



Universidade Federal da Bahia
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica
Departamento de Ciências da Computação do Instituto de Matemática
Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

Luiz Carlos Simões Soares Júnior

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA NAVEGAÇÃO E TELEMETRIA DE UM ROV ATUANDO EM ÁGUAS RASAS

Salvador
2008

Luiz Carlos Simões Soares Júnior

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA NAVEGAÇÃO E TELEMETRIA DE UM ROV ATUANDO EM ÁGUAS RASAS

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica, programa conjunto entre o Departamento de Engenharia Mecânica e o Departamento de Ciência da Computação, da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. *Iuri Muniz Pepe*

Salvador
2008

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ CARLOS SIMÕES SOARES JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA NAVEGAÇÃO E TELEMETRIA DE UM ROV ATUANDO EM ÁGUAS RASAS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Iuri Muniz Pepe - Orientador

Doutor em Física Nuclear, Université Catholique de Louvain, U.C.L., Bélgica.
Universidade Federal da Bahia

Herman Pessoa Lima Júnior

Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil.
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

Herman Augusto Lepikson

Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil.
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 17 de dezembro de 2008.

*Dedico a minha avó, meu pai, meus tios e meus amigos,
que sempre acreditaram no meu sucesso.*

AGRADECIMENTOS

"O crescimento intelectual deveria começar no nascimento e terminar somente na morte."

—ALBERT EINSTEIN

RESUMO

O ROV, Veículo Operado Remotamente, é um robô subaquático que permite ao operador permanecer em um ambiente seguro enquanto este veículo efetua uma tarefa perigosa. Aplicações para os ROVs incluem resgate, manutenção e construção de estrutura submarinas, manutenção de plantas nucleares, medidas de poluição da água e observação. Para facilitar a navegação com estes veículos são necessários dados que forneçam informações sobre o posicionamento e o estado do veículo.

Esta dissertação descreve o desenvolvimento de um sistema eletrônico de sensoriamento para navegação de ROV atuando em águas rasas, até 30 metros. São consideradas várias estratégias, técnicas e teorias envolvendo o projeto, o desenvolvimento, a montagem e os testes de circuitos eletrônicos, da calibração de sensores, dos protocolos de comunicação e linhas de transmissão para robôs submersíveis.

O sistema de sensoriamento é composto por sensores que informam: perfis em três dimensões do campo magnético terrestre (bússola), aceleração, velocidade, posição do veículo, medida da profundidade, visão colorida em duas dimensões e o estado de carga da bateria de bordo. A combinação destes dados fornece ao operador informações sobre o estado do veículo, o que possibilita uma navegação segura e eficiente. Para a leitura dos sinais dos sensores e transmissão destes dados à central de controle foi desenvolvido um sistema embarcado baseado em um microcontrolador PIC.

Toda a eletrônica desenvolvida neste trabalho foi projetada de forma modular, de modo que os diversos elementos desenvolvidos possam ser reaproveitados em outros trabalhos. Como resultados mais relevantes podemos destacar: a unidade de medida de aceleração que mostrou-se sensível para estímulos da ordem de 0,03 g, a bússola eletrônica que apresentou um erro máximo de 9° para as medidas de ângulo e o profundímetro que apresentou uma resolução de 0,04 m. Estes resultados são extremamente

alentadores e mostram que, com a continuidade e a consolidação das pesquisas em robótica móvel no Laboratório de Propriedades Ópticas (LaPO), melhores resultados podem ser obtidos em um futuro próximo. .

Palavras-chaves: ROV, Robótica Teleoperada, Aquisição de Dados em Tempo-Real, Sistema de Navegação, Sensores, Instrumentação.

ABSTRACT

The ROV, Remotely Operated Vehicle, is an underwater robot that allows the operator to remain in a safe environment, while the vehicle performs a dangerous task. Applications for the ROVs include rescue, maintenance and construction of underwater structure, maintenance of nuclear plants, measurements of water pollution and observation. For an easier navigation with these vehicles are needed data which can provide position and status of the vehicle.

This paper describes the development of an electronic sensing system for low-cost ROV operating in shallow waters, up to thirty meters. Several strategies, techniques and theories involving the design, development, assembly and testing of electronic circuits, the calibration of sensors, the communication protocols and transmission lines for submersible robots were taken into consideration.

This sensing system is composed of several sensors: three-dimensional profile of the Earth magnetic field (compass), acceleration, speed and position of the vehicle, depth measurement, two-dimensional color vision and onboard battery state of charge. The fusion of these data provides to the operator the vehicle's condition, which enables a safe and efficient navigation. In order to acquire the sensor signal and perform data transmission to central control station, an embedded system based on a PIC microcontroller was developed.

All the electronics developed in this study was designed in a modular way, so that the various designed elements can be reused in other studies. It is of utmost importance to highlight these results: the acceleration measurement unit proved to be sensitive to stimulus in the order of 0.03 g, the electronic compass has a maximum error in the angle measurement of 9° and the depth measurement unit showed a resolution of 0.04 m. These results are extremely overwhelming and should foresee, in a very short period,

that the consolidation of the mobile robotic research in Optical Properties Laboratory (LaPO) will provide additional results to be investigated.

Keywords: ROV, Remotely Operated Robots, Real-Time Data Acquisition, Navigation System, Sensors, Instrumentation.

