ALESSANDRO DE OLIVEIRA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE SENSORIAMENTO DE POSIÇÃO
E ATUAÇÃO PARA POSICIONAMENTO DINÂMICO DE MODELOS
REDUZIDOS EM TANQUE DE PROVAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

São Paulo

2005

ALESSANDRO DE OLIVEIRA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE SENSORIAMENTO DE POSIÇÃO
E ATUAÇÃO PARA POSICIONAMENTO DINÂMICO DE MODELOS
REDUZIDOS EM TANQUE DE PROVAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Sistemas

Orientador:
Prof. Dr. José Jaime da Cruz

São Paulo
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Alessandro de Oliveira

Desenvolvimento de sistema de sensoriamento de posição e atuação para posicionamento dinâmico de modelos reduzidos em tanques de provas / A.O. Santos. -- São Paulo, 2005.

232 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.Tanque de provas 2.Controle (Teoria de sistema e controle) 3.Sensoriamento remoto I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

DEDICATÓRIA

*“É certo que não podemos mudar a direção dos ventos, mas,
com certeza, podemos alterar a posição das velas.”*

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. José Jaime da Cruz pelos conselhos, dicas e por acreditar no potencial do meu trabalho.

Aos amigos André, Kenji, Glenan, Vinícius e Tannuri por terem compartilhado as dificuldades e o momentos de alegria deste projeto.

Ao amigo e desenhista Ailton por transformar meus rascunhos em documentação oficial.

À minha família pela paciência e permanente incentivo, especialmente, aos meus pais, pelo carinho, compreensão, e grande disposição em me auxiliar sempre nos momentos difíceis.

A todos que colaboraram, direta e indiretamente, para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo central o desenvolvimento da infra-estrutura de sensoriamento e atuação para a avaliação de Sistemas de Posicionamento Dinâmico de modelos reduzidos de embarcações em tanques de provas. Ele descreve a concepção, o projeto, a implementação e os testes de um sistema sensor de posição e orientação do modelo, assim como o hardware dos propulsores utilizados como atuadores do modelo. O sistema sensor é baseado na emissão e recepção de sinais acústicos sincronizados de alta frequência (ultra-som). Utiliza-se o Método Esférico 3-D como algoritmo de triangularização, obtendo-se a estimativa da posição por meio da minimização de uma medida quadrática do erro. Além disso, foi também aplicado o filtro estendido de Kalman como algoritmo de estimação. São apresentadas de forma clara e objetiva as dificuldades encontradas no decorrer do desenvolvimento do trabalho, bem como as soluções adotadas para contorná-las, analisando as influências das condições atmosféricas e do ambiente laboratorial no processo de medição, os resultados obtidos a partir dos ensaios, a robustez e o desempenho do sistema sensor.

ABSTRACT

The main objective of this work is the development of both sensing and actuation infra-structure for the performance evaluation of Dynamic Positioning Systems for reduced scale model of ships in towing tanks or offshore tanks. It describes the conception, design, implementation and tests of a range and orientation sensor system, as well as the hardware of the propellers used as the model actuators. The sensor system is based on the emission and reception of high frequency synchronized acoustic signals (ultra-sound). A 3-D spherical method based on the minimization of a quadratic measure of the error is used to estimate the position of the ship model. Furthermore the extended Kalman filter is also used. The difficulties found during the development of the project are presented as well as the solutions adopted to circumvent them. The experimental results obtained are discussed. In particular, the influence of both the local atmosphere and the lab environment on the performance of the sensor system are taken into account.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO	22
1.2 JUSTIFICATIVA	23
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	32
2. SENSORIAMENTO	34
2.1 PROPAGAÇÃO E NATUREZA DA ONDA ULTRA-SÔNICA	35
2.1.1 Compressibilidade	36
2.1.2 Velocidade de propagação longitudinal das ondas de pressão num meio contínuo isotrópico	38
2.1.3 Velocidade de propagação do ultra-som nos diversos meios	40
2.1.4 Análise da sensibilidade da velocidade de propagação	42
2.2 METODOLOGIA	46
2.2.1 Princípios de funcionamento	46
2.2.2 Especificações do sistema	47
2.2.3 Descrição do sistema	47
2.3 PROCEDIMENTOS PARA CÁLCULO	50
2.3.1 Parâmetros do sistema: alcance máximo, incremento mínimo de tempo e precisão teórica	50
2.3.2 Algoritmos de triangularização	51
2.3.3 O filtro estendido de Kalman	57
3. INFRA-ESTRUTURA ELETRÔNICA E CALIBRAÇÃO	63
3.1 HARDWARE	63
3.1.1 Base	63
3.1.2 Sensores	65
3.1.3 Embarcação	66
3.1.4 Módulo de Potência para motores DC	68
3.1.5 Módulo de Potência para motores de Passo	68
3.1.6 Sistema de Transmissores Ultra-sônicos (Antenas)	69
3.1.7 Sistema de Distribuição de Energia	70
3.2 SOFTWARE	71
3.2.1 Firmware do Módulo de Controle da Central de Processamento em Terra	71
3.2.2 Firmware do Módulo de Controle Embarcado	73
3.3. CALIBRAÇÃO	74
4. RESULTADOS	79
4.1 PRIMEIRA ETAPA: ENSAIOS INICIAIS	79
4.2 SEGUNDA ETAPA: UMA NOVA CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	90
4.2.1 Estudo acústico do ambiente do laboratório	92
4.2.2 Resultados finais do Sistema Sensor de Posicionamento e Orientação	101
5. CONCLUSÕES	106
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICE A: ACÚSTICA TÉCNICA	113

<i>Tabela A.1: Velocidade de propagação do som nos líquidos e sólidos.</i>	114
<i>Tabela A.2: Velocidade de propagação do som nos aeriformes.</i>	115
<i>Tabela A.3: Impedância acústica específica dos diversos meios.</i>	116
<i>Tabela A.4: Coeficiente de transmissão e reflexão do som nos diversos meios, em relação ao ar.</i>	117
<i>Tabela A.5: Coeficiente de absorção do som pelas paredes, em função da frequência.</i>	118
<i>Tabela A.6: Coeficiente de absorção do som pelos pisos, em função da frequência.</i>	119
<i>Tabela A.7: Tempo de reverberação aconselhável, em função do volume do ambiente e da procedência do som.</i>	120
<i>Tabela A.8: Massa Específica dos materiais de construção.</i>	121
APÊNDICE B: PLANTA PREDIAL	122
<i>ENG-NAV-001: Lay-out de Instalação Escola Politécnica da USP Depto. de Eng. Naval e Oceânica, folha 1 e 2/2;</i>	122
APÊNDICE C: LAY-OUTS CONSTRUTIVOS	123
<i>ENG-NAV-005: Lay-out de Embarcação de ensaio e testes sensor posicional de ultrassom, folha 1/1;</i>	123
<i>ENG-NAV-002: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional (cachorro), folha 1/1;</i>	123
<i>ENG-NAV-003: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional para teto, folha 1 e 2/2;</i>	123
<i>ENG-NAV-011: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional para teto, folha 1/1;</i>	123
<i>ENG-NAV-008: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional para teto, folha 1 a 13/13;</i>	123
APÊNDICE D: SOFTWARES: CÓDIGOS-FONTE E PROGRAMAS	124
PROGRAMAS (SCRIPTS) MATLAB:	124
<i>corr.f.m</i>	124
<i>Corrfm.m</i>	124
<i>Estimapinv.m</i>	124
<i>F.m</i>	124
<i>Ini_kalman.m</i>	124
<i>Jacob.m</i>	124
<i>Jo.m</i>	124
<i>Kalmand1.m</i>	124
<i>Kalmand2.m</i>	124
<i>Lin.m</i>	124
<i>Nr.m</i>	124
<i>Onda2.m</i>	124
<i>Plotall.m</i>	124
<i>Plotanr1.m</i>	124
<i>Plotanr2.m</i>	124
<i>Trata.m</i>	124
PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS:	124
<i>Frmconfig.frm</i>	125
<i>Frmconsole.frm</i>	125
<i>Fmrpostq.frm</i>	125
<i>Mdigeral.frm</i>	125
<i>Spd.vbp</i>	125
<i>Spd.vbw</i>	125
FIRMWARES:	125
<i>Base01.asm</i>	125
<i>Naut01.asm</i>	125
APÊNDICE E: CIRCUITOS, DIAGRAMAS ELÉTRICOS, MAGNÉTICOS E DE/PARA ...	180
<i>ENG-NAV-004: TRAFO TR-1 Módulo de Controle embarcado, folha 1/1;</i>	180
<i>ENG-NAV-006: Módulos de Controle, folha 1 a 6/6;</i>	180

<i>ENG-NAV-007: Diagrama da placa de Interligação, folha 1/1;.....</i>	<i>180</i>
<i>ENG-NAV-009: Diagrama de Interligação das placas, folha 1 a 9/9;.....</i>	<i>180</i>
<i>ENG-NAV-010: Circuito Final Sensores do Tanque, folha 1/1;</i>	<i>180</i>

APÊNDICE F: FOTOGRAFIAS DO SISTEMA..... 181

<i>Foto 1: Vista Geral do laboratório onde foram realizados os ensaios.....</i>	<i>182</i>
<i>Foto 2: Vista do tanque de provas utilizado no desenvolvimento do sistema sensor.....</i>	<i>182</i>
<i>Foto 3: Módulo de Controle e Gerenciamento (Embarcação).....</i>	<i>183</i>
<i>Foto 4: Módulo de Distribuição de Energia.</i>	<i>183</i>
<i>Foto 5: Módulo de Potência para Motores de Passo.</i>	<i>184</i>
<i>Foto 6: Módulo de Potência para Motores DC.....</i>	<i>184</i>
<i>Foto 7: Módulo de Controle e Gerenciamento (Base).....</i>	<i>185</i>
<i>Foto 8: Lay-out da montagem do Módulo de Controle da Base.....</i>	<i>185</i>
<i>Foto 9: Detalhe construtivo da Placa de Controle da Base.....</i>	<i>186</i>
<i>Foto 10: Módulo de Sensor Receptor.</i>	<i>186</i>
<i>Foto 11: Lay-out da montagem do Módulo Sensor Receptor.....</i>	<i>187</i>
<i>Foto 12: Detalhe construtivo da Placa de filtros do Módulo sensor.....</i>	<i>187</i>
<i>Foto 13: A – Detalhe do atuador DC do truster da popa; B – Detalhe do atuador DC do truster da proa; C – Vista geral da embarcação; D – Vista lateral da embarcação; E – Vista da hélice principal e leme; F – Detalhe lateral do truster.....</i>	<i>188</i>
<i>Foto 14: Detalhe construtivo do chicote de distribuição de energia.....</i>	<i>189</i>
<i>Foto 15: Detalhe dos chicotes de interligação entre os módulos.</i>	<i>189</i>
<i>Foto 16: Módulo de Transmissão Ultra-sônico (Antena de 40kHz).</i>	<i>190</i>
<i>Foto 17: Módulo de Transmissão Ultra-sônico (Antena de 25kHz).</i>	<i>190</i>
<i>Foto 18: Detalhe da instalação dos sensores receptores no teto.</i>	<i>191</i>
<i>Foto 19: Vista inferior do arranjo de Sensores.....</i>	<i>191</i>

APÊNDICE G: DATASHEETS..... 192

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: ARQUITETURA DOS SISTEMAS SENSORES ULTRA-SÔNICOS.....	19
FIGURA 2.1: VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM.....	38
FIGURA 2.2: GRÁFICO DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA EM FUNÇÃO DO TEMPO NA CIDADE DE SÃO PAULO (24 E 25/08/2004).....	44
FIGURA 2.3: GRÁFICO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO NA CIDADE DE SÃO PAULO (24 E 25/08/2004).....	45
FIGURA 2.4: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MEDIDA DE DISTÂNCIA.....	46
FIGURA 2.5: ESTRUTURA DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO.....	48
FIGURA 2.6: DIAGRAMA DE CONECTIVIDADE ENTRE AS CENTRAIS.....	49
FIGURA 2.7: PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO DE ERROS QUADRÁTICOS COM RESTRIÇÃO.....	53
FIGURA 2.8: ESQUEMA DOS SENSORES E SUAS RESPECTIVAS DISTÂNCIAS, UTILIZADAS PELO MÉTODO DA MATRIZ PSEUDO-INVERSA.....	55
FIGURA 2.9: SISTEMAS DE COORDENADAS.....	57
FIGURA 3.1: DIAGRAMA DE BLOCOS DA BASE.....	64
FIGURA 3.2: DIAGRAMA DE BLOCOS DOS SENSORES.....	65
FIGURA 3.3: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO DE CONTROLE EMBARCADO.....	67
FIGURA 3.4: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO DE POTÊNCIA PARA MOTORES DC.....	68
FIGURA 3.5: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO DE POTÊNCIA PARA MOTORES DE PASSO.....	69
FIGURA 3.6: DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÓDULO DE TRANSMISSÃO ULTRA-SÔNICO.....	70
FIGURA 3.7: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA.....	71
FIGURA 3.8: DISPOSIÇÃO DOS ATUADORES NA EMBARCAÇÃO.....	73
FIGURA 3.9: TRANSDUTORES ULTRA-SÔNICOS COMERCIAIS.....	74
FIGURA 3.10: RESULTADOS DA AMOSTRAGEM DOS TRANSDUTORES ULTRA-SÔNICOS COMERCIAIS. EIXO DAS ORDENADAS EM [M] E ABCISSAS EM [AMOSTRAS].....	75
FIGURA 3.11: HISTOGRAMA DA AMOSTRAGEM DOS TRANSDUTORES ULTRA-SÔNICOS COMERCIAIS. EIXO DAS ABCISSAS EM [M] E ORDENADAS EM [AMOSTRAS].....	75
FIGURA 3.12: GRÁFICO DAS MEDIDAS PARA CALIBRAÇÃO. MEDIDAS EM [AMOSTRAS], ENSAIO EM [INTERVALOS DE 20CM] E INTERVALOS DE TEMPO EM [CLOCKS DE 800NS].....	76
FIGURA 3.13: MEDIANAS E RETA DE REGRESSÃO LINEAR PARA CALIBRAÇÃO EM 25kHz. DISTÂNCIA REAL EM [M] E INTERVALOS DE TEMPO EM [CLOCKS DE 800NS].....	77
FIGURA 4.1: ESTRUTURA DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO, UTILIZADA NOS PRIMEIROS ENSAIOS.....	79
FIGURA 4.2: RESPOSTA DO SENSOR PARA A FREQUÊNCIA DE 40kHz DURANTE AMOSTRAGEM DINÂMICA. EIXO DAS ABCISSAS: AMOSTRAS E EIXO DAS ORDENADAS: INTERVALOS DE TEMPO.....	80
FIGURA 4.3: ESTRUTURA PROPOSTA PARA AS ANTENAS ULTRA-SÔNICAS, COMPOSTA POR DOIS ARRANJOS CIRCULARES DE TRANSDUTORES.....	81
FIGURA 4.4: RESPOSTA DO SENSOR PARA A FREQUÊNCIA DE 40kHz, APÓS MODIFICAÇÕES. EIXO DAS ABCISSAS: AMOSTRAS E EIXO DAS ORDENADAS: INTERVALOS DE TEMPO.....	82
FIGURA 4.5: EXEMPLO DE SIMULAÇÃO PARA O FENÔMENO DE CANCELAMENTO, QUATRO EMISSORES EM 40kHz (VISTA EM PLANTA). AS VARIÁVEIS REPRESENTADAS NOS EIXOS DAS ABCISSAS E DAS ORDENADAS CORRESPONDEM À POSIÇÃO NO PLANO OXY, EM METROS.....	83
FIGURA 4.6: EXEMPLO DE SIMULAÇÃO 3D PARA O FENÔMENO DE CANCELAMENTO, QUATRO EMISSORES EM 40kHz. O PLANO HORIZONTAL REPRESENTA A POSIÇÃO DO PONTO E O EIXO VERTICAL REPRESENTA A AMPLITUDE DO SINAL.....	84
FIGURA 4.7: EXEMPLO DE SIMULAÇÃO PARA O FENÔMENO DE CANCELAMENTO, QUATRO EMISSORES EM 25kHz (VISTA EM PLANTA). AS VARIÁVEIS REPRESENTADAS NOS EIXOS DAS ABCISSAS E DAS ORDENADAS CORRESPONDEM À POSIÇÃO NO PLANO OXY, EM METROS.....	84
FIGURA 4.8: EXEMPLO DE SIMULAÇÃO 3D PARA O FENÔMENO DE CANCELAMENTO, QUATRO EMISSORES EM 25kHz. O PLANO HORIZONTAL REPRESENTA A POSIÇÃO DO PONTO E O EIXO VERTICAL REPRESENTA A AMPLITUDE DO SINAL.....	85
FIGURA 4.9: EXEMPLO DE SIMULAÇÃO PARA O FENÔMENO DE CANCELAMENTO. EXTRAÍDO DE HTTP://WWW.FALSTAD.COM/MATHPHYSICS.HTML	86

FIGURA 4.10: RESULTADOS A PARTIR DOS FILTROS DIGITAIS. EIXO DAS ABCISSAS: AMOSTRAS E EIXO DAS ORDENADAS: INTERVALOS DE TEMPO.	87
FIGURA 4.11: RESPOSTA DO SISTEMA: VARIAÇÕES NO PLANO XY: SEMICÍRCULO. AS VARIÁVEIS REPRESENTADAS NOS EIXOS DAS ABCISSAS E DAS ORDENADAS CORRESPONDEM À POSIÇÃO[CM] NO PLANO OXY.	88
FIGURA 4.12: DISTÂNCIA ENTRE AS ANTENAS ESTIMADA PELO INSTRUMENTO. EIXO DAS ABCISSAS: AMOSTRAS E EIXO DAS ORDENADAS: DISTÂNCIA EM [CM].	88
FIGURA 4.13: ANTENAS EMISSORAS COM APENAS QUATRO TRANSDUTORES. EIXOS DAS ABCISSAS: AMOSTRAS E EIXO DAS ORDENADAS: INTERVALOS DE TEMPO.	89
FIGURA 4.14: SENSORES RECEPTORES CENTRALIZADOS E ALOCADOS NO TETO DO LABORATÓRIO.	90
FIGURA 4.15: MEDIDAS LIVRES DA INTERFERÊNCIA DESTRUTIVA.	91
FIGURA 4.16: TRANSDUTOR EMISSOR SAINDO DA REGIÃO ATIVA, CAUSANDO “CEGUEIRA” MOMENTÂNEA EM UM DOS RECEPTORES.	92
FIGURA 4.17: ILUSTRAÇÃO DOS DIFERENTES DESVIOS-PADRÕES OBSERVADOS PARA AS FREQUÊNCIAS DE 25 E 40kHz.	101
FIGURA 4.18: AMOSTRAS DAS FREQUÊNCIAS DE 25 E 40kHz, LIVRES DE INTERFERÊNCIA E APLICADAS AO ALGORITMO DE TRIANGULARIZAÇÃO.	102
FIGURA 4.19: RESULTADOS DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.	103
FIGURA 4.20: RESULTADOS FINAIS FORNECIDOS PELO SISTEMA SENSOR: MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.	104
FIGURA 4.21: RESULTADOS DO MÉTODO DA MATRIZ PSEUDO-INVERSA.	104
FIGURA 4.22: RESULTADOS FINAIS FORNECIDOS PELO SISTEMA SENSOR: MÉTODO MATRIZ PSEUDO-INVERSA.	105

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1: CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES ULTRA-SÔNICOS.....	20
TABELA 2.1: INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA NA VELOCIDADE DO SOM.....	44
TABELA 2.2: INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NA VELOCIDADE DO SOM.....	45
TABELA 3.1: PACOTE RECEBIDO DO MÓDULO DE CONTROLE EMBARCADO.....	72
TABELA 3.2: PACOTE TRANSMITIDO AO COMPUTADOR PRINCIPAL.....	72
TABELA 3.3: PACOTE RECEBIDO DO COMPUTADOR PRINCIPAL.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	<i>Coordenação de Pessoal de Nível Superior</i>
CENPES	<i>Centro de Pesquisas da Petrobrás</i>
DP	<i>Dinamic Position</i>
EMBRAPA	<i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária</i>
FAPESP	<i>Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo</i>
INRIA	<i>Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique</i>
IRQ	<i>Interrupt Request</i>
LSAM	<i>Laboratório de Sistemas Ativos e Mecatrônica</i>
MEMS	<i>Micro ElectroMechanical Systems</i>
PARA-SIM	<i>Paraconsistente-Simulador</i>
PROBE	<i>Programa Biblioteca Eletrônica</i>
PSK	<i>Phase Shift-Keying</i>
RF	<i>Rádio-Frequência</i>
SPD	<i>Sistema de Psicionamento Dinâmico</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Matriz das diferenças
- $\mathbf{A}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- $\mathbf{A}_{EL}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- A_i – Elemento da matriz de diferenças entre longitudes
- $\mathbf{A}_L$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- A_{MAX} – Alcance Máximo
- A_n – Vetor coluna das diferenças entre longitudes (direção do eixo das abscissas)
- B – Vetor coluna das diferenças quadráticas
- $\mathbf{B}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- B_i – Elemento da matriz de diferenças entre latitudes
- B_{ij} – Elemento da matriz de amortecimento linear viscoso
- $\mathbf{B}_L$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- B_n – Vetor coluna das diferenças entre latitudes (direção do eixo das ordenadas)
- C_i – Elemento da matriz de diferenças entre altitudes
- C_n – Vetor coluna das diferenças entre altitudes (direção da cota Z)
- C_p – Calor específico a pressão constante dos gases
- C_v – Calor específico a volume constante dos gases
- D_i – Elemento da matriz de diferenças quadráticas
- D_n – Vetor coluna das diferenças quadráticas
- $\mathbf{D}$ – Matriz de amortecimento linear viscoso
- E – Módulo de elasticidade em m^3/kg
- E – Energia em joules
- $\mathbf{E}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- E_{ij} – Erro quadrático
- $\mathbf{E}_L$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- E_r – Energia refletida
- E_t – Energia transmitida
- F – Força em N
- $\mathbf{F}_{EL}$ – Matriz das forças de baixa frequência
- F_{iEL} – Componentes de força e momento de baixa frequência
- F_{iT} – Componentes de força e momento de propulsão
- $\mathbf{F}_T$ – Matriz das forças de propulsão
- $\mathbf{H}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- $\mathbf{I}$ – Matriz identidade auxiliar para manipulação algébrica

- I_z – Momento de inércia
- J – Funcional do problema de minimização
- $\bar{J}$ – Funcional do problema de minimização com restrição
- $\mathbf{K}$ – Matriz de ganhos de Kalman
- M – Variável auxiliar
- M – Massa do navio
- M_{ij} – Elemento da matriz de massa adicional
- $\mathbf{M}$ – Matriz das massas
- P – Pressão atmosférica em N/m^2
- P_c – Precisão de contagem
- P_i – Ponto a ser estimado
- $\mathbf{Q}$ – Matriz de covariâncias dos ruídos no estado
- $\mathbf{Q}_{\text{FEL}}$ – Matriz de covariâncias
- R – Constante geral dos gases em $\text{N/kg}^\circ\text{K}$
- R – Raio do poro em m
- $\mathbf{R}$ – Matriz de covariância dos ruídos de medição
- S – Superfície em m^2
- S_i – Elementos de superfície
- S_P^c – Sensibilidade da velocidade do som em relação à pressão
- S_T^c – Sensibilidade da velocidade do som em relação à temperatura
- S_{TOTAL} – Área útil do laboratório
- T – Temperatura absoluta em $^\circ\text{K}$
- $\mathbf{T}$ – Matriz de transformação entre os sistemas de referência
- T – Tempo de reverberação em s
- T_0 – Tempo de reverberação aconselhável
- T_0 – Temperatura absoluta de 0°C
- $T_{25\text{kHz}}$ – Tempo de reverberação para 25kHz
- $T_{40\text{kHz}}$ – Tempo de reverberação para 40kHz
- U – Energia sonora por unidade de volume J/m^3
- V – Volume em m^3
- V_{pi} – Volume das estruturas prediais
- V_{SOM} – Velocidade do som
- V_{ii} – Volume dos tanques de prova
- V_{TOTAL} – Volume útil do laboratório
- V_v – Volume da viga de sustentação
- W – Potência sonora em W
- X – Vetor solução do Método da Matriz Pseudo-Inversa

- $\mathbf{X}$ – Matriz de covariâncias do erro de estimação
- $\overline{\mathbf{X}}$ – Matriz de covariâncias do erro de estimação a priori
- $\hat{\mathbf{X}}$ – Matriz de covariâncias do erro de estimação a posteriori
- X_L – Posição em relação ao sistema fixo no laboratório
- $\mathbf{X}_L$ – Vetor com as posições em relação ao sistema fixo no laboratório
- Y_L – Posição em relação ao sistema fixo no laboratório
- a – Aceleração em m/s^2
- a – Coeficiente de absorção
- a_i – Coeficiente de absorção
- $a_{25\text{kHz}}$ – Coeficiente de absorção para a frequência de 25kHz
- $a_{40\text{kHz}}$ – Coeficiente de absorção para a frequência de 40kHz
- c – Velocidade do som
- c_0 – Velocidade do som a 0°C em m/s
- c_x – Velocidade longitudinal do êmbolo
- d – Distância
- d_{ij} – Distância medidas em relação aos sensores receptores
- d_p – Variável auxiliar
- d_q – Variável auxiliar
- f – Frequência em Hz
- k – Constante
- k – Variável auxiliar
- k – Coeficiente de Poisson
- m – Massa em kg
- n – Índice politrópico dos gases
- p – Pressão em N/m^2
- t – Temperatura em $^\circ\text{C}$
- t – Intervalo de tempo em s
- $t_{\text{INC min}}$ – Tempo de incremento mínimo
- $\mathbf{V}$ – Vetor de ruídos gaussianos de medidas com média nula
- v – Volume específico em m^3
- v – Velocidade de propagação da onda
- $\mathbf{x}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- $\overline{x}$ – Estimativa a priori do vetor de estados
- $\hat{x}$ – Estimativa a posteriori do vetor de estados
- x – Elemento solução
- x_G – Movimentos do centro de massa
- x_i – Coordenada a ser estimada

- x_{iL} – Movimentos de baixa frequência, relacionados ao sistema fixado no navio
- x_{si} – Coordenada do sensor receptor
- $\mathbf{x}_L$ – Vetor com as posições em relação ao fixo no navio
- x_p – Variável auxiliar
- x_q – Variável auxiliar
- y – Elemento solução
- y_i – Coordenada a ser estimada
- y_{si} – Coordenada do sensor receptor
- y_p – Variável auxiliar
- y_q – Variável auxiliar
- $\mathbf{z}$ – Vetor das variáveis medidas
- z – Elemento solução
- z_i – Coordenada a ser estimada
- z_{si} – Coordenada do sensor receptor
- z_p – Variável auxiliar
- z_q – Variável auxiliar
- $\mathbf{\Gamma}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- $\mathbf{\Phi}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- α' – Índice de compressibilidade
- λ – Operador de Lagrange
- μ – Coeficiente de viscosidade do ar em kg/ms
- ρ – Massa específica em kg/m³
- ψ_L – Aproximação em relação ao sistema fixo no laboratório
- τ – Intervalo de tempo por reflexão
- $\mathbf{\omega}$ – Matriz auxiliar para manipulação algébrica
- $\mathbf{\omega}_{FEL}$ – Vetor de ruídos brancos gaussianos com média nula

1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação é parte integrante de uma parceria entre o Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle e o Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em que os esforços se concentram, principalmente, no sensoramento e atuação de um Sistema de Posicionamento Dinâmico (SPD) de modelos reduzidos em Tanque de Provas.

Sensores são os órgãos sensoriais dos sistemas tecnológicos físico-químicos, que coletam informações sobre as variações das grandezas presentes no ambiente, transformando e convertendo seus resultados em sinais elétricos ou de outra natureza. São elementos essenciais em centros de pesquisa, na geração e distribuição de energia, na automação industrial de processos, em sistemas meteorológicos e de supervisão ambiental, sistemas hospitalares de suporte à vida, dentre muitos outros exemplos.

O aprimoramento e o desenvolvimento de novos sensores são estimulados pela constante evolução tecnológica da moderna microeletrônica; mesmo sensores relativamente complexos, antes concebidos apenas como instrumentos científicos de grandes dimensões, agora são produzidos como aparelhos compactos e de custos, relativamente, baixos. Além disto, a proliferação de sistemas de controle levou a um universo de novas e surpreendentes aplicações para os sensores ultra-sônicos. Estes estão presentes no nosso dia-a-dia, em alarme de carros, nos sistemas de segurança e nas trenas de curto alcance. Com uma abordagem um pouco mais genérica e teórica, obtêm-se medidores de fluxo, densidade, velocidade, dentre muitas possibilidades para gases e líquidos.

SISTEMAS SENSORES INTELIGENTES

Sensores “sonares” transmitem ondas acústicas e depois recebem seus “ecos” para análise, em processo realizado graças aos transdutores ultra-sônicos, que transformam os sinais elétricos em ondas acústicas e vice-versa. Os sistemas sensores não precisam ser apenas, simples transmissores/receptores ultra-sônicos; na

maioria dos casos, comportam-se como sensores inteligentes, com alto nível de eficiência e repetibilidade nas medições.

Normalmente, estuda-se o meio de propagação através das modificações impostas à onda, desde sua transmissão, até a sua respectiva recepção. O sinal ultra-sônico carrega diversas informações sobre o ambiente em investigação (vide Figura 1.1) e desde que devidamente analisado, conseguem-se obter informações estruturais como densidade, temperatura, pressão, etc.; e informações dinâmicas como velocidade, vazão, reconhecimento multidimensional de posição e orientação, dentre outras grandezas derivadas. Para atingir este desempenho, os sinais são gerados, processados e demodulados por “*hardware*” dedicado, através de algoritmos baseados em modelos para propagação de sinais ultra-sônicos, e em interações entre as variáveis físico-químicas presentes no sistema em análise. Tais sensores podem ser incorporados a sistemas de controle capazes de acessar sensores adicionais, combinando suas informações às dos diferentes sensores, gerenciando barramentos de dados e tomando decisões sobre os fluxos de processamento.

Figura 1.1: Arquitetura dos Sistemas Sensores Ultra-sônicos.

Dependendo de como o sinal ultra-sônico é afetado pelo meio durante sua propagação, os sensores sonares podem ser subdivididos em dois tipos: *sensores de distância e sensores de propagação* (Mágori, 1994).

Existem também os *sensores ultra-sônicos dirigidos*, que detectam as emissões acústicas de objetos; outros são sensíveis à mudança de propriedades de um transdutor em oscilação, através do contato entre variados meios de propagação. Ressalta-se que a discussão sobre estes tipos de sensores não pertence ao escopo desta dissertação (vide Tabela 1.1).

CLASSE	TIPO	APLICAÇÃO
Sensores Ultra-sônicos: Dirigidos	Transdutores transmissores de contato	Contato de objetos Impedância acústica Densidade
	Recepção de emissões acústicas	Deteção de vazamentos Orientação por correlação
Sensores Ultra-sônicos: Sonares Influência na transmissão ultra-sônica do sistema	Sensores de Propagação Influência no tempo de propagação, na fase e na atenuação do sinal	Vazão de volume e massa em gases (efeito derivativo), calor Determinação e checagem do tipo e concentração de gases Transmissão (Barreira Ultra-sônica) Medição rápida de temperatura Medição dinâmica de pressão Turbulência de fluxo (Medidor-Vortex) Densidade
	Sensores de Distância Mudança nas configurações da transmissão pela reflexão dos sinais.	Presença de objetos estacionários e em movimento Distância, posição e nível Características estruturais do objeto, através da separação parcial de ecos, filtro inverso, classificação-Fuzzy, Redes Neurais Estrutura lateral por correlação, abertura sintética, holografia Reconhecimento multidimensional Doppler; Movimento, velocidade, vazão

Tabela 1.1: Classificação dos Sensores Ultra-sônicos.

Sensores de distância baseados nos princípios ultra-sônicos utilizam o tempo de propagação e amplitude do sinal recebido para obter a presença, distância, e o tipo de som refletido pelos objetos presentes no ambiente. Modelos matemáticos apropriados permitem selecionar objetos a serem reconhecidos e classificados. Além disso, detalhes laterais podem ser reconhecidos, introduzindo-se movimentos relativos definidos entre o sensor e o objeto em estudo.

No caso dos sensores de propagação, modela-se o comportamento das variáveis testadas durante a transmissão, sendo que os parâmetros com possibilidade de serem afetados são: velocidade de propagação, difração, refração, variações nas propriedades físicas, dispersão, atenuação, impedância acústica, dentre outros.

