.0	-0.95	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0
0.7-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.0522	0.0422	0.0330	0.0190	0.0100	0.0040	0.0012	0	0	0
0.4	0.1467	0.1200	0.0972	0.0630	0.0395	0.0214	0.0116	0.0044	0	0
0.3	0.2306	0.2040	0.1790	0.1333	0.0943	0.0623	0.0376	0.0202	0.0033	0
0.25	0.2598	0.2372	0.2115	0.1651	0.1246	0.0899	0.0579	0.0350	0.0084	0
0.2	0.2826	0.2630	0.2100	0.1967	0.1570	0.1207	0.0880	0.0592	0.0172	0
0.15	0.3000	0.2824	0.2650	0.2300	0.1950	0.1610	0.1280	0.0955	0.0365	0

r/R	+1.0	+0.95	+0.9	+0.85	+0.8	+0.7	+0.6	+0.5	+0.4	+0.2	0
0.7-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	0.0382	0.0169	0.0067	0.0022	0.006	0	0	0	0	0	0
0.5	0.1278	0.0778	0.0500	0.0328	0.0211	0.0085	0.0034	0.0008	0	0	0
0.4	0.2181	0.1467	0.1088	0.0833	0.0637	0.0357	0.0189	0.0090	0.0033	0	0
0.3	0.2923	0.2186	0.1760	0.1445	0.1191	0.0790	0.0503	.0300	0.0148	0.0027	
0.25	0.3256	0.2513	0.2068	0.1747	0.1465	0.1008	0.0669	0.0417	0.0224	0.0031	0
0.2	0.3560	0.2821	0.2353	0.2000	0.1685	0.1180	0.0804	0.0520	0.0304	0.0049	0
0.15	0.3860	0.3150	0.2642	0.2230	0.1870	0.1320	0.0920	0.0615	0.0384	0.0096	0

Tabela - 2 [3]

Passo

r/R	-1.0	-0.95	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0
0.9-1.0	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.85	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.8	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.7	0	0.0975	0.190	0.360	0.510	0.640	0.750	0.840	0.960	1
0.6	0	0.0965	0.1885	0.3585	0.5110	0.6415	0.7530	0.8426	0.9613	1
0.5	0	0.0950	0.1865	0.3569	0.5140	0.6439	0.7580	0.8456	0.9639	1
0.4	0	0.0905	0.1810	0.3500	0.5040	0.6353	0.7525	0.8415	0.9645	1
0.3	0	0.0800	0.1670	0.3360	0.4885	0.6195	0.7335	0.8265	0.9583	1
0.25	0	0.0725	0.1567	0.3228	0.4740	0.6050	0.7184	0.8139	0.9519	1
0.2	0	0.0640	0.1455	0.3060	0.4535	0.5842	0.6995	0.7984	0.9446	1
0.15	0	0.0540	0.1325	0.2870	0.4280	0.5585	0.6770	0.7805	0.9360	1

r/R	+1.0	+0.95	+0.9	+0.85	+0.8	+0.7	+0.6	+0.5	+0.4	+0.2	0
0.9-1.0	0	0.0975	0.1900	0.2775	0.3600	0.5100	0.6400	0.7500	0.8400	0.9600	1
0.85	0	0.1000	0.1950	0.2830	0.3660	0.5160	0.6455	0.7550	0.8450	0.9615	1
0.8	0	0.1050	0.2028	0.2925	0.3765	0.5265	0.6545	0.7635	0.8520	0.9635	1
0.7	0	0.1240	0.2337	0.3300	0.4140	0.5615	0.6840	0.7850	0.8660	0.9675	1
0.6	0	0.1485	0.2720	0.3775	0.4620	0.6060	0.7200	0.8090	0.8790	0.9690	1
0.5	0	0.1750	0.3056	0.4135	0.5039	0.6430	0.7478	0.8275	0.8880	0.9710	1
0.4	0	0.1935	0.3235	0.4335	0.5220	0.6590	0.7593	0.8345	0.8933	0.9725	1
0.3	0	0.1890	0.3197	0.4265	0.5130	0.6505	0.7520	0.8315	0.8920	0.9750	1
0.25	0	0.1758	0.3042	0.4108	0.4982	0.6359	0.7415	0.8315	0.8899	0.9751	1
0.2	0	0.1560	0.2840	0.3905	0.4777	0.6190	0.7277	0.8170	0.8875	0.9750	1
0.15	0	0.1300	0.2600	0.3665	0.4520	0.5995	0.7105	0.8055	0.8825	0.9760	1

6 - SIMBOLOGIA

LVDT - transdutor diferencial variável linear
θ - ângulo
mV - milivolt
BA - borda de ataque
BF - borda de fuga
X, α - raio do perfil cilíndrico
R - raio do hélice
C_R, L - comprimento da corda
br - distância da BA (borda de ataque) até espessura máxima do perfil
ar - distância da BA (borda de ataque) até geratriz
φ_{dorso} - distância da corda até dorso do perfil
φ_{fase} - distância da corda até face do perfil
t_{max} - espessura máxima do perfil
t_n - espessura na borda de ataque
t_0 - espessura na borda de fuga
z_1 - distância do LVDT (C) até a pá do hélice
z_2 - distância do LVDT (D) até a pá do hélice
Y - distância entre os LVDT's (C) e (D)

7 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESP pelo incentivo à pesquisa que tem oferecido recurso para o desenvolvimento do meu projeto. Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade de São Paulo que oferece estrutura para desenvolvimento de meus trabalhos.

A todos que de forma direta ou indiretamente nos auxiliaram para que o trabalho pudesse alcançar até o nível atual.

8 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

(1) SIEMENS, A.G. - Instrumentação Industrial, São Paulo, 1976
(2) BOLTON, W. - Instrumentação & Controle, São Paulo, 1976
(3) PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE (PNA) VOL. II 1988
(4) SOISSON, Harold E. - Instrumentação Industrial - Sào Paulo, 1987
(5) BECKWITH, Thomas G.; BUCK, N.L. - Mechanical Measurements 2.ed.,1973
(6) HANDBOOK OF APPIED INSTRUMENTATION - 1964
(7) ZANUTTO, J.C.; RUBIO, M.R. - Curso de Introdução à Instrumentação em
(8) Engenharia - METROTEC - São Paulo, 1985 - (Publicação Técnica n^0 79)
(9) TACHIBANA, T - Série Sistemática de Hélices - (Apostila)
(10) TACHIBANA, T - A Geometria do Hélice Marítimo - EPUSP , 1978 (Apostila)
(11) PADOVEZI, C. D. - Otimização de Hélice de Pequenas Embarcações Utilizando Séries Sistemáticas; XI PAN-AMERICAN NAVAL ENGINEERING CONGRESS
(12) TACHIBANA, T – Sistema de Proteção de Hélice para Embarcação Fluviais (SOBENA 96) SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENGENHARIA NAVAL.

00011