SUMÁRIO

Capítulo 1—Introdução	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Organização do Trabalho	6
Capítulo 2—Robótica Submarina Não Tripulada	8
2.1 O Veículo Teleoperado (ROV)	8
2.2 O veículo autônomo (AUV)	9
2.3 Veículos Híbridos	10
Capítulo 3—Embasamento Teórico	11
3.1 Fatores que afetam um ROV	11
3.1.1 Visibilidade	11
3.1.2 Leis Físicas	12
3.1.2.1 Empuxo e Flutuação -	13
3.1.2.2 Estabilidade -	13
3.1.2.3 Pressão Hidrostática -	14
Capítulo 4—Estrutura do Projeto	16
4.1 Projeto do Sistema de Sensoriamento do ROV	16
4.2 Projeto Eletrônico Embarcado	17
4.3 Unidade Embarcada de Controle	18
4.4 Comunicação	22
4.4.1 Diferentes formas de comunicação em ROVs	23
4.4.2 Barramento RS-485	24

4.4.3	Protocolo MODBUS	32
4.4.4	Checagem de CRC	35
4.5	Circuito de conversão RS-232 - RS-485	39
Capítulo 5—Sistema de Sensoriamento		41
5.1	Sensor de Profundidade	41
5.1.1	O sensor MPXH6400A	42
5.1.2	O Circuito Desenvolvido	43
5.2	Sensor de Aceleração	45
5.2.1	Circuito de condicionamento de Sinal	46
5.3	Bússola Eletrônica	47
5.3.1	Os sensores HMC1022 e HMC1001	48
5.3.2	Circuito de condicionamento de Sinal	49
5.4	Sistema de Controle de Energia	52
5.4.1	Bateria	53
5.4.2	Conversor DC/DC	54
5.4.3	Monitoramento de Carga da Bateria	54
5.5	Controlador dos Motores	55
5.5.1	Placa de controle Ponte H	55
5.6	Atuadores	57
5.7	Estrutura Mecânica	58
5.8	Câmera de Vídeo	60
Capítulo 6—Calibração, Testes e Medidas		62
6.1	Linha de transmissão	62
6.2	Medida do Tempo de Propagação e Resistência de Terminação	63
6.3	Sensor de Profundidade	67
6.4	Sensor de Aceleração	71
6.5	Bússola Eletrônica	75
6.6	Sistema de medida de carga da bateria	80

6.6.1	Avaliação da Cápsula Estanque	81
6.7	Avaliação do Arranjo Mecânico	82
Capítulo 7—Conclusões		85
7.1	Contribuições deste trabalho	85
7.2	Desfechos desse trabalho	86
7.2.1	Sistema eletrônico de comando do ROV	86
7.2.2	Conjunto de Sensores	86
7.3	Recomendações para trabalhos futuros	87
7.3.1	Sistema eletrônico	88
7.3.2	Conjunto de Sensores	88
7.3.3	Sistema de Comunicação	89
7.3.4	Sistema Mecânico	89
7.3.5	Sistema de Propulsão	89
7.4	Considerações Finais	90
Apêndice A—Aritmética Polinomial Sobre Campos Finitos		93
A.1	Campos Finitos em Z_2	96
Apêndice B—Esquemas Eletrônicos Desenvolvidos		98
Apêndice C—Código desenvolvido para o Sistema Embarcado		105

LISTA DE TABELAS

3.1	Relação entre pressão e altura de coluna d'água.	15
4.1	Características do Barramento RS-485.	26
4.2	Organização de endereços no protocolo MODBUS.	33
4.3	Exemplos de Polinômios de CRC (KOOPMAN, 2002).	36
4.4	Teclas de Atalho	40
6.1	Dados para a calibração do sensor de pressão.	69
6.2	Valores Médios de Calibração dos Acelerômetros.	72
6.3	Medidas de Validação do Sensor de Campo Magnético.	79

LISTA DE FIGURAS

1.1	Estrutura de um ROV e seus sub-sistemas.	5
2.1	O ROV VICTOR.	9
2.2	ABE (Autonomous Benthic Explorer) sendo resgatado apos mapeamento de fluxo de calor em Juan de Fuca Ridge.	10
3.1	Espectro de absorção de Luz pela água. (CHAPLIN, 2008)	12
3.2	Forças atuando sobre um corpo em equilíbrio (Esquerda) e fora do equilíbrio (Direita)	14
4.1	Diagrama Geral do Projeto	17
4.2	Diagrama do Sistema Eletrônico Embarcado	18
4.3	Sistema Eletrônico Embarcado	22
4.4	Rede RS-485 típica com duas linhas	25
4.5	Taxa de transferência versus comprimento do cabo numa linha RS-485	27
4.6	Configuração diferencial sem terminação	28
4.7	Configuração diferencial com terminação para múltiplos pontos	29
4.8	Configuração diferencial com Terminação CA	30
4.9	Diagrama de uma rede RS485 com terminação e proteção contra falhas de linha aberta	31
4.10	Diagrama tipo de uma rede RS-485, terminação com proteção contra falhas de linha aberta/fechada	31
4.11	Rede RS-485 utilizando malha de terra.	32
4.12	Janela de Comunicação do protocolo MODBUS.	34
4.13	Organização dos bits de uma palavra MODBUS RTU.	34
4.14	Fluxograma do algoritmo para cálculo do CRC-16.	37
4.15	Interface de controle.	39

5.1	Sensor de Pressão MPXH6400A	42
5.2	Diagrama Interno do Sensor MPXH6400A	43
5.3	Circuito do Sensor de pressão MPXH6400	44
5.4	Placa de condicionamento de sinal do sensor de aceleração 3d.	46
5.5	Circuito de condicionamento para o acelerômetro.	47
5.6	Magnetização após pulso de SET e RESET.	49
5.7	Circuito para pulso de SET e RESET.	50
5.8	Circuito de condicionamento de sinal HMC1022/HMC1001.	50
5.9	Placa de condicionamento de sinal da bússola eletrônica 3d.	52
5.10	Circuito de condicionamento do sinal de alimentação.	54
5.11	Modo de operação de uma ponte-H a) Parado b) Movimento Direto c) Movimento Reverso	56
5.12	Bomba de porão RULE de 1100 GPH.	58
5.13	Modelo proposto para a turbina.	58
5.14	Cápsula estanque.	59
5.15	Estrutura do ROV.	60
5.16	Minicamera CCD da Multitoc.	61
6.1	Montagem inicial para medida do atraso da linha de transmissão.	63
6.2	Diagrama do Circuito gerador de Pulsos.	64
6.3	Montagem final para medida do atraso da linha de transmissão.	65
6.4	Pulso na linha de transmissão sem resistor de terminação.	65
6.5	Pulso na linha de transmissão com resistor de terminação.	66
6.6	Comparação entre o sinal transmitido pelo cabo curto e a linha de trans- missão com terminação.	67
6.7	Gráfico da medida de calibração do sensor de pressão.	70
6.8	Posições de medida para calibração do acelerômetro.	72
6.9	Ajuste linear dos pontos para o eixo X.	73
6.10	Ajuste linear dos pontos para o eixo Y.	73
6.11	Ajuste linear dos pontos para o eixo Z.	74
6.12	Teste da Unidade de Medida de Aceleração.	75