VANTAGENS E DESVANTAGENS

As principais vantagens dos sensores ultra-sônicos estão diretamente relacionadas aos materiais e às características construtivas dos transdutores, tais como:

- *Excelente estabilidade a longo prazo,*
- *Baixo consumo de energia e*
- *Baixo custo de produção.*

Em particular, as vantagens específicas dos sensores de distância podem ser consideradas como:

- *Sensibilidade direcional (diretividade);*
- *Alta resolução estrutural devido à sua grande largura de banda;*
- *Possibilidade de medição remota, interferência desprezível com os objetos a serem medidos, grande sensibilidade a diversos tipos de materiais;*
- *Maior resistência aos efeitos da umidade, intempéries ambientais e aos desgastes ocasionados pelo envelhecimento.*

O ultra-som possui propriedades que permitem que sua velocidade seja fortemente modificada pelo meio de propagação; este efeito derivativo em sua velocidade é a base para a alta resolução de medidores de vazão, proporcionando o surgimento de um número ainda maior de novas vantagens para os sensores de propagação:

- *Alto grau de repetibilidade, alta linearidade e resposta rápida;*
- *Aplicabilidade a uma grande variedade de gases e líquidos;*
- *Alta sensibilidade em relação à temperatura e a outras propriedades dos fluidos.*

As deficiências dos sistemas sensores ultra-sônicos ocorrem, normalmente, associadas às propriedades que são vantagens em outros momentos. Tomemos como exemplo, a variação da velocidade de propagação devida à influência da temperatura e à composição dos materiais, ou a alta diretividade dos transdutores. O efeito da atenuação na propagação do sinal com o aumento da frequência, limita a medição a curtas distâncias, se comparadas às obtidas pelos sistemas sensores óticos ou baseados em microondas. De qualquer forma, nestes casos, pode-se aumentar a potência de transmissão ou podem-se selecionar baixas frequências, ao custo da redução na resolução e ao aumento da sensibilidade do sistema sensor à interferência causada pelos ruídos acústicos presentes no ambiente.

1.1 Objetivo

O objetivo central deste trabalho, compilado e apresentado nesta dissertação, sintetiza-se em projetar e construir um sensor de posição e orientação baseado na emissão e recepção de sinais acústicos sincronizados de alta frequência. O seu desenvolvimento está diretamente relacionado à área de instrumentação laboratorial, onde sua utilização se dá na realimentação em compensadores de posicionamento dinâmico para modelos reduzidos em Tanque de Provas.

Como objetivo mais amplo do projeto tem-se a elaboração e implementação da infra-estrutura eletrônica de sensoriamento, controle e gerenciamento, necessária ao desenvolvimento de um SPD.

O sistema sensor proposto nesta dissertação, a princípio, está classificado como um *Sonar Atmosférico*, pertencente à classe dos *Sensores de Distância* (posicionamento e orientação). Entretanto, utiliza uma topologia diferenciada, capaz de sincronizar suas transmissões através de sinais de rádio-frequência, dispensando desta forma o tratamento dos sinais de eco, o que torna o sistema mais robusto, uma vez que, este sendo menos suscetível às variações do meio, consegue compensar com relativa facilidade a maioria das perturbações. Tal característica teoricamente conflita com a definição dos sonares: sensores de distância, pois não manipulam os sinais de eco (reflexões). Conseqüentemente, o sensor proposto neste trabalho deveria pertencer a uma nova classe de sensores ultra-sônicos, contudo, este texto não objetiva discutir os critérios de classificação dos sensores ultra-sônicos. Portanto, manter-se-á a classificação mais usual apresentada anteriormente.

1.2 Justificativa

Normalmente, tanto o estudo da dinâmica como a determinação dos coeficientes do modelo hidrodinâmico de unidades flutuantes são efetuados realizando-se ensaios com modelos, em escala reduzida, em tanque de provas onde são gerados ventos, correntezas e ondas. Durante tais ensaios, na maioria dos casos, é necessário mensurar a posição e a velocidade da embarcação para obter, de forma precisa, as características dinâmicas do modelo. Em princípio, estas variáveis são medidas através de sensores baseados em potenciômetros, sistemas ópticos e raios infravermelhos; no entanto, a utilização de um ou outro sistema é um compromisso entre o custo e a precisão das medidas requeridas durante os ensaios.

Os sistemas baseados em potenciômetros necessitam de acoplamentos mecânicos, havendo neste caso uma interferência com o modelo em escala, o que pode afetar a sua dinâmica. No que se refere aos sistemas de medição baseados em princípios ópticos e raios infravermelhos tem-se a vantagem de não haver elos mecânicos entre o modelo e o sensor; porém, os seus custos são relativamente elevados.

Em conformidade com o atual nível de tecnologia, sistemas digitais de alto desempenho permitem desenvolver instrumentos robustos e confiáveis, de grande precisão, embasados em princípios físicos clássicos e otimizados para cada aplicação, compatibilizando a natureza, o custo e a precisão dos ensaios.

A partir das ponderações supracitadas, justifica-se tal desenvolvimento, levando-se em consideração a atual necessidade de se validar modelos em escala reduzida e o fato de inexistir um sistema sensor semelhante, na essência de sua topologia ou mesmo de seu custo.

1.3 Contextualização – Revisão Bibliográfica

Para desenvolver-se o presente trabalho, realizou-se uma vasta pesquisa, em inúmeras fontes e em diversas áreas. Basicamente, os materiais utilizados como base para pesquisa foram dissertações, teses, livros, a rede mundial de computadores (Internet), catálogos de fornecedores e artigos nacionais e internacionais.

A pesquisa enfocou, num primeiro momento, o estudo do ultra-som como fenômeno e instrumento. Nesta etapa, estudou-se o fenômeno físico em si, suas propriedades e características especiais, os materiais e o princípio de funcionamento dos transdutores piezo-elétricos, os diversos tipos de sensores ultra-sônicos e suas possíveis aplicações, a eletrônica envolvida (controle e gerenciamento), especificações técnicas de produtos comerciais (frequência, potência, precisão, admitância, diretividade, resposta em frequência, etc.), principais fabricantes e seus respectivos fornecedores.

Sites interessantes sobre sensores e transdutores:

<https://www.jameco.com/>

<http://www.senix.com/>

<http://www.turck.com.br/produtos.htm>

<http://planeta.terra.com.br/arte/risnik/ultrasom.html>

<http://tesla.eletrica.ufpr.br/ie02/slm99/>

<http://www.4qdttec.com/ultra.html>

Sites de noticiários técnicos:

<http://www.amato.com.br/checkup/ecodoppler.html>

http://www.sensant.com/news_docs/

<http://www.uol.com.br/cienciahoje/>

Sites dos centros tecnológicos:

http://www4.cptec.inpe.br/port/sensores_pcds.htm

<http://www.cei.sp.senac.br/graduacao/Abstracts/RT08-00.htm>

http://www.fem.unicamp.br/~lsam/rover_main.html

<http://www.pcs.usp.br/~robotica/projetos.htm>

Artigo – Resumo técnico sobre sensores e transdutores:

http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/automacao/autoa07.pdf

Artigo sobre controle de vazão:

http://www.sensant.com/news_docs/FlowControlArticle.pdf

Artigo sobre a análise de permeabilidade:

<http://www.imes.ethz.ch/st/research/projects/3d-permeability.pdf>

Muitos artigos, revistas e *sites* foram especialmente pesquisados em busca de informações sobre o atual Estado da Arte dos transdutores ultra-sônicos, sua tecnologia, ramos de desenvolvimento, suas aplicações e, obviamente, as pesquisas mais modernas, consideradas de ponta, para realmente ter-se a noção real do nível de desenvolvimento atingido internacionalmente neste assunto (Santos, 2003).

Como resultado desta primeira etapa de pesquisa, constatou-se que esta área de desenvolvimento abrange um universo muito maior do que se imaginava. O conhecimento já conquistado e o potencial de novas possibilidades são inúmeros, indo desde aplicações singelas, como apitos ultra-sônicos para “espantar” pragas, podendo chegar até às aplicações extremamente complexas como armas ultra-sônicas de última geração. Para ilustrar as aplicações desta área, dentre as mais interessantes destacam-se:

Aplicações domésticas: Apitos inibidores para cães, repelentes de pestes (ratos, morcegos e pernilongos), detectores de presença, alarmes utilizados por sistemas de segurança, mini-sonares para estacionamentos para evitar colisões com pilastras ou balizas, etc.

Sites de curiosidades eletrônicas:

<http://www.discovercircuits.com/U/ultrasonic.htm>

<http://www.web-ee.com/default.htm>

- ***Aplicações de limpeza minuciosa e delicada:*** A lista de potenciais aplicações para os limpadores ultra-sônicos é interminável. Basicamente, são equipamentos especiais que utilizam o processo de cavitação (movimento turbulento cíclico apresentado por um fluido quando excitado por vibrações ultra-sônicas) na limpeza de instrumentos de precisão, tubos de ensaio e materiais delicados de laboratório em geral. Atualmente, os fabricantes têm se dedicado a produzir equipamentos cada vez mais confiáveis, competitivos e de acordo com as necessidades dos usuários.

Sites dos fabricantes e fornecedores de equipamentos de ultra-som:

<http://www.bluewaveinc.com/>

<http://www.geneq.com/catalog/>

<http://goldstar-ultrasonic.com/>

<http://www.relacx.com/>

<http://www.sensant.com/n>

<http://www.shimadzu.com.br/med/Produtos/Ultrasom/SDU2200.htm>

Aplicações na Medicina: A modernização das técnicas empregadas na ultra-sonografia tem proporcionado o desenvolvimento de equipamentos capazes de monitorar os fluxos sanguíneos, o sistema cardiovascular e gerar imagens intra-uterinas em 3D. A ultra-sonografia tornou-se uma aliada indispensável da Medicina para o diagnóstico mais preciso de doenças, proporcionando aos pacientes uma maior garantia de cura e sobrevivência.

Artigo sobre a visualização volumétrica 3D:

<http://w3.impa.br/~tron/pdf/mcc0399.pdf>

Artigo sobre a análise de permeabilidade:

<http://www.imes.ethz.ch/st/research/projects/3d-permeability.pdf>

- **Aplicações em instrumentação e na indústria em geral:** No ramo da instrumentação, os sensores e transdutores de ultra-som são largamente utilizados em produtos ou aplicações relacionadas, direta ou indiretamente, com medidores de distância ou deslocamento; estes produtos são representados, principalmente, pelas trenas ultra-sônicas e sonares de vários tipos. A segunda etapa desta investigação bibliográfica concentra-se na pesquisa deste tipo específico de aplicação, com especial interesse nas trenas ultra-sônicas e sensores similares.

Sites dos fabricantes e fornecedores de sensores e transdutores:

http://www.bannerengineering.com/literature_resources/

<http://www.guib.com.br/Hp/Banner/>

- **Pesquisas modernas e tendências:** A utilização de sensores ultra-sônicos está apenas se iniciando. Várias universidades espalhadas pelo mundo estão empenhadas no desenvolvimento de novas aplicações, na pesquisa de novas topologias construtivas, novos materiais e na miniaturização dos sensores. Além das universidades, muitos outros grandes centros corporativos tecnológicos estão investindo em laboratórios e fornecendo recursos para pesquisa nesta área. Atualmente, um dos grandes motivos que incentivam estas pesquisas é a possibilidade de empregar sensores ultra-sônicos no lugar de outros tipos de sensores (por exemplo, sensores a laser), visando a minimização dos custos de supervisão e dos sistemas de controle. Com o avanço da tecnologia na área de materiais, os

transdutores ultra-sônicos têm-se tornado cada vez mais eficientes, o que influencia diretamente no rendimento, na confiabilidade, na robustez e na calibração de possíveis sensores. Isto tem nos conduzido a aplicações fantásticas que vão desde complexos sistemas de telemetria até às aplicações *hi-tech* como os MEMS (Micro ElectroMechanical Systems). Dentre as aplicações nacionais consideradas como o Estado da Arte, são apresentadas a seguir:

▼ **Automação do processo de avaliação de desempenho de tratores em implementos em campo:** A idéia principal desta aplicação, desenvolvida pela EMBRAPA, consiste em monitorar o desempenho de tratores, levantando suas curvas de potência e rendimento, visando a otimização de vários funcionais, minimizando o tempo e o consumo das máquinas, com o objetivo de maximizar a vida útil dos equipamentos e o lucro para o proprietário. Os sensores ultra-sônicos foram utilizados como medidores de distância nos sistemas de controle utilizados nos tratores.

Artigo sobre a telemetria de tratores:

[http://atlas.sct.embrapa.br/pab/pab.nsf/1369aa7a4f8bbb9d03256508004f4e1d/76b8dab8a0714fa7032567cb007a4031/\\$FILE/pab97_298.pdf](http://atlas.sct.embrapa.br/pab/pab.nsf/1369aa7a4f8bbb9d03256508004f4e1d/76b8dab8a0714fa7032567cb007a4031/$FILE/pab97_298.pdf)

▼ **Robôs móveis:** Aplicação desenvolvida pelo LSAM (Laboratório de Sistemas Ativos e Mecatrônica) da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Os sensores de ultra-som são usados na robótica para localização da superfície de objetos, determinação da posição do robô num certo ambiente, esquemas de navegação e, na maioria dos casos, para detecção de obstáculos. Estas técnicas também estão sendo utilizadas no projeto de um Simulador de Controle Lógico Paraconsistente, conhecido como PARA-SIM, numa parceria estabelecida entre diversos centros tecnológicos nacionais.

Site do centro tecnológico:

<http://www.unicamp.br>

▼ **Carro inteligente:** A novidade está sendo desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Brasília (UNB) com colaboração da Fiat e do Instituto Nacional

de Pesquisa em Informática e Automação da França (INRIA). O aparelho para estacionar veículos é composto por sensores de ultra-som de funcionamento análogo ao dos “radares” que permitem aos morcegos se localizarem no meio ambiente. O carro apresenta 16 sensores distribuídos, igualmente, pelas suas laterais e pára-choques que, acionados pelo motorista, emitem ultra-sons e determinam a distância de elementos externos, pela velocidade do som e pelo tempo que este leva para retornar, após colidir com os objetos localizados no exterior do automóvel.

Site de noticiário técnico:

<http://www.uol.com.br/cienciahoje/>

▼ **PIG de inspeção por ultra-som:** Um *pig* é um equipamento utilizado na indústria petrolífera para levar sensores e outros instrumentos pelo interior de tubulações, como os oleodutos. Um equipamento deste tipo está sendo desenvolvido pelo Laboratório de Sensores e Atuadores do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em parceria com o Centro de Pesquisas (CENPES) da Petrobrás. Será utilizado para localizar pontos de corrosão acentuada e outras falhas em oleodutos por meio de sensores de ultra-som, sendo a inspeção feita por meio de pulsos de ultra-sônicos. Este método é baseado na determinação do tempo de propagação de uma onda acústica, que se propaga no meio líquido e se reflete ao atingir a parede interna do tubo. O sinal refletido pela parede interna fornece a distância do emissor ao tubo, que é utilizada para avaliar a corrosão interna.

Site do Laboratório de Mecatrônica da POLI-USP:

<http://www.pmr.poli.usp.br/lSAT/>

Algumas aplicações internacionais consideradas como o Estado da Arte:

▼ **Indústria Bélica (Acoustic Weapons):** As armas acústicas que estão sendo pesquisadas e desenvolvidas em alguns países são anunciadas como armas não letais. Seus projetistas dizem que estas são capazes de imobilizar imediatamente seus oponentes, evitando assim o permanente contato físico. Não existem informações confiáveis e precisas sobre as especificações ou o verdadeiro efeito dessas novas

armas. No entanto, registram-se pesquisas sobre os efeitos de grandes amplitudes de som no ser humano e projetos de fontes de alta potência para propagação de sons extremamente fortes.

Para maiores informações consultar o *site*:

http://www.princeton.edu/~globsec/publications/pdf/9_3altmann.pdf.

MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*): Novos sensores ultra-sônicos baseados em silício (Semicondutores) estão prontos para se combinarem com outros tipos de sensores (pressão e acelerômetros), perseguindo custos acessíveis e a popularização desta recente tecnologia. Estes novos aparelhos trazem aperfeiçoamentos revolucionários que interferem diretamente, tanto no custo como no desempenho, representando o maior avanço na tecnologia de sensores ultra-sônicos.

Artigo sobre os MEMS:

http://www.sensant.com/news_docs/!SEN5108x.pdf

Concluída esta primeira etapa de pesquisas, partiu-se para a seguinte, em que os esforços concentraram-se na busca por maiores esclarecimentos e pela especificidade de informações sobre os sistemas sensores ultra-sônicos de posicionamento e orientação, suas aplicações, as áreas de desenvolvimento e atuação, topologias mais utilizadas (Gao et al., 1998 e Osuna et al., 1998), a eletrônica envolvida, os exemplos comerciais, as especificações técnicas, o rol de fabricantes; em suma, tudo que estivesse relacionado, direta ou indiretamente, com o assunto ou que possuísse algum tipo de relevância para a estruturação, organização, procedimentos para a implementação do projeto.

Nesta busca foram analisados vários artigos sobre o assunto em questão (Ruser et al., 2003; Wang et al., 2000; Bang et al., 1995; Bartaseh et al., 1997 e Sabatini et al., 1998), em que, na grande maioria, demonstravam-se apenas os resultados de seus experimentos, sem comentários sobre detalhes, necessários à reprodução eletrônica das topologias utilizadas. De modo geral, os artigos apresentavam diversas aplicações relacionadas ao tema principal (Nilsson et al., 1994; Akbarally et al., 1995; Li et al., 1995; Shinohara et al., 1992 e Marioli et al., 1992), mas longe de

serem considerados semelhantes ao proposto por este trabalho. Acredita-se que este problema possa ter ocorrido devido à dificuldade de se realizar as pesquisas pela *Internet*, uma vez que o material existente é bastante abrangente. Contudo, como os temas e títulos destes artigos são extremamente específicos (Fiorillo, 2000; Mágori, 1989; Barbieri et al., 1990; Ros et al., 1992 e Unnikrishnan et al., 2002), as opções de busca baseadas em palavras-chaves realizadas em bancos de dados bibliográficos forneceram poucos resultados, o que foi devidamente compensado através da investigação em diversos *sites* clássicos e demais portais técnicos (FAPESP, Pesquisa Educacional Portugal, CAPES, Web of Science, PROBE, EBSCO e SABER).

Dessa forma, não dispondo de material suficiente para iniciar o projeto de um patamar tecnológico mais elevado, voltaram-se os esforços de pesquisa para as fontes teóricas de instrumentação e eletrônica, forçando o desenvolvimento de um sistema sensor sem precedentes conhecidos. Tal desenvolvimento baseou-se em sistemas eletrônicos consagrados, relacionados aos sensores de posicionamento direcionados à navegação, seus algoritmos de triangularização (Milne, 1983), a lógica combinacional e sequencial de seus circuitos (Tetley et al., 1986) e (Russo, 1999) e suas arquiteturas operacionais.

Como resultado desta etapa, idealizou-se um sensor de posicionamento e orientação com topologia baseada em dois subsistemas independentes, sincronizados por rádio-frequência e compostos por quatro transdutores distintos cada.

No decorrer das experiências evidenciaram-se alguns problemas acústicos, diretamente relacionados ao fenômeno físico de interferência entre sinais. Uma nova pesquisa fez-se então imprescindível, dando origem assim a uma nova investigação, buscando novas fontes, novos *sites* e artigos (Choset et al., 2003; Veryha et al., 2000; Mizutani et al., 1998).

As importantes informações obtidas sobre os fenômenos de interferência, suas propriedades, eventuais causas e possíveis soluções, além de interessantes e atualizados artigos sobre métodos, algoritmos e topologias diferentes, capazes de melhorar o desempenho do sistema sensor proposto, através da detecção e tratamento da fase dos sinais transmitidos (Figueroa, 2001), serão devidamente explanadas e analisadas nos capítulos subsequentes.

Finalizando esta contextualização, conclui-se que é extremamente complexo estabelecer limites ou definir o Estado da Arte de um tema tão moderno quanto a instrumentação relacionada aos transdutores ultra-sônicos. Sabe-se que a velocidade de evolução dos sistemas sensores, da microeletrônica e da engenharia de materiais, impossibilita conhecer com precisão o atual nível de desenvolvimento tecnológico atingido pelo conhecimento humano. Considere-se ainda a possibilidade do verdadeiro Estado da Arte encontrar-se provavelmente sob a responsabilidade de algum centro de pesquisa ou laboratório militar, fato que causaria um atraso de alguns anos na divulgação dos resultados das pesquisas mais avançadas.

Portanto, sem receio de se expressar à comunidade científica, acredita-se que as informações apresentadas nesta dissertação são compatíveis e coerentes com as apresentadas pelos diversos artigos nacionais e internacionais pesquisados e analisados durante o decorrer do projeto. As mais diversas formas de pesquisa, análise e estudos dirigidos a esta área são considerados válidos, podendo produzir resultados de extrema relevância para o futuro da espécie humana, em decorrência de sua intelectualidade, criatividade e curiosidade diante dos fenômenos naturais.

1.4 Organização do texto

A presente dissertação foi organizada de forma coerente, para expor as informações, resultados e contribuições de maneira clara e objetiva, visando à sobriedade e a lucidez de um relatório experimental minuciosamente detalhado. No Capítulo 1 os temas abordados são apresentados dentro do contexto atual do desenvolvimento de sistemas sensores ultra-sônicos, através de uma INTRODUÇÃO teórica e uma contextualização. Ao longo dos capítulos e seções seguintes, ocorrem revisões e discussões bibliográficas específicas sobre alguns assuntos abordados, apresentadas, portanto, dentro de um contexto mais apropriado.

No Capítulo 2 são apresentados todos os algoritmos de triangularização, as topologias estudadas e utilizadas, métodos numéricos empregados no desenvolvimento dos algoritmos, estudos sobre a sensibilidade do sistema sensor às variáveis ambientais, arquitetura estrutural do sistema, explanação sobre o histórico

de desenvolvimento do projeto, e muitas outras informações relevantes utilizadas no SENSORIAMENTO do sistema sensor.

No Capítulo 3 são apresentados e detalhados todos os circuitos eletrônicos utilizados pelo sensor e pela INFRA-ESTRUTURA ELETRÔNICA do SPD, seus diagramas de blocos, lógicas de acionamento, descrição de funcionamento dos subsistemas e periféricos, filtros mais relevantes para o projeto, *layouts* mecânicos construtivos, principais características e propriedades, além de todos os procedimentos e experimentos realizados no decorrer do projeto; visando a CALIBRAÇÃO do sistema sensor, ensaios estáticos e dinâmicos, métodos para rotinas de calibração para ensaios precisos e sugestões de novas topologias para aumentar a precisão e a acurácia do sistema.

No Capítulo 4 são expostos todos os RESULTADOS obtidos através dos muitos ensaios e experimentos realizados no decorrer do projeto, desempenho, análises estatísticas, problemas constatados e suas eventuais soluções.

No Capítulo 5 são apresentados comentários, análises e ponderações sobre todas as etapas do desenvolvimento do sistema sensor, sintetizando as CONCLUSÕES finais referentes às observações realizadas durante o projeto.

Apêndices complementam a documentação presente nesta dissertação, trazendo diagramas elétricos, desenhos mecânicos, fotos, gráficos, tabelas, circuitos e cálculos eletrônicos, listas de materiais, etc.

* * * * *

2. SENSORIAMENTO

Como mencionado anteriormente, o trabalho detalhado nesta dissertação teve por objetivo projetar um sensor de posição e orientação, a princípio, genérico, mas que fosse facilmente incorporado a um SPD.

Define-se “Posicionamento Dinâmico” como um sistema capaz de controlar automaticamente a posição e o aproamento de uma embarcação por meio de propulsão ativa (Tannuri, 2002). Esta definição elucida, porém, não transmite totalmente a complexidade da tecnologia necessária para proporcionar à embarcação esta funcionalidade. Respeitando a integração harmônica e característica dos subsistemas que compõem a estrutura dos sistemas de posicionamento dinâmico, fundamentou-se o projeto do sensor de posição e da infra-estrutura destes na filosofia de controle centralizado, onde um único módulo embarcado é responsável pelo sensoramento (temperatura ambiente, tensão e autonomia do banco de baterias e *encoders* para medir a posição angular do leme e do propulsor azimuthal), pelo controle direto dos atuadores (motores DC e motores de passo) e pelo gerenciamento da comunicação entre a embarcação (Modelo) e o computador principal (Base).

Partindo desta premissa, ponderou-se sobre diversas topologias e métodos largamente difundidos para o sensor de posição, através do estudo, da análise cuidadosa de seus conceitos físicos fundamentais, bem como da sua relação custo-benefício. Como resultado desta pesquisa, adotou-se para o sistema de sensoramento principal, o método de análise e medição que utiliza a propagação de sinais acústicos.

Com base nestas informações e de posse de todo o conhecimento necessário para o projeto e sua respectiva construção, desenvolveu-se a infra-estrutura eletrônica básica indispensável ao SPD que, todavia, apresentou alguns problemas e certas deficiências de projeto que tiveram de ser corrigidas ou contornadas no decorrer da execução dos experimentos. As modificações impostas ao projeto, conduziram-no a dois estágios distintos de desenvolvimento que serão devidamente comentados e esclarecidos ao longo da presente dissertação.

2.1 PROPAGAÇÃO E NATUREZA DA ONDA ULTRA-SÔNICA

O ultra-som é o resultado das vibrações dos corpos elásticos, chamadas de vibrações sonoras, e se transmitem ao meio que circunda a fonte sonora, produzindo compressões e distensões sucessivas, que se propagam com velocidade uniforme em todas as direções, desde que a propriedade elástica do meio seja igual em todos os seus pontos, isto é, desde que o meio seja isotrópico. O ultra-som, portanto, se propaga por meio de impulsos ocasionados ao meio em torno do corpo sonoro, os quais provocam deformações transitórias que se movimentam longitudinalmente, de acordo com a onda de pressão criada (Costa, 2003).

Como todo movimento material, o ultra-som apresenta certa energia que, em vista das resistências opostas ao seu deslocamento (atrito devido à viscosidade, inércia, obstáculos, etc.), é restituída ao meio, através de dois processos:

- 1) A onda ultra-sônica encontra um obstáculo (corpo sólido ou mesmo outro meio elástico fluido de densidade diferente) ao qual cede parte da sua quantidade de movimento, de modo que parte de sua energia é transferida a aquele, que entra em vibração;*
- 2) Uma transformação da energia cinética da onda ultra-sônica devida à viscosidade do próprio meio em que ela se propaga na forma de calor.*

Portanto, apenas parte da energia transmitida ao meio dá origem a uma vibração sonora, enquanto a restante é transformada em calor. As vibrações recebidas pelo meio, por sua vez, são transmitidas às partículas adjacentes, até que a energia mecânica disponível, diminuindo a cada transmissão de movimento, não ocasione mais vibrações perceptíveis.

Em virtude da natureza da onda ultra-sônica, esta somente se propaga nos meios elásticos ou corpos de uma maneira geral, sejam aeriformes, líquidos ou sólidos, sendo sua velocidade de propagação uma função das propriedades do meio (módulo de elasticidade e densidade). Ao contrário da luz e das diversas ondas eletromagnéticas, as ondas ultra-sônicas não se propagam no vácuo.

A análise matemática do movimento tridimensional de uma onda em um fluido perfeito, que seria o caso mais geral para o estudo da propagação da onda

sonora nos meios elásticos é de grande complexidade. Portanto, analisar-se-á a propagação das ondas elásticas longitudinais (consideradas planas) num meio compressível, contínuo e isotrópico, o que atende perfeitamente ao objetivo deste trabalho.

A consideração da propagação do som por meio das ondas planas somente é possível na hipótese de que a fonte sonora seja constituída por um plano infinito. Na prática, entretanto, as conclusões que se obtêm, aplicando-se este proceder a uma onda de grande curvatura, como ocorre com aquelas que se encontram bastante afastadas da fonte, são satisfatórias (Costa, 2003).

2.1.1 Compressibilidade

Compressibilidade ou elasticidade tridimensional de um corpo é a característica pelo qual o mesmo sofre variações de volume sobre a ação de variações da pressão externa. Todos os corpos ou elementos ponderáveis da natureza são compressíveis, embora na análise de certos fenômenos, os líquidos e os sólidos possam ser considerados como incompressíveis devido à sua baixa compressibilidade.

A compressibilidade de uma substância qualquer é caracterizada pelo chamado índice de compressibilidade α' , o qual é definido como sendo a relação entre a variação de volume e a variação de pressão sofrida pela unidade de volume da mesma, isto é:

$$\alpha' = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp}, \quad (2.1)$$

onde, no sistema internacional de unidades SI:

V - é o volume em m^3

v - é o volume específico em m^3/kg

p - é a pressão em N/m^2 ,

de modo que o coeficiente de compressibilidade tem por unidade m^2/N .

Ao inverso do coeficiente de compressibilidade, dá-se o nome de módulo de elasticidade E :

$$E = \frac{1}{\alpha'} = -\frac{v}{1} \frac{dp}{dv} \quad \text{N/m}^2 \quad (2.2)$$

Para a água a 0°C e à pressão atmosférica, o módulo de elasticidade vale aproximadamente:

$$E = 2,128 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

Para os gases perfeitos, pode-se calcular o módulo de elasticidade, a partir da equação geral das transformações politrópicas:

$$pv^n = \text{constante}$$

Isto é:

$$npv^{n-1}dv + v^n dp = 0$$

Ou seja:

$$\frac{dp}{dv} = -\frac{np}{v}$$

Donde:

$$E = -\frac{vdp}{dv} = np \quad (2.3)$$

Conclui-se então que o módulo de elasticidade dos gases depende do tipo de transformação, seguida pelo mesmo durante a variação de pressão.

Na propagação das ondas de pressão do som nos gases, onde a transformação graças a sua rapidez pode ser considerada, teoricamente, como isentrópica (adiabática sem atrito) $n = k$, ter-se-ia, com boa aproximação:

$$E = kp \quad (2.4)$$

Considerando o ar como um gás perfeito e lembrando que para o mesmo, o coeficiente de Poisson $k = C_p/C_v = 1,4$, pode-se dizer que à pressão atmosférica normal, o módulo de elasticidade vale:

$$E = 1,4 \times 101,315 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2 = 141,842 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$$

Ou seja, é cerca de 15.000 vezes inferior ao da água.

2.1.2 Velocidade de propagação longitudinal das ondas de pressão num meio contínuo isotrópico

A transmissão das pressões no meio de uma massa fluida não é instantânea, pois leva um determinado tempo para a onda percorrer uma certa distância, o que caracteriza uma velocidade de deslocamento que é, na realidade, igual à velocidade de propagação do som no meio considerado.

Dentro da hipótese formulada no início deste tópico, a determinação da expressão desta velocidade de deslocamento no sentido longitudinal, num meio compressível, pode ser feita considerando-se um fluido contínuo e isotrópico contido num tubo rígido de seção S , tendo em uma de suas extremidades um pistão (vide Figura 2.1).

Figura 2.1: Velocidade de propagação do som.

Deslocando o pistão para a direita com uma velocidade c_x , durante um intervalo de tempo t , haverá um acréscimo de pressão Δp , que se propagará através do fluido com uma velocidade c que é a velocidade do som no mesmo.

Assim, no intervalo de tempo t , o pistão terá deslocado uma massa fluida de massa específica r , igual a $Sc_x tr$, enquanto devido ao acréscimo de pressão Δp , a massa específica do fluido entre 1 e 2 sofrerá um acréscimo Δr .

Como a massa deslocada pelo pistão deve ser igual à variação de massa devida ao acréscimo de densidade, devemos ter:

$$Sc_x tr = Sct\Delta r$$

Isto é:

$$c = \frac{c_x \mathbf{r}}{\Delta \mathbf{r}} \quad (2.5)$$

Por outro lado, a força que impulsiona a massa m de fluido deve ser igual ao produto desta massa pela aceleração c/t que a mesma adquire:

$$F = ma \Rightarrow S Dp = S c_x t \mathbf{r} \frac{c}{t}$$

Isto é:

$$c = \frac{\Delta p}{c_x \mathbf{r}} \quad (2.6)$$

O produto das equações 2.5 e 2.6 fornece:

$$c = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \mathbf{r}}} = \sqrt{\frac{dp}{d\mathbf{r}}} \quad (2.7)$$

Como a massa específica $\mathbf{r} = 1/\nu$, pode-se fazer:

$$\mathbf{r} = \frac{1}{\nu} = \nu^{-1}, \quad d\mathbf{r} = -\frac{d\nu}{\nu^2}$$

De modo que obtêm-se ainda:

$$c = \sqrt{-\frac{\nu^2 dp}{d\nu}}$$

Substituindo a expressão do módulo de elasticidade E dada na equação (2.2), obtêm-se:

$$c = \sqrt{E\nu} = \sqrt{\frac{E}{\mathbf{r}}} \quad (2.8)$$

2.1.3 Velocidade de propagação do ultra-som nos diversos meios

Para o caso de líquidos e sólidos que têm uma compressibilidade muito pequena, pode-se considerar, dentro dos limites de aplicação dos problemas práticos, r como constante, e a velocidade de propagação do som nos mesmos pode ser calculada com bastante exatidão pela expressão (2.8).

Assim, adotando-se o sistema de unidades internacional SI, no qual o módulo de elasticidade é dado em N/m^2 e a massa específica é dada em kg/m^3 , pode-se calcular para a água destilada:

$$E = 2,13 \cdot 10^9 N/m^2$$

$$r = 1000 kg/m^3$$

Donde:

$$c = \sqrt{\frac{2,13 \cdot 10^9}{10^3}} = 1,461 \cdot 10^3 m/s$$

A Tabela A.1 – Velocidade de propagação do som nos líquidos e sólidos, fornece os valores médios dos elementos de cálculo e das velocidades do som, para as condições normais de diversos líquidos e sólidos (vide informações contidas no Apêndice A).

Para o caso dos aeriformes, que são altamente compressíveis e ainda apresentam um módulo de elasticidade proporcional à pressão que suportam, a velocidade do som depende como visto, da transformação sofrida pelo fluido, durante o processo de propagação. Nestas condições, é preferível calcular a velocidade do som nos aeriformes, a partir da expressão (2.6):

$$c = \sqrt{Ev},$$

onde, portanto em virtude da rapidez da transformação, considerando a operação teoricamente como isentrópica (adiabática sem atrito), o módulo de elasticidade assume o valor da expressão (2.4), ou seja, $E = kp$, de modo que:

$$c = \sqrt{kp v} \quad (2.9)$$

Os gases permitem ainda uma simplificação da equação acima, pois de acordo com a equação geral dos gases perfeitos:

$$pv = RT ,$$

de modo que se pode escrever:

$$c = \sqrt{kRT} , \quad (2.10)$$

onde a temperatura absoluta em graus Kelvin $T = t + 273$, e t é a temperatura em graus Celsius.

A equação anterior mostra que, na propagação do som nos meios ditos compressíveis (gases e vapores), bem definidos ($R, k = C_p / C_v$), a velocidade depende unicamente da temperatura.

A Tabela A.2 – Velocidade de propagação do som nos líquidos e sólidos, fornece as características de cálculo e as velocidades do som para alguns aeriformes, para a temperatura de 20°C (vide informações contidas no Apêndice A).

Chamando, por outro lado, de c_0 a velocidade do som a 0°C, isto é:

$$c_0 = \sqrt{kRT_0} = \sqrt{273kR}$$

Pode-se calcular a velocidade do som em um gás, a partir da velocidade do som no mesmo a 0°C:

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (2.11)$$

Assim para o ar, no qual a velocidade do som a 0°C vale:

$$c_0 = \sqrt{1,4 \times 287,02 \times 273} = 331 \text{ m/s}$$

$$c = 331 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = 331 \sqrt{\frac{273+t}{273}} = 331 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273}\right)} \cong 331 + 0,606t \quad \text{m/s,}$$

sendo que a aproximação vale se $t \ll 273$.

2.1.4 Análise da sensibilidade da velocidade de propagação

O algoritmo para a obtenção da posição requer o conhecimento do valor da velocidade do som através do ar; considerar-se-á somente para fins práticos que esta seja apenas função da pressão atmosférica e da temperatura do meio ambiente $c = f(T, P)$. Devido às eventuais variações de temperatura e pressão atmosférica durante os ensaios, a resposta real do instrumento será diferente da ideal; empregar-se-á o conceito de sensibilidade como uma maneira de prever tal desvio. Especificamente para a velocidade do som é interessante saber quão sensível será o sensor em relação às variações de temperatura e pressão. Essas sensibilidades podem ser quantificadas para uma função $y=y(x)$ usando-se a função clássica da sensibilidade S_x^y definida pela equação 2.12 (Sedra, 2000).

$$S_x^y \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x} \quad (2.12)$$

Portanto,

$$S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \quad (2.13)$$

Neste caso, definir-se-á a sensibilidade da velocidade do som em relação à temperatura como S_T^c e à pressão como S_P^c . Para fins de cálculo, ressaltam-se apenas as variáveis temperatura T e pressão P , considerando k para todos os outros parâmetros constantes. Logo,

$$c = \sqrt{\frac{E}{r}} = \sqrt{Ev}$$

Como,

$$Pv = RT \Rightarrow v = \frac{RT}{P}$$

Substituindo,

$$c = \sqrt{\frac{ERT}{P}} = \sqrt{\frac{k \cdot T}{P}} \quad (2.14)$$

Como,

$$\frac{\partial c}{\partial T} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{k}{P \cdot T}} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial c}{\partial P} = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T}{P^3}}, \quad (2.16)$$

aplicando a definição de sensibilidade (2.12) às variáveis temperatura e pressão, obtém-se:

$$S_T^c = \frac{\partial c}{\partial T} \cdot \frac{T}{c} \quad (2.17)$$

$$S_P^c = \frac{\partial c}{\partial P} \cdot \frac{P}{c} \quad (2.18)$$

Pode-se resolver as expressões (2.17) e (2.18), utilizando (2.14), (2.15) e (2.16), logo,

$$S_T^c = \frac{1}{2} \quad (2.19)$$

$$S_P^c = \frac{1}{2} \quad (2.20)$$

Para corrigir a velocidade do som utilizar-se-ão as informações meteorológicas sobre as condições climáticas e geográficas características da cidade de São Paulo, obtidas junto ao site: <http://www.inmet.gov.br>.

Figura 2.2: Gráfico da variação de pressão atmosférica em função do tempo na cidade de São Paulo (24 e 25/08/2004).

A partir do gráfico, nota-se que as taxas de variação da pressão atmosférica se alteram ao longo do dia e de um dia para o outro. Então, considerando a maior variação do período, de aproximadamente 1,0205 a 1,0125atm (valores já convertidos do dia 25/08/2004), obtêm-se que tal intervalo implica numa variação de pressão de -0,8%. Conseqüentemente, de acordo com a expressão (2.20), obtêm-se uma variação positiva na velocidade do som de +0,4%. Para 20°C encontram-se:

Pressão atmosférica [atm]	Velocidade do som [m/s]
1,0205	339,448
1,0125	340,786

Tabela 2.1: Influência da variação de pressão atmosférica na velocidade do som.

Portanto, com base nos resultados encontrados, conclui-se que a variação existe e não é insignificante; contudo, para fins práticos, considerar-se-á a pressão atmosférica constante e igual a 1,0180atm para ensaios realizados na cidade de São Paulo.

Analogamente, podem-se realizar os mesmos cálculos com as informações sobre as variações de temperatura.

Figura 2.3: Gráfico da variação de temperatura em função do tempo na cidade de São Paulo (24 e 25/08/2004).

Novamente, nota-se que as variações da temperatura se alteram ao longo do dia e de um dia para o outro. Considerando a maior variação do período, de aproximadamente 287,5 a 301K (valores já convertidos do dia 25/08/2004), obtêm-se que tal intervalo implica em uma variação de temperatura de +4,69%. Conseqüentemente, de acordo com a expressão (2.19), obtêm-se uma variação positiva na velocidade do som de +2,34%. Para 1,0180atm encontram-se:

Temperatura [°C]	Velocidade do som [m/s]
14,5	336,660
28,0	344,473

Tabela 2.2: Influência da variação de temperatura na velocidade do som.

Portanto, conclui-se que a variação de temperatura realmente é significativa, como era esperado, ratificando a necessidade de um tratamento especial. Ciente desta necessidade, no projeto eletrônico previu-se um sensor de temperatura para permitir a compensação da velocidade do som durante os ensaios.

Adotou-se a seguinte fórmula para a velocidade do som (unidades SI) no ar em função da temperatura:

$$c = 19,85513 \cdot \sqrt{T}, \quad (2.21)$$

que resulta da equação (2.14).

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Princípios de funcionamento

Uma boa parte dos métodos utilizados para se medir distâncias que não envolvem vínculos mecânicos baseia-se na medida do tempo de propagação de um certo tipo de energia (ondas eletromagnéticas ou acústicas) entre dois pontos; portanto, para medir uma distância (d), deve-se conhecer a velocidade de propagação da onda (v), levando-se em consideração o meio em que esta se propaga e, então, medir o tempo decorrido (Δt) entre a sua emissão e recepção (vide Figura 2.4). A equação (2.22) fornece a distância d :

$$d = v\Delta t \quad (2.22)$$

Figura 2.4: Princípio de funcionamento da medida de distância.

Ao utilizarem-se sinais ultra-sônicos (ondas acústicas que se propagam com velocidades de aproximadamente 344m/s) propagados através do ar, tem-se que, para intervalos de tempo da ordem de milisegundos, as distâncias resultantes são da ordem de metros. Este fato simplifica, razoavelmente, o projeto eletrônico do sistema responsável pela medição dos intervalos de tempo de propagação, pois podemos utilizar cristais osciladores nas frequências comerciais (4 a 20MHz), implicando em ciclos de instrução compreendidos no intervalo [200ns-1μs], tempo suficientemente pequeno para não afetar a precisão do instrumento e nem comprometer o funcionamento do sistema. Basicamente, a essência do sensor consiste em desenvolver um instrumento eletrônico capaz de medir intervalos de tempo com precisão e resolução adequadas. Tal instrumento será detalhado posteriormente.

2.2.2 Especificações do sistema

Considerando-se as dimensões dos modelos (escala em torno de 1:150) e também os seus deslocamentos e velocidades durante os experimentos, e sabendo que a menor constante de tempo associada ao modelo é da ordem de 1s, têm-se as seguintes especificações de projeto:

- ***Frequência de amostragem ou atualização da posição: 10Hz;***
- ***Precisão: 1 cm;***
- ***Fundo de escala: 18m;***
- ***Desvio padrão máximo: 5mm.***

2.2.3 Descrição do sistema

Para se obter a posição e o aproamento do modelo, duas antenas são instaladas na unidade flutuante em pontos estratégicos, como a proa e a popa, para trabalharem com frequências diferentes, caracterizando sistemas completamente independentes.

Cada antena é responsável pela emissão de pulsos ultra-sônicos modulados para um conjunto de quatro sensores receptores, localizados num plano horizontal e fixados no teto do tanque de provas acima do experimento, totalizando um conjunto de oito sensores, sendo quatro transdutores para cada frequência (para maiores informações, vide Lay-outs Construtivos – Anexo C).

A posição de cada antena ou ponto de referência (proa ou popa) pode ser estimada com base nas medidas das distâncias obtidas a partir dos tempos de propagação entre o emissor (antena) e os quatro receptores (sensores). Conhecida a posição das duas antenas, suas respectivas frequências, e a distância que as separa, obtêm-se dois pontos de referência distintos do modelo. Estes dois pontos definem um segmento de reta, que devidamente orientado, fornece a direção e o sentido do vetor “popa-proa”, e conseqüentemente, obtém-se a localização e o aproamento (y) do modelo em estudo (vide Figura 2.5).

Figura 2.5: Estrutura do sistema de posicionamento.

O sistema de localização neste trabalho não está restrito ao caso bidimensional, isto é, ao plano paralelo à linha d'água, o que possibilita ao usuário estudar os deslocamentos ou determinar a posição vertical da embarcação.

Partindo da premissa de que o intervalo das frequências de trabalho deve ser superior à faixa audível (15Hz-16kHz), as frequências adotadas para o projeto estão restritas ao conjunto de frequências comerciais disponíveis no mercado: 25, 32, 40, 50kHz. Arbitrariamente, adotaram-se as faixas de 25 e 40kHz para as frequências de trabalho, evitando assim o desconforto auditivo dos usuários durante a operação do sistema.

O sistema é composto por um computador principal e duas centrais de processamento microcontrolado: **Base** e a **Embarcação**. A central de processamento embarcada, aqui designada “Embarcação”, é responsável pelo controle, geração e modulação dos pulsos ultra-sônicos emitidos pelas antenas.

O computador principal é o responsável por todos os cálculos necessários para a triangularização dos sensores. Suas informações são realimentadas pela Central de processamento em terra, aqui denominada “Base”. A Base é responsável

pelo gerenciamento do sistema de localização e pela geração da base de tempo necessária aos sensores receptores (vide Figura 2.6).

Figura 2.6: Diagrama de conectividade entre as centrais.

As etapas de um ciclo de operação do sistema são as seguintes.

- O computador principal solicita à embarcação a atualização da posição. Um pacote protocolado com as informações é transmitido de modo serial à Base, que o converte em um sinal modulado no sistema PSK (Phase-Shift Keying) e o transmite através de RF (Rádio Frequência – 315MHz) ao Modelo;

A central de processamento embarcada (Modelo) manipula as informações recebidas:

- Um novo pacote serial protocolado é convertido em um sinal modulado PSK e transmitido de volta à Base através de RF (Rádio Frequência – 433MHz), trazendo informações de status do modelo e sincronizando o timer principal de 16 Bits de resolução, responsável pela geração da base de tempo necessária aos oito transdutores ultra-sônicos de recepção; ao mesmo tempo que um pulso ultra-sônico de 10ms de duração, é irradiado simultaneamente por duas antenas dotadas de transdutores ultra-sônicos;

Os sinais recebidos pelos transdutores ultra-sônicos de recepção geram interrupções no microcontrolador da Base, que automaticamente as associa a cada transdutor que as solicitou, atribuindo-lhe um intervalo de tempo do *timer* principal. Os resultados são então compilados, protocolados e transmitidos ao computador principal para que este calcule e atualize a nova posição.

2.3 PROCEDIMENTOS PARA CÁLCULO

2.3.1 Parâmetros do sistema: alcance máximo, incremento mínimo de tempo e precisão teórica

Para exemplificar alguns parâmetros de projeto, adotou-se nos cálculos posteriores a velocidade do som como sendo 339,87m/s (20°C). Uma vez conhecida esta velocidade, pode-se calcular a precisão teórica atingida pelo sensor com base nos parâmetros digitais de projeto.

O *timer* principal (16bits) do sistema pode ser considerado um contador que é representado por dois registradores de oito bits incrementados, automaticamente, pela estrutura interna do microcontrolador. Tais incrementos ocorrem através de um divisor de frequência interno, conhecido como *Prescaler*, que utiliza o sinal proveniente do cristal oscilador do próprio microcontrolador e determina quantos ciclos de instrução são necessários para que ocorra o próximo incremento do *timer*. Quando este *timer* atinge um valor pré-determinado, interrupções “por estouro de tempo”, pré-programadas são executadas, dando origem a uma “base de tempo” precisa e confiável.

Define-se *Incremento Mínimo de tempo* ($t_{INC\ min}$) como sendo o menor intervalo de tempo atribuído a um incremento do *timer* principal. Portanto, para ciclos de instrução de 200ns¹ e para um *Prescaler* igual a 1:4 (um novo incremento

¹ Para cristal oscilador de 20MHz nos microcontroladores que utilizam o conceito estrutural de quatro sub-ciclos ou fases de processamento para cada ciclo de máquina executado, na realidade, resultando em uma frequência prática de 5MHz na execução de instruções mnemônicas.

de *timer* ocorre a cada quatro ciclos de instrução) obtém-se um incremento mínimo de tempo igual a 800ns (4 x 200ns).

Define-se *Precisão Teórica da Contagem (Pc)* como sendo a menor distância possível de ser mensurada a partir do incremento mínimo de tempo e da velocidade do som.

$$Pc = t_{INC\ min} \cdot V_{SOM} \quad (2.23)$$

Para um incremento mínimo de 800ns, considerando a velocidade do som de 339,87m/s, obtêm-se:

$$\therefore Pc = 271,90mm$$

Define-se *Alcance Máximo* como sendo a maior distância possível de ser mensurada a partir do incremento mínimo de tempo e da velocidade do som, sem que ocorra o estouro do contador de ciclos, isto é, que o contador *timer* principal exceda 65.535.

O alcance máximo A_{MAX} pode ser calculado da seguinte maneira:

$$A_{MAX} = t_{INC\ min} \cdot 2^{16} \cdot V_{SOM} \quad (2.24)$$

Para um incremento mínimo de 800ns, considerando a velocidade do som como sendo 339,87m/s, obtêm-se:

$$\therefore A_{MAX} = 17,81m$$

Para um alcance maior, seria necessário aumentar o *Prescaler* de 1:4 para 1:8, 1:16. Entretanto, ocorreria uma diminuição na precisão do instrumento.

2.3.2 Algoritmos de triangularização

Os algoritmos utilizados neste trabalho experimental são baseados nos algoritmos de rastreamento mais utilizados pelos sistemas de posicionamento dinâmico, e que podem ser divididos em quatro categorias gerais (Milne, 1983):

- a) Método Hiperbólico 2-D (altura conhecida);

- b) Método Esférico 2-D (altura conhecida);
- c) Método Hiperbólico 3-D (altura desconhecida) e
- d) Método Esférico 3-D (altura desconhecida).

Cada um dos métodos citados anteriormente, pode ser sub-dividido em duas categorias: algoritmos que calculam diretamente a posição de um transdutor e algoritmos que estimam a sua posição com base no método dos mínimos quadrados.

Os algoritmos de cálculo direto fazem muitas suposições em suas soluções, frequentemente utilizam substituições, e fornecem apenas um resultado, sem condições de verificação da repetibilidade ou acurácia; neste caso não existe transdutor extra, resultando desta forma, em um algoritmo sem qualquer tipo de redundância. Se eventualmente, por qualquer motivo um transdutor for retirado do sistema, este não terá solução. De qualquer forma, a maioria dos sistemas garante que existam transdutores extras disponíveis para fornecer o número necessário para se determinar a posição da embarcação. Com as observações extras provenientes de transdutores adicionais, é possível aplicar algoritmos iterativos de mínimos quadrados, normalmente, capazes de aumentar a acurácia da solução final de coordenadas X, Y, Z, uma vez que cada transdutor adicional empregado contribui para o alcance de melhores resultados. Contudo, um número maior de transdutores implica na necessidade de um tempo maior de processamento, de modo que, para se determinar a posição em tempo real, um compromisso deve ser estabelecido entre o número de transdutores utilizado e a acurácia final do sistema.

Para o presente trabalho, adotou-se o **Método Esférico 3-D** como Algoritmo de Triangularização devido à sua simplicidade estrutural, basicamente, representada pela intersecção de quatro esferas de coordenadas conhecidas. Para maiores informações sobre as vantagens e desvantagens de cada método, consultar (Milne, 1983).

Os primeiros cálculos foram realizados utilizando o Método Numérico Iterativo de Newton-Raphson para dois pontos distintos e conhecidos do modelo. Este método exige um tempo de processamento razoável e foi amplamente utilizado no decorrer do projeto.

MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Considerem-se dois pontos P_1 e P_2 , cujas coordenadas num sistema OXYZ, fixo em relação ao laboratório, são (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) , respectivamente. O problema que se considera a seguir consiste em estimar essas coordenadas dispondo-se das medidas d_{ij} entre o ponto P_i , ($i=1,2$), e cada um dos sensores S_j , ($j=1,\dots,4$), cujas coordenadas (x_{sj}, y_{sj}, z_{sj}) são supostas conhecidas no mesmo sistema OXYZ. Admite-se também dada a distância d entre P_1 e P_2 (vide Figura 2.7). A estimativa será obtida por meio do método dos mínimos quadrados.

Figura 2.7: Problema de minimização de erros quadráticos com restrição.

Definindo-se o erro quadrático E_{ij}

$$E_{ij} = \left[\sqrt{(x_i - x_{sj})^2 + (y_i - y_{sj})^2 + (z_i - z_{sj})^2} - d_{ij} \right]^2 \quad (i = 1,2; j = 1, \mathbf{K}, 4)$$

o problema de estimação pode ser formulado como minimizar o índice quadrático J

$$J = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 E_{ij}$$

sujeito à restrição:

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - d^2 = 0$$

Tem-se, portanto, um problema de otimização não linear com 6 incógnitas e uma restrição. Este problema pode ser resolvido usando-se o Método dos Multiplicadores de Lagrange (Kirk, 1970). Define-se então o índice aumentado $\bar{J}$:

$$\bar{J} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 E_{ij} + I \left[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - d^2 \right],$$

em que a incógnita adicional I é chamada de Multiplicador de Lagrange, e o problema passa a ser minimizar $\bar{J}$ isento de restrições. Uma condição necessária que deve ser satisfeita por sua solução é que as derivadas parciais de $\bar{J}$ em relação às incógnitas do problema sejam nulas, isto é,

$$\frac{\partial \bar{J}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{J}}{\partial y_i} = 0 \quad (i = 1, 2)$$

$$\frac{\partial \bar{J}}{\partial z_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{J}}{\partial I} = 0.$$

Tem-se assim um sistema não linear com 7 equações e 7 incógnitas que pode ser resolvido numericamente utilizando-se, por exemplo, o Método de Newton-Raphson. Para maiores detalhes sobre a implementação do algoritmo, vide informações contidas em Códigos-Fonte e Programas Matlab – Apêndice D.

Além do Método de Newton-Raphson, um novo Método, baseado na **Matriz Pseudo-Inversa** também foi estudado e implementado, visando confrontar as informações e resultados gerados pelo método anterior.

MÉTODO DE CÁLCULO ATRAVÉS DA MATRIZ PSEUDO-INVERSA

Este método também utiliza quatro medidas de distâncias para estimar as coordenadas de um ponto de interesse no espaço. Porém, não vincula a distância entre os dois pontos distintos do modelo, fornecendo estimativas independentes para eles.

Supondo um único ponto com fonte emissora posicionada no ponto $P_1(x_1, y_1, z_1)$ e quatro sensores posicionados nos pontos (x_{Si}, y_{Si}, z_{Si}) , com $i = 1, \dots, 4$, pode-se escrever o seguinte sistema de equações (vide Figura 2.8):

Figura 2.8: Esquema dos sensores e suas respectivas distâncias, utilizadas pelo Método da Matriz Pseudo-Inversa.

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= d_1^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= d_2^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= d_3^2 \\
 (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 &= d_4^2
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Podem-se eliminar os termos quadráticos subtraindo pares de equações esféricas, o que conduz a equações da seguinte forma.

$$\begin{aligned}
 d_1^2 - d_2^2 &= x^2 + y^2 + z^2 - 2.(x.x_1 + y.y_1 + z.z_1) + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - \\
 &\quad (x^2 + y^2 + z^2 - 2.(x.x_2 + y.y_2 + z.z_2) + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2)
 \end{aligned}$$

Simplificando, tem-se

$$d_1^2 - d_2^2 = -2.x.(x_1 - x_2) - 2.y.(y_1 - y_2) - 2.z.(z_1 - z_2) + (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) + (z_1^2 - z_2^2)$$

Ou, de forma geral,

$$-2.x.(x_p - x_q) - 2.y.(y_p - y_q) - 2.z.(z_p - z_q) = d_p^2 - d_q^2 - (x_p^2 - x_q^2) - (y_p^2 - y_q^2) - (z_p^2 - z_q^2)$$

Adotando a notação abaixo

$$\begin{cases} A_n = -2(x_p - x_q) \\ B_n = -2(y_p - y_q) \\ C_n = -2(z_p - z_q) \\ D_n = (d_p^2 - d_q^2) - (x_p^2 - x_q^2) - (y_p^2 - y_q^2) - (z_p^2 - z_q^2) \end{cases}$$

onde $n, (n = 1, \mathbf{K}, 6)$, é o índice que corresponde a uma combinação particular de p e q ($p, q = 1, \mathbf{K}, 4$), tem-se a seguinte equação matricial:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B},$$

na qual:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ A_m & B_m & C_m \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} D_1 \\ \mathbf{M} \\ D_m \end{bmatrix},$$

Como a matriz $\mathbf{A}$ não é quadrada (o que caracteriza um sistema incompatível), não pode ser invertida, neste caso pode-se usar a forma generalizada da operação de inversão de matrizes para matrizes não quadradas, conhecida como **pseudo-inversa**:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B}) \quad (2.26)$$

onde se supõe que $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$ seja inversível.

É claro que o método acima pode ser aplicado igualmente para estimar a posição do ponto P_2 . Para maiores detalhes sobre a implementação do algoritmo, vide informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas Matlab – Apêndice D.

Visando refinar as informações de saída, calculou-se um filtro de Kalman simplificado e otimizado para tratar os resultados provenientes dos dois métodos utilizados. A estrutura matemática do filtro será detalhada logo a seguir.

2.3.3 O filtro estendido de Kalman

MODELO MATEMÁTICO DO NAVIO

O modelo do navio considera os movimentos de baixa frequência da embarcação. A dinâmica de baixa frequência é representada por um modelo linear, obtido a partir do modelo completo dado por:

(2.27)

$$\begin{aligned} (M + M_{11})\ddot{x}_{1L} - (M + M_{22})\dot{x}_{2L}\dot{x}_{6L} - (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{6L}^2 + B_{11}\dot{x}_{1L} &= F_{1EL} + F_{1T}; \\ (M + M_{22})\ddot{x}_{2L} + (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{6L} + (M + M_{11})\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{22}\dot{x}_{2L} + B_{26}\dot{x}_{6L} &= F_{2EL} + F_{2T}; \\ (I_Z + M_{66})\ddot{x}_{6L} + (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{2L} + (Mx_G + M_{26})\dot{x}_{1L}\dot{x}_{6L} + B_{66}\dot{x}_{6L} + B_{26}\dot{x}_{2L} &= F_{6EL} + F_{6T}. \end{aligned}$$

onde M é a massa do navio, M_{ij} ; ($i,j=1,2,6$), é o elemento (i,j) da matriz de massa adicional; F_{iEL} são as componentes de força ($i=1,2$) e momento ($i=6$) ambiental de baixa frequência e F_{iT} , as componentes de força ($i=1,2$) e momento ($i=6$) de propulsão; x_{1L} , x_{2L} e x_{6L} são os movimentos de baixa frequência, relacionados ao sistema fixado no navio. Os termos B_{ij} representam o amortecimento linear viscoso, relevantes para movimentos de baixas velocidades, como os presentes em navios dotados de Sistemas DP².

O índice 1 refere-se ao movimento de *surge*, 2 ao de *sway* e 6 ao de *yaw* (vide Figura 2.9). O índice L refere-se à baixa frequência.

Figura 2.9: Sistemas de coordenadas

² Estes parâmetros são avaliados por meio de ensaios de decaimento em modelos de escala reduzida.

Realizando a linearização, obtém-se:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}_L + \mathbf{D}\mathbf{x}_L = \mathbf{F}_{EL} + \mathbf{F}_T \quad (2.28)$$

com

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M + M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M + M_{22} & M.x_G + M_{26} \\ 0 & M.x_G + M_{26} & I_Z + M_{66} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & B_{26} \\ 0 & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

sendo $\mathbf{x}_L = (X_L \ Y_L \ y_L)^T$ o vetor com as posições em relação ao sistema fixo no laboratório, a transformação de sistemas de coordenadas das velocidades é dada pela equação:

$$\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{T}(y_L) \dot{\mathbf{x}}_L,$$

sendo $\mathbf{x}_L$ o vetor com as posições em relação ao sistema fixo no navio, com

$$\mathbf{T}(y_L) = \begin{pmatrix} \cos(y_L) & -\sin(y_L) & 0 \\ \sin(y_L) & \cos(y_L) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

No caso específico de um navio controlado em torno de um ponto fixo, a não linearidade presente na equação acima pode ser removida, girando-se o sistema fixo OXYZ em torno do eixo OZ de forma que o aproamento desejado seja $y_d = 0^\circ$. Neste caso, como o aproamento real do navio será mantido próximo ao desejado ($y_L - y_d \cong 0^\circ$), a equação se reduz a $\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{x}_L$.

Logo, definindo-se $\mathbf{x}_L = (X_L \ Y_L \ y_L \ \dot{x}_L \ \dot{y}_L \ \dot{y}_L)^T$ o modelo de baixa frequência (2.28) pode ser escrito como:

$$\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{A}_L \mathbf{x}_L + \mathbf{B}_L \mathbf{F}_T + \mathbf{A}_{EL} \mathbf{F}_{EL} \quad (2.31)$$

sendo

$$\mathbf{A}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_{EL} = \mathbf{B}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}_L = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Quando o navio está sob controle de trajetória, e há variação do aproamento desejado durante a manobra, não se pode fazer a rotação do eixo fixo de forma a obter $y_D = 0^\circ$. Neste caso, a matriz A_L passa a depender do ângulo de aproamento, introduzindo-se uma não-linearidade geométrica ao problema:

$$\mathbf{A}_L(\mathbf{y}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{T}(\mathbf{y}) \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

MODELO DE FORÇAS AMBIENTAIS DE BAIXA FREQUÊNCIA

Como mencionado anteriormente, o Filtro de Kalman pode também estimar as forças de baixa frequência de correnteza e deriva de ondas. Para tanto, um modelo do comportamento de tais esforços deve ser provido ao filtro.

Considerando-se o modelo de baixa frequência (2.28), deve-se incluir um modelo para a dinâmica da força diretamente, que, considerando lenta taxa de variação, é dado por:

$$\dot{\mathbf{F}}_{\text{EL}} = \boldsymbol{\omega}_{\text{FEL}} \quad (2.34)$$

onde $\boldsymbol{\omega}_{\text{FEL}}$ é um vetor de ruídos brancos gaussianos com média nula e matriz de covariância $\mathbf{Q}_{\text{FEL}}$.

Como será apresentada adiante, a força estimada pelo Filtro de Kalman provê o efeito integral ao controlador, além de permitir uma estimativa grosseira da velocidade e direção da correnteza, apresentada ao operador na tela do console.

De posse dos modelos desenvolvidos previamente, deve-se agrupá-los a fim de se obter o modelo não-linear completo da embarcação para posterior aplicação do Filtro de Kalman. Considerando-se, portanto, as equações anteriores e desconsiderando a força de controle $\mathbf{F}_T$, obtêm-se:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{E}\boldsymbol{\omega}, \quad (2.35)$$

com

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_L \\ \mathbf{F}_{\text{EL}} \end{pmatrix}$$

para o modelo com força ambiental ou

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega} &= \boldsymbol{\omega}_{\text{FEL}}; \\ \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} \mathbf{A}_L^{6 \times 6} & \mathbf{A}_{\text{EL}}^{6 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 6} & \mathbf{0}^{3 \times 3} \end{pmatrix}; \\ \mathbf{E} &= \begin{pmatrix} \mathbf{0}^{6 \times 3} \\ \mathbf{I}^{3 \times 3} \end{pmatrix}\end{aligned}$$

O estimador de estados, utilizando as medidas realizadas pelos sensores de posição e baseando-se no modelo matemático do navio, fornece ao controlador a posição da embarcação no plano horizontal, englobando os movimentos de alta e baixa frequências. Assim, sendo $\mathbf{z}$ o vetor com as três variáveis medidas (X_L , Y_L e y_L) e $\mathbf{v}$ um vetor com ruídos gaussianos de medida com média nula e matriz de covariância $\mathbf{R}$, pode-se escrever:

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v},$$

com

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}^{3 \times 3} & \mathbf{0}^{3 \times 3} & \mathbf{0}^{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

O modelo das equações (2.28) e (2.29) deve ser escrito na forma discreta, para posterior aplicação do Filtro de Kalman. Realizando a aproximação $\dot{\mathbf{x}}[k] \cong (\mathbf{x}[k] - \mathbf{x}[k-1])/\Delta t$, sendo Δt o intervalo de amostragem, obtêm-se:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}[k] &= \mathbf{f}(\mathbf{x}[k-1], \boldsymbol{\omega}[k-1]) \\ \mathbf{z}[k] &= \mathbf{H}.\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k] \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}) &= (\mathbf{A}.\Delta t + \mathbf{I}) \cdot \mathbf{x}[k-1] + \mathbf{E}.\Delta t \cdot \boldsymbol{\omega}[k-1]\end{aligned} \quad (2.37)$$

FILTRO DE KALMAN

Sendo $\bar{\mathbf{x}}$ a estimativa a priori do vetor de estados e $\hat{\mathbf{x}}$ a estimativa a posteriori, $\mathbf{X}$ a matriz de covariância do erro de estimação e $\mathbf{K}$ a matriz de ganhos de Kalman, a formulação do filtro de Kalman discreto é dada por (Cadet, 2003):

Predição:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{x}}[k+1] &= \mathbf{\Phi}.\hat{\mathbf{x}}[k] \\ \bar{\mathbf{X}}[k+1] &= \mathbf{\Phi}.\hat{\mathbf{X}}[k].\mathbf{\Phi}^T + \mathbf{\Gamma}.\mathbf{Q}.\mathbf{\Gamma}^T\end{aligned}$$

com $\mathbf{\Phi} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x} \big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}[k]}$; $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{E}.\Delta t$ e $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{\text{FEL}}$

Correção:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}[k] &= \bar{\mathbf{X}}[k].\mathbf{H}^T.(\mathbf{H}.\bar{\mathbf{X}}[k].\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}[k] &= \bar{\mathbf{x}}[k] + \mathbf{K}[k].(\mathbf{z}[k] - \mathbf{H}.\bar{\mathbf{x}}[k]) \\ \hat{\mathbf{X}}[k] &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}[k].\mathbf{H}).\bar{\mathbf{X}}[k]\end{aligned}\tag{2.38}$$

com $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{\text{FEL}}$

O termo $(\mathbf{z}[k] - \mathbf{H}.\bar{\mathbf{x}}[k])$ é chamado de inovação, e contém o erro entre a medida e a previsão feita no intervalo de amostragem anterior.

Embora a estrutura do Filtro de Kalman seja razoavelmente complexa, alguns casos extremos simplificam-na e fornecem uma compreensão física clara do filtro.

Considera-se o caso de o modelo possuir boa aderência com a realidade e um sistema de medição é muito ruim. Isto equivale, portanto, a considerar a norma da matriz de covariância $\mathbf{Q}$ bastante pequena e a norma da matriz $\mathbf{R}$ elevada. Analisando as equações de Correção, verifica-se que a norma da matriz de ganhos $\mathbf{K}$ será pequena (o cálculo possui a inversa de $\mathbf{R}$), e, conseqüentemente, o vetor de estados corrigido será muito próximo do valor previsto no passo anterior pelo modelo ($\hat{\mathbf{x}}[k] \cong \bar{\mathbf{x}}[k]$). Assim, o filtro automaticamente “despreza” as informações ruins que são provenientes dos sensores e se baseia nos valores previstos pelo seu modelo internos, que são mais confiáveis.