6.13	Círculo utilizado para calibração da bússola eletrônica.	76
6.14	Gráfico de Calibração da Bússola Eletrônica.	77
6.15	Gráfico de Calibração da Bússola Eletrônica, com dados ajustados. . .	78
6.16	Teste da Bússola Eletrônica	80
6.17	Curva de Descarga da Bateria.	81
6.18	Avaliação da cápsula estanque.	82
6.19	Unidade eletrônica de sensoriamento para o ROV	83
6.20	Cápsulas para acomodação das partes eletrônicas	83
6.21	Montagem final do ROV.	84
B.1	Diagrama do Circuito para o Acelerômetro	99
B.2	Diagrama do Circuito para a Bússola	100
B.3	Diagrama do Circuito para o Fonte	101
B.4	Diagrama do Circuito para o Motor	102
B.5	Diagrama do Circuito para o Sistema Embarcado	103
B.6	Diagrama do Circuito de Conversão RS-232 para RS-485	104

LISTA DE ABREVIATURAS

ABE	Autonomous Benthic Explorer
ADC	Analog to Digital Converter
ADU	Application Data Unit
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CCD	Charge-Coupled Device
CE	Centro de Empuxo
CG	Centro de Gravidade
CI	Circuito Integrado
CRC	Cyclical Redundancy Checking
DIP	Dual In-line Package
E/S	Entrada/Saída
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
EG	Altura Metacêntrica
FR	Força Resultante
GPH	Galões Por Hora
LPH	Litros Por Hora
LRC	Longitudinal Redundancy Checking
mca	Metros de Coluna d'Água
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NTSC	National Television System Committee
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PIC	Programmable Intelligent Computer
PUV	Programmed Underwater Vehicle
PVC	Poli Cloreto de Vinila
PWM	Pulse-Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RC	Resistor-Capacitor
RISC	Reduced Instruction set Controller
ROV	Remotely Operated vehicle (Veículo Operado Remotamente)
TTL	Transistor-Transistor Logic
UFBA	Universidade Federal da Bahia
VLSI	Very Large Scale Integration

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade da Água
v	Velocidade de Propagação no Material
Ah	Ampère-Hora
g	Gravidade
h	Altura da Coluna d'Água
ns	Nano-Segundo
P	Pressão
P_o	Pressão Superficial
XOR	Operação Lógica de OU Exclusivo

INTRODUÇÃO

A era espacial foi o estopim para um grande esforço internacional na exploração do oceano (BOHM; JENSEN, 2005), isso ocorreu em meados século XX. As mesmas empresas aéreas que lançavam foguetes começaram a olhar para o mar, ou melhor, para as profundezas dele. Os Estados Unidos embarcaram num programa de desenvolvimento de uma “segunda” NASA, para explorar as profundezas marinhas. Outros países também seguiram esta tendência. Rapidamente os engenheiros descobriram que construir máquinas para explorar esta nova fronteira na Terra era tão desafiante tecnologicamente quanto a construção de astronaves. Tecnologias aeroespaciais de transmissão de dados e controle remoto dos foguetes foram adaptadas para tarefas subaquáticas e usadas numa nova classe de veículos, os ROVs. Estes funcionam essencialmente como um satélite espacial, mas aplicados às profundezas. O ROV (*Remotely Operated Vehicle*), Veículo Operado Remotamente, é um robô subaquático que permite ao operador permanecer em um ambiente seguro, enquanto o veículo remoto trabalha em uma tarefa perigosa.

O responsável pelo desenvolvimento do primeiro ROV é desconhecido. Porém, na história dos ROV existem dois projetos que merecem ser ressaltados. O PUV (*Programmed Underwater Vehicle*) que foi um torpedo desenvolvido pela Luppis-Whitehead Automobiles na Áustria em 1864, mas, o primeiro a possuir um cabo de comunicação, foi chamado POODLE e desenvolvido por Dimitri Rebikoff em 1953. Os ROVs ganharam fama quando um submersível como este foi utilizado para recuperar uma bomba atômica perdida em um acidente com uma aeronave em 1966, (MICHEL, 2008).

Nos últimos anos, o uso de robôs submersíveis operados remotamente tem crescido rapidamente, em especial impulsionado pelo desenvolvimento de veículos capazes de

trabalhar em água mais profundas e em áreas de risco, onde mergulhadores não podem explorar. Aplicações para os ROVs incluem resgate, manutenção e construção de estrutura submarinas, manutenção de plantas nucleares, medidas de poluição da água e observação.

A manutenção de plantas nucleares utilizando ROV já é comum nos EUA, França e Japão (YUH, 1995). Empresas como a Deep Ocean Engineering, RSI Research, etc já dispõem de veículos específicos para esta aplicação. ROVs em plantas nucleares representam uma ferramenta precisa para inspeção de áreas com altos níveis de radiação, auxiliando na vistoria dos reatores e manutenção das plantas nucleares.

ROVs também vêm sendo utilizados na observação de peixes bentônicos nas bacias de Northwind e do Canadá, no Oceano Ártico (STEIN; FELLE; VECCHIONE, 2005). As imagens adquiridas por estes submersíveis permitem uma avaliação da biodiversidade da região. O uso de ROVs constituiu uma ferramenta muito importante nesta análise, uma vez que estes peixes habitam águas profundas e sob uma camada de gelo. Estes submersíveis também estão sendo utilizados no monitoramento de peixes em tanques de criação, como é o caso de (FROST et al., 1996), onde um ROV é utilizado para monitorar o crescimento dos peixe. O uso desta ferramenta apresenta melhores resultado, quando comparado a mergulhadores, por estressar menos os peixes.

Para facilitar a navegação com estes veículos são necessários dados que forneçam informações sobre o posicionamento e estado do veículo (DROLET; MICHAUD; CITÈ,). Os sistemas de sensoriamento devem fornecer ao operador informações como posição linear, orientação e profundidade, facilitando um mergulho controlado.