No caso oposto, considere-se o modelo com uma grande imprecisão e as medidas bastante acuradas (norma de $\mathbf{Q}$ elevada e norma de $\mathbf{R}$ pequena). Considerando, por simplificação, um sistema no qual a matriz $\mathbf{H}$ seja quadrada e inversível, as equações de Correção poderiam se aproximadas por:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}[k] &\cong \bar{\mathbf{X}}[k].\mathbf{H}^T.(\mathbf{H}.\bar{\mathbf{X}}[k].\mathbf{H}^T)^{-1} = \mathbf{H}^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}[k] &\cong \bar{\mathbf{x}}[k] + \mathbf{H}^{-1}.(\mathbf{z}[k] - \mathbf{H}.\bar{\mathbf{x}}[k]) = \mathbf{H}^{-1}.\mathbf{z}[k]\end{aligned}\tag{2.39}$$

Portanto, os estados estimados pelo filtro de Kalman dependem basicamente das medições, não utilizando as informações do modelo de Previsão. Para maiores detalhes sobre a implementação do algoritmo, vide informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas – Apêndice D.

* * * * *

3. INFRA-ESTRUTURA ELETRÔNICA E CALIBRAÇÃO

O sistema desenvolvido é composto por um conjunto de módulos eletrônicos, classificados e subdivididos em *Locais* e *Remotos*. Os módulos classificados como *Locais* são constituídos pelos subsistemas e circuitos eletrônicos que compõem a Central de Processamento em terra (Base), consequentemente, os Módulos Remotos, são constituídos pela estrutura eletrônica embarcada, isto é, localizada dentro do modelo.

Os *Módulos Locais* são representados por:

- 1) 1 Módulo de Controle e Gerenciamento (Base) e
- 2) 4 Módulos de Sensores Receptores.

Os *Módulos Remotos*, por sua vez, são representados por:

- 1) 1 Módulo de Controle e Gerenciamento (Embarcação);
- 2) 4 Módulos de Potência para motores DC;
- 3) 2 Módulos de Potência para motores de passo;
- 4) 2 Módulos de Transmissão Ultra-sônico (Antenas) e
- 5) 1 Módulo de Distribuição de Energia.

3.1 HARDWARE

3.1.1 Base

A Base é composta por vários módulos e subsistemas (vide Figura: 3.1):

1. **Módulo de Fontes:** Responsável pelo fornecimento de energia para todos os circuitos e subsistemas pertencentes à Central de Processamento em Terra. Principais características: Retificador de onda completa (15-0-15V); Chave de seleção para a tensão de entrada (110/220V); Chave LIGA-DESLIGA; Fusível de proteção (100mA); Tensão filtrada e controlada por reguladores de tensão (+5V e +12V); Led indicador de status.
2. **Módulo de RF:** Responsável pela comunicação remota via Rádio-Frequência com o módulo de controle embarcado, localizado dentro do tanque de provas.

Principais características: Frequência das portadoras TX: 315MHz e RX: 433MHz; Largura de Banda: ± 2 MHz; Sensibilidade: -110dB; Taxa de transmissão: 2400-4800Bps.

3. **Sistema de Solicitação de Interrupções:** Responsável pelo tratamento dos sinais provenientes dos sensores ultra-sônicos e pelo gerenciamento das solicitações de Interrupções (IRQs) à Central de Processamento. Principais características: Monoestáveis com configuração fixa e ajustados para digitalizar os sinais dos sensores; Subsistema lógico exclusivo de entrada para assegurar a solicitação de interrupções através de qualquer evento.
4. **Módulo de Comunicação Serial:** Responsável pela transmissão das informações de telemetria ao computador principal. Principais características: *Driver/Receiver Multichannel RS232*, modelo MAX232.
5. **Unidade Central de Processamento:** Responsável pela geração da base de tempo para as interrupções e pelo controle do processo de medição. Principais características: Microcontrolador MICROCHIP modelo PIC16F877, com cristal de 20MHz e 200ns de tempo de instrução.

Figura 3.1: Diagrama de blocos da BASE.

Para maiores informações consultar Diagrama Elétrico “Módulo de Controle da Base”, folha 1/6 – Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para – Apêndice E.

3.1.2 Sensores

Existem 4 sensores no sistema, e cada sensor é composto por (vide Figura: 3.2):

Figura 3.2: Diagrama de blocos dos sensores.

1. **Geração de Referências:** Responsável pela geração das tensões de referência necessárias aos filtros. Principais características: Tensão controlada por regulador de tensão (+5V) e Fonte chaveada sem isolamento galvânica gerando tensão negativa (-6V).
2. **Módulo Filtro de 25kHz:** Responsável pelo tratamento do sinal dos filtros, amplificadores, comparadores e circuitos complementares provenientes do transdutor ultra-sônico na frequência de 25kHz. Principais características: *Filtro Passa Baixas* de entrada com atenuação de 20dB; Ganho de 3,2 no estágio intermediário; Filtro sintonizado e comparador no estágio final (saída do sensor); Led indicador de status.

3. **Módulo Filtro de 40kHz:** Responsável pelo tratamento do sinal dos filtros, amplificadores, comparadores e circuitos complementares provenientes do transdutor ultra-sônico na frequência de 40kHz. Principais características: *Filtro Passa Altas* de entrada com atenuação de 20dB; Ganho de 3,2 no estágio intermediário; Filtro sintonizado e comparador no estágio final (saída do sensor); Led indicador de status.

Para maiores informações consultar Diagrama Elétrico “Circuito Final Sensores do Tanque”, folha 1/1 – Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para – Apêndice E.

3.1.3 Embarcação

O módulo embarcado é composto por vários circuitos e subsistemas (vide Figura: 3.3):

1. **Módulo de Fontes:** Responsável pelo fornecimento de energia para todos os circuitos e subsistemas pertencentes à estrutura eletrônica embarcada. Principais características: Fonte chaveada (25,74kHz), invertendo um barramento DC de 24V (8 baterias de 12V/7Ah, divididas em 2 bancos de 24V) na topologia meia ponte; Retificador de onda completa (em ponte – 16V); Fusível de proteção (5A); Tensão filtrada e controlada por reguladores de tensão (+5V e +12V) para os sistemas digitais de controle e (+5V_A e +12V_A) para os sistemas de potência; Led indicador de status.
2. **Módulo de RF:** Responsável pela comunicação remota via Rádio-Frequência com o módulo de controle em terra. Principais características: Frequência das portadoras TX: 433MHz e RX: 315MHz; Largura de Banda: ± 2 MHz; Sensibilidade: -110dB; Taxa de transmissão: 2400-4800Bps.
3. **Sistema de Medição de Temperatura:** Responsável pela medição da temperatura ambiente para correção da velocidade do som nos cálculos. Principais características 2 Sensores de precisão, calibrados para temperaturas em graus Celsius (°C), com acurácia de 0,5°C, disponíveis para análise diferencial de temperatura.

4. **Sistema de Medição de Baterias:** Responsável pelo gerenciamento da autonomia dos bancos de baterias. Principais características: Dois (2) Conversores Tensão/Frequência opto-acoplados, trabalhando com frequências de medição contidas no intervalo [100Hz-10kHz].
5. **Sistema de Medição para os Encoders:** Responsável pela leitura dos potenciômetros de precisão, que fornecem a informação sobre a posição angular dos eixos do leme e do propulsor azimuthal, aos quais estão acoplados. Principais características: 2 potenciômetros multivoltas de precisão (10 revoluções); Resistência: 10kΩ; Bucha metálica.
6. **Unidade Central de Processamento:** Responsável pela telemetria do sistema, pelo controle dos disparos dos pulsos ultra-sônicos e pelo gerenciamento dos *setpoints* dos atuadores. Principais características: Microcontrolador MICROCHIP modelo PIC16F877, com cristal de 20MHz e 200ns de tempo de instrução.

Para maiores informações consultar Diagrama Elétrico “Módulo de Controle da Base”, folhas 2,3,4/6 – Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para – Apêndice E.

Figura 3.3: Diagrama de blocos do Módulo de Controle Embarcado.

3.1.4 Módulo de Potência para motores DC.

Existem 4 módulos de potência deste tipo no sistema, sendo cada módulo composto por (vide Figura: 3.4):

1. **Módulo de Chaveamento:** Responsável pelo gerenciamento do fornecimento de energia à bobina dos motores DC. Principais características: Conversor CC/CC (78,125Hz), invertendo um barramento DC de 24V na topologia ponte completa (H).
2. **Sistema Opto-acoplador:** Responsável pelo gerenciamento do *setpoint* fornecido pelo Módulo de Controle Embarcado e pela isolamento galvânica entre o acionamento dos motores e os sinais de controle. Principais características: Circuito inversor opto-acoplador, Led indicador de status.

Para maiores informações consultar Diagrama Elétrico “Módulo de Controle da Base”, folha 4/6 – Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para – Apêndice E.

Figura 3.4: Diagrama de blocos do Módulo de Potência para Motores DC.

3.1.5 Módulo de Potência para motores de Passo.

Existem 2 módulos de potência deste tipo no sistema, sendo cada módulo composto por (vide Figura: 3.5):

1. **Módulo de Chaveamento:** Responsável pelo gerenciamento do fornecimento de energia às bobinas dos motores de passo. Principais características: Conversor CC/CC duplo (78,125Hz), invertendo um

barramento DC de 24V na topologia ponte completa (H) para duas bobinas independentes (Motor de passo bipolar).

2. **Sistema Opto-acoplador:** Responsável pelo gerenciamento do *setpoint* fornecido pelo Módulo de Controle Embarcado e pela isolamento galvânica entre o acionamento dos motores e os sinais de controle. Principais características: Circuito inversor opto-acoplador, Led indicador de status.

Para maiores informações consultar Diagrama Elétrico “Módulo de Controle da Base”, folha 4/6 – Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para – Apêndice E.

Figura 3.5: Diagrama de blocos do Módulo de Potência para Motores de Passo.

3.1.6 Sistema de Transmissores Ultra-sônicos (Antenas).

Existem 2 antenas no sistema (de 25kHz e 40kHz), sendo cada antena composta por (vide Figura: 3.6):

1. **Módulo de Chaveamento:** Responsável pelo gerenciamento do fornecimento de energia aos transdutores transmissores ultra-sônicos. Principais características: Conversor CC/CC (25kHz e 40kHz), invertendo um barramento DC de 24V na topologia meia ponte.
2. **Sistema Opto-acoplador:** Responsável pelo controle do disparo ultra-sônico fornecido pelo Módulo de Controle Embarcado e pela isolamento galvânica

entre a ativação dos transdutores e os sinais de controle. Principais características: Circuito inversor opto-acoplador.

3. **Módulo Oscilador:** Responsável pela geração dos sinais das portadoras (25kHz e 40kHz) injetados no módulo de chaveamento. Principais características: Circuito oscilador de precisão baseado na PL: CD4046BC (Micropower Phase-Locked Loop), Lógica sequencial de controle para oscilação *manual* ou *automática*.

Para maiores informações consultar Diagrama Elétrico “Módulo de Controle da Base”, folha 6/6 – Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para – Apêndice E.

Figura 3.6: Diagrama de blocos do Módulo de Transmissão Ultra-sônico.

3.1.7 Sistema de Distribuição de Energia.

O Sistema de Distribuição de Energia é composto por (vide Figura: 3.7):

1. **Módulo de Distribuição de Energia:** Responsável pelo equilíbrio na distribuição de carga entre as baterias e pela proteção individual de cada módulo alimentado direta ou indiretamente pelos bancos de baterias. Principais características: 7 Subsistemas de distribuição, Fusíveis de proteção (100mA – Módulo de Controle Embarcado, 5A – Módulos de Potência para Motores de Passo e 10A – Módulos de Potência para Motores DC), Leds indicadores de status.

Para maiores informações consultar o Diagrama Elétrico “Diagrama da Placa de interligação”, folha 1/1 – Diagramas Elétricos, Circuitos e projetos – Apêndice E.

Sistema de Distribuição de Energia

Figura 3.7: Diagrama de blocos do Sistema de Distribuição de Energia.

3.2 SOFTWARE

3.2.1 Firmware do Módulo de Controle da Central de Processamento em Terra

Neste módulo, as informações são recebidas do Módulo de Controle Embarcado através de pacotes contendo 8 bytes (vide Tabela 3.1) e transmitidas ao computador principal através de pacotes com 24 bytes cada (vide Tabela 3.2). As informações recebidas basicamente referem-se às medições atualizadas de tensão e temperatura realizadas pelo módulo embarcado. Contudo, as informações transmitidas para o computador principal incorporam, além das medições, os tempos de propagação atribuídos a cada sensor ultra-sônico, fornecendo desta maneira, 8 tempos contidos no intervalo [0; 52,4288ms]. Para maiores detalhes sobre o *firmware*

da Central de Processamento em terra, vide informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas – Apêndice D.

Bytes	Variável	Descrição
1	INICIO	Início da transmissão: SOH
2	COMANDO	Byte de comando/endereço (p/ expansões futuras)
3	TEMP1	Medições da Temperatura ambiente
4	TEMP2	
5	VBAT1	Medições da Temperatura ambiente
6	VBAT2	
7	CHECKSUM	Variável para validação de pacote
8	FIM	Final de transmissão: EOF

Tabela 3.1: Pacote recebido do Módulo de Controle Embarcado.

Bytes	Variável	Descrição
1	INICIO	Início da transmissão: SOH
2	COMANDO	Byte de comando/endereço (p/ expansões futuras)
3	MIC_A1L	Byte menos significativo do contador de tempo: 25kHz (A)
4	MIC_A1H	Byte mais significativo do contador de tempo: 25kHz (A)
5	MIC_A2L	Byte menos significativo do contador de tempo: 40kHz (A)
6	MIC_A2H	Byte mais significativo do contador de tempo: 40kHz (A)
7	MIC_B1L	Informações análogas sobre os tempos dos sensores da posição B
8	MIC_B1H	
9	MIC_B2L	
10	MIC_B2H	
11	MIC_C1L	Informações análogas sobre os tempos dos sensores da posição C
12	MIC_C1H	
13	MIC_C2L	
14	MIC_C2H	
15	MIC_D1L	Informações análogas sobre os tempos dos sensores da posição D
16	MIC_D1H	
17	MIC_D2L	
18	MIC_D2H	
19	TEMP1	Medições da Temperatura ambiente
20	TEMP2	
21	VBAT1	Medição das Tensões dos Bancos de Baterias
22	VBAT2	
23	CHECKSUM	Variável para validação de pacote
24	FIM	Final de transmissão: EOF

Tabela 3.2: Pacote transmitido ao computador principal.

3.2.2 Firmware do Módulo de Controle Embarcado

Neste módulo, as informações são recebidas do computador principal através de pacotes contendo 12 bytes (vide Tabela 3.3) e transmitidas ao computador principal através de pacotes com 8 bytes cada (vide Tabela 3.1). As informações recebidas basicamente referem-se às solicitações de atualização da posição da embarcação e aos *setpoints* de controle para os atuadores (vide Figura 3.8).

Figura 3.8: Disposição dos atuadores na embarcação.

Contudo, as informações transmitidas para a Central de Processamento em terra incorporam apenas as medições de tensão e temperatura provenientes do microcontrolador embarcado. Para maiores detalhes sobre o *firmware* da Central de Processamento em terra, vide informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas – Apêndice D.

Bytes	Variável	Descrição
1	INICIO	Início da transmissão: SOH
2	COMANDO	Byte de comando/endereço (p/ expansões futuras)
3	SMT_DC	Seleção do sentido de rotação Motor DC
4	SMT_PASSO	Seleção do sentido de rotação Motor de Passo
5	MDC1	Setpoint de controle p/ Motor DC1: [0-25 Níveis]
6	MDC2	Setpoint de controle p/ Motor DC2: [0-25 Níveis]
7	MDC3	Setpoint de controle p/ Motor DC3: [0-25 Níveis]
8	MDC4	Setpoint de controle p/ Motor DC4: [0-25 Níveis]
9	MPASSO1	Setpoint de controle p/ Motor Passo1: [0-200 Passos]
10	MPASSO2	Setpoint de controle p/ Motor Passo2: [0-200 Passos]
11	CHECKSUM	Variável para validação de pacote
12	FIM	Final de transmissão: EOF

Tabela 3.3: Pacote recebido do computador principal.

3.3. CALIBRAÇÃO

Durante os ensaios, realizaram-se rotinas de calibração no sistema, visando avaliar a qualidade e as características técnicas dos transdutores e minimizar os efeitos dos atrasos provenientes dos circuitos e subsistemas envolvidos no tratamento dos sinais.

AVALIAÇÃO DOS TRANSDUTORES ULTRA-SÔNICOS

Os transdutores ultra-sônicos que apresentaram os melhores resultados foram aqueles que utilizavam cristais piezo-elétricos (vide Figura 3.9), com altos ganhos na frequência de ressonância. Outro fator importante observado foi a utilização de altas frequências em relação ao espectro audível. Isto simplificou a filtragem dos sinais e as medidas se tornaram menos sensíveis aos ruídos do ambiente. Uma das vantagens dos transdutores de ultra-som é que eles possibilitam uma melhor distribuição da onda sonora no ambiente, pois têm uma diretividade (abertura) próxima a 90°, melhorando a detecção da onda. A utilização destes transdutores trouxe grandes vantagens ao sistema:

- *Menor consumo;*
- *Maior facilidade no tratamento dos sinais recebidos;*
- *Melhora na precisão das medidas.*

Figura 3.9: Transdutores ultra-sônicos comerciais.

Pôde-se observar a qualidade das medidas em um dos testes realizados com um dos sensores do sistema. Neste teste, para uma determinada distância, foram obtidas 200 amostras, sendo que o desvio padrão calculado foi de apenas de 0,29 cm.

Tanto o gráfico temporal (vide Figura 3.10) quanto o histograma (vide Figura 3.11) sugerem um ruído de medição gaussiano. Para a validação do sistema de sensoriamento por ultra-som, foram realizados diversos testes de repetição.

Figura 3.10: Resultados da amostragem dos transdutores ultra-sônicos comerciais.
Eixo das ordenadas em [m] e abscissas em [amostras].

Figura 3.11: Histograma da amostragem dos transdutores ultra-sônicos comerciais.
Eixo das abscissas em [m] e ordenadas em [amostras].

Desta forma foi possível verificar-se a variância inerente ao processo de medição e a influência que a distância de medição exerce na qualidade dos dados.

AValiação DOS ATRASOS INERENTES AO SISTEMA

O microcontrolador da Base, que envia a ordem de *beep* ao modelo, após receber a resposta por RF de que as antenas de ultra-som já foram acionadas, inicia uma contagem de ciclos de *clock*. O número de ciclos de *clock* é que vai fornecer a distância entre uma determinada antena do modelo e um certo sensor. No momento em que o modelo acaba de emitir uma onda ultra-sônica, ele inicia a emissão dos pacotes para a Base, os quais informarão que a onda acaba de ser emitida. Assim, tem-se que o tempo necessário para a comunicação por RF ser concluída – emissão do pacote do modelo para a base, bem como a verificação de *checksum* na Base – é um tempo “perdido” nas medições, pois quando a Base concluir o processamento do pacote, a frente de onda poderá já ter chegado. Dessa forma, a medida registrada aproxima-se de zero. Portanto, tem-se um “tempo morto” que implicará numa zona morta em que todas as medidas serão iguais a zero. Essa zona resultará numa esfera centrada no sensor ultra-sônico e terá um raio máximo conhecido.

Figura 3.12: Gráfico das Medidas para Calibração. Medidas em [amostras], Ensaio em [Intervalos de 20cm] e Intervalos de tempo em [clocks de 800ns].

CALIBRAÇÃO DO SENSOR ULTRA-SÔNICO

Para os ensaios de calibração foram realizadas medidas desde 1 metro até 9,2 metros de distância do emissor ao sensor de 25kHz, usando-se um intervalo de 20 centímetros entre uma medida e outra. Para cada distância foram feitas 200 medidas. Na Figura 3.12, vemos um gráfico das medidas realizadas.

Pode-se notar que há algumas medidas erradas, visivelmente fora da superfície. Esses erros são decorrentes de perdas de pacotes seriais durante a transmissão de dados e/ou efeitos de reflexões ocasionadas pela reverberação das ondas ultra-sônicas irradiadas no ambiente.

No entanto, essas discrepâncias terão pouca influência na calibração, pois foram usadas as medianas da distribuição de frequências (histograma) para cada distância.

Observam-se os gráficos destas medianas e da reta de regressão linear ajustada no MatLab® na Figura 3.13.

*Figura 3.13: Medianas e Reta de Regressão Linear para Calibração em 25kHz.
Distância Real em [m] e Intervalos de tempo em [clocks de 800ns].*

CALIBRAÇÃO EXATA

Realizar uma calibração acurada do sensor é uma tarefa bastante complexa. Para isso é necessário dispor de um dispositivo de referência de grande precisão para medir distâncias. Os métodos de calibração anteriores serviram apenas para proporcionar ao sistema, uma aproximação razoável em relação ao seu ajuste ideal, tornando o sensor operacional.

No entanto, no decorrer deste projeto desenvolveu-se um método de calibração relativamente preciso para o ajuste final do sistema sensor. Entretanto, devido à sua complexidade, esse método não pôde ser implementado em tempo hábil. De qualquer forma, o método proposto será detalhado a seguir para que estudos futuros eventualmente possam vir a utilizá-lo.

O método de calibração proposto consiste basicamente em: i) calibrar digitalmente os termômetros interno e externo do Módulo de Controle Embarcado, buscando corrigir adequadamente a velocidade do som; ii) monitorar a pressão atmosférica e a umidade relativa do ar no ambiente, que são fatores externos que influem no processo de medida; iii) compensar todos os atrasos digitais, provenientes das diversas etapas necessárias ao tratamento dos sinais de comunicação e iv) adotar arbitrariamente uma origem para a referência espacial do ambiente, isto é, a origem O do sistema OXYZ definido anteriormente, determinando conseqüentemente a posição tridimensional precisa de cada um dos transdutores ultra-sônicos que compõem os quatro receptores do sistema sensor. Uma maneira de realizar este último e mais complicado procedimento está baseada na triangularização das coordenadas do ambiente através da utilização de instrumentos de precisão, como os *teodolitos* (para obtenção das coordenadas X e Y) e as *mangueiras de nível* (para obtenção da cota Z).

* * * * *

4. RESULTADOS

Os resultados estão apresentados em duas etapas: a primeira, analisa os dados obtidos a partir dos experimentos realizados com os receptores alocados nas bordas do tanque de provas, sendo que nesta etapa, vale ressaltar os problemas de interferência destrutiva, encontrados no decorrer dos ensaios, bem como, a pesquisa por soluções; na segunda etapa, manipulam-se as informações provenientes do sistema sensor, avaliando seu desempenho e os resultados obtidos com a realocação dos sensores para o teto do laboratório.

4.1 PRIMEIRA ETAPA: ENSAIOS INICIAIS

Para avaliar melhor o desempenho do algoritmo de rastreamento empregado, utilizou-se o Método da Matriz Pseudo-Inversa, não vinculando a distância entre as antenas como uma restrição nas soluções. Delimitou-se uma região do tanque de dimensões 5,0m x 5,0m. Os sensores receptores foram alocados em cada um dos vértices do tanque.

Figura 4.1: Estrutura do sistema de posicionamento, utilizada nos primeiros ensaios.

Durante os diversos ensaios, as informações obtidas conduziram a conclusões importantes sobre o desempenho do instrumento. O sensor não apresentou o comportamento desejado, observando-se significativas oscilações durante a amostragem, conforme pode ser constatado através da Figura 4.2, onde A40, B40, C40 e D40 representam os sinais de 40kHz coletados através dos sensores alocados nos quatro vértices do tanque provas.

Figura 4.2: Resposta do sensor para a frequência de 40kHz durante amostragem dinâmica. Eixo das abscissas: Amostras e Eixo das ordenadas: Intervalos de tempo.

As variações bruscas das ordenadas observadas em alguns pontos mostram claramente a distorção nos sinais de resposta dos receptores, durante as diversas manobras realizadas pela embarcação, tais manobras consistiam basicamente, em movimentos circulares em torno do eixo central, em torno da proa ou popa do modelo, movimentos de deriva ou trajetórias aleatórias. Acreditou-se que o problema fosse em decorrência da falta de diretividade dos transdutores ou deficiência dos filtros de entrada. Para contornar o problema, acrescentou-se um arranjo circular de transdutores, totalizando vinte e quatro emissores estruturados e separados por intervalos (arcos) de quinze graus (15°), divididos em quatro circuitos de acionamento, independentes compostos por seis transdutores cada um, vide Figura

4.3. Para maiores informações consultar o “Diagrama de Interligação das Placas”, folha 5/9 – Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para – Apêndice E.

Figura 4.3: Estrutura proposta para as antenas ultra-sônicas, composta por dois arranjos circulares de transdutores.

Aparentemente, a modificação não proporcionou aumento significativo no desempenho do sensor, como pode ser constatado no gráfico da Figura 4.4.

Figura 4.4: Resposta do sensor para a frequência de 40kHz, após modificações. Eixo das abscissas: Amostras e Eixo das ordenadas: Intervalos de tempo.

ANÁLISE DO PROBLEMA DE INTERFERÊNCIA DESTRUTIVA

Analizando os vários gráficos gerados e vinculando-os às informações sobre o posicionamento das antenas, observou-se que os erros ocorrem sempre nas mesmas posições angulares. Tal fato, não só reforçou as suspeitas, como confirmou a existência dessas regiões especiais, as quais foram denominadas de zonas de sombra. Estudos realizados sobre as zonas de sombra indicam que o problema, na verdade é um fenômeno físico acústico de interferência destrutiva de sinais.

Dá-se o nome de interferência ao encontro de duas ou mais ondas sonoras (Costa, 2003). Quando duas ondas de mesma frequência são superpostas, dá-se origem a um movimento vibratório de mesma frequência, onde sua amplitude pode apresentar valores desde a diferença até a soma das amplitudes dos movimentos componentes, dependendo da fase relativa dos mesmos. Se as ondas estão em fase, isto é, se as várias compressões e distensões se verificam nos mesmos pontos, o movimento resultante apresentará uma amplitude que será igual à soma das amplitudes dos movimentos componentes. Entretanto, se as ondas apresentam

oposição de fases, o movimento resultante terá uma amplitude que será igual à diferença das amplitudes dos movimentos componentes, podendo verificar-se, no caso de igualdade das amplitudes, a extinção do sinal.

Fontes emissoras colocadas próximas, e transmitindo sinais iguais, permitem o surgimento de áreas, onde ocorre uma somatória destrutiva dos sinais, causando a impressão de cancelamento ou ausência dos mesmos.

Desenvolveu-se um programa no Matlab para simular e estudar o fenômeno acústico de interferência de sinais. Tal simulação consistiu, basicamente, em analisar a correlação entre as propagações de quatro sinais senoidais, isto é, fontes sonoras pontuais, dispostas e espaçadas uniformemente, sobre uma circunferência de raio 0,052m (raio aproximado dos arranjos circulares utilizados pelas antenas). O estudo para quatro transdutores emissores em 40kHz pode ser visto nas Figuras 4.5 e 4.6. e o estudo para quatro transdutores emissores em 25kHz pode ser visto nas Figuras 4.7 e 4.8. Para maiores detalhes sobre o programa *onda2.m*, vide informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas – Apêndice D. Analisando as Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, pode-se observar, claramente, o fenômeno acústico da interferência destrutiva dos sinais (zonas de sombra), representado pela tonalidade azul escura, presente nos gráficos.

Figura 4.5: Exemplo de simulação para o fenômeno de cancelamento, quatro emissores em 40kHz (vista em planta). As variáveis representadas nos eixos das abscissas e das ordenadas correspondem à posição no plano OXY, em metros.

Nas próximas figuras, as fontes emissoras estão alocadas nos seguintes pontos do espaço: $F_1(0,052; 0,052, 0)$, $F_2(-0,052; 0,052, 0)$, $F_3(-0,052; -0,052, 0)$ e $F_4(0,052; -0,052, 0)$, em metros.

Figura 4.6: Exemplo de simulação 3D para o fenômeno de cancelamento, quatro emissores em 40kHz. O plano horizontal representa a posição do ponto e o eixo vertical representa a amplitude do sinal.

Figura 4.7: Exemplo de simulação para o fenômeno de cancelamento, quatro emissores em 25kHz (vista em planta). As variáveis representadas nos eixos das abscissas e das ordenadas correspondem à posição no plano OXY, em metros.

Figura 4.8: Exemplo de simulação 3D para o fenômeno de cancelamento, quatro emissores em 25kHz. O plano horizontal representa a posição do ponto e o eixo vertical representa a amplitude do sinal.

Outra simulação realizada através do software *Interference Applet*, aplicação escrita em linguagem Java, cujo objetivo é demonstrar a interferência entre duas fontes sonoras (Falstad, 2003), exemplifica o fenômeno (vide Figura 4.9). Novamente, pode-se notar claramente o fenômeno da interferência destrutiva, representado pelas faixas escuras. Para maiores detalhes sobre o programa de simulação, vide informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas – Apêndice D.

As variáveis representadas nos eixos das abscissas e das ordenadas correspondem à posição no plano OXY, em centímetros.

Figura 4.9: Exemplo de simulação para o fenômeno de cancelamento. Extraído de <http://www.falstad.com/mathphysics.html>.

A melhor sintonia dos filtros analógicos de entrada aumenta a sensibilidade do sistema, pois aproveita melhor a potência transmitida, porém, observou-se que ela não influenciou no fenômeno de surgimento das zonas de sombra; praticamente, dobrou-se a potência transmitida, o que, apenas evidenciou o fenômeno.

A partir de então, passou-se a desenvolver filtros digitais simples, baseados em médias móveis e limitadores de derivação. Os resultados melhoraram significativamente, mas os problemas não foram resolvidos, mantendo ainda pequenas oscilações e causando um ligeiro atraso nos sinais (vide Figura 4.10).

Figura 4.10: Resultados a partir dos filtros digitais. Eixo das abscissas: Amostras e Eixo das ordenadas: Intervalos de tempo.

A linha contínua representa o sinal original e as linhas pontilhadas representam os resultados obtidos pelos filtros digitais. Os pontos azuis correspondem à média móvel com variação máxima de 5cm e os pontos verdes correspondem ao limitador de derivação, ajustado para uma variação máxima de 1,5cm:200ms. Para maiores detalhes sobre os filtros digitais utilizados, vide informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas – Apêndice D.

Estes filtros atenuam, mas não resolvem completamente o problema. As oscilações causadas pela passagem dos sensores pelas zonas de sombra, mesmo filtradas ainda interferem na resposta do instrumento, diminuindo a precisão do sensor (vide figura 4.11). Neste ensaio, procurou-se realizar uma trajetória em forma de um semicírculo em torno do eixo central da embarcação.

Figura 4.11: Resposta do sistema: Variações no plano XY: Semicírculo. As variáveis representadas nos eixos das abscissas e das ordenadas correspondem à posição[cm] no plano OXY.

Figura 4.12: Distância entre as antenas estimada pelo instrumento. Eixo das abscissas: Amostras e Eixo das ordenadas: Distância em [cm].

O gráfico da Figura 4.11, permite observar o quanto a resposta do instrumento no plano XY (onde X representa o eixo das abscissas e Y representa o eixo das ordenadas) é distorcida pelas oscilações relativas às zonas de sombra e por não vincular a distância entre as antenas durante os cálculos. O gráfico da Figura 4.12 expõe claramente, a falta de coesão entre as soluções do sistema quando não se vincula a distância entre as antenas durante os cálculos, considerando que a distância entre as antenas no momento do ensaio era de 90cm. Não se contava com tamanha distorção, fato que inviabilizou o tratamento independente proposto inicialmente, para pontos distintos da embarcação.

Em decorrência do estudo do fenômeno acústico, concluiu-se que os dados corrompidos não forneceriam bons resultados, independentemente do método de estimação utilizado. Deste modo chegou-se a uma nova configuração para as antenas emissoras, com apenas quatro transdutores. Os resultados podem ser vistos no gráfico da figura 4.13.

Figura 4.13: Antenas emissoras com apenas quatro transdutores. Eixos das abscissas: Amostras e Eixo das ordenadas: Intervalos de tempo.

Com apenas quatro emissores por antena, o sinal torna-se mais comportado, mas em compensação, acentuam-se as zonas de sombra, captando reflexões do ambiente durante a passagem pelas sombras.

4.2 SEGUNDA ETAPA: UMA NOVA CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

A partir deste ponto, objetivando contornar os problemas causados pelas interferências, uma mudança na geometria fez-se necessária, levando o sistema a uma nova topologia, onde os sensores receptores mantiveram-se coplanares, porém, centralizados e alocados no teto do laboratório, logo acima do tanque de provas (vide Figura 4.14). Para maiores informações consultar o “Lay-out de Fixação sensor ultrassônico direcional para teto”, folha 1/1 – Lay-outs construtivos – Apêndice C.

Figura 4.14: Sensores receptores centralizados e alocados no teto do laboratório.

Esta nova concepção contornou o problema anterior, gerando medidas aparentemente livres da interferência destrutiva. Nestas medidas não foram observados os mesmos padrões apresentados nos ensaios iniciais, eliminando-se assim o efeito indesejado da interferência acústica (vide Figura 4.15).

Figura 4.15: Medidas livres da interferência destrutiva.

Entretanto, devida a alteração na disposição dos sensores, a área útil de medição ficou restrita a uma região aproximadamente circular, de diâmetro em torno de 3m e centralizada pelo conjunto de receptores (vide figura 2.5). Além disso, surgiu um novo inconveniente, representado pela perda do sinal transmitido, devida a grande diretividade dos transdutores ultra-sônicos emissores (vide Figura 4.16).

Figura 4.16: Transdutor emissor saindo da região ativa, causando “cegueira” momentânea em um dos receptores.

Deve-se ressaltar que este inconveniente, não impossibilita os ensaios, pois na prática, não interfere nos resultados das amostras, desde que os ensaios sejam realizados dentro da área limite permitida.

4.2.1 Estudo acústico do ambiente do laboratório

Esta análise baseia-se em referência teórica sobre Acústica Técnica (Costa, 2003), onde é enfatizado o estudo da propagação de ondas sonoras pertencentes ao espectro de frequências audível. Entretanto, devido ao fato de as ondas ultra-sônicas serem ondulações mecânicas e, essencialmente, pertencerem ao mesmo fenômeno acústico, permitiu-se extrapolar o conhecimento (tabelas, expressões, índices e parâmetros), apenas ajustando-o às frequências ultra-sônicas, para se efetuar a análise da reverberação no ambiente.

Este breve estudo acústico não possui a pretensão de realizar avaliações precisas do ambiente laboratorial utilizado no decorrer dos ensaios. Esta simples

análise visa tão somente apresentar e esclarecer como os fenômenos acústicos e suas respectivas propriedades se relacionam e interagem com o ambiente onde se realizaram as experiências de sensoriamiento, buscando demonstrar como as condições estruturais do laboratório, eventualmente, interferiram e alteraram os resultados do projeto.

Essas condições dificilmente podem ser determinadas de uma maneira acurada, de modo que, na maior parte das vezes, propõem-se hipóteses simples que nem sempre se comprovam na prática. Assim, no estudo geométrico da onda sonora, normalmente, supõe-se uma reflexão uniforme dos raios sonoros que incidem sobre as paredes, limites do ambiente em consideração, enquanto no estudo dinâmico do regime sonoro, considera-se uma perfeita difusão da energia sonora.

Mesmo com essas simplificações, a prática tem mostrado que os resultados obtidos nas principais propriedades acústicas dos ambientes, com relação ao regime sonoro produzido nos mesmos, são plenamente satisfatórios em muitas situações.

Dentre os fenômenos e propriedades acústicas mais importantes destacam-se: *Impedância acústica específica, reflexão, refração, absorção, interferência, batimento, difração, ressonância, distorção, eco e reverberação*. Todas estas propriedades causam interferências nos ensaios, em maior ou menor grau; porém, dar-se-á uma atenção especial ao fenômeno da reverberação, considerando que este seja o maior responsável externo pelos desvios observados nas medidas.

O estudo proposto consiste simplesmente em analisar a reverberação do ambiente de pesquisa, através de um parâmetro conhecido como “Tempo de Reverberação”, confrontá-lo com índices práticos e tabelados e confirmar a influência do ambiente do laboratório nos resultados obtidos.

A persistência do som residual no ambiente, após o cessar da fonte que o emite, toma o nome de reverberação ou circunsonância; esta difere do eco, pois enquanto a primeira caracteriza uma permanência do som no ambiente, este é caracterizado pela repetição distinta do mesmo. Tal persistência, devida às reflexões sucessivas do som pelas paredes, tem uma grande importância na determinação da qualidade acústica de um ambiente. Uma reverberação excessiva ocasiona confusão

e ininteligibilidade, enquanto uma escassa torna o ambiente surdo, e a intensidade sonora decresce muito rapidamente ao afastar-se da fonte.

Entretanto, para o ambiente laboratorial em estudo, consideram-se os tempos de salas especiais, onde a reverberação que naturalmente vai excitar os equipamentos de registro de som deve ser a mínima possível, no caso, menor que $2/3T_0$ - onde T_0 representa o tempo de reverberação aconselhável.

O tempo convencional de reverberação de um ambiente, que caracteriza perfeitamente o problema dinâmico da onda sonora, foi definido por Sabine, como aquele necessário para que a intensidade energética do som residual atinja um milionésimo de seu valor de regime inicial (Costa, 2003). Esse tempo é calculado, admitindo-se uma perfeita difusão do som, com uma distribuição uniforme de energia sonora sobre a superfície S , que limita o espaço V do recinto considerado.

Partindo da função que relaciona a variação de energia incidente pela variação da superfície:

$$\frac{dW}{dS} = \frac{cU}{4},$$

onde U é a densidade de energia ou energia por unidade de volume e supondo difusão perfeita do som, considera-se como energia incidente na unidade de tempo sobre S , a seguinte expressão:

$$1 = \frac{W}{S} = \frac{cU}{4} \Rightarrow W = \frac{cU}{4}S$$

Estabelecido o regime permanente, a energia total disponível no volume V do recinto considerado é:

$$E_t = UV$$

Pode-se concluir que o tempo necessário para que toda esta energia seja refletida uma vez será dado por:

$$t = \frac{E_t}{W} = \frac{4UV}{cUS} = \frac{4V}{cS} \quad (4.1)$$

Se S apresenta um coeficiente de absorção a uniforme, a energia total E_t depois de uma reflexão, ficará reduzida a uma energia residual E_r , tal que:

$$E_r = E_t(1 - a)$$

E, após um tempo t , durante o qual se verificam t/t reflexões, a energia passará a ser:

$$E_r = E_t(1 - a)^{t/t}$$

Na realidade, entretanto, a superfície S é constituída de uma soma de várias parcelas $S_1, S_2, \dots S_n$, com seus respectivos coeficientes de absorção $a_1, a_2, \dots a_n$, de modo que, de acordo com a hipótese inicial de distribuição uniforme da energia sonora, sobre uma superfície genérica S_i de coeficiente de absorção a_i , incide no tempo t uma parcela da energia total:

$$\frac{S_i}{S} E_t,$$

a qual ficará reduzida após a primeira reflexão a:

$$\frac{S_i}{S} E_t(1 - a_i),$$

e conseqüentemente, a energia residual total após a primeira reflexão de toda a energia sonora contida no volume do recinto em consideração será:

$$E_r = \frac{E_t}{S} [S_1(1 - a_1) + S_2(1 - a_2) + \dots S_n(1 - a_n)]$$

Como, entretanto, $S = S_1 + S_2 + \dots S_n$:

$$E_r = E_t \left(1 - \frac{S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots S_n a_n}{S} \right)$$

E, chamando simplesmente de a ao coeficiente de absorção equivalente do ambiente, a expressão:

$$a = \frac{S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots S_n a_n}{S},$$

chega-se à mesma expressão inicial:

$$E_r = E_t (1 - a)$$

E igualmente, para um tempo t em que se verificam t/t reflexões, a energia residual seria da mesma forma:

$$E_r = E_t (1 - a)^{t/t}$$

De acordo com a definição de Sabine, para o procurado tempo de reverberação convencional, devemos ter:

$$\frac{E_r}{E_t} = 10^{-6}$$

De modo que chamado de T este tempo, pode-se escrever:

$$\frac{E_r}{E_t} = 10^{-6} = (1 - a)^{T/t},$$

onde t , é dado pela expressão (4.1):

$$t = \frac{4V}{cS}$$

Assim obtêm-se:

$$10^{-6} = (1 - a)^{cST/4V}$$

Manipulando,

$$T = \frac{24V}{cS \log 1/(1 - a)}$$

E considerando para o ar nas condições normais, $c = 344m/s$; finalmente chega-se à fórmula dita de Eyring:

$$T = \frac{0,07V}{S \log 1/(1-a)} = \frac{0,16V}{S \ln 1/(1-a)} \quad (4.2)$$

Portanto, se faz necessário conhecer e estimar algumas características estruturais do ambiente em questão, representadas pelos parâmetros V , S e a .

CÁLCULO DO VOLUME TOTAL DO AMBIENTE

De acordo com as cotas atualizadas da planta predial do laboratório (vide LAY-OUT DE INSTALAÇÃO ESCOLA POLITÉCNICA DA USP DEPTO. DE ENG. NAVAL E OCEÂNICA – Apêndice B), pode-se dividir o ambiente em dois grandes paralelepípedos:

- O Primeiro e principal, é representado pelo corpo central do laboratório e denominado V_{p_1} - Dimensões (CxLxA), respectivamente, Comprimento, Largura e Altura (Valores em [m]): **29,695 x 12,275 x 3,150;**
- O segundo é representado pelo volume extra incorporado ao recinto e denominado V_{p_2} - Dimensões: **13,000 x 1,540 x 3,150;**

Sabendo que pelas dimensões relevantes que possuem, tanto a viga de concreto no teto do recinto como os dois tanques de provas não podem ser desprezados e que a impedância acústica específica da água é relativamente alta, para fins práticos, considerar-se-ão os dois tanques de provas como grandes blocos de alvenaria, sendo os demais objetos ignorados.

Os três elementos citados também serão considerados paralelepípedos e representados pelas seguintes variáveis:

- V_{t_1} - Volume do tanque de provas maior
Dimensões: **21,880 x 4,885 x 1,050;**
- V_{t_2} - Volume do tanque de provas menor
Dimensões: **24,875 x 1,330 x 1,030;**
- V_v - Volume da viga de concreto
Dimensões: **3,395 x 12,275 x 0,310;**

Considerando o volume dos sólidos mais importantes, estima-se o volume total pela seguinte expressão:

$$V_{TOTAL} = Vp_1 + Vp_2 - Vt_1 - Vt_2 - Vv$$

Portanto, para o ambiente em questão o volume total é:

$$V_{TOTAL} = 1,052 \cdot 10^3 m^3$$

CÁLCULO DA ÁREA LIMITANTE TOTAL DO AMBIENTE

A exemplo do tratamento dado ao cálculo do volume total, os tanques continuam sendo representados por paralelepípedos de alvenaria. Esta hipótese diminui o volume útil do recinto, porém, aumenta a sua área limitante.

Considerando a área dos sólidos mais importantes, calcula-se a área superficial total como:

$$S_{TOTAL} = 1,161 \cdot 10^3 m^2$$

CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DO AMBIENTE

Considerando que os poros do material absorvente sejam suficientemente pequenos de tal forma que a resistência oferecida ao movimento vibratório da onda sonora, em vista da própria inércia do ar contido nos mesmos, seja desprezível e que, portanto, prevaleça a resistência devida à viscosidade no movimento das partículas em contato com as paredes dos poros, teoricamente pode-se demonstrar que o coeficiente de absorção é dado pela expressão (Costa, 2003):

$$a = 1 - \frac{2M^2 - 2M + 1}{2M^2 + 2M + 1} \quad (4.3)$$

onde

$$M = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{m}{2pfr}}$$

e R é o raio do poro [m]

m é o coeficiente de viscosidade do ar [kg/ms]

f é a frequência [Hz]

r é a massa específica [kg/m³]

É importante ressaltar que esta avaliação teórica, entretanto, praticamente só se verifica para o caso em que toda a energia sonora que atravessa o material seja absorvida.

Para os cálculos em questão, consideram-se:

- *para parede de tijolos rebocada e pintada a óleo, o raio R do poro vale $0,60 \cdot 10^{-6} \text{ m}$;*
- *o coeficiente de viscosidade do ar η vale $3,91 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$;*
- *para alvenaria de tijolos cerâmicos cheios a massa específica r vale $1,60 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.*

Então, utilizando esses valores na expressão (4.3) obtém-se:

- Para a frequência de 25kHz: $a_{25\text{kHz}} = 0,140977$
- Para a frequência de 40kHz: $a_{40\text{kHz}} = 0,174779$

Portanto, conhecidos e estimados os parâmetros estruturais do ambiente em questão, representados pelos parâmetros V , S e a , aplicam-se as informações à expressão (4.2), obtendo-se os seguintes tempos de reverberação:

- para a frequência de 25kHz:

$$T_{25\text{kHz}} = 954,144 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

- para a frequência de 40kHz:

$$T_{40\text{kHz}} = 754,754 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Como dito anteriormente, para o ambiente laboratorial em estudo, consideram-se os tempos de salas especiais, onde a reverberação que naturalmente vai excitar os equipamentos de registro de som deve ser a mínima possível, no caso, $2/3T_0$ - onde T_0 representa o tempo de reverberação aconselhável. Como não existe

um índice pré-determinado para o recinto em questão, adotar-se-á a o tempo de reverberação aconselhável, em função do volume do ambiente ($\approx 1000\text{m}^3$) e da procedência da onda sonora (no caso presente, um sinal produzido por meios eletrônicos). Neste caso, $T_0 = 0,95\text{s}$ (vide Tabela A.7: Tempo de reverberação aconselhável, em função do volume do ambiente e da procedência do som – Apêndice A).

Prosseguindo a análise, obtêm-se para 25kHz:

$$T_{25\text{kHz}} = 0,954\text{s}$$

$$\frac{2T_0}{3} = 0,633\text{s}$$

$$\therefore T_{25\text{kHz}} > \frac{2T_0}{3}$$

E analogamente, para 40kHz encontra-se

$$T_{40\text{kHz}} = 0,754\text{s}$$

$$\frac{2T_0}{3} = 0,633\text{s}$$

$$\therefore T_{40\text{kHz}} > \frac{2T_0}{3}$$

Ambos os tempos de reverberação estão acima do valor mínimo tolerado. Conseqüentemente, como era esperado, pode-se concluir que, devido ao fato do recinto não ter sido submetido a nenhum tratamento especial, no sentido de minimizar as reflexões, o sistema sensor deverá operar num ambiente sujeito a forte influência da reverberação acústica. Em tese, tal fato explica parcialmente o acréscimo no valor do desvio-padrão observado durante os ensaios (vide Figura 4.17), pois a persistência das reflexões no recinto levaria ao surgimento de interferências de baixa amplitude, que se supõe serem responsáveis por eventuais avanços ou atrasos na detecção dos bordos dos pulsos ultra-sônicos na entrada dos filtros.

Figura 4.17: Ilustração dos diferentes desvios-padrões observados para as frequências de 25 e 40kHz.

4.2.2 Resultados finais do Sistema Sensor de Posicionamento e Orientação

Para avaliar o desempenho final do algoritmo de estimação, empregando a restrição de distância entre as antenas, delimitou-se uma área praticamente circular, de modo que os transdutores ultra-sônicos emissores conseguissem, com eficiência, emitir seus sinais para todos os sensores receptores, alocados no teto do recinto, logo acima do tanque de provas, centralizados e coplanares.

No decorrer desta segunda etapa, os diversos ensaios realizados, bem como a análise dos seus resultados, conduziram o trabalho a novas conclusões sobre o desempenho do instrumento. Desta vez, o sistema sensor apresentou o comportamento desejado, com resultados significativos e dentro das especificações especificadas.

Figura 4.18: Amostras das frequências de 25 e 40kHz, livres de interferência e aplicadas ao algoritmo de triangularização.

Utilizando as amostras coletadas de um dos ensaios (vide Figura 4.18) e a velocidade do som corrigida, realiza-se a conversão destas, isto é, de incrementos de *clock* para distâncias [m] (programa *trata.m*); os valores são então submetidos ao filtro digital (programa *corr.f.m* ou *corr.f.m.m*) e depois ao Método dos Mínimos Quadrados (programa *nr.m*) ou ao Método da Matriz Pseudo-Inversa (programa *Estimapinv.m*) para a obtenção das estimativas desejadas, vide Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22. Para maiores detalhes sobre a implementação do algoritmo, pode-se consultar as informações contidas em Softwares: Códigos-Fonte e Programas – Apêndice D.

Como era esperado, a imposição do vínculo da distância entre as antenas no Método dos Mínimos Quadrados resultou em soluções de melhor qualidade do que as apresentadas pelo Método da Matriz Pseudo-Inversa. Conquanto o fato de não restringir a distância entre as antenas, nem apresentar informações na cota Z (devida coplanaridade dos sensores receptores), afete, razoavelmente, a solução do Sistema Sensor, pode-se considerar esta última solução como uma aproximação satisfatória para a condição inicial de partida, necessária ao algoritmo numérico de Newton-

Raphson empregado no Método dos Mínimos Quadrados. É oportuno mencionar que, como os intervalos de amostragem são relativamente pequenos em relação à dinâmica dos modelos reduzidos das embarcações de interesse, daí em diante a solução de um passo é utilizada como aproximação inicial para o passo subsequente.

Figuras 4.19 e 4.21: Para os gráficos **X40**, **Y40**, **Z40**, **X25**, **Y25** e **Z25** o eixo das abscissas representa as amostras e o eixo das ordenadas representa o deslocamento em centímetros; para os gráficos de **lambda** e **d** o eixo das abscissas representa as amostras e o eixo das ordenadas representa a amplitude dos parâmetros, finalizando, para o gráfico **Posição Superficial** o plano formado pelos eixos das abscissas e pelo eixo das ordenadas representa a posição dos pontos proa e popa, em centímetros.

Figura 4.19: Resultados do Método dos Mínimos Quadrados.

Figuras 4.20 e 4.22: para os gráficos **X**, **Y** e **Ψ** o eixo das abscissas representa as amostras e o eixo das ordenadas representa o deslocamento em centímetros (**X** e **Y**) e em graus (**Ψ**).

Figura 4.20: Resultados finais fornecidos pelo Sistema Sensor: Método dos Mínimos Quadrados.

Figura 4.21: Resultados do Método da Matriz Pseudo-Inversa.

Figura 4.22: Resultados finais fornecidos pelo Sistema Sensor: Método Matriz Pseudo-Inversa.

Com relação à estimação por meio do filtro estendido de Kalman, deve-se ressaltar que as matrizes de covariância dos ruídos de medição $\mathbf{R}$ e no estado $\mathbf{Q}$ foram inicialmente estimadas com base na observação das características estatísticas das amostras obtidas durante os ensaios. Entretanto, através de ajustes práticos experimentais, realizados no decorrer do desenvolvimento, estas matrizes foram ajustadas para melhorar o desempenho do filtro considerado.

Observa-se que o projeto do filtro estendido de Kalman proposto produziu resultados satisfatórios, eliminando a influência de pontos discrepantes e proporcionando um bom desempenho ao Sistema Sensor. A inexistência de um sensor de posição e orientação de maior precisão impossibilitou a verificação da precisão final do instrumento desenvolvido e, conseqüentemente, o processo de validação completo. Todavia, os resultados foram analisados, aferidos e calibrados a partir de ensaios metódicos, utilizando-se instrumentos especiais, como trenas de precisão e osciloscópios digitais, pautados na expectativa de aproximar os resultados obtidos dos valores medidos com esses instrumentos disponíveis.

* * * * *

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados o projeto e a implementação de um sensor de posição baseado na emissão e recepção de ultra-som sincronizado, onde duas antenas emissoras são instaladas em um modelo. A medida da posição é definida em relação a um referencial pré-fixado, determinado por quatro módulos receptores, compostos de dois transdutores ultra-sônicos cada, sintonizados em duas frequências diferentes, de tal forma que cada grupo efetue quatro medidas redundantes de dois pontos distintos da embarcação. Com isto é possível estimar a orientação do modelo.

De posse de um sistema de medição com boa repetibilidade, pode-se realizar um procedimento de calibração completo. Isto possibilitou a observação da existência de um tempo morto passível de compensação e de uma zona morta ou obscura para distâncias menores que, aproximadamente, 70 centímetros, a ser evitada. Na referida distância, a potência irradiada pelas antenas é muito intensa, causando uma grande reflexão de ondas e interferências entre as frequências.

Os resultados preliminares das experiências mostraram que o sistema de posição proposto opera de acordo com as especificações, principalmente, para a obtenção das coordenadas no plano horizontal. Tratando-se da obtenção da coordenada vertical, observou-se um tempo maior na convergência das estimativas, fato atribuído à coplanaridade dos receptores. As medidas fornecidas pelo sistema de ultra-som apresentaram erros aproximadamente gaussianos, com desvios-padrões próximos a 4,6 milímetros, variando pouco com a distância. Todos os cálculos foram realizados tanto para a proa como para a popa, de modo independente. A minimização dos erros quadráticos e as estimativas de incerteza dos resultados não foram obtidas considerando quaisquer restrição às soluções, uma vez que os cálculos não consideraram a distância conhecida entre as antenas como uma restrição, fato que interferiu no desempenho final do sistema, como notou-se ao estudar os resultados do instrumento. Para solucionar o problema, fez-se necessário incrementar o algoritmo de estimação, vinculando a distância entre as antenas, o que restringiu o sistema a uma única e otimizada solução para os oito sensores.

Quanto ao fenômeno acústico de interferência destrutiva, ocorrido durante os ensaios, o mesmo demonstrou ser extremamente complexo, exigindo soluções não-

triviais, como a substituição das antenas, realocação dos receptores para planos elevados (cota Z maior que 2,5m) e alteração dos tipos de transdutores utilizados, no que se refere às frequências de trabalho, potência transmitida, meios de propagação e diagramas de diretividade. Contudo, as especificações de projeto como taxa de amostragem, precisão, e acurácia foram respeitadas.

De qualquer forma, o problema foi contornado de maneira satisfatória, porém, restringindo drasticamente a área útil de medição. Isto não compromete a utilidade do Sistema Sensor desde que sejam respeitadas as limitações operacionais.

Acredita-se que a melhor topologia ainda seja a inicial, em que os receptores são alocados nos vértices das bordas do tanque de provas, e as antenas emissoras compostas por apenas um transdutor ultra-sônico com dispersão omnidirecional, isto é, com amplitude constante em todas as direções (360°) no plano OXY, paralelo ao plano da lâmina d'água. Contudo, nem todas as possibilidades de soluções foram testadas durante o decorrer deste trabalho. Por exemplo, poder-se-ia transformar a fonte ultra-sônica atual, completamente diretiva, em uma fonte relativamente omnidirecional, utilizando um obstáculo vazado de pequenas dimensões em relação ao comprimento de onda do sinal transmitido (Costa, 2003), uma vez que, este procedimento seria mais fácil e econômico.

Para finalizar, pode-se afirmar que o Sistema Sensor de Posicionamento e Orientação obtido através do desenvolvimento do hardware, dos algoritmos de estimação propostos, proporcionou resultados excelentes e de alta qualidade, entretanto, como mencionado anteriormente, tal sistema ainda pode ser aperfeiçoado para apresentar desempenho e resultados ainda melhores, desde que seja aferido e validado corretamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mágori, V., Ultrasonic Sensors in Air, **Corporate Research and Development**, Siemens AG. Munich Germany – IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1994.

Santos, A. O., Sensores e transdutores ultra-sônicos, **Monografia - disciplina PCS5713, USP** – Depto. de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica de São Paulo, 2003.

Milne, P. H., Underwater acoustic positioning systems, **Ed. Gulf Publishing Company**, London, 1983

Tetley, L.;Calcutt, D., Electronic Aids to Navigation, **Ed. Edward Arnold**, London, 1986.

Russo, A. A., Desenvolvimento de Sonar Atmosférico Ativo para Determinação de Posição, USP – **LAC Laboratório de Automação e Controle**, 1999.

Figuerola, F.; Tong, C. C.; Barbieri, E., A Method for Short or Long Range Time-of-flight Measurements Using Phase-Detection With na Analog Circuit, **IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**, VOL. 50, Nº5, OCTOBER 2001.

Tannuri, E. A., Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de controle ativo combinado a sistemas de amarração para o posicionamento de unidades flutuantes de produção e armazenamento de petróleo em águas profundas, **Tese de Doutorado, USP** – Depto. de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica de São Paulo, 2002.

Costa, E.C., Acústica Técnica, **Editora Edgard Blücher LTDA**, São Paulo, 1ª.Ed., 2003.

Sedra, A. S. e Smith, K. C., Microeletrônica, **MAKRON Books**, 4ª. Ed.,2000.

Choset, H.; Nagatani, K.; Lazar, N. A., The Arc-Tranversal Median Algorithm: A Geometric Approach to increasing Ultrasonic Sensor Azimuth Accuracy, **IEEE**, 2003.

Ruser, H.; Ivanov, B.; Horn, M., Smart Multi-sensor for 2-D target classification, Institute of Measurement and Automation, **University of Bundeswehr Munich**, IEEE, 2003.

Veryha, Y.; Kourtch, L.; Verigo, B.; Murashco, V., Method and System for Robot End Effector Path Correction Using 3-D Ultrasound Sensor, **Proceedings of the 3º World Congress on Intelligent Control and Automation**, IEEE, 2000.

Wang, L.; Emura, T.; Ushiwata, T., Automatic Guidance of a Vehicle Based on DGPS and a 3D Map, Departmente of Mechatronics and Precision Engineering, Tohoku University, **IEEE Intelligent Transportation Systems**, 2000.

Fiorillo, A. S., Noise Analysis in Air-Coupled PVDF Ultrasonic Sensors, **IEEE Transactions on Ultrasonics**, Ferroelectrics and frequency control, vol. 47, Nº 6, 2000.

Mágori, V., Signal Processing for Smart Ultrasonic Sensor, Siemens AG, **Corporate Research and Development Munich**, West Germany, IEEE, 1989

Bang, S. W.; Yu, W.; Chung, M. J., Sensor-Based local Homing Using Omnidirectional Range and Intensity Sensing system for Indoor Mobile Robot Navigation, Department of Electrical Engineering, **Korea Advanced Institute of Science and Tecnology**, IEEE, 1995.

Bartasesh, D. T.; Burcham, T. N.; MacFayden, G. M., Na Ultrasonic Ranging System for the Blind, **Agricultural and Biological Engineering Mississippi**, State University, IEEE, 1997.

Gao, R.; Cai, X., A Wireless Ranging System as an Embedded Sensor Module for the Long Cane, Department Mechanical and Industrial Engineering, **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**, 1998.

Sabatini, A. M.; Rocchi, A., Sampled Baseband Correlators for In-Air Ultrasonic Rangefinders, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 45, N° 2, 1998.

Osuna, R. G.; Janet, J. A.; Luo, R. C., Modeling of Ultrasonic Range Sensor for Localization of Autonomous Mobile Robots, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 45, N° 4, 1998.

Mizutani, Y.; Suzuki, T.; Ikeda, H.; Yoshida, H.; Shinohara, S., Frequency Control of MOS-FET Fullbridge Power Inverter for Maximizing Output Power to Megasonic Transducer at 3MHz, **Shizuoka University**, IEEE, 1998.

Nilsson, A.; Holmberg, P., Combining a stable 2-D Vision Camera and na Ultrasonic Range Detector for 3-D Position Estimation, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 43, N° 2, 1994.

Akbarally, H.; Kleeman, L., A sonar sensor for Accurate 3D target localization and classification, Intelligent Robotics Research Centre Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University, Austrália, **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 1995.

Li, H. M.; Kleeman, L., A low sample rate 3D sonar sensor for mobile robots, Intelligent Robotics Research Centre Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University, Austrália, **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 1995.

Shinohara, S.; Yoshida, H.; Ikeda, H.; Nishide, K.; Sumi, M., Compact and High-Precision Range Finder with Wide Dynamic Range and Its application, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 41, Nº 1, 1992.

Marioli, D.; Narduzzi, C.; Offelli, C.; Petri, D.; Sardini, E.; Taroni, A. Digital Time-of-Flight Measurement for Ultrasonic Sensors, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 41, Nº 2, 1992.

Barbieri, E.; Figueroa, F., Experiments on Identification and Control of Flexible Structures Using na Ultrasonic Ranging Systems, **Tulare University, IEEE**, 1990.

Unnikrishnan, N. Kumar, P., Accuracy Considerations in a 3-D Ultrasonic Positioning System Based on the Difference in Time of Flights, Department of Mechanical Engineering and Energy Processes, Southern Illinois University at Carbondale, Carbondale, IL 62901 – **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control** – December 2002 – Volume 124, Issue 4, pp. 688-693.

Ros, S., Abreu, J.M.M., Freire, T., Calderon, L., Digital-Techniques improve range Measurement with Ultrasound Sensor, **SENSORS AND ACTUATORS A-PHISYCAL** 32(1-3): 550-554 APR 1992.

Site da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP):
<http://www.fapesp.br/>, Acesso em: 22 de outubro de 2004.

Site de pesquisa educacional de Portugal:
<http://www.fis.uc.pt/museu/hist.htm>, Acesso em: 22 de outubro de 2004.

Site da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES):
<http://www.capes.gov.br/>, Acesso em: 22 de outubro de 2004.

Site da Web of Science:

<http://isiknowledge.com/>, Acesso em: 10 de novembro de 2004.

Site do Programa Biblioteca Eletrônica (PROBE):

<http://www.probe.br/letra-a.htm>, Acesso em: 22 de outubro de 2004.

Site Electronic Journals Service (EBSCO):

<http://ejournals.ebsco.com/>, Acesso em: 29 de outubro de 2004.

Site SABER O portal do conhecimento:

<http://www.saber.usp.com.br/>, Acesso em: 22 de outubro de 2004.

Cadet, O., Introduction to Kalman Filter and its use in Dynamic Positioning Systems, **Proceedings of Dynamic Positioning Conference**, September 16-17, Houston, USA, 2003.

Falstad, Paul, Mathphysics. Disponível em:

<http://www.falstad.com/mathphysics.html> ,

<http://www.falstad.com/interference/> , Data de acesso: 20 de agosto de 2004.

Kirk, D. E., Optimal Control Theory – A Introduction, **Prentice-Hall Inc.**, Englewood Cliffs New Jersey, 1970.

APÊNDICE A: Acústica Técnica

Tabela A.1: Velocidade de propagação do som nos líquidos e sólidos.

Tabela A.2: Velocidade de propagação do som nos aeriformes.

Tabela A.3: Impedância acústica específica dos diversos meios.

Tabela A.4: Coeficiente de transmissão e reflexão do som nos diversos meios, em relação ao ar.

Tabela A.5: Coeficiente de absorção do som pelas paredes, em função da frequência.

Tabela A.6: Coeficiente de absorção do som pelos pisos, em função da frequência.

Tabela A.7: Tempo de reverberação aconselhável, em função do volume do ambiente e da procedência do som.

Tabela A.8: Massa Específica dos materiais de construção.

<i>MEIO</i>	<i>E</i> N/m ²	<i>ρ</i> kg/m ³	<i>c</i> m/s
Água destilada	2,13 x 10 ⁹	1.000	1.461
Álcool metílico	1,06 x 10 ⁹	810	1.143
Gasolina	1,32 x 10 ⁹	680	1.395
Água do mar	2,33 x 10 ⁹	1.030	1.504
Prata	75,30 x 10 ⁹	10.500	2.678
Alumínio	70,62 x 10 ⁹	2.710	5.105
Ferro	207,93 x 10 ⁹	7.900	5.130
Aço	194,22 x 10 ⁹	7.800	4.990
Chumbo	19,74 x 10 ⁹	11.300	1.322
Vidro sódico	60,30 x 10 ⁹	2.500	4.911
Parafina (160°C)	1,53 x 10 ⁹	900	1.304
Rocha	15,62 x 10 ⁹	2.500	2.500

Tabela A.1: Velocidade de propagação do som nos líquidos e sólidos.

<i>MEIO</i>	<i>E</i> Nm/kg°K	<i>K=C_p/C_v</i>	<i>c</i> m/s
Ar	287,02	1,400	344
Nitrogênio	296,73	1,400	349
Hidrogênio	4.124,40	1,407	1.304
Oxigênio	259,86	1,400	327
Anidrido Carbônico	188,96	1,300	268
Vapor de água	461,47	1,300	419

Tabela A.2: Velocidade de propagação do som nos aeriformes.

MEIO	ρ kg/m³	c m/s	Z kg/m²s
Ar	1,20	344	412,80
Anidrido carbônico	1,98	268	530,64
Vapor de água	0,60	419	251,40
Aço	7.800	4.990	38.922.000
Alumínio	2.710	5.105	13.834.550
Chumbo	11.300	1.322	14.938.600
Vidro sódico	2.500	5.000	12.500.000
Rocha	2.500	2.500	6.250.250
Mármore	2.600	3.800	9.880.000
Alvenaria	2.200	3.480	7.656.000
Tijolos	1.800	3.650	6.570.000
Pinho fibra corte paralelo	840	3.320	2.788.000
Pinho fibra corte perpendicular	840	1.013	850.920
Cortiça	240	500	120.000
Borracha	920	54	49.680
Água do mar	1.030	1.504	1.549.120
Água destilada	1.000	1.461	1.461.000

Tabela A.3: Impedância acústica específica dos diversos meios.