Objetivando estimar ou medir a posição angular e linear de um veículo, soluções utilizando diversos sensores têm sido apresentadas. Algumas dessas soluções utilizam três acelerômetros, três giroscópios e também sensores magnéticos. Os dados destes sensores combinados podem fornecer informações precisas, no entanto, seu custo material (*hardware* elétrico, eletrônicos e diferentes componentes mecânicos), de montagem (integração entre sensores e montagem mecânica), além do custo de disponibilidade

de processamento de dados para a aquisição, tratamento e processamento de sinal é muito elevado (DJAMBAZIAN et al., 2006).

Além das informações de posição e orientação, outros dados físicos são de grande importância para o operador do veículo; o sistema de imagem, a medida da carga da bateria e a profundidade.

O sistema de geração de imagem é uma das facilidades instaladas mais importantes neste tipo de equipamento. Em geral, os ROV são equipados com pelo menos uma câmera de vídeo que fornece ao operador imagem do ambiente sub-aquático em tempo real. Já a informação do estado de carga da bateria permite ao operador planejar o tempo de intervenção com o ROV, evitando transtornos. Outro sensor importante é o profundímetro, apesar do fato que a partir dos dados do sensor de aceleração poder-se obter a profundidade, esta seria uma medida indireta deste parâmetro físico. Esta determinação dependeria então de um algoritmo de conversão, o que acarretaria um acúmulo de erros.

A indústria de ROV, apesar de pequena, traz um alto índice de valor agregado, além de ser uma das mais dinâmicas do mundo. Novos equipamentos estão sempre sendo lançados no mercado, e os ROVs continuam sempre encontrando novas aplicações (BOHM; JENSEN, 2005).

A robótica submarina sem dúvida constitui um campo de pesquisa repleto de desafios. O desenvolvimento de tecnologias nesta área pode contribuir não apenas diretamente, em pesquisas no campo da robótica submarina, mas servindo de ferramenta para pesquisas em diversas outras áreas.

No estado da Bahia, que possui 1.183 Km de litoral, o mais extenso do Brasil, a aplicação dos ROVs no monitoramento ambiental ou na inspeção de construções submersas constitui, sem dúvida, uma ferramenta potencial de contribuição para o desenvolvimento regional.

1.1 OBJETIVO

Os fatores apresentados acima foram decisivos na escolha do tema deste trabalho, que tem como objetivo global iniciar um novo campo de pesquisa, a robótica submarina na UFBA. Isto irá possibilitar o desenvolvimento de novas tecnologias nesta área e o desenvolvendo de ferramentas para áreas correlatas.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento um sistema de navegação e telemetria para um robô submersível operado remotamente. Este sistema é composto de dois grandes blocos. Um dos blocos fica embarcado no submersível e é responsável por efetuar fisicamente os comandos enviados ao ROV pelo operador, assim como enviar, ao operador e/ou ao bloco de comando (em seco), os dados referentes ao estado do equipamento e os sinais dos sensores. O outro bloco que o compõe é a interface homem-máquina, que envia os comandos do operador ao robô, mostra ao usuário os sinais dos diversos sensores, devidamente tratados, e exibe as imagens de uma câmera de vídeo embarcada.

Não foi o objetivo deste trabalho manipular uma grande quantidade de dados, o que acarretaria a necessidade de sistemas de processamento mais potentes e conseqüente aumento no custo do projeto. Como objetivos esperados para este trabalho tem-se:

- Desenvolvimento de uma plataforma embarcada para leitura dos sinais dos sensores, comunicação e controle dos motores.
- Desenvolvimento de uma interface homem-máquina para comunicação com o submersível.
- Implementação de um protocolo para comunicação com o submersível.
- Desenvolvimento de uma plataforma de sensoriamento utilizando:
 - Um sensor de pressão para medida de profundidade.
 - Uma triade de acelerômetros para cálculo de velocidade e posição.

1.1 OBJETIVO

- Uma triade de sensores magnéticos para medida de orientação (bússola 3D).
- Um sistema para monitoramento do estado de carga da bateria.

Estes conjuntos de elementos sensores, de processamento de dados e de atuadores, permitem o controle de um dispositivo de arranjo similar ao apresentado na Figura 1.1.

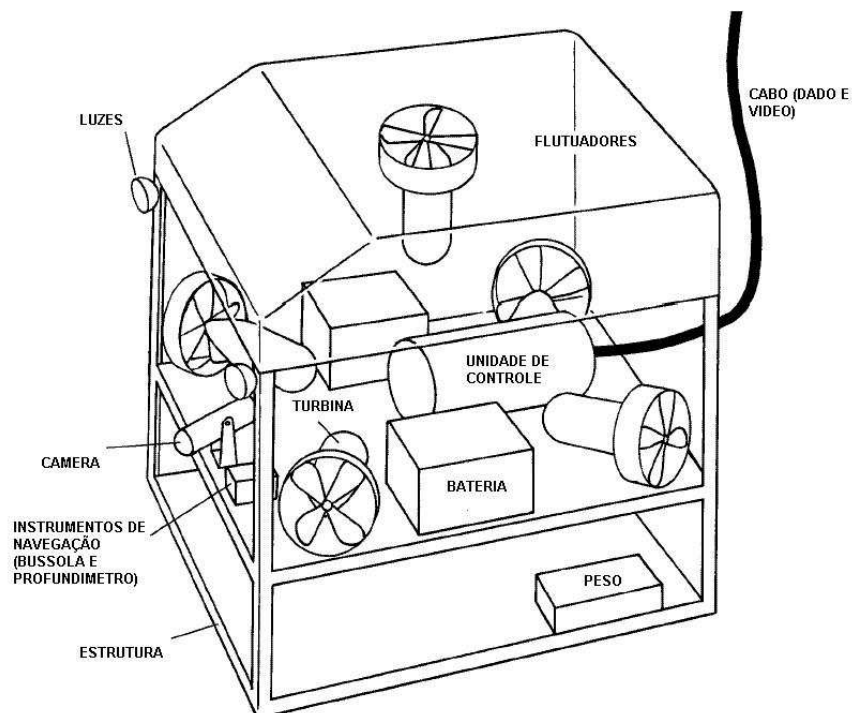


Figura 1.1. Estrutura de um ROV e seus sub-sistemas.