<i>MEIO</i>	<i>Z</i> kg/m ² s	<i>r</i>	<i>t</i>
Ar	412,80	0	1
Anidrido carbônico	530,64	0,01560	0,98440
Vapor de água	251,40	0,05900	0,94100
Aço	38.922.000	0,99998	0,00002
Alumínio	13.834.550	0,99988	0,00012
Chumbo	14.938.600	0,99989	0,00011
Vidro sódico	12.500.000	0,99987	0,00013
Rocha	6.250.250	0,99974	0,00026
Mármore	9.880.000	0,99983	0,00017
Alvenaria	7.656.000	0,99978	0,00022
Tijolos	6.570.000	0,99975	0,00025
Pinho fibra corte paralelo	2.788.000	0,99941	0,00059
Pinho fibra corte perpendicular	850.920	0,99806	0,00194
Cortiça	120.000	0,98633	0,01367
Borracha	49.680	0,96731	0,03269
Água do mar	1.549.120	0,99894	0,00106
Água destilada	1.461.000	0,99887	0,00113

Tabela A.4: Coeficiente de transmissão e reflexão do som nos diversos meios, em relação ao ar.

Material – paredes	130 Hz	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz	4.000 Hz
Parede de tijolos	0,024	0,025	0,031	0,042	0,049	0,070
Parede de tijolos rebocada	0,012	0,013	0,017	0,023	0,023	0,025
Parede de tijolos rebocada e caiada	0,020	0,022	0,025	0,027	0,030	0,032
Parede de tijolos rebocada e pintada a óleo	0,018	0,020	0,023	0,023	0,024	0,025
Reboco de gesso sobre tijolo furado	0,013	0,015	0,020	0,028	0,040	0,050
Concreto	0,010	0,012	0,016	0,019	0,023	0,035
Concreto rebocado	0,009	0,011	0,014	0,016	0,017	0,018
Concreto rebocado caiado	0,015	0,017	0,020	0,022	0,025	0,027
Lambri de madeira	0,080	0,070	0,060	0,060	0,060	0,060
Lambri de madeira com verniz	0,050	0,040	0,030	0,030	0,030	0,030
Lambri de madeira pintado a óleo	0,040	0,035	0,030	0,030	0,030	0,030
Azulejos	0,010	0,011	0,012	0,015	0,018	
Mármore	0,010	0,010	0,010	0,012	0,015	
Chapas de fibra de madeira leve	0,012	0,018	0,032	0,055	0,600	
Eucatex tipo isolante	0,110	0,180	0,350	0,560	0,600	
Eucatex acústico tipo A	0,120	0,250	0,520	0,650	0,720	0,930
Lã de rocha apoiada à parede	0,280	0,400	0,500	0,560	0,460	0,380
Lã de rocha a 3cm da parede	0,440	0,500	0,500	0,520	0,600	0,610
Estuque	0,035	0,032	0,030	0,029	0,028	
Revestimento de feltro de 2,5cm	0,120	0,320	0,510	0,620	0,600	0,560
Revestimento de feltro de 5,0cm			0,680			
Revestimento de feltro de 10,0cm			0,790			
Lã min. feltrada 2,5cm (18kg/m ³)	0,260	0,450	0,610	0,720	0,750	
Cortina leve	0,060	0,080	0,100	0,100	0,100	
Cortina pesada	0,060	0,100	0,440	0,420	0,400	
Quadro a óleo			0,280			
Grelha de ventilação (50% abertura)	0,300	0,400	0,500	0,500	0,500	
Vidros	0,030	0,028	0,027	0,026	0,025	

Tabela A.5: Coeficiente de absorção do som pelas paredes, em função da frequência.

Material – pisos	130 Hz	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz	4.000 Hz
Cimento	0,010	0,012	0,012	0,012	0,012	
Madeira	0,090	0,080	0,080	0,090	0,100	
Tacos	0,040	0,035	0,030	0,030	0,030	
Carpete	0,120	0,110	0,100	0,100	0,100	
Cerâmica	0,012	0,013	0,015	0,016		
Passadeira leve	0,080	0,080	0,080	0,040	0,030	
Passadeira pesada	0,120	0,140	0,180	0,210	0,280	
Metálico	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	
Superfície de água	0,008	0,008	0,013	0,015	0,020	0,025

Tabela A.6: Coeficiente de absorção do som pelos pisos, em função da frequência.

Origem do som	V m ³ 1.000	V m ³ 2.500	V m ³ 5.000	V m ³ 10.000	V m ³ 15.000	V m ³ 20.000	V m ³ 25.000
Som reproduzido	0,95	1,10	1,25	1,40	1,50	1,55	1,60
Som instrumental	1,25	1,45	1,65	1,85	2,00	2,10	2,15
Linguagem	0,83	0,93	1,02	1,10	1,15	1,20	1,25

Tabela A.7: Tempo de reverberação aconselhável, em função do volume do ambiente e da procedência do som.

Material	ρ kg/m³
Alvenaria de tijolos cerâmicos cheios	1.600
Alvenaria de tijolos cerâmicos furados (50%)	800
Reboco comum de argamassa de cal ou similar	1.800
Argamassa de cimento e areia	2.000
Concreto	2.400
Pedra de granito	2.750
Pedra de basalto	2.600
Pedra de grês (arenito)	2.300
Mármore	2.600
Concreto celular	300 a 600
Gesso	1.200
Terra seca	1.700
Revestimentos de cerâmica das paredes	1.800
Revestimentos de cerâmica dos pisos	1.900
Madeira balsa	200
Madeiras leves (pinus)	300 a 450
Madeira pinho	550
Madeiras médias	500 a 1.000
Madeira eucalipto	900 a 1.100
Madeiras pesadas (ipê, cabriúva, etc.)	1.000 a 1.500
Vidro	2.500
Chumbo	11.370
Aço	7.800
Alumínio	2.700
Borracha	1.100
Borracha esponjosa	25
Plástico esponjoso	80
Cortiça	200
Feltro	320
Serragem	200
Asfalto	2120
Lã de vidro	25 a 400
Lã de rocha	70 a 200
Papel	700 a 1.000
Papelão	650
Amianto	500 a 700
Poliestireno expandido	>22
Espuma de poliuretano	20 a 60
Madeira aglomerada de baixa densidade	200 a 500
Madeira aglomerada de alta densidade	500 a 900
Madeira aglomerada tipo MDF	600

Tabela A.8: Massa Específica dos materiais de construção.

APÊNDICE B: Planta predial

ENG-NAV-001: Lay-out de Instalação Escola Politécnica da USP Depto. de Eng. Naval e Oceânica, folha 1 e 2/2;

Revisada conforme “as-built” medidas aferidas in-loco na data 12/01/2005, referente ao Laboratório didático principal (Sala dos tanques de prova) do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

APÊNDICE C: Lay-outs Construtivos

ENG-NAV-005: Lay-out de Embarcação de ensaio e testes sensor posicional de ultrassom, folha 1/1;

ENG-NAV-002: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional (cachorro), folha 1/1;

ENG-NAV-003: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional para teto, folha 1 e 2/2;

ENG-NAV-011: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional para teto, folha 1/1;

ENG-NAV-008: Lay-out de Suporte para sensor ultra-sônico direcional para teto, folha 1 a 13/13;

APÊNDICE D: Softwares: Códigos-Fonte e Programas

PROGRAMAS (SCRIPTS) MATLAB:

Programas escritos em linguagem MATLAB Editor/Debugger – The MathWorks, Inc. ®.

corr.f.m

Corrfm.m

Estimapinv.m

F.m

Ini_kalman.m

Jacob.m

Jo.m

Kalmand1.m

Kalmand2.m

Lin.m

Nr.m

Onda2.m

Plotall.m

Plotanr1.m

Plotanr2.m

Trata.m

PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS:

Aplicação escrita em linguagem Visual Basic – Microsoft ®.

Frmconfig.frm

Frmconsole.frm

Fmrpostq.frm

Mdigeral.frm

Spd.vbp

Spd.vbw

FIRMWARES:

Programas escritos em linguagem Assembler – Microchip ®.

Base01.asm

Naut01.asm

PROGRAMAS (SCRIPTS) MATLAB:*Corrf.m: Filtro digital limitador;*

```

tm=50;%182;

clear pt1;
clear pt3;
clear pt5;
clear pt7;
clear pt2;
clear pt4;
clear pt6;
clear pt8;

p1 = s1;%*800e-9*34400;
p3 = s3;%*800e-9*34400;
p5 = s5;%*800e-9*34400;
p7 = s7;%*800e-9*34400;
p2 = s2;%*800e-9*34400;
p4 = s4;%*800e-9*34400;
p6 = s6;%*800e-9*34400;
p8 = s8;%*800e-9*34400;

%p2=;
%p4=;
%p6=;
%p8=;

pt1(1)=p1(1);
pt3(1)=p3(1);
pt5(1)=p5(1);
pt7(1)=p7(1);
pt2(1)=p2(1);
pt4(1)=p4(1);
pt6(1)=p6(1);
pt8(1)=p8(1);
for i=2:length(p2)
    %pt1(i)=(p1(i)+pt1(i-1))/2;
    %pt3(i)=(p3(i)+pt3(i-1))/2;
    %pt5(i)=(p5(i)+pt5(i-1))/2;
    %pt7(i)=(p7(i)+pt7(i-1))/2;
    %pt2(i)=(p2(i)+pt2(i-1))/2;
    %pt4(i)=(p4(i)+pt4(i-1))/2;
    %pt6(i)=(p6(i)+pt6(i-1))/2;
    %pt8(i)=(p8(i)+pt8(i-1))/2;
    pt1(i)=p1(i);
    pt2(i)=p2(i);
    pt3(i)=p3(i);
    pt4(i)=p4(i);
    pt5(i)=p5(i);
    pt6(i)=p6(i);
    pt7(i)=p7(i);
    pt8(i)=p8(i);

    if (pt1(i)>pt1(i-1)+tm)
        pt1(i)=pt1(i-1)+tm;
    end
    if (pt3(i)>pt3(i-1)+tm)
        pt3(i)=pt3(i-1)+tm;
    end
    if (pt5(i)>pt5(i-1)+tm)
        pt5(i)=pt5(i-1)+tm;
    end
    if (pt7(i)>pt7(i-1)+tm)
        pt7(i)=pt7(i-1)+tm;
    end

    if (pt2(i)>pt2(i-1)+tm)
        pt2(i)=pt2(i-1)+tm;

```

```

end
if (pt4(i)>pt4(i-1)+tm)
    pt4(i)=pt4(i-1)+tm;
end
if (pt6(i)>pt6(i-1)+tm)
    pt6(i)=pt6(i-1)+tm;
end
if (pt8(i)>pt8(i-1)+tm)
    pt8(i)=pt8(i-1)+tm;
end
end

s1=pt1';
s3=pt3';
s5=pt5';
s7=pt7';
s2=pt2';
s4=pt4';
s6=pt6';
s8=pt8';

```

Corrfm.m: Filtro digital de média móvel;

```

tm=100;0%50%182;

clear pt1;
clear pt3;
clear pt5;
clear pt7;
clear pt2;
clear pt4;
clear pt6;
clear pt8;

p1 = s1;%*800e-9*34400;
p3 = s3;%*800e-9*34400;
p5 = s5;%*800e-9*34400;
p7 = s7;%*800e-9*34400;
p2 = s2;%*800e-9*34400;
p4 = s4;%*800e-9*34400;
p6 = s6;%*800e-9*34400;
p8 = s8;%*800e-9*34400;

%p2=;
%p4=;
%p6=;
%p8=;

pt1(1)=p1(1);
pt3(1)=p3(1);
pt5(1)=p5(1);
pt7(1)=p7(1);
pt2(1)=p2(1);
pt4(1)=p4(1);
pt6(1)=p6(1);
pt8(1)=p8(1);
for i=2:length(p2)
    pt1(i)=(p1(i)+pt1(i-1))/2;
    pt3(i)=(p3(i)+pt3(i-1))/2;
    pt5(i)=(p5(i)+pt5(i-1))/2;
    pt7(i)=(p7(i)+pt7(i-1))/2;
    pt2(i)=(p2(i)+pt2(i-1))/2;
    pt4(i)=(p4(i)+pt4(i-1))/2;
    pt6(i)=(p6(i)+pt6(i-1))/2;
    pt8(i)=(p8(i)+pt8(i-1))/2;
    %pt1(i)=p1(i);
    %pt2(i)=p2(i);
    %pt3(i)=p3(i);

```



```

    %pt4(i)=p4(i);
    %pt5(i)=p5(i);
    %pt6(i)=p6(i);
    %pt7(i)=p7(i);
    %pt8(i)=p8(i);

    if (pt1(i)>pt1(i-1)+tm)
        pt1(i)=pt1(i-1)+tm;
    end
    if (pt3(i)>pt3(i-1)+tm)
        pt3(i)=pt3(i-1)+tm;
    end
    if (pt5(i)>pt5(i-1)+tm)
        pt5(i)=pt5(i-1)+tm;
    end
    if (pt7(i)>pt7(i-1)+tm)
        pt7(i)=pt7(i-1)+tm;
    end

    if (pt2(i)>pt2(i-1)+tm)
        pt2(i)=pt2(i-1)+tm;
    end
    if (pt4(i)>pt4(i-1)+tm)
        pt4(i)=pt4(i-1)+tm;
    end
    if (pt6(i)>pt6(i-1)+tm)
        pt6(i)=pt6(i-1)+tm;
    end
    if (pt8(i)>pt8(i-1)+tm)
        pt8(i)=pt8(i-1)+tm;
    end
end

s1=pt1';
s3=pt3';
s5=pt5';
s7=pt7';
s2=pt2';
s4=pt4';
s6=pt6';
s8=pt8';

%plot([st2 st4 st6 st8],'.');
%hold on
figure
plot([s2 s4 s6 s8],'.');
hold off
legend('A40','B40','C40','D40');

%plot(st2,'. ');
%hold on
%plot(s2,'g');
%hold off
%legend('A40','B40','C40','D40');

```

Estimapinv.m: Método da Matriz Pseudo-Inversa;

```

clear res40; clear res25;

d=500;%cm direcao X
l=480;%cm direcao Y

%Alturas dos receptores em relacao a parede do tanque
xa=230;ya=260;ha=208;
xb=270;yb=260;hb=208;
xc=270;yc=220;hc=208;
xd=230;yd=220;hd=208;

%Calculo da matriz A
A(1,1)=-2*(xd-xa);    .B(1,1)=-2*(yd-ya);    C(1,1)=-2*(hd-ha);

```

```

A(2,1)=-2*(xb-xa);    B(2,1)=-2*(yb-ya);    C(2,1)=-2*(hb-ha);
A(3,1)=-2*(xc-xa);    B(3,1)=-2*(yc-ya);    C(3,1)=-2*(hc-ha);
A(4,1)=-2*(xc-xb);    B(4,1)=-2*(yc-yb);    C(4,1)=-2*(hc-hb);
A(5,1)=-2*(xd-xb);    B(5,1)=-2*(yd-yb);    C(5,1)=-2*(hd-hb);
A(6,1)=-2*(xd-xc);    B(6,1)=-2*(yd-yc);    C(6,1)=-2*(hd-hc);

A=[A B C];
E=pinv(A);

ini_kalman;

for i = 1:length(s2)

    kalmand2;

    micA=matd(2,1,i);
    micB=matd(2,2,i);
    micC=matd(2,3,i);
    micD=matd(2,4,i);
    D(1,1)=(micD^2-micA^2)-(xd*xd-xa*xa)-(yd*yd-ya*ya)-(hd*hd-ha*ha);%D-A
    D(2,1)=(micB^2-micA^2)-(xb*xb-xa*xa)-(yb*yb-ya*ya)-(hb*hb-ha*ha);%B-A
    D(3,1)=(micC^2-micA^2)-(xc*xc-xa*xa)-(yc*yc-ya*ya)-(hc*hc-ha*ha);%C-A
    D(4,1)=(micC^2-micB^2)-(xc*xc-xb*xb)-(yc*yc-yb*yb)-(hc*hc-hb*hb);%C-B
    D(5,1)=(micD^2-micB^2)-(xd*xd-xb*xb)-(yd*yd-yb*yb)-(hd*hd-hb*hb);%D-B
    D(6,1)=(micD^2-micC^2)-(xd*xd-xc*xc)-(yd*yd-yc*yc)-(hd*hd-hc*hc);%D-C
    xm=E*D;
    xm=xm';
    res25(i,:)=xm;

    micA=matd(1,1,i);
    micB=matd(1,2,i);
    micC=matd(1,3,i);
    micD=matd(1,4,i);
    D(1,1)=(micD^2-micA^2)-(xd*xd-xa*xa)-(yd*yd-ya*ya)-(hd*hd-ha*ha);%D-A
    D(2,1)=(micB^2-micA^2)-(xb*xb-xa*xa)-(yb*yb-ya*ya)-(hb*hb-ha*ha);%B-A
    D(3,1)=(micC^2-micA^2)-(xc*xc-xa*xa)-(yc*yc-ya*ya)-(hc*hc-ha*ha);%C-A
    D(4,1)=(micC^2-micB^2)-(xc*xc-xb*xb)-(yc*yc-yb*yb)-(hc*hc-hb*hb);%C-B
    D(5,1)=(micD^2-micB^2)-(xd*xd-xb*xb)-(yd*yd-yb*yb)-(hd*hd-hb*hb);%D-B
    D(6,1)=(micD^2-micC^2)-(xd*xd-xc*xc)-(yd*yd-yc*yc)-(hd*hd-hc*hc);%D-C
    xm=E*D;
    xm=xm';
    res40(i,:)=xm;

    matx(1,i) = res40(i,1);
    matx(2,i) = res40(i,2);
    matx(3,i) = res40(i,3);
    matx(4,i) = res25(i,1);
    matx(5,i) = res25(i,2);
    matx(6,i) = res25(i,3);
    matx(7,i) = 0;

    y(i,1) = (matx(1,i)+matx(4,i))/2;
    y(i,2) = (matx(2,i)+matx(5,i))/2;
    y(i,3) = atan2(-(matx(2,i)-matx(5,i)),-(matx(1,i)-matx(4,i)));

    kalmand1;

end

```

F.m: Programa utilizado pelo Método dos Mínimos Quadrados;

```

function res = F (xv,d)
global xs D del;

vet = [];

```

```

for i = 1:7
    temp = (Jo(xv+del*[zeros(i-1,1);1;zeros(7-i,1)],d) - Jo(xv-del*[zeros(i-1,1);1;zeros(7-i,1)],d))/(2*del);
    vet = [vet;temp];
end;

res = vet;

```

Ini_kalman.m: Programa utilizado pelo Filtro de Kalman;

```

% escala

f = (25/0.5878e8)^(1/3);
mx = f^3*(0.5878e8 + 0.156e7) ;
my = f^3*(0.5878e8 + 0.241e8) ;
mz = f^5*(2.48e11 + 8.95e10);
cx = f^3*2.6e4; %surge
cy = f^3*0.8e6; %sway
cz = f^5*1.1e6; %yaw

M=[mx 0 0]
  [0 my 0]
  [0 0 mz]];

Damp=[cx 0 0]
      [0 cy 0]
      [0 0 cz]];

v_xcirc = [];
v_xbarra= [];

R = diag([15e-4 ; 15e-4 ; 1e-2]);

Q = diag([0.22 0.22 0.12]);

xcirc = [200/100;150/100;pi/2;ones(3,1);f^3*20e4 ;f^3*20e4; f^4*20e6];
Xcirc = eye(9,9);

```

Jacob.m: Programa utilizado pelo Método dos Mínimos Quadrados;

```

unction res = Jacob(xv,d)
global xs D del;

mat = [];

for i=1:7
    lin=[];
    for j=1:7
        temp = 1/(4*del^2) * ( Jo(xv+del*[zeros(i-1,1);1;zeros(7-i,1)]+del*[zeros(j-1,1);1;zeros(7-j,1)],d)-...
                                Jo(xv-del*[zeros(i-1,1);1;zeros(7-i,1)]+del*[zeros(j-1,1);1;zeros(7-j,1)],d)-...
                                Jo(xv+del*[zeros(i-1,1);1;zeros(7-i,1)]-del*[zeros(j-1,1);1;zeros(7-j,1)],d)+...
                                Jo(xv-del*[zeros(i-1,1);1;zeros(7-i,1)]-del*[zeros(j-1,1);1;zeros(7-j,1)],d));
        lin=[lin temp];
    end;
    mat=[mat;lin];
end;

res = mat;

```

Jo.m: Programa utilizado pelo Método dos Mínimos Quadrados;

```
function res = Jo (xv,d)
global xs D;

x = [xv(1) xv(2) xv(3)
     xv(4) xv(5) xv(6)];

soma=0;
for i=1:2
    for j=1:4
        soma=soma+(sqrt( (x(i,1)-xs(j,1))^2 + (x(i,2)-xs(j,2))^2 + (x(i,3)-xs(j,3))^2
        - d(i,j) )^2);
    end;
end;

res = soma + xv(7)*( (xv(4)-xv(1))^2 + (xv(5)-xv(2))^2 + (xv(6)-xv(3))^2 - D^2);
```

Kalmand1.m: Programa utilizado pelo Filtro de Kalman;

```
% Correcao - Kalmand1

H = [eye(3,3) zeros(3,6)];

vy=[y(i,1)/100;y(i,2)/100;y(i,3)];

matrizK = Xbarra*H'*inv(H*Xbarra*H'+R);
xcirc = xbarra + matrizK*(vy-H*xbarra);
Xcirc = (eye(9)-matrizK*H)*Xbarra*(eye(9)-matrizK*H)'+matrizK*R*matrizK';

v_xcirc(i,:) = xcirc';
```

Kalmand2.m: Programa utilizado pelo Filtro de Kalman;

```
% calculos - Predicao - Kalmand2

p = xcirc(3);
T = [cos(p) -sin(p) 0
     sin(p) cos(p) 0
     0 0 1];

A1=[zeros(3,3) T;
    zeros(3,3) -inv(M)*Damp];

B1=[zeros(3,3)
    inv(M)];
C1=eye(6,6);

z66=zeros(6,6);
z63=zeros(6,3);
z33=zeros(3,3);
z36=z63';

A=[A1 B1 ;
    z36 z33];
EE=[zeros(6,3);
    eye(3,3)];

H = [eye(3,3) zeros(3,6)];
h = 0.2;

FI = eye(9)+h*A;
LAMBDA = h*EE;
xbarra = FI*xcirc;
Xbarra = FI*Xcirc*FI'+LAMBDA*Q*LAMBDA';

v_xbarra(i,:) = xbarra';
```

Lin.m: Programa utilizado pelo Método dos Mínimos Quadrados;

```
t=1:1:500
p=polyfit(t',s1,1)
s1=polyval(p,t')

p=polyfit(t',s3,1)
s3=polyval(p,t')

p=polyfit(t',s5,1)
s5=polyval(p,t')

p=polyfit(t',s7,1)
s7=polyval(p,t')

figure
plota
```

Nr.m: Programa utilizado pelo Método dos Mínimos Quadrados;

```
global xs D del;

xs = [230 260 208
      270 260 208
      270 220 208
      230 220 208];
D = 100;

del = 0.2;

x = [220 90 30 220 180 30 0.1]';

% testes
res = [250 240 0
       350 240 0]; %posicao certa

xv_certo = [res(1,:) res(2,:) 0]';

d = [norm(xs(1,:)-res(1,:)) norm(xs(2,:)-res(1,:)) norm(xs(3,:)-res(1,:))
     norm(xs(4,:)-res(1,:))
     norm(xs(1,:)-res(2,:)) norm(xs(2,:)-res(2,:)) norm(xs(3,:)-res(2,:))
     norm(xs(4,:)-res(2,:))];

ini_kalman;
n=0;
x_ant = x;
for i=1:length(s2)
    i

    kalmand2;

    d = matd(:,i);
    termino=0;
    iter=100;
    while (termino==0) & (iter>0)
        x_novo = x_ant - inv(Jacob(x_ant,d))*F(x_ant,d);
        if(norm(x_novo-x_ant)<0.1)
            termino = 1;
        else
            x_ant = x_novo;
        end;
        iter=iter-1;
        if ((termino==0) | (iter<0)) & ((x_novo(3)>208) | (x_novo(6)>208))
            if (x_novo(3)>40) x_ant(3) = 20+rand*5;
            end;
            if (x_novo(6)>40)
                x_ant(6) = 20+rand*5
            end
            x_novo
```

```

        end;
        iter = 100;
        termino=0;
    end;
end;
matx(:,i)=x_novo;

y(i,1) = (matx(1,i)+matx(4,i))/2;
y(i,2) = (matx(2,i)+matx(5,i))/2;
if (i==1)
    y(i,3) = atan2(-(matx(2,i)-matx(5,i)),-(matx(1,i)-matx(4,i)));
else
    y(i,3) = atan2(-(matx(2,i)-matx(5,i)),-(matx(1,i)-matx(4,i))) + n*2*pi;
    if ((y(i,3)-y(i-1,3))>pi/2)
        n=n-1;
        y(i,3) = y(i,3)-2*pi;
    end;
    if ((y(i,3)-y(i-1,3))<-pi/2)
        n=n+1;
        y(i,3) = y(i,3)+2*pi;
    end;
end;

Kalmand1;
p = xcirc(3);
x_ant(1) = xcirc(1)*100 - D/2*cos(p);
x_ant(2) = xcirc(2)*100 - D/2*sin(p);
x_ant(3) = x_novo(3);
x_ant(4) = xcirc(1)*100 + D/2*cos(p);
x_ant(5) = xcirc(2)*100 + D/2*sin(p);
x_ant(6) = x_novo(6);
x_ant(7) = x_novo(7);
end;

```

Onda2.m: Programa de simulação para análise do fenômeno de interferência destrutiva;

```

% conjunto de valores para o nosso experimento
w = 25e3; %freq em Hz
c = 2*pi/(320/w); %comprimento de onda
x = -.6:0.002:.6;
y = -.6:0.002:.6;
n = 4; %numero de emissores
r = 0.052; %raio do circulo onde eles estao posicionados

% conjunto de valores para o som, para comparar com o simulador java
% de http://falstad.com/interference/
%w = 2656;
%c = 2*pi/(320/w);
%x = -3:0.01:3;
%y = -3:0.01:3;
%x = -2:0.005:2;
%y = -2:0.005:2;
%n = 4;
%r = 0.15;

for i=1:n
    dir(i) = (i-1)*2*pi/n+pi;
    xc(i)=r*cos(dir(i));
    yc(i)=r*sin(dir(i));
end;

for i=1:length(x)
    for j=1:length(y)
        P(i,j)=0;
        tc = 0; ts = 0;
        for k=1:n

```

```

        ang = atan2((y(j)-yc(k)),(x(i)-xc(k)))-dir(k);
        d = sqrt((x(i)-xc(k))^2+(y(j)-yc(k))^2);
%       if ang>pi %com direcionalidade
%           ang = ang - 2*pi;
%       end;
%       if ang<-pi
%           ang = ang + 2*pi;
%       end;
%       if abs(ang)>pi/2
%           pot=(pi-abs(ang))/(pi/2)*0.25;
%       else
%           pot=1-0.75*abs(ang)/(pi/2);
%       end;

        pot=1; %sem direcionalidade
        tc = tc + pot*cos(c*d);
        ts = ts + pot*sin(c*d);

    end;
    P(i,j)=(sqrt(ts^2+tc^2));
end;
end;

surf(x,y,P,'edgecolor','none')
view([0 90])

```

Plotall.m: Programa responsável pela plotagem dos resultados;

```

plot([s1 s3 s5 s7 s2 s4 s6 s8],'-');
legend('A25','B25','C25','D25','A40','B40','C40','D40');

hold on;
plot([s1 s3 s5 s7 s2 s4 s6 s8],'.');

```

Plotanr1.m: Programa responsável pela plotagem dos resultados;

```

figure(1);
clf;
subplot(331);
plot(matx(1,:));Title('x 40');
subplot(332);
plot(matx(2,:));Title('y 40');
subplot(333);
plot(matx(3,:));Title('z 40');
subplot(334);
plot(matx(4,:));Title('x 25');
subplot(335);
plot(matx(5,:));Title('y 25');
subplot(336);
plot(matx(6,:));Title('z 25');
subplot(337);
plot(matx(7,:));Title('lambda');
subplot(339);
d = sqrt( (matx(1,:)-matx(4,:)).^2 + (matx(2,:)-matx(5,:)).^2 + (matx(3,:)-
matx(6,:)).^2);
plot(d);Title('d');
subplot(338);
plot(matx(4,:),matx(5,),'r');hold on;
plot(matx(1,:),matx(2,),'k');legend('25','40');

figure(2);clf;
if(isempty(xcirc)==1)
    subplot(311);
    plot(y(:,1));Title('X');
    subplot(312);
    plot(y(:,2));Title('Y');
    subplot(313);
    plot(y(:,3)*180/pi);Title('psi');

```

```

else
    subplot(311);
    plot(y(:,1));hold on; plot(v_xcirc(:,1)*100,'r');Title('X');
    subplot(312);
    plot(y(:,2));hold on; plot(v_xcirc(:,2)*100,'r');Title('Y');
    subplot(313);
    plot(y(:,3)*180/pi);hold on; plot(v_xcirc(:,3)*180/pi,'r');Title('psi');
end;

```

Plotanr2.m: Programa responsável pela plotagem dos resultados;

```

figure (3);
clf;
subplot(331);
plot(matx(1,:));Title('x 40');
subplot(332);
plot(matx(2,:));Title('y 40');
subplot(333);
plot(matx(3,:));Title('z 40');
subplot(334);
plot(matx(4,:));Title('x 25');
subplot(335);
plot(matx(5,:));Title('y 25');
subplot(336);
plot(matx(6,:));Title('z 25');
subplot(337);
plot(matx(7,:));Title('lambda');
subplot(339);
d = sqrt( (matx(1,:)-matx(4,:)).^2 + (matx(2,:)-matx(5,:)).^2 + (matx(3,:)-
matx(6,:)).^2);
plot(d);Title('d');
subplot(338);
plot(matx(4,:),matx(5,),'r');hold on;
plot(matx(1,:),matx(2,),'k');legend('25','40');

figure(4);clf;
if(isempty(xcirc)==1)
    subplot(311);
    plot(y(:,1));Title('X');
    subplot(312);
    plot(y(:,2));Title('Y');
    subplot(313);
    plot(y(:,3)*180/pi);Title('psi');
else
    subplot(311);
    plot(y(:,1));hold on; plot(v_xcirc(:,1)*100,'r');Title('X');
    subplot(312);
    plot(y(:,2));hold on; plot(v_xcirc(:,2)*100,'r');Title('Y');
    subplot(313);
    plot(y(:,3)*180/pi);hold on; plot(v_xcirc(:,3)*180/pi,'r');Title('psi');
end;

```

Trata.m: Programa que prepara as medidas brutas para análise.

```

cc=8E-7*34000;
y=1500;
for i = 1:length(s2)
    matd(2,1,i)=(s1(i)+y)*cc; %25
    matd(2,2,i)=(s3(i)+y)*cc;
    matd(2,3,i)=(s5(i)+y)*cc;
    matd(2,4,i)=(s7(i)+y)*cc;

    matd(1,1,i)=(s2(i)+y)*cc; %40
    matd(1,2,i)=(s4(i)+y)*cc;
    matd(1,3,i)=(s6(i)+y)*cc;
    matd(1,4,i)=(s8(i)+y)*cc;

```



```

if i>2
    if (matd(2,1,i)==matd(2,2,i)) & (matd(2,4,i)==matd(2,3,i))
        matd(2,1,i)=matd(2,1,i-1);
        matd(2,2,i)=matd(2,2,i-1);
        matd(2,3,i)=matd(2,3,i-1);
        matd(2,4,i)=matd(2,4,i-1);
    end;
    if (matd(1,1,i)==matd(1,2,i)) & (matd(1,4,i)==matd(1,3,i))
        matd(1,1,i)=matd(1,1,i-1);
        matd(1,2,i)=matd(1,2,i-1);
        matd(1,3,i)=matd(1,3,i-1);
        matd(1,4,i)=matd(1,4,i-1);
    end;
end;

end;

```

PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS:

Frmconfig.frm:

```

VERSION 5.00
Object = "{831FDD16-0C5C-11D2-A9FC-0000F8754DA1}#2.0#0"; "MSCOMCTL.OCX"
Begin VB.Form frmconfig
    AutoRedraw      = -1    'True
    BorderStyle     = 1     'Fixed Single
    Caption         = "Configurações gerais"
    ClientHeight    = 4200
    ClientLeft      = 45
    ClientTop       = 330
    ClientWidth     = 3435
    Icon            = "frmconfig.frx":0000
    LinkTopic       = "Form1"
    MaxButton       = 0     'False
    MDIChild        = -1    'True
    MinButton       = 0     'False
    ScaleHeight     = 4200
    ScaleWidth      = 3435
    Begin VB.Frame Frame3
        Caption      = "Taxa de Amostragem"
        ForeColor    = &H00000000&
        Height       = 915
        Left         = 75
        TabIndex     = 2
        Top          = 75
        Width        = 3240
        Begin VB.TextBox Text1
            Alignment  = 2     'Center
            Appearance = 0     'Flat
            BackColor  = &H00FFFFFF&
            ForeColor  = &H00000000&
            Height     = 360