O sistema de aquisição de dados deve ser capaz de interfacear (condicionar e converter em código binário), processar e guardar em memória o sinal analógico de diversos sensores: bússola, aceleração e profundidade, podendo ainda serem adicionados sensores como o de presença de clorofila, medição de temperatura, determinação de pH, etc; desde que o sinal analógico do sensor esteja entre 0 e 5 volts. Estes sensores são de interesse, tanto para facilitar a navegação com o submersível, quanto para o monitoramento ambiental. O sistema de controle é capaz de controlar os motores responsáveis

pela propulsão do veículo e fazer a comunicação com a unidade central de controle, onde o operador se encontra.

Na solução aqui apresentada, o sinal dos sensores é digitalizado por uma interface com oito canais de conversores analógico/digital; com resolução de 10 bits; uma entrada/saída digital de 6 bits e uma saída com largura de pulso modulada (PWM) capaz de controlar até 6 motores. O sistema desenvolvido é composto por um microcontrolador da família PIC que pode se comunicar com um computador por portas seriais de dois tipos: RS-485 ou RS-232. O usuário interage e controla o sistema a partir de um computador portátil (PC), usando para tanto uma interface homem-máquina gráfica, que permite a visualização do sinal dos sensores e da câmera de vídeo, além de servir como central de comando remoto para o sistema de propulsão.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado em 7 capítulos, que cobrem a análise do problema, descrição do projeto desenvolvido, avaliação dos resultados, conclusões e perspectivas de futuros trabalhos.

No Capítulo 1, tem-se uma breve introdução do problema e a solução aqui proposta.

No Capítulo 2 são apresentadas as diversas categorias da robótica submarina não tripulada.

No Capítulo 3 - Embasamento Teórico - são discutidos parâmetros relevantes no projeto de um ROV, tratando de fatores que afetam o comportamento e a percepção no ambiente aquático.

O Capítulo 4, contém uma discussão detalhada dos diversos elementos desenvolvidos neste trabalho. É também detalhado neste capítulo o barramento de comunicação, o protocolo de comunicação e o sistema de alimentação.

No Capítulo 5 - Sistema de Sensoriamento - é feita uma discussão sobre as unidades

de sensoriamento desenvolvidas, bem como seus módulos de condicionamento de sinal.

No Capítulo 6 - Calibração, Testes e Medidas - são discutidos os métodos utilizados para comprovar o funcionamento das diferentes partes do sistema. Os testes de avaliação também foram estendidos ao cabo utilizado como linha transmissão.

No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões, as contribuições deste trabalho e recomendações a trabalhos futuros.

ROBÓTICA SUBMARINA NÃO TRIPULADA

Existem tipicamente dois tipos de robôs submarinos não tripulados, aqueles conectados à superfície através de um cabo (chamados Veículos Operados Remotamente ou ROVs) e aqueles que não possuem cabo (chamados de Veículo Autônomo Subaquático ou AUVs - *Autonomous Underwater Vehicle*) (BOHM; JENSEN, 2005).

2.1 O VEÍCULO TELEOPERADO (ROV)

Veículos operados Remotamente, ou ROVs (*Remotely Operated Vehicle*), são uma classe de robôs subaquáticos alimentados por corrente elétrica através de um cabo, ou umbilical, que conecta o veículo a fonte de energia. Os ROVs são diretamente controlados por um piloto que normalmente está em um navio ou na costa. É normalmente equipado com uma gama de sensores que fornecem ao piloto informações sobre o estado do veículo, além de uma ou mais câmeras de vídeos.

Este é o caso do ROV VICTOR (VICTOR, 2008), Figura 2.1, que foi utilizado na investigação dos corais profundos na região noroeste do Atlântico.

2.2 O VEÍCULO AUTÔNOMO (AUV)



Figura 2.1. O ROV VICTOR.

O piloto se comunica com o veículo pelo mesmo conjunto de cabos (umbilical) que transporta energia. Por este cabo são enviados energia elétrica e sinais de comando e recebidas informações sobre os sensores, atuadores e imagens das câmeras de vídeos.

2.2 O VEÍCULO AUTÔNOMO (AUV)

Os Veículos Autônomos Subaquáticos são o que existe de mais novo na área da robótica submarina. Eles carregam sua própria fonte de energia e não possuem nenhum tipo de conexão física com a superfície. Sensores embarcados conectados a um computador fornecem informações necessárias à sua navegação como profundidade, velocidade e tempo de viagem. Unidades de sonar permitem ao veículo desviar de obstáculos e criar um mapa do fundo, permitindo a localização de objetos. Uma câmera de vídeos captura imagens e as armazena. Ao final da missão as informações coletadas por este submersível são enviadas à estação, como é o caso do ABE (Autonomous Benthic Explorer), Figura 2.2.



Figura 2.2. ABE (Autonomous Benthic Explorer) sendo resgatado após mapeamento de fluxo de calor em Juan de Fuca Ridge.

Apesar do fato de que os AUVs são considerados o estado da arte, no que diz respeito aos veículos submersíveis, este tipo de veículo ainda apresenta algumas limitações. A quantidade de energia que este pode transportar ainda é limitada. Existem limitações tecnológicas na resolução, tanto dos sensores de bordo, quanto dos sensores de superfície, que ainda não fornecem dados confiáveis sobre o ambiente da missão. Além da imprecisão da informação, a quantidade de dados gerados pelos diversos sensores é muito grande, o que dificulta o seu processamento, exigindo computadores cada vez mais potentes (BOHM; JENSEN, 2005).

2.3 VEÍCULOS HÍBRIDOS

São veículos especialmente desenvolvidos que combinam características de ROVs e AUVs. Como o PURL, um AUV desenvolvido no Underwater Research Lab na Universidade Simon Fraser em British Columbia, que pode operar tanto como um AUV, sem cabo, quanto como um ROV (BOHM; JENSEN, 2005).