```

```

        Left           = 1050
        TabIndex       = 4
        Text           = "200"
        Top            = 300
        Width          = 1965
    End
    Begin VB.Label Label1
        Caption         = "Taxa (ms)"
        ForeColor       = &H00000000&
        Height          = 315
        Left            = 75
        TabIndex        = 3
        Top             = 375
        Width           = 765
    End
End
Begin VB.Frame Frame2
    Caption           = "Câmera de Vídeo"
    ForeColor         = &H00000000&
    Height            = 1215
    Left              = 75
    TabIndex          = 1
    Top               = 2850
    Width             = 3240
    Begin VB.CommandButton Command1
        BackColor       = &H00E0E0E0&
        Caption         = "Abrir Config. da Câmera"
        Height          = 390
        Left            = 675
        Style           = 1 'Graphical
        TabIndex        = 9
        Top             = 450
        Width           = 1965
    End
End
Begin VB.Frame Frame1
    Caption           = "Comunicação Serial"
    ForeColor         = &H00000000&
    Height            = 1590
    Left              = 75
    TabIndex          = 0
    Top               = 1125
    Width             = 3240
    Begin MSComctlLib.ImageList ImageList1
        Left            = 375
        Top             = 975
        _ExtentX        = 1005
        _ExtentY        = 1005
        BackColor       = -2147483643
    End
End

```

```

        ImageWidth      = 48
        ImageHeight     = 48
        MaskColor       = 12632256
        _Version        = 393216
        BeginProperty Images {2C247F25-8591-11D1-B16A-00C0F0283628}
            NumListImages = 1
            BeginProperty ListImage1 {2C247F27-8591-11D1-B16A-00C0F0283628}
                Picture      = "frmconfig.frx":0E42
                Key          = ""
            EndProperty
        EndProperty
    End
Begin VB.TextBox Text3
    Alignment      = 2 'Center
    Appearance     = 0 'Flat
    BackColor      = &H00FFFFFF&
    ForeColor      = &H00000000&
    Height         = 360
    Left           = 1800
    TabIndex       = 8
    Text           = "1"
    Top            = 300
    Width          = 1215
End
Begin VB.TextBox Text2
    Alignment      = 2 'Center
    Appearance     = 0 'Flat
    BackColor      = &H00FFFFFF&
    ForeColor      = &H00000000&
    Height         = 360
    Left           = 1800
    TabIndex       = 7
    Text           = "4800"
    Top            = 825
    Width          = 1215
End
Begin VB.Label Label3
    Caption        = "Taxa de transm. (bps)"
    ForeColor      = &H00000000&
    Height         = 240
    Left           = 75
    TabIndex       = 6
    Top            = 900
    Width          = 1665
End
Begin VB.Label Label2
    Caption        = "Porta"
    ForeColor      = &H00000000&
    Height         = 240

```

```

        Left          = 75
        TabIndex      = 5
        Top           = 375
        Width         = 615
    End
End
End
Attribute VB_Name = "frmconfig"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False

```

Frmconsole.frm:

```

VERSION 5.00
Begin VB.Form frmconsole
    AutoRedraw       = -1 'True
    BorderStyle      = 1  'Fixed Single
    Caption          = "Console"
    ClientHeight     = 4890
    ClientLeft       = 45
    ClientTop        = 330
    ClientWidth      = 3720
    Icon             = "frmconsole.frx":0000
    LinkTopic        = "Form1"
    MaxButton        = 0  'False
    MDIChild         = -1 'True
    MinButton        = 0  'False
    ScaleHeight      = 4890
    ScaleWidth       = 3720
    Begin VB.TextBox TxtCsl
        Appearance     = 0  'Flat
        BackColor       = &H00C0C0C0&
        BeginProperty Font
            Name        = "Courier New"
            Size        = 9.75
            Charset     = 0
            Weight      = 400
            Underline   = 0  'False
            Italic       = 0  'False
            Strikethrough = 0  'False
        EndProperty
        ForeColor       = &H00C00000&
        Height          = 390
        Left            = 75
        TabIndex        = 1
        Top             = 4425
        Width           = 3540
    End
End

```

```

End
Begin VB.ListBox LstCsl
    Appearance      = 0 'Flat
    BackColor       = &H00C0C0C0&
    BeginProperty Font
        Name         = "Courier New"
        Size         = 9.75
        Charset      = 0
        Weight       = 400
        Underline    = 0 'False
        Italic       = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H00FF0000&
    Height          = 4350
    Left            = 75
    TabIndex        = 0
    Top             = 75
    Width           = 3540
End
End
Attribute VB_Name = "frmconsole"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Private Sub Form_Activate()
    TxtCsl.SetFocus
End Sub

Private Sub TxtCsl_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If KeyAscii = 13 Then
        If LstCsl.ListCount = 18 Then
            LstCsl.Clear
        End If
        LstCsl.AddItem TxtCsl
        TxtCsl.Text = ""
        TxtCsl.SetFocus
    End If
End Sub

```

Fmrpostq.frm:

```

VERSION 5.00
Begin VB.Form frmpostq
    BorderStyle      = 1 'Fixed Single
    Caption          = "Posição do navio no tanque"
    ClientHeight     = 8190
    ClientLeft       = 45

```

```

ClientTop      = 330
ClientWidth    = 9975
Icon           = "frmpostq.frx":0000
LinkTopic      = "Form1"
MaxButton      = 0   'False
MDIChild       = -1  'True
MinButton      = 0   'False
ScaleHeight    = 8190
ScaleWidth     = 9975
Begin VB.PictureBox APostQ
    Appearance   = 0   'Flat
    ForeColor    = &H80000008&
    Height       = 8040
    Left         = 75
    ScaleHeight  = 8010
    ScaleWidth   = 9810
    TabIndex     = 0
    Top          = 75
    Width        = 9840
End
End
Attribute VB_Name = "frmpostq"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False

```

Mdigeral.frm:

```

VERSION 5.00
Object = "{648A5603-2C6E-101B-82B6-000000000014}#1.1#0"; "MSCOMM32.OCX"
Object = "{831FDD16-0C5C-11D2-A9FC-0000F8754DA1}#2.0#0"; "MSCOMCTL.OCX"
Begin VB.MDIForm mdigeral
    BackColor      = &H8000000C&
    Caption        = "SPD - Sistema de Posicionamento Dinâmico (v.5.0)"
    ClientHeight    = 9930
    ClientLeft     = 60
    ClientTop      = 345
    ClientWidth    = 14040
    Icon           = "mdigeral.frx":0000
    LinkTopic      = "MDIForm1"
    ScrollBars     = 0   'False
    StartUpPosition = 3   'Windows Default
    WindowState    = 2   'Maximized
    Begin VB.Timer Timer1
        Left        = 10800
        Top         = 750
    End
    Begin MSCommLib.MSComm Serial

```

```

Left          = 9375
Top           = 675
_ExtentX      = 1005
_ExtentY      = 1005
_Version      = 393216
DTREnable     = -1 'True
End
Begin MSComctlLib.Toolbar Barral
    Align      = 4 'Align Right
    Height     = 9930
    Left       = 13470
    TabIndex   = 0
    Top        = 0
    Width      = 570
    _ExtentX   = 1005
    _ExtentY   = 17515
    ButtonWidth = 1032
    ButtonHeight = 1005
    Style      = 1
    ImageList   = "ImageList1"
    _Version   = 393216
BeginProperty Buttons {66833FE8-8583-11D1-B16A-00C0F0283628}
    NumButtons = 5
BeginProperty Button1 {66833FEA-8583-11D1-B16A-00C0F0283628}
    Key          = "Sair"
    Object.ToolTipText = "Sair do Programa"
    ImageIndex   = 1
EndProperty
BeginProperty Button2 {66833FEA-8583-11D1-B16A-00C0F0283628}
    Style        = 3
EndProperty
BeginProperty Button3 {66833FEA-8583-11D1-B16A-00C0F0283628}
    Key          = "Console"
    Object.ToolTipText = "Console"
    ImageIndex   = 2
EndProperty
BeginProperty Button4 {66833FEA-8583-11D1-B16A-00C0F0283628}
    Key          = "Config"
    Object.ToolTipText = "Configurações Gerais"
    ImageIndex   = 3
EndProperty
BeginProperty Button5 {66833FEA-8583-11D1-B16A-00C0F0283628}
    Key          = "PosTq"
    Object.ToolTipText = "Visualizar Posição no Tanque"
    ImageIndex   = 4
EndProperty
EndProperty
BorderStyle   = 1
End

```

```

Begin MSComctlLib.ImageList ImageList1
    Left           = 10050
    Top            = 600
    _ExtentX       = 1005
    _ExtentY       = 1005
    BackColor      = -2147483643
    ImageWidth     = 32
    ImageHeight    = 32
    MaskColor      = 12632256
    _Version       = 393216
    BeginProperty Images {2C247F25-8591-11D1-B16A-00C0F0283628}
        NumListImages = 4
        BeginProperty ListImage1 {2C247F27-8591-11D1-B16A-00C0F0283628}
            Picture      = "mdigeral.frx":030A
            Key           = ""
        EndProperty
        BeginProperty ListImage2 {2C247F27-8591-11D1-B16A-00C0F0283628}
            Picture      = "mdigeral.frx":238C
            Key           = ""
        EndProperty
        BeginProperty ListImage3 {2C247F27-8591-11D1-B16A-00C0F0283628}
            Picture      = "mdigeral.frx":44C6
            Key           = ""
        EndProperty
        BeginProperty ListImage4 {2C247F27-8591-11D1-B16A-00C0F0283628}
            Picture      = "mdigeral.frx":5318
            Key           = ""
        EndProperty
    EndProperty
End
End
Attribute VB_Name = "mdigeral"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Private Sub Barral_ButtonClick(ByVal Button As MSComctlLib.Button)
With Button
    Select Case .Key
        Case "Sair"
            End
        Case "Console"
            Load frmconsole
        Case "Config"
            Load frmconfig
        Case "Postq"
            Load frmpostq
    End Select
End With

```



```

End Sub

'Private Sub MDIForm_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As
Single)
'If Y < 500 Then
'    Barral.Visible = True
'Else
'    Barral.Visible = False
'End If
'End Sub

```

Spd.vbp:

```

Type=Exe
Form=frmconsole.frm
Reference=*G{00020430-0000-0000-C000-
000000000046}#2.0#0#..\..\WINNT\System32\stdole2.tlb#OLE Automation
Object={648A5603-2C6E-101B-82B6-000000000014}#1.1#0; MSCOMM32.OCX
Object={F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0; COMDLG32.OCX
Object={831FDD16-0C5C-11D2-A9FC-0000F8754DA1}#2.0#0; MSCOMCTL.OCX
Object={38911DA0-E448-11D0-84A3-00DD01104159}#1.1#0; COMCT332.OCX
Form=mdigeral.frm
Form=frmconfig.frm
Form=frmpostq.frm
IconForm="frmconsole"
Startup="mdigeral"
HelpFile=""
Title="DPTiete"
Command32=""
Name="SPD"
HelpContextID="0"
CompatibleMode="0"
MajorVer=5
MinorVer=0
RevisionVer=0
AutoIncrementVer=0
ServerSupportFiles=0
VersionCompanyName=".."
CompilationType=0
OptimizationType=0
FavorPentiumPro(tm)=0
CodeViewDebugInfo=0
NoAliasing=0
BoundsCheck=0
OverflowCheck=0
FlPointCheck=0
FDIVCheck=0

```

```

UnroundedFP=0
StartMode=0
Unattended=0
Retained=0
ThreadPerObject=0
MaxNumberOfThreads=1
DebugStartupOption=0

[MS Transaction Server]
AutoRefresh=1

```

Spd.vbw:

```

frmconsole = 66, 66, 799, 514, C, 22, 22, 755, 470, C
mdigeral = 220, 220, 748, 668, Z, 66, 66, 799, 514, C
frmconfig = 0, 0, 0, 0, C, 132, 132, 660, 580, C
frmpostq = 0, 0, 0, 0, C, 110, 110, 638, 558, C

```

FIRMWARES:

Base01.asm: Programa gravado no microcontrolador da Base;

```

;*****
****
;***** Projeto: Sistema de Posicionamento Dinamico
*****
;***** Modulo: BASE (Processamento dos receptores de ultra-som)
*****
;*****
****
;*
;* PROCESSADOR:      PIC16F877
;* TITULO:           BASE01.ASM
;* VERSÃO:           00.00.01
;* DATA DA ATUALIZAÇÃO:      15.03.2004 (Segunda-feira)
;*
;* OBJETIVOS:  * Coletar e processar informacoes periodicas provenientes da
;*              eletronica embarcada (NAUTILUS);
;*              * Detectar e processar as IRQs solicitadas pelos sensores de
;*              ultra-som;
;*              * Transmitir as informacoes processadas para o computador
;*              principal;
;*
;* DESCRIÇÃO:
;*      Este firmware e responsavel pelo gerenciamento das IRQs ocasionadas pelas
;* bordas de descida dos sinais provenientes dos sensores (receptores de ultra-som),
bem

```

```

; * como seu tratamento, "empacotamento" e envio dos dados resultantes ao computador
; * principal.
; *
; *****

;=====
;      Configuration Bits
;=====

      __CONFIG __CP_ALL & __DEBUG_OFF & __WRT_ENABLE_OFF & __CPD_ON & __LVP_OFF &
__BODEN_OFF & __PWRTE_ON & __WDT_OFF & __HS_OSC

;=====
;==== ARQUIVOS DE DEFINIÇÕES =====
;=====+=====

      LIST P=16F877
      #INCLUDE "P16F877.INC"

; *****
; ***** DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS *****
; *****
; Definições dos nomes e endereços de todas as variaveis utilizadas.

;----- BANK0 (RAM<0020H:007FH>) -----

      CBLOCK 0X20

; *****
; Memória reservada para salvar o contexto:

      WORK_TEMP      ; Variavel auxiliar: CONTEXTO
      STATUS_TEMP    ; Variavel auxiliar: CONTEXTO
      PCLATH_TEMP     ; Variavel auxiliar: CONTEXTO
; *****
; Memória reservada ao pacote principal de informacoes a ser transmitido:

      INICIO_TX       ; Inicio da transmissao: SOH
      COMANDO_TX      ; Byte de comando/endereco

; Borda [A] do tanque:
      MIC_A1L         ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
      MIC_A1H         ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
      MIC_A2L         ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz
      MIC_A2H         ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz

```

```

        ; Borda [B] do tanque:
        MIC_B1L      ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        MIC_B1H      ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        MIC_B2L      ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz
        MIC_B2H      ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz

        ; Borda [C] do tanque:
        MIC_C1L      ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        MIC_C1H      ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        MIC_C2L      ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz
        MIC_C2H      ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz

        ; Borda [D] do tanque:
        MIC_D1L      ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        MIC_D1H      ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        MIC_D2L      ; Byte menos significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz
        MIC_D2H      ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz

        ; Informacoes do STATUS operacional do Nautilus:
        TEMP1_TX      ; Temperatura interna do navio
        TEMP2_TX      ; [ Temperatura da agua do tanque ]!
        VBAT1_TX      ; Valor proporcional a tensao das baterias do bloco[1]
        VBAT2_TX      ; Valor proporcional a tensao das baterias do bloco[2]

        CHECKSUM_TX    ; Variavel Checksum
        FIM_TX         ; Final da transmissao: EOF

;*****
; Memória reservada a recepção do pacote de informacoes provenientes do Nautilus:

        INICIO_RX
        COMANDO_RX

        ; Informacoes do STATUS operacional do Nautilus:
        TEMP1_RX      ; Temperatura interna do navio
        TEMP2_RX      ; [ Temperatura da agua do tanque ]!

```

```

VBAT1_RX      ; Valor proporcional a tensao das baterias do bloco[1]
VBAT2_RX      ; Valor proporcional a tensao das baterias do bloco[2]

CHECKSUM_RX   ; Variavel Checksum
FIM_RX        ; Final da transmissao: EOF
RXREG         ; Variavel auxiliar de RECEPCAO.

;*****

FLAGS         ; Variavel auxiliar p/ flags
FLAGS2        ; Variavel auxiliar p/ flags
FLAGS3        ; Variavel auxiliar p/ flags
FLAGS_MIC

CHEART        ; CONTADOR TMR0 "HEART"
CAUX          ; CONTADOR AUXILIAR para as IRQs
CAUX_MEST

TMROUT        ; CONTADOR 70ms (35 INCREMENTOS)
FOTO_PD       ; FOTO DO PORTD
POINTER_TX    ; Ponteiro que indica o proximo byte a ser enviado.
TMR1H_TEMP
TMR1L_TEMP

ENDC

;*****
;***** DECLARAÇÃO DE CONSTANTES *****
;*****
; Definições dos valores das constantes utilizadas.

#define SOH      A'I'      ;0X01      ; (Start Of Header)
#define EOF      A'F'      ;0X04      ; (End Of File)
#define TEMPO_TMROUT .35      ; 35 * 2mS(TMR0) = 70ms
#define LETRA    A'z'

#define BANK0   BCF      STATUS,RP0      ; Seleciona Banco0 da RAM
#define BANK1   BSF      STATUS,RP0      ; Seleciona Banco1 da RAM

;*****
;***** DECLARACAO DE FLAGS *****
;*****

#define HAB_TMROUT   FLAGS,0      ; 0 -> DESABILITADO
                                ; 1 -> HABILITADO

#define PACK_RX_OK   FLAGS,1      ; 0 -> PACOTE INVALIDO
                                ; 1 -> PACOTE AGUARDANDO TRATAMENTO

```

```

#define PACK_TX_OK      FLAGS,2          ; 0 -> PACOTE INVALIDO
                                   ; 1 -> PACOTE AGUARDANDO TRATAMENTO

#define ESCUTA_MIC      FLAGS,3          ; 0 -> NAO TRATADO
                                   ; 1 -> TRATADO

;#define      ????      FLAGS,4          ; 0 -> NAO TRANSMITE
;                                   ; 1 -> TRASMITE

#define MIC_D2          FLAGS2,0         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

#define MIC_D1          FLAGS2,1         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

#define MIC_C2          FLAGS2,2         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

#define MIC_C1          FLAGS2,3         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

#define MIC_B2          FLAGS2,4         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

#define MIC_B1          FLAGS2,5         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

#define MIC_A2          FLAGS2,6         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

#define MIC_A1          FLAGS2,7         ; 0 -> DESABILITADO
                                   ; 1 -> HABILITADO

;*****
;***** NOMENCLATURA DAS ENTRADAS *****
;*****
; Definição de todos os pinos que estão sendo utilizados como entradas

;----- PORTB -----

#define      MIC_A1_C1PORTB,4          ; [DIG] IRQ_MEST Microfones A1 e C1
#define      MIC_A2_C2PORTB,5          ; [DIG] IRQ_MEST Microfones A2 e C2
#define      MIC_B1_D1PORTB,6          ; [DIG] IRQ_MEST Microfones B1 e D1
#define      MIC_B2_D2PORTB,7          ; [DIG] IRQ_MEST Microfones B2 e D2

;----- PORTC -----

#define      RX          PORTC,7        ; [DIG] RECEPCAO SERIAL

```

```

;----- PORTD -----

#define ST_D2 PORTD,0 ; [DIG] STATUS do Microfone D2
#define ST_D1 PORTD,1 ; [DIG] STATUS do Microfone D1
#define ST_C2 PORTD,2 ; [DIG] STATUS do Microfone C2
#define ST_C1 PORTD,3 ; [DIG] STATUS do Microfone C1
#define ST_B2 PORTD,4 ; [DIG] STATUS do Microfone B2
#define ST_B1 PORTD,5 ; [DIG] STATUS do Microfone B1
#define ST_A2 PORTD,6 ; [DIG] STATUS do Microfone A2
#define ST_A1 PORTD,7 ; [DIG] STATUS do Microfone A1

;*****
;***** NOMENCLATURA DAS SAÍDAS *****
;*****
; Definição de todos os pinos que estão sendo utilizados como saídas

;----- PORTA -----

#define HEART PORTA,4 ; [DIG] HEART beat

;----- PORTC -----

#define TX PORTC,6 ; [DIG] TRANSMISSAO SERIAL

;*****
;***** PINOS DISPONÍVEIS *****
;*****
; Definição de todos os pinos disponiveis.

; PORTA <0-3,5>
; PORTB <0-3>
; PORTC <0-5>
; PORTE <0-2>

;*****
;***** VETOR DE RESET *****
;*****

ORG 0X00
GOTO MAIN

;*****
;***** VETOR DAS IRQs *****
;*****

```

```

ORG 0X04

;----- SALVA CONTEXTO -----

MOVWF WORK_TEMP      ; Copia W para o registrador WORK_TEMP
SWAPF STATUS,W        ; Prepara o STATUS para ser salvo em STATUS_TEMP
CLRF STATUS           ; Seta BANK0
MOVWF STATUS_TEMP     ; Salva STATUS no registrador STATUS_TEMP

;-----

BTFSC  INTCON,RBIF     ; OCORREU IRQ POR MUDANÇA DE ESTADO?
GOTO   INT_MEST        ; SIM
                        ; NÃO

BTFSC  INTCON,T0IF     ; Ocorreu IRQ por estouro do Timer0?
GOTO   INT_TMR0        ; SIM.
                        ; NAO.

BTFSC  PIR1,RCIF       ; Ocorreu IRQ por recepcao SERIAL?
GOTO   INT_RX          ; SIM.
                        ; NAO.

GOTO   SAI_IRQS        ; Abandona as IRQs...

;-----

;////////////////////////////////////
;///// MUDANÇA DE ESTADO //////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////

INT_MEST
    BCF    INTCON,RBIE  ; Desabilita IRQ por mudanca de estado.
    MOVF   PORTB,W      ; Atualiza a condicao de conflito.
    BCF    INTCON,RBIF  ; Reseta a possivel solicitacao de IRQ_MEST.

    CLRF   FLAGS2
    BSF    ESCUTA_MIC

SAI_INT_MEST

    GOTO   SAI_IRQS     ; Finaliza o tratamento das IRQs.

;-----

;////////////////////////////////////
;///// RECEPCAO SERIAL //////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////

INT_RX
    MOVF   RCREG,W
    MOVWF  RXREG
    MOVLW  COMANDO_RX
    MOVWF  FSR

```



```

        CLRF    CAUX
PILHA
        MOVF    INDF,W
        DECF    FSR,F
        MOVWF   INDF
        INCF    FSR,F
        INCF    FSR,F
        INCF    CAUX,F
        BTFSS   CAUX,3          ; Pilha rotacionada?
        GOTO    PILHA          ; NAO.
                                   ; SIM.

        MOVF    INICIO_RX,W
        XORLW   SOH
        BTFSS   STATUS,Z       ; Confere INICIO de pacote?
        GOTO    SAI_INT_RX     ; NAO.
                                   ; SIM. Continua validando pacote...

        MOVF    FIM_RX,W
        XORLW   EOF
        BTFSS   STATUS,Z       ; Confere FIM de pacote?
        GOTO    SAI_INT_RX     ; NAO.
                                   ; SIM. Continua validando pacote...

        MOVF    COMANDO_RX,W
        ADDWF   TEMP1_RX,W
        ADDWF   TEMP2_RX,W
        ADDWF   VBAT1_RX,W
        ADDWF   VBAT2_RX,W
        XORWF   CHECKSUM_RX,W
        BTFSS   STATUS,Z       ; Confere CHECKSUM dados transmitidos?
        GOTO    SAI_INT_RX     ; NAO.
                                   ; SIM.

        BSF     PACK_RX_OK     ; Seta flag de pacote aguardando tratamento!
        BSF     HAB_TMROUT     ; Habilita TIMER OUT
        CLRF    TMROUT         ; Prepara TMR0 para estourar em aproximadamente 68-70ms
(TIMER OUT)

        CLRF    TMR1H          ;
        CLRF    TMR1L          ; Reseta os registradores do TMR1
        BSF     T1CON,TMR1ON    ; Habilita o TMR1.

        MOVF    PORTB,W        ; Atualiza a condicao de conflito.
        BCF     INTCON,RBIF     ; Reseta a possivel solicitacao de IRQ_MEST.
        BSF     INTCON,RBIE     ; Habilita IRQ por mudanca de estado.

        BSF     PORTA,1

SAI_INT_RX
        GOTO    SAI_IRQS       ; Finaliza o tratamento das IRQs.

;-----

```

```

;////////////////////////////////////
;////// TIMER0 //////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////
; Timer0 programado para 2ms.

INT_TMR0

    MOVLW    .217            ; Obs: QUALQUER MODIFICACAO, ALTERAR
    MOVWF    TMR0            ; ESTE VALOR!!!
    BCF      INTCON,T0IF

    BTFSS    HAB_TMROUT      ; TIMER OUT habilitado?
    GOTO     INT_TMR0_01     ; NAO.
    INCF     TMROUT,F        ; SIM.
    MOVLW    TEMPO_TMROUT
    XORWF    TMROUT,W
    BTFSS    STATUS,Z        ; Esgotou TIMER OUT?
    GOTO     INT_TMR0_01     ; NAO.
                                ; SIM.

    CLRF     TMROUT          ;
    BCF      HAB_TMROUT      ; Reseta TIMER OUT
    BSF      PACK_TX_OK      ; Habilita TRANSMISSAO SERIAL

    CLRF     FLAGS2
    BCF      ESCUTA_MIC
    BCF      T1CON,TMR1ON    ; Desabilita o TMR1.

    BCF      PORTA,0
    BCF      PORTA,1

INT_TMR0_01
    INCF     CHEART,F
    MOVLW    .125            ;
    XORWF    CHEART,W        ; Oscilacao de 2Hz;
    MOVLW    B'00010000'
    BTFSS    STATUS,Z        ; Inverter estado do led?
    GOTO     SAI_INT_TMR0    ; NAO.
    XORWF    PORTA,F        ; SIM.
    CLRF     CHEART

SAI_INT_TMR0
    GOTO     SAI_IRQS        ; Finaliza o tratamento das IRQs.

;-----

SAI_IRQS

;----- RECUPERA CONTEXTO -----

```

```

        SWAPF STATUS_TEMP,W      ; Swap STATUS_TEMP register into W (sets bank to
original state)
        MOVWF STATUS             ; Move W into STATUS register
        SWAPF WORK_TEMP,F        ; Swap W_TEMP
        SWAPF WORK_TEMP,W        ; Swap W_TEMP into W

;-----

        RETFIE

;*****

;***** DECLARACAO DAS ROTINAS *****
;*****

;.....
;..... PREPARA_FLAGS .....
;.....
; Esta rotina retorna uma mascara para realizar as operacoes com FLAGS_MIC.

PREPARA_FLAGS
        ANDLW    0X07
        ADDWF    PCL,F
        RETLW    B'00000001'
        RETLW    B'00000010'
        RETLW    B'00000100'
        RETLW    B'00001000'
        RETLW    B'00010000'
        RETLW    B'00100000'
        RETLW    B'01000000'
        RETLW    B'10000000'

;.....
;..... CRAVA_TEMPO .....
;.....
; Esta rotina retorna um ponteiro que aponta para o endereco de gravacao
; do respectivo microfone.

CRAVA_TEMPO
        ANDLW    0X07
        ADDWF    PCL,F
        RETLW    MIC_D2H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz
        RETLW    MIC_D1H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        RETLW    MIC_C2H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz

```

```

        RETLW    MIC_C1H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        RETLW    MIC_B2H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz
        RETLW    MIC_B1H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz
        RETLW    MIC_A2H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[2]:19kHz
        RETLW    MIC_A1H          ; Byte mais significativo do contador de tempo para a
frequencia[1]:16kHz

;*****
;***** CONFIGURACAO & INICIALIZACAO *****
;*****

MAIN

        BANK1

        MOVLW    0X07             ; justificado a esquerda,
        MOVWF    ADCON1          ; Configura [RA0:RA5] digitais

        MOVLW    B'11101100'     ;
        MOVWF    TRISA           ; Configura PORTA[0-3,5] como entrada e RA4 como saida.

        MOVLW    B'11111111'     ; (FF):1111 1111 --> W
        MOVWF    TRISB           ; Configura PORTB como entrada

        MOVLW    B'11111111'     ;
        MOVWF    TRISC           ; Configura PORTC como entrada

        MOVLW    B'11111111'     ;
        MOVWF    TRISD           ; Configura PORTD como entrada

        MOVLW    0X07             ;
        MOVWF    TRISE           ; Configura PORTE como entrada

        MOVLW    B'11000111'     ;
        MOVWF    OPTION_REG       ; Pull-ups desabilitados
                                   ; Timer0 [1:256]; Bordo de subida

        MOVLW    B'01100000'     ;-> anterior, com timer0
        MOVWF    INTCON           ; IRQ por timer0
                                   ; IRQ de perifericos
                                   ; IRQ por mudanca de estado (stand by)

        MOVLW    B'00100000'     ;
        MOVWF    PIE1             ; IRQ de recepcao serial
                                   ; IRQ de transmissao serial (stand by)

```

```

MOVLW  B'00100010'
MOVWF  TXSTA          ; Desabilita TX, LOW SPEED

MOVLW  .63
MOVWF  SPBRG          ; BAUD RATE 4800 Bps (ou 19200 Bps)

BANK0

MOVLW  B'10010000'
MOVWF  RCSTA          ; Habilita o modulo serial
                        ; 8 bits, recepcao continua

CLRF   PORTA
CLRF   PORTB
CLRF   PORTC
CLRF   PORTD
CLRF   PORTE

CLRF   FLAGS          ; Flags de controle...
CLRF   FLAGS2         ;
CLRF   FLAGS3         ;
CLRF   FLAGS_MIC      ; ...mais flags de controle.

MOVLW  .217           ;
MOVWF  TMR0           ; Inicializa o TMR0 (2ms)

MOVLW  B'00101101'    ; Timer1 [1:4]; Habilita Oscilador TMR1, Clock interno,
MOVWF  T1CON          ; Configura TMR1: Habilitacao TMR1 (stand by).

CLRF   TMR1L
CLRF   TMR1H

MOVLW  SOH
MOVWF  INICIO_TX

MOVLW  A'c'
MOVWF  COMANDO_TX     ;

MOVLW  A'1'
MOVWF  MIC_A1L        ;

MOVLW  A'2'
MOVWF  MIC_A1H        ;

MOVLW  A'3'
MOVWF  MIC_A2L        ;

MOVLW  A'4'
MOVWF  MIC_A2H        ;

```

```
MOVLW  A'5'  
MOVWF  MIC_B1L      ;  
  
MOVLW  A'6'  
MOVWF  MIC_B1H      ;  
  
MOVLW  A'7'  
MOVWF  MIC_B2L      ;  
  
MOVLW  A'8'  
MOVWF  MIC_B2H      ;  
  
MOVLW  A'9'  
MOVWF  MIC_C1L      ;  
  
MOVLW  A'A'  
MOVWF  MIC_C1H      ;  
  
MOVLW  A'B'  
MOVWF  MIC_C2L      ;  
  
MOVLW  A'C'  
MOVWF  MIC_C2H      ;  
  
MOVLW  A'D'  
MOVWF  MIC_D1L      ;  
  
MOVLW  A'E'  
MOVWF  MIC_D1H      ;  
  
MOVLW  A'F'  
MOVWF  MIC_D2L      ;  
  
MOVLW  A'0'  
MOVWF  MIC_D2H      ;  
  
MOVLW  A'x'  
MOVWF  TEMP1_TX      ;  
  
MOVLW  A'y'  
MOVWF  TEMP2_TX      ;  
  
MOVLW  A'z'  
MOVWF  VBAT1_TX      ;  
  
MOVLW  A'w'  
MOVWF  VBAT2_TX      ;
```

```

        MOVLW    EOF
        MOVWF    FIM_TX

        CLRF     CHEART
        BSF      INTCON,GIE      ; Habilita as IRQs

;*****
;***** PROGRAMA PRINCIPAL *****
;*****
PRINCIPAL

;-----
; TRATAMENTO DA TRANSMISSAO DE DADOS
;-----

TRATA_TX
        BTFSS   PACK_TX_OK      ; TRANSMISSAO Autorizada?
        GOTO    TRATA_RX        ; NAO.
                                   ; SIM.

        MOVF    INICIO_TX,W      ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

        MOVF    COMANDO_TX,W    ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

        MOVF    MIC_A1L,W        ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

        MOVF    MIC_A1H,W        ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

        MOVF    MIC_A2L,W        ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

```

```
MOVF    MIC_A2H,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1

MOVF    MIC_B1L,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1

MOVF    MIC_B1H,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1

MOVF    MIC_B2L,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1

MOVF    MIC_B2H,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1

MOVF    MIC_C1L,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1

MOVF    MIC_C1H,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1

MOVF    MIC_C2L,W      ;
MOVWF   TXREG
NOP
BTFSS   PIR1,TXIF
GOTO    $-1
```



```

MOVF    MIC_C2H,W      ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    MIC_D1L,W      ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    MIC_D1H,W      ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    MIC_D2L,W      ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    MIC_D2H,W      ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    TEMP1_TX,W     ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    TEMP2_TX,W     ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    VBAT1_TX,W     ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVF    VBAT2_TX,W     ;

```

```

MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVWF    COMANDO_TX,W
ADDWF    MIC_A1L,W
ADDWF    MIC_A1H,W
ADDWF    MIC_A2L,W
ADDWF    MIC_A2H,W
ADDWF    MIC_B1L,W
ADDWF    MIC_B1H,W
ADDWF    MIC_B2L,W
ADDWF    MIC_B2H,W
ADDWF    MIC_C1L,W
ADDWF    MIC_C1H,W
ADDWF    MIC_C2L,W
ADDWF    MIC_C2H,W
ADDWF    MIC_D1L,W
ADDWF    MIC_D1H,W
ADDWF    MIC_D2L,W
ADDWF    MIC_D2H,W
ADDWF    TEMP1_TX,W
ADDWF    TEMP2_TX,W
ADDWF    VBAT1_TX,W
ADDWF    VBAT2_TX,W
MOVWF    CHECKSUM_TX      ; Preparacao do CHECKSUM_TX
MOVWF    CHECKSUM_TX,W   ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVWF    FIM_TX,W        ;
MOVWF    TXREG
NOP
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     $-1

MOVLW    LETRA
MOVWF    COMANDO_TX
MOVWF    MIC_A1L
MOVWF    MIC_A1H
MOVWF    MIC_A2L
MOVWF    MIC_A2H
MOVWF    MIC_B1L
MOVWF    MIC_B1H
MOVWF    MIC_B2L
MOVWF    MIC_B2H

```

```

MOVWF MIC_C1L
MOVWF MIC_C1H
MOVWF MIC_C2L
MOVWF MIC_C2H
MOVWF MIC_D1L
MOVWF MIC_D1H
MOVWF MIC_D2L
MOVWF MIC_D2H

BCF    PACK_TX_OK    ; Reseta flag...

;-----
; TRATAMENTO DA RECEPCAO DE DADOS
;-----
TRATA_RX
    BTFSS PACK_RX_OK    ; Tratamento de pacote valido?
    GOTO  TRATA_MIC      ; NAO.
                                ; SIM.

;    MOVF  COMANDO_RX,W  ; ?????
;    MOVF  COMANDO_TX    ; ?????

;    MOVF  TEMP1_RX,W
;    MOVWF TEMP1_TX
;
;    MOVF  TEMP2_RX,W
;    MOVWF TEMP2_TX
;
;    MOVF  VBAT1_RX,W
;    MOVWF VBAT1_TX
;
;    MOVF  VBAT2_RX,W
;    MOVWF VBAT2_TX
;
    BCF    PACK_RX_OK

;-----

;-----
; TRATAMENTO DOS MICROFONES
;-----
TRATA_MIC
    BTFSS ESCUTA_MIC    ; Tratamento de pacote valido?
    GOTO  PRINCIPAL      ; NAO.
                                ; SIM.

VMIC_D2
    BTFSC PORTD,0        ; MIC ATIVO?
    GOTO  VMIC_D1        ; NAO.
                                ; SIM.