EMBASAMENTO TEÓRICO

Este capítulo contém a discussão de alguns fundamentos teóricos necessários ao desenvolvimento de um ROV. Ele trata de fatores que afetam o comportamento e a percepção no ambiente aquático.

3.1 FATORES QUE AFETAM UM ROV

Sistemas que operam em ambiente aquático, em especial os submersos, estão sujeitos a um número muito grande de alterações em suas vizinhanças, que devem ser previstas nas diretrizes de projeto destes equipamentos. O robô precisa ser estanque e seu conjunto de sensores e atuadores necessita ser adaptado ao mundo marinho. Devido a natureza da dinâmica do ambiente subaquático um grande número de fatores, em sua maioria não-lineares, afetam o funcionamento, a eficiência e o desempenho dos vários subsistemas do submarino.

3.1.1 Visibilidade

A visibilidade debaixo d'água pode ser afetada por diversos fatores. O sol é uma fonte de luz policrômica, ou seja, a radiação eletromagnética que chega a Terra é composta por diversos comprimentos de onda (as cores). A água absorve a luz reduzindo sua intensidade à medida que a profundidade aumenta, e esta absorção ocorre de forma diferenciada para os diversos comprimentos de onda, como apresentado na Figura 3.1.

3.1 FATORES QUE AFETAM UM ROV

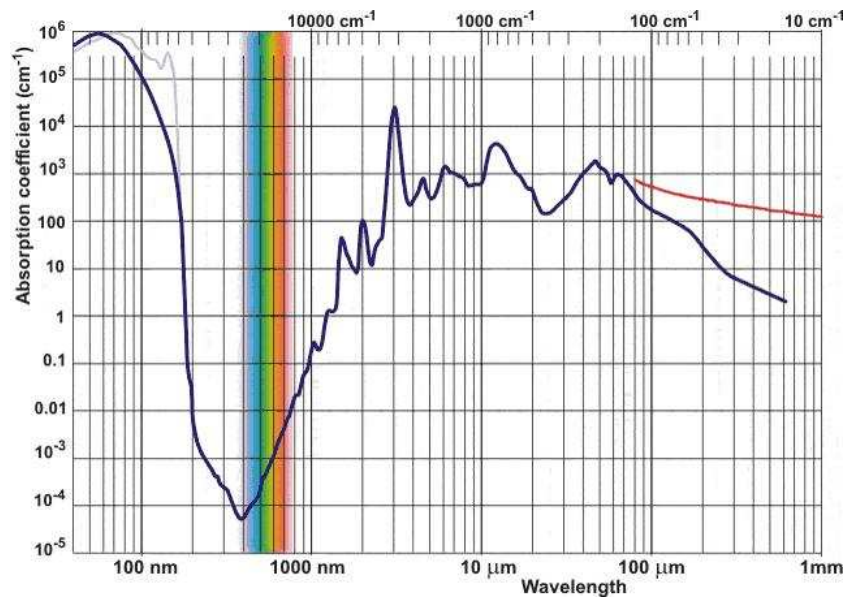


Figura 3.1. Espectro de absorção de Luz pela água. (CHAPLIN, 2008)

A radiação infra-vermelha é a primeira a ser absorvida, seguida pelo vermelho, amarelo até o violeta. Por este motivo, as imagens em ambientes subaquáticos são pobres em coloração, prevalecendo o tom azul-acinzentado. Para poder visualizar um maior espectro de cores e detalhes com boa definição faz-se necessário a utilização de sistemas de iluminação artificial.

Um outro fator que afeta a visibilidade durante o mergulho é a presença de partículas em suspensão. Esta suspensão de partículas pode ser criada por diferentes fenômenos, inclusive a própria turbina do ROV pode ser fonte de turbidez, mas geralmente este fenômeno está ligado à presença de correntes aquáticas. A turbidez é mais comum e pronunciada em rios.

3.1.2 Leis Físicas

Algumas considerações físicas são de fundamental importância na concepção de um veículo submersível. Estes fatores têm alto impacto no projeto e no desenvolvimento do seu sistema de controle, além de determinar a seleção da faixa de trabalho dos

sensores incorporados ao veículo.

3.1.2.1 Empuxo e Flutuação - O empuxo é uma força vertical direcionada de baixo para cima, igual ao peso do fluido que ocuparia o espaço ocupado por um determinado objeto, sendo assim, depende simplesmente do volume do objeto e da densidade do fluido.

As diferenças de força entre o peso e o empuxo atuando num objeto submerso são mais comumente descritas como condição de flutuação, do que como força resultante. Esta condição de flutuação determina se o objeto flutua no líquido em que está imerso, afunda ou permanece em meia água (equilíbrio). Tais condições são referidas como flutuação positiva, negativa e neutra.

- Flutuação positiva: ocorre quando o empuxo é maior do que o peso do objeto no ar, este então tende a flutuar.
- Flutuação negativa: ocorre quando o empuxo é menor do que o peso do objeto no ar, este então tende a submergir.
- Flutuação neutra: ocorre quando o empuxo é igual ao peso do objeto no ar, este então tende a permanecer em uma posição de equilíbrio.

No desenvolvimento de um submersível o ideal seria obter flutuação neutra, o que possibilitaria ao veículo subir e descer com um leve empurrão criado pela turbina vertical. Este mesmo deslocamento poderia ser obtido com uma leve inclinação (para cima ou para baixo), durante o movimento horizontal, com o menor gasto de energia possível. Apesar disto, costuma-se adotar a estratégia de deixar o ROV com flutuação levemente positiva.

3.1.2.2 Estabilidade - A estabilidade é a tendência que um objeto tem de voltar à sua posição ou orientação original após ter sofrido uma perturbação. Num submersível,

as duas principais forças que definem a sua estabilidade são empuxo e peso (Figura 3.2). Estas devem ser usadas de forma a sempre restaurar a orientação do veículo.

Seja **CE** o ponto imaginário onde toda a força de empuxo atua, ou seja o centro de empuxo. Seja então **CG**, o ponto imaginário onde toda a massa do submersível está concentrada ou centro de gravidade. Ajustando no ROV a geometria das massas, de tal forma que ambos estejam sobre uma linha vertical no centro do veículo, sendo que **CE** está na parte superior, enquanto que **CG** encontra-se na parte inferior, a combinação destas forças, para cima e para baixo, dá origem a uma força resultante, **FR**, que tenderá a restaurar a orientação original do submersível.

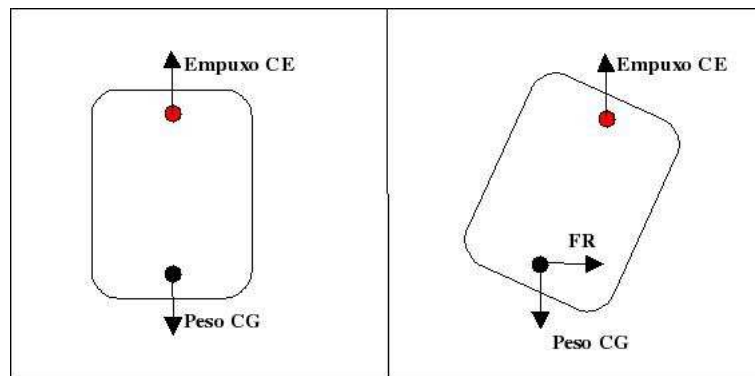


Figura 3.2. Forças atuando sobre um corpo em equilíbrio (Esquerda) e fora do equilíbrio (Direita)

A distância entre **CE** e o **CG** é crucial quando busca-se determinar o estado e a magnitude da estabilidade de um objeto, esta distância recebe o nome de altura metacêntrica, (**EG**). Se a distância (**EG**) é relativamente grande, então o módulo de **FR** é grande, e portanto a embarcação tem forte tendência a voltar para sua posição estável inicial. Já se **CE** e **CG** estão próximos, **EG** é pequeno e a embarcação tem fraca tendência de voltar a sua posição estável inicial. Se o submersível tem **CE** coincidindo com **CG**, é dito que ele tem **EG** zero.

3.1.2.3 Pressão Hidrostática - A força que depende da profundidade e que age sobre a superfície de um objeto imerso num determinado líquido é o resultado do peso

3.1 FATORES QUE AFETAM UM ROV

da coluna de fluido sobre ele somado a qualquer outra pressão que esteja agindo sobre a superfície desta massa líquida. Esta força é chamada de pressão hidrostática, dada pela Equação 3.1:

$$P = P_o + \rho gh \quad (3.1)$$

onde,

- P é a pressão da água
- ρ é a densidade da água
- g é a aceleração gravitacional
- h é a profundidade na água
- P_o é a pressão agindo sobre a superfície da água

A pressão P , em ambiente aquático somente devido à coluna d'água, aumenta linearmente com a profundidade h , como apresenta na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Relação entre pressão e altura de coluna d'água.

Profundidade (m)	Pressão (kPa)
5	49,03
10	98,06
15	147,1
20	196,13
25	245,17

ESTRUTURA DO PROJETO

Este capítulo contém uma discussão detalhada dos diversos elementos desenvolvidos neste trabalho. Ele trata dos elementos eletrônicos utilizados, como microcontrolador, sensores e controlador de potência para os motores e os circuitos desenvolvidos para a utilização destes. Também é detalhado neste capítulo o barramento de comunicação, o protocolo de comunicação e o sistema de alimentação utilizado.

4.1 PROJETO DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO DO ROV

O sistema de sensoriamento desenvolvido engloba desde a interface de controle do operador (em seco) até o sistema embarcado no veículo. Desta forma, o projeto pode ser dividido em dois blocos eletrônicos distintos, um bloco embarcado e um bloco em seco (unidade de controle do operador). O diagrama geral do projeto é apresentado na Figura 4.1.

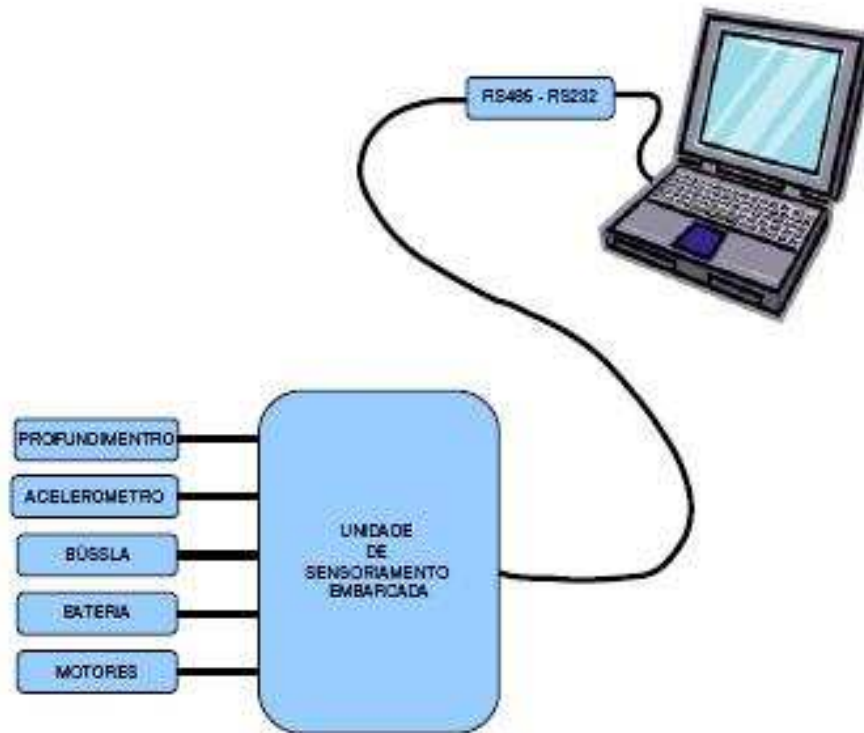


Figura 4.1. Diagrama Geral do Projeto

Como apresentado na Figura 4.1, o conjunto eletrônico embarcado foi composto de: uma unidade de sensoriamento embarcada, sensores de aceleração (acelerômetro), pressão (profundímetro) e campo magnético (bússola), além de uma unidade de potência para alimentação (condicionamento do sinal da bateria) e uma unidade de potência para os motores.