```

```

    BTFSC    MIC_D2            ; MIC TRATADO?
    GOTO     VMIC_D1          ; SIM.
                                ; NAO.

    MOVF     TMR1H,W          ;
    MOVWF    MIC_D2H          ;
    MOVF     TMR1L,W          ;
    MOVWF    MIC_D2L          ;
    BSF      MIC_D2            ; SINALIZA MIC TRATADO...

VMIC_D1
    BTFSC    PORTD,1          ; MIC ATIVO?
    GOTO     VMIC_C2          ; NAO.
                                ; SIM.

    BTFSC    MIC_D1            ; MIC TRATADO?
    GOTO     VMIC_C2          ; SIM.
                                ; NAO.

    MOVF     TMR1H,W          ;
    MOVWF    MIC_D1H          ;
    MOVF     TMR1L,W          ;
    MOVWF    MIC_D1L          ;
    BSF      MIC_D1            ; SINALIZA MIC TRATADO...

VMIC_C2
    BTFSC    PORTD,2          ; MIC ATIVO?
    GOTO     VMIC_C1          ; NAO.
                                ; SIM.

    BTFSC    MIC_C2            ; MIC TRATADO?
    GOTO     VMIC_C1          ; SIM.
                                ; NAO.

    MOVF     TMR1H,W          ;
    MOVWF    MIC_C2H          ;
    MOVF     TMR1L,W          ;
    MOVWF    MIC_C2L          ;
    BSF      MIC_C2            ; SINALIZA MIC TRATADO...

VMIC_C1
    BTFSC    PORTD,3          ; MIC ATIVO?
    GOTO     VMIC_B2          ; NAO.
                                ; SIM.

    BTFSC    MIC_C1            ; MIC TRATADO?
    GOTO     VMIC_B2          ; SIM.
                                ; NAO.

    MOVF     TMR1H,W          ;
    MOVWF    MIC_C1H          ;
    MOVF     TMR1L,W          ;
    MOVWF    MIC_C1L          ;
    BSF      MIC_C1            ; SINALIZA MIC TRATADO...

VMIC_B2

```

```

    BTFSC PORTD,4      ; MIC ATIVO?
    GOTO  VMIC_B1      ; NAO.
                        ; SIM.

    BTFSC  MIC_B2      ; MIC TRATADO?
    GOTO  VMIC_B1      ; SIM.
                        ; NAO.

    MOVF   TMR1H,W     ;
    MOVWF  MIC_B2H     ;
    MOVF   TMR1L,W     ;
    MOVWF  MIC_B2L     ;
    BSF    MIC_B2      ; SINALIZA MIC TRATADO...

VMIC_B1
    BTFSC PORTD,5      ; MIC ATIVO?
    GOTO  VMIC_A2      ; NAO.
                        ; SIM.

    BTFSC  MIC_B1      ; MIC TRATADO?
    GOTO  VMIC_A2      ; SIM.
                        ; NAO.

    MOVF   TMR1H,W     ;
    MOVWF  MIC_B1H     ;
    MOVF   TMR1L,W     ;
    MOVWF  MIC_B1L     ;
    BSF    MIC_B1      ; SINALIZA MIC TRATADO...

VMIC_A2
    BTFSC PORTD,6      ; MIC ATIVO?
    GOTO  VMIC_A1      ; NAO.
                        ; SIM.

    BTFSC  MIC_A2      ; MIC TRATADO?
    GOTO  VMIC_A1      ; SIM.
                        ; NAO.

    MOVF   TMR1H,W     ;
    MOVWF  MIC_A2H     ;
    MOVF   TMR1L,W     ;
    MOVWF  MIC_A2L     ;
    BSF    MIC_A2      ; SINALIZA MIC TRATADO...

VMIC_A1
    BTFSC PORTD,7      ; MIC ATIVO?
    GOTO  MIC_OK       ; NAO.
                        ; SIM.

    BTFSC  MIC_A1      ; MIC TRATADO?
    GOTO  MIC_OK       ; SIM.
                        ; NAO.

    BSF    PORTA,0

    MOVF   TMR1H,W     ;
    MOVWF  MIC_A1H     ;

```

```

MOVF    TMR1L,W        ;
MOVWF   MIC_A1L        ;
BSF     MIC_A1         ; SINALIZA MIC TRATADO...

MIC_OK

        INCF    FLAGS2,W
        BTFSS   STATUS,Z      ; TODOS MICs CHEGARAM?
        GOTO    PRINCIPAL     ; NAO.
                                ; SIM.

        CLRF    TMROUT        ;
        BCF     HAB_TMROUT     ; Reseta TIMER OUT
        BSF     PACK_TX_OK     ; Habilita TRANSMISSAO SERIAL
        BCF     ESCUTA_MIC
        CLRF    FLAGS2
        BCF     T1CON,TMR1ON   ; Desabilita o TMR1.

;-----

;*****
;***** FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL *****
;*****

        GOTO    PRINCIPAL

END

```

Naut01.asm: Programa gravado no microcontrolador da Embarcação;

```

;*****
;***** Projeto: Sistema de Posicionamento Dinamico *****
;***** Modulo: NAUTILUS (Gerenciamento dos atuadores e antenas de ultra-som) *****
;*****
;*
;* PROCESSADOR:          PIC16F877
;* TITULO:                NAUT01.ASM
;* VERSÃO:                00.00.01
;* DATA DA ATUALIZAÇÃO:  22.03.2004 (Segunda-feira)
;*
;* OBJETIVOS:            * Receber e processar informacoes periodicas provenientes do
;*                        computador principal;
;*                        * Gerenciar os setpoints para os atuadores (motores) e
controlar
;*                        o acionamento das antenas de ultra-som;
;*                        * Sincronizar e transmitir as informacoes processadas para a
base;
;*
;* DESCRIÇÃO:

```

```

;*          Este firmware e responsavel pelo gerenciamento dos atuadores (motores
DC e
;* e motores de passo) da embarcacao, controlar o acionamento dos tweeters de ultra-
som,
;* sincronizar os contadores da base e fornecer informacoes de status sobre as
baterias e
;* as temperaturas do sistema.
;*
;*****

;=====
;          Configuration Bits
;=====

__CONFIG _CP_ALL & _DEBUG_OFF & _WRT_ENABLE_OFF & _CPD_ON & _LVP_OFF &
_BODEN_OFF & _PWRTE_ON & _WDT_OFF & _HS_OSC

;=====
;===== ARQUIVOS DE DEFINIÇÕES =====
;=====

LIST P=16F877
#include "P16F877.INC"

;*****
****
;***** DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
*****
;*****
****
; Definições dos nomes e endereços de todas as variaveis utilizadas.

;----- BANK0 (RAM<0020H:007FH>) -----

CBLOCK 0x20

;*****
; Memória reservada para salvar o contexto:

WORK_TEMP      ; Variavel auxiliar: CONTEXTO
STATUS_TEMP    ; Variavel auxiliar: CONTEXTO
PCLATH_TEMP     ; Variavel auxiliar: CONTEXTO

;*****
; Memória reservada ao pacote principal de informacoes a ser transmitido para a base:

INICIO_TX
COMANDO_TX

```

```

; Informacoes do STATUS operacional do Nautilus:
TEMP1_TX      ; Temperatura interna do navio
TEMP2_TX      ; [ Temperatura da agua do tanque ]!
VBAT1_TX      ; Valor proporcional a tensao das baterias do bloco[1]
VBAT2_TX      ; Valor proporcional a tensao das baterias do bloco[2]

CHECKSUM_TX    ; Variavel Checksum
FIM_TX        ; Final da transmissao: EOF

;*****

; Memória reservada a recepção do pacote de informacoes provenientes do computador
principal:

INICIO_RX      ; Inicio da transmissao: SOH
COMANDO_RX     ; Byte de comando/endereco

SMOTOR_DC      ; Byte responsavel pela selecao de sentido de giro dos motores
DC.
SMOTOR_PASSO   ; BYte responsavel pela selecao de sentido de giro dos motores
de passo.
               ; [0]: Sentido Horario.
               ; [1]: Sentido Anti-Horario.

MDC1           ; SET-POINT para o motor DC(1): [0-25]
MDC2           ; SET-POINT para o motor DC(2): [0-25]
MDC3           ; SET-POINT para o motor DC(3): [0-25]
MDC4           ; SET-POINT para o motor DC(4): [0-25]

MPASSO1        ; SET-POINT para o numero de incrementos para o motor de
passo(1): [0-200 steps]
MPASSO2        ; SET-POINT para o numero de incrementos para o motor de
passo(2): [0-200 steps]

CHECKSUM_RX    ; Variavel Checksum
FIM_RX         ; Final da transmissao: EOF
RXREG          ; Variavel auxiliar de RECEPCAO.

;*****

FLAGS          ; Variavel auxiliar p/ flags
FLAGS2         ; Variavel auxiliar p/ flags
FLAGS3         ; Variavel auxiliar p/ flags

CAUX           ; CONTADOR AUXILIAR para as IRQs
POINTER_TX     ; Ponteiro que indica o proximo byte a ser enviado.

CHEARTL       ;

```



```

CHEARTH          ; CONTADORES TMR0 "HEART"

STEP             ; Contador principal para os passos do PWM.
PWM1             ; SETPOINT M1
PWM2             ; SETPOINT M2
PWM3             ; SETPOINT M3
PWM4             ; SETPOINT M4
DELAY1          ; Utilizada no DELAY de 10ms

ENDC

;*****
;***** DECLARAÇÃO DE CONSTANTES *****
;*****
; Definições dos valores das constantes utilizadas.

#define SOH       A'I'      ;0X01          ; (Start Of Header)
#define EOF       A'F'      ;0X04          ; (End Of File)
#define LETRA     A'U'
#define NPWM_STEPS .25      ; Numero de incrementos do PWM.

#define BANK0_BCF STATUS,RP0 ; Selecciona Banco0 da RAM
#define BANK1_BSF STATUS,RP0 ; Selecciona Banco1 da RAM

;*****
;***** DECLARACAO DE FLAGS *****
;*****

#define HABDELAY   FLAGS,0    ; 0 -> DESABILITADO...
                        ; 1 -> HABILITADO Tempo de 10ms para bipar

#define PACK_RX_OK FLAGS,1    ; 0 -> PACOTE INVALIDO
                        ; 1 -> PACOTE AGUARDANDO TRATAMENTO

#define PACK_TX_OK FLAGS,2    ; 0 -> PACOTE INVALIDO
                        ; 1 -> PACOTE AGUARDANDO TRATAMENTO

#define PWM1_SINAL FLAGS,3    ; 0 > POSITIVO
                        ; 1 > NEGATIVO

#define PWM2_SINAL FLAGS,4    ; 0 > POSITIVO
                        ; 1 > NEGATIVO

#define PWM3_SINAL FLAGS,5    ; 0 > POSITIVO
                        ; 1 > NEGATIVO

#define PWM4_SINAL FLAGS,6    ; 0 > POSITIVO
                        ; 1 > NEGATIVO

```

```

;*****
;***** NOMENCLATURA DAS ENTRADAS *****
;*****
; Definição de todos os pinos que estão sendo utilizados como entradas

;----- PORTA -----

#define VBAT1 PORTA,0 ; [DIG] Frequencia referente a tensao da
BATERIA(1)
#define VBAT2 PORTA,1 ; [DIG] Frequencia referente a tensao da
BATERIA(2)
#define TEMP1 PORTA,2 ; [ANL] Tensao referente a temperatura
interna do Nautilus
#define TEMP2 PORTA,3 ; [ANL] Tensao referente a temperatura
externa ao Nautilus

;----- PORTC -----

#define RX PORTC,7 ; [DIG] RECEPCAO SERIAL

;*****
;***** NOMENCLATURA DAS SAÍDAS *****
;*****
; Definição de todos os pinos que estão sendo utilizados como saídas

;----- PORTA -----

#define HEART PORTA,4 ; [DIG] HEART beat
#define TWEETERS PORTA,5 ; [DIG] Habilidade para bipar os tweeters

;----- PORTB -----

#define MPS1_1A PORTB,0 ; [DIG] Entrada da primeira bobina do motor
de passo(1)
#define MPS1_1B PORTB,1 ; [DIG] Saida da primeira bobina do motor de
passo(1)
#define MPS1_2A PORTB,2 ; [DIG] Entrada da segunda bobina do motor de
passo(1)
#define MPS1_2B PORTB,3 ; [DIG] Saida da segunda bobina do motor de
passo(1)
#define MPS2_1A PORTB,4 ; [DIG] Entrada da primeira bobina do motor
de passo(2)
#define MPS2_1B PORTB,5 ; [DIG] Saida da primeira bobina do motor de
passo(2)
#define MPS2_2A PORTB,6 ; [DIG] Entrada da segunda bobina do motor de
passo(2)
#define MPS2_2B PORTB,7 ; [DIG] Saida da segunda bobina do motor de
passo(2)

```

```

;----- PORTC -----
;----- PORTC -----

#DEFINE      MDC1_1A  PORTC,0          ; [DIG] Entrada da bobina do motor DC(1)
#DEFINE      MDC1_1B  PORTC,1          ; [DIG] Saida da bobina do motor DC(1)
#DEFINE      MDC2_1A  PORTC,2          ; [DIG] Entrada da bobina do motor DC(2)
#DEFINE      MDC2_1B  PORTC,3          ; [DIG] Saida da bobina do motor DC(2)
#DEFINE      MDC3_1A  PORTC,4          ; [DIG] Entrada da bobina do motor DC(3)
#DEFINE      MDC3_1B  PORTC,5          ; [DIG] Saida da bobina do motor DC(3)
#DEFINE      TX        PORTC,6          ; [DIG] TRANSMISSAO SERIAL

;----- PORTD -----
;----- PORTD -----

#DEFINE      MDC4_1A  PORTD,0          ; [DIG] Entrada da bobina do motor DC(4)
#DEFINE      MDC4_1B  PORTD,1          ; [DIG] Saida da bobina do motor DC(4)
#DEFINE      HABF      PORTD,2          ; [DIG] Habilidade das fontes (Rele)

;***** PINOS DISPONÍVEIS *****
;***** PINOS DISPONÍVEIS *****
;***** PINOS DISPONÍVEIS *****
; Definição de todos os pinos disponiveis.

;      PORTD <3-7>
;      PORTE <0-2>

;***** VETOR DE RESET *****
;***** VETOR DE RESET *****
;***** VETOR DE RESET *****

      ORG 0X00
      GOTO MAIN

;***** VETOR DAS IRQs *****
;***** VETOR DAS IRQs *****
;***** VETOR DAS IRQs *****

      ORG 0X04

;----- SALVA CONTEXTO -----
;----- SALVA CONTEXTO -----

      MOVWF WORK_TEMP          ; Copia W para o registrador WORK_TEMP
      SWAPF STATUS,W           ; Prepara o STATUS para ser salvo em STATUS_TEMP
      CLRF STATUS              ; Seta BANK0
      MOVWF STATUS_TEMP        ; Salva STATUS no registrador STATUS_TEMP

;-----
;-----

      BTFSC  PIR1,RCIF          ; Ocorreu IRQ por recepcao SERIAL?
      GOTO   INT_RX             ; SIM.
                                ; NAO.

```

```

    BTFSC  INTCON,T0IF      ; Ocorreu IRQ por estouro do Timer0?
    GOTO   INT_TIMER0      ; SIM.
                                ; NAO.
;    BTFSC  PIR1,TXIF      ; Ocorreu IRQ por transmissao SERIAL?
;    GOTO   INT_TX         ; SIM.
                                ; NAO.
    GOTO   SAI_IRQS        ; Abandona as IRQs...

;-----

;////////////////////////////////////
;///// RECEPCAO SERIAL //////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////
INT_RX
    MOVF   RCREG,W
    MOVWF  RXREG
    MOVLW  COMANDO_RX
    MOVWF  FSR
    CLRF   CAUX
PILHA
    MOVF   INDF,W
    DECF   FSR,F
    MOVWF  INDF
    INCF   FSR,F
    INCF   FSR,F
    INCF   CAUX,F
    MOVF   CAUX,W
    XORLW  .12
    BTFSS  STATUS,Z        ; Pilha rotacionada?
    GOTO   PILHA           ; NAO.
                                ; SIM.
    MOVF   INICIO_RX,W
    XORLW  SOH
    BTFSS  STATUS,Z        ; Confere INICIO de pacote?
    GOTO   SAI_INT_RX      ; NAO.
                                ; SIM. Continua validando pacote...
    MOVF   FIM_RX,W
    XORLW  EOF
    BTFSS  STATUS,Z        ; Confere FIM de pacote?
    GOTO   SAI_INT_RX      ; NAO.
                                ; SIM. Continua validando pacote...
    MOVF   COMANDO_RX,W
    ADDWF  SMOTOR_DC,W
    ADDWF  SMOTOR_PASSO,W
    ADDWF  MDC1,W
    ADDWF  MDC2,W
    ADDWF  MDC3,W
    ADDWF  MDC4,W
    ADDWF  MPASSO1,W

```

```

        ADDWF    MPASSO2,W
        XORWF    CHECKSUM_RX,W
        BTFSS    STATUS,Z          ; Confere CHECKSUM dados transmitidos?
        GOTO     SAI_INT_RX        ; NAO.
                                   ; SIM.

        BSF      PACK_RX_OK        ; Seta flag de pacote aguardando tratamento!

SAI_INT_RX
        GOTO     SAI_IRQS          ; Finaliza o tratamento das IRQs.

;-----

;////////////////////////////////////
;///// TIMER0 //////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////
; Timer0 programado para 100us.
;////////////////////////////////////
INT_TIMER0

        MOVLW    .13               ; Obs: QUALQUER MODIFICACAO, ALTERAR
        MOVWF    TMR0              ; ESTE VALOR!!!
        BCF      INTCON,T0IF

        BTFSS    HABDELAY
        GOTO     SAITMR0
        MOVLW    .100
        XORWF    DELAY1,W
        BTFSS    STATUS,Z
        INCF     DELAY1,F
        BTFSS    STATUS,Z
        GOTO     SAITMR0
        BCF      TWEETERS
        BCF      HABDELAY
        CLRF     DELAY1
SAITMR0

;=====
; TRATAMENTO DOS PWMs
; PWM de 25 passos, para Freq=400Hz.

        INCF     STEP,F            ; Incrementa o contador de passos dos PWMs

;-----

TRATA_PWM1

        MOVF     PWM1,F
        BTFSC    STATUS,Z          ; PWM1=0?
        GOTO     ZERA_PWM1        ; SIM.

```

```

                                ; NAO.

    MOVF    PWM1,W
    SUBWF   STEP,W              ; W = STEP-PWM1
    BTFSS   STATUS,C            ; STEP >= PWM1?
    GOTO    ZERA_PWM1           ; SIM.
                                ; NAO.

    BTFSS   PWM1_SINAL          ; SETPOINT POSITIVO?
    GOTO    PWM1_P              ; SIM.
                                ; NAO.

PWM1_N
    BCF     PORTC,0
    BSF     PORTC,1
    GOTO    TRATA_PWM2

PWM1_P
    BSF     PORTC,0
    BCF     PORTC,1
    GOTO    TRATA_PWM2

ZERA_PWM1
    BCF     PORTC,0
    BCF     PORTC,1

;-----

TRATA_PWM2

    ; ...
    ; ...
    ; ...

;-----

FIM_PWM
    MOVLW   NPWM_STEPS
    XORWF   STEP,W
    BTFSC   STATUS,Z            ; STEP=25?
    CLRF    STEP                ; SIM.
                                ; NAO.

;=====

    INCF    CHEARTL,F
    BTFSC   STATUS,Z            ; Estourou?
    INCF    CHEARTH,F          ; SIM.
                                ; NAO.

    MOVLW   0x13
    XORWF   CHEARTH,W
    BTFSS   STATUS,Z            ; .19?
    GOTO    SAI_INT_TMR0        ; NAO.

```

```

; SIM.

MOVLW    0X88
XORWF    CHEARTL,W
BTFSS    STATUS,Z      ; .136?
GOTO     SAI_INT_TMR0   ; NAO.

; SIM. (5.000 * 100us = 500ms)

MOVLW    B'00010000'
XORWF    PORTA,F        ; Inverte o estado do LED:2Hz

CLRF     CHEARTH
CLRF     CHEARTL        ; Reinicia os contadores

SAI_INT_TMR0

GOTO     SAI_IRQS

;-----

;//////////////////////////////////////
;///// TRANSMISSAO SERIAL ////////////////////////////////////////
;//////////////////////////////////////

;INT_TX
;    MOVF    POINTER_TX,W
;    XORLW    (FIM_TX+1)
;    BTFSC    STATUS,Z      ; Finalizou a transmissao do pacote?
;    GOTO     FINALIZA_TX   ; SIM.
;                                ; NAO.
;    MOVF    POINTER_TX,W
;    MOVWF    FSR
;    MOVF    INDF,W
;    MOVWF    TXREG
;    INCF     POINTER_TX,F   ;
;    GOTO     SAI_INT_TX
;
;FINALIZA_TX
;
;    BANK1
;    BCF      TXSTA,BRGH     ; Baixa velocidade de transmissao.
;    ;
;    ;                      ; Seta taxa de transmissao/Recepcao: 4800 Bps
;    BCF      TXSTA,TXEN     ; Desabilita a transmissao serial.
;    BCF      PIE1,TXIE      ; Desabilita IRQ por transmissao serial.
;    BANK0
;
;
;    BSF      TWEETERS
;    BSF      HABDELAY
;
;SAI_INT_TX
;
;    GOTO     SAI_IRQS

```

```

;-----

SAI_IRQS

;----- RECUPERA CONTEXTO -----

        SWAPF STATUS_TEMP,W    ; Swap STATUS_TEMP register into W (sets bank to
original state)
        MOVWF STATUS           ; Move W into STATUS register
        SWAPF WORK_TEMP,F      ; Swap W_TEMP
        SWAPF WORK_TEMP,W      ; Swap W_TEMP into W

;-----

        RETFIE

;*****

;*****
;***** DECLARACAO DAS ROTINAS *****
;*****
;
;
;

;*****
;***** CONFIGURACAO & INICIALIZACAO *****
;*****

;*****
;***** CONFIGURACAO & INICIALIZACAO *****
;*****

MAIN

        BANK1

        MOVLW    0X04           ;0X02
        MOVWF    ADCON1        ; Configura [RA0:RA5] analogicos
        MOVLW    B'11001111'
        MOVWF    TRISA         ; Configura RA4 E RA5 como saida

        MOVLW    0XFF           ; (FF):1111 1111 --> W
        MOVWF    TRISB         ; Configura PORTB como entrada

        MOVLW    B'11000000'

```



```

MOVWF TRISC          ; Configura PORTC PIN1,2 como SAIDA

MOVLW B'11111000'    ; Configura Saida no pino RD2:HABF
MOVWF TRISD          ; Configura PORTD como entrada

MOVLW 0X07
MOVWF TRISE          ; Configura PORTE como entrada

MOVLW B'11000000'
MOVWF OPTION_REG     ; Pull-ups desabilitados
                      ; Timer0 [1:2]; Bordo de subida

MOVLW B'01100000'    ;-> anterior, com timer0
MOVWF INTCON         ; IRQ por timer0
                      ; IRQ de perifericos

MOVLW B'01100000'
MOVWF PIE1           ; IRQ de recepcao serial
                      ; IRQ de transmissao serial (stand by)

MOVLW B'00100010'
MOVWF TXSTA          ; Desabilita TX, LOW SPEED

MOVLW .63
MOVWF SPBRG          ; BAUD RATE 4800 Bps

BANK0

MOVLW B'10010000'
MOVWF RCSTA          ; Habilita o modulo serial
                      ; 8 bits, recepcao continua

CLRF PORTA
CLRF PORTB
CLRF PORTC
CLRF PORTD
CLRF PORTE

CLRF FLAGS           ; Flags de controle...
CLRF FLAGS2          ;
CLRF FLAGS3          ;

CLRF STEP            ; Contador principal para os passos do PWM.
CLRF PWM1            ; SETPOINT M1
CLRF PWM2            ; SETPOINT M2
CLRF PWM3            ; SETPOINT M3
CLRF PWM4            ; SETPOINT M4

MOVLW .214           ;
MOVWF TMR0           ; Inicializa o TMR0

```

```

        MOVLW    SOH
        MOVWF    INICIO_TX

        MOVLW    EOF
        MOVWF    FIM_TX

        MOVLW    LETRA
        MOVWF    COMANDO_TX

        CLRF     CHEARTL
        CLRF     CHEARTH

        BSF      INTCON,GIE      ; Habilita as IRQs

;*****
;***** PROGRAMA PRINCIPAL *****
;*****
PRINCIPAL

;-----
; TRATAMENTO DA TRANSMISSAO DE DADOS
;-----

TRATA_TX
        BTFSS   PACK_TX_OK      ; TRANSMISSAO Autorizada?
        GOTO    TRATA_RX        ; NAO.
                                   ; SIM.

        MOVF    INICIO_TX,W     ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

        MOVF    COMANDO_TX,W    ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
;        CLRF    COMANDO_TX
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

        MOVF    TEMP1_TX,W      ;
        MOVWF   TXREG
        NOP
        BTFSS   PIR1,TXIF
        GOTO    $-1

        MOVF    TEMP2_TX,W      ;
        MOVWF   TXREG
        NOP

```

```

    BTFSS    PIR1,TXIF
    GOTO     $-1

    MOVF     VBAT1_TX,W      ;
    MOVWF    TXREG
    NOP
    BTFSS    PIR1,TXIF
    GOTO     $-1

    MOVF     VBAT2_TX,W      ;
    MOVWF    TXREG
    NOP
    BTFSS    PIR1,TXIF
    GOTO     $-1

    MOVF     COMANDO_TX,W
    ADDWF    TEMP1_TX,W
    ADDWF    TEMP2_TX,W
    ADDWF    VBAT1_TX,W
    ADDWF    VBAT2_TX,W
    MOVWF    CHECKSUM_TX     ; Preparacao do CHECKSUM_TX
    MOVF     CHECKSUM_TX,W   ;
    MOVWF    TXREG
    NOP
    BTFSS    PIR1,TXIF
    GOTO     $-1

    MOVF     FIM_TX,W        ;
    MOVWF    TXREG
    NOP
    BTFSS    PIR1,TXIF
    GOTO     $-1

    BSF      TWEETERS
    BSF      HABDELAY

    BCF      PACK_TX_OK      ; Reseta flag...

;-----
; TRATAMENTO DA RECEPCAO DE DADOS
;-----
TRATA_RX
    BTFSS    PACK_RX_OK      ; Tratamento de pacote valido?
    GOTO     PRINCIPAL       ; NAO.
                                ; SIM.

    ; SMOTOR_DC ;
    ; SMOTOR_PASSO ;
    ; MDC1 ;

```

```
    ; MDC2 ;
    ; MDC3 ;
    ; MDC4 ;
    ; MPASSO1 ;
    ; MPASSO2 ;

    MOVF MDC1,W
    MOVWF PWM1

    BCF PACK_RX_OK
    BSF PACK_TX_OK

;-----

;*****
;***** FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL *****
;*****

    GOTO    PRINCIPAL

    END
```

* * * * *

APÊNDICE E: Circuitos, Diagramas Elétricos, Magnéticos e De/Para

ENG-NAV-004: TRAFO TR-1 Módulo de Controle embarcado, folha 1/1;

ENG-NAV-006: Módulos de Controle, folha 1 a 6/6;

ENG-NAV-007: Diagrama da placa de Interligação, folha 1/1;

ENG-NAV-009: Diagrama de Interligação das placas, folha 1 a 9/9;

ENG-NAV-010: Circuito Final Sensores do Tanque, folha 1/1;

APÊNDICE F: Fotografias do sistema

Foto 1: Vista Geral do laboratório onde foram realizados os ensaios.

Foto 2: Vista do tanque de provas utilizado no desenvolvimento do sistema sensor.

Foto 3: Módulo de Controle e Gerenciamento (Embarcação).

Foto 4: Módulo de Distribuição de Energia.

Foto 5: Módulo de Potência para Motores de Passo.

Foto 6: Módulo de Potência para Motores DC.

Foto 7: Módulo de Controle e Gerenciamento (Base).

Foto 8: Lay-out da montagem do Módulo de Controle da Base.

Foto 9: Detalhe construtivo da Placa de Controle da Base.

Foto 10: Módulo de Sensor Receptor.

Foto 11: Lay-out da montagem do Módulo Sensor Receptor.

Foto 12: Detalhe construtivo da Placa de filtros do Módulo sensor.

Foto 13: A – Detalhe do atuador DC do truster da popa; B – Detalhe do atuador DC do truster da proa; C – Vista geral da embarcação; D – Vista lateral da embarcação; E – Vista da hélice principal e leme; F – Detalhe lateral do truster.

Foto 14: Detalhe construtivo do chicote de distribuição de energia.

Foto 15: Detalhe dos chicotes de interligação entre os módulos.

Foto 16: Módulo de Transmissão Ultra-sônico (Antena de 40kHz).

Foto 17: Módulo de Transmissão Ultra-sônico (Antena de 25kHz).

Foto 18: Detalhe da instalação dos sensores receptores no teto.

Foto 19: Vista inferior do arranjo de Sensores.

APÊNDICE G: Datasheets

DATASHEETS DOS COMPONENTES MAIS IMPORTANTES

Site da MICROCHIP Technology Incorporated:

www.microchip.com

- Microcontroller PIC16F877.

Site da FAIRCHILD Semiconductor Corporation:

www.fairchildsemi.com

- Phototransistor Output Optocoupler 4N25;
- NPN Epitaxial Silicon Transistor BC337;
- PNP Epitaxial Silicon Transistor BC328;
- NPN Epitaxial Silicon Transistor BC548;
- Dual J-K Master/Slave Flip-Flop with Set and Reset CD4027BC;
- Micropower Phase-Locked Loop CD4046BC;
- Quad Analog Switch CD4066BC;
- NPN Epitaxial Darlington Transistor TIP122;
- PNP Epitaxial Darlington Transistor TIP127.

Site da NATIONAL Semiconductor Corporation:

www.national.com

- Precision Voltage-to-Frequency Converter LM331;
- Timer LM555;
- Tone Decoder LM567;
- 3-Terminal Positive Voltage Regulators LM78M12;
- Precision Centigrade Temperature Sensor LM35.

Site da INTERNATIONAL RECTIFIER Technology Incorporated:

www.irf.com

- Self-Oscillating Half-Bridge Driver IR2153;
- HEXFET Power MOSFET IRF840.

Site da INTERNATIONAL RECTIFIER Corporation:

www.irf.com

- Self-Oscillating Half-Bridge Driver IR2153;
- HEXFET Power MOSFET IRF840.

Site da ST Microelectronics Group:

www.st.com

- 10W Car Radio Audio Amplifier TDA 2003.

Site da WENSHING Eletronics Co., LTD:

www.wenshing.com.tw

- Receiver RF Module RWS 433 e 315MHz;
- Transmitter RF Module TWS 433 e 315MHZ.