A unidade em seco, do outro lado da linha de comunicação, contém um conversor RS-485 - RS-232 e um programa de controle e visualização dos sinais, desenvolvido em código Gambas (linguagem similar ao Microsoft Visual Basic para ambiente Linux).

4.2 PROJETO ELETRÔNICO EMBARCADO

O conjunto eletrônico embarcado é responsável pelo gerenciamento das operações executadas pelo veículo. A ele cabe digitalizar o sinal dos sensores utilizados no sis-

4.3 UNIDADE EMBARCADA DE CONTROLE

tema de monitoramento. É também responsável pela geração do sinal de PWM que controlam a velocidade e sentido de rotação dos motores. Os sinais digitalizados e a informação de velocidade dos motores são transmitidos por uma porta de comunicação RS-485, ver sessão 4.4.2. Um diagrama deste sistema é apresentado na Figura 4.2. Cada um destes módulos e seus sub-módulos é detalhado a seguir.

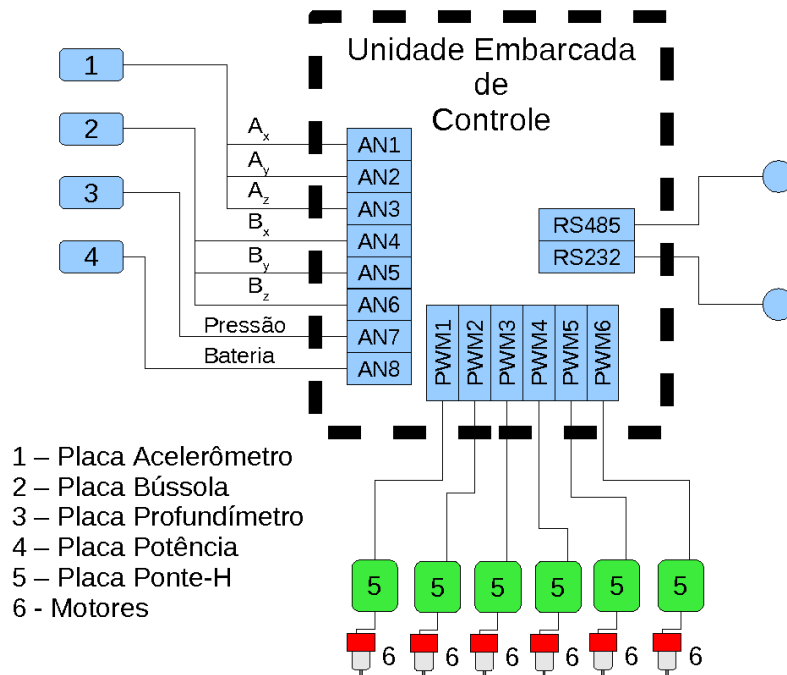


Figura 4.2. Diagrama do Sistema Eletrônico Embarcado

4.3 UNIDADE EMBARCADA DE CONTROLE

A unidade embarcada de controle central é responsável pelo controle dos motores, leitura dos sinais dos sensores e comunicação com a central do controle. A escolha do microcontrolador a ser utilizado no projeto levou em consideração as necessidades do sistema de controle embarcado, uma vez que esta unidade de processamento seria responsável pela coleta dos sinais analógicos dos diversos sensores, controle do sistema de propulsão e comunicação de dados com a central de controle, onde está o operador. Isto sem negligenciar o custo do projeto.

Foi feito um levantamento das necessidades do sistema. Para coleta dos sinais analógicos dos sensores o sistema necessita de pelo menos 8 entradas analógicas, uma vez que são necessárias 3 entradas para a bússola eletrônica, 3 entradas para os acelerômetros, 1 entrada para o sensor de pressão e 1 entrada para o monitoramento da carga da bateria. Estas entradas analógicas devem possuir uma resolução de pelo menos 10 bits, o que garante uma resolução percentual de 0,098%. Ou seja, uma resolução de 5 mV para uma tensão de referência de 5 V.

O controle do sistema de propulsão tem como requisitos 6 geradores de PWM para controle de velocidade dos motores. A resolução deste sistema não constitui um parâmetro crucial do projeto, sendo que um sistema de PWM com resolução de 5 bits é suficiente, permitindo a seleção de 32 possíveis velocidades. O sistema deve também fornecer dois sinais à unidade de controle de potência, um com o sinal de PWM propriamente dito, e a informação do sentido de rotação do motor.

A comunicação entre a unidade de controle embarcada e a unidade central de processamento é feita através de um cabo de comunicação. Para a transmissão destes dados o padrão de comunicação adotado foi o RS-485, um barramento livre amplamente difundido em ambiente industrial. O protocolo o MODBUS utilizado para controlar o fluxo de dados neste barramento, ver sessão 4.4.3.

Foram então estabelecidos como requisitos básicos do sistema embarcado:

- 8 entradas analógicas de 10 bits, faixa de tensão de entrada entre 0 e 5 V.
- 6 saídas de PWM com resolução de 5 bits.
- Comunicação via barramento RS-485 com protocolo MODBUS.

Uma vez estabelecidos os requisitos básicos do projeto foi utilizada a metodologia sugerida por (BERGER, 2001), onde alguns questionamentos são levados em consideração para a escolha dos microcontrolador adequado. O primeiro questionamento visa determinar se o microprocessador está disponível em um encapsulamento adequado

e possível de ser implementado. Os microcontroladores estão disponíveis no mercado em diversos padrões, como por exemplo: DIP (*Dual In-line Packet*), SOIC (*small-outline integrated circuit*), PSOP (*Plastic Small-Outline Package*), TSOP (*Thin Small-Outline Package*), SSOP (*Shrink Small-Outline Package*) e TSSOP (*Thin-Shrink Small Outline Package*). Neste projeto a melhor escolha foi um controlador em encapsulamento DIP de baixo custo, pela facilidade de montagem.

A segunda questão tratou do desempenho do processador, que deve ser suficiente para o trabalho a que se destina. Como as tarefas a serem realizadas pelo ROV não são críticas em termos de tempo de execução, este não constitui um parâmetro de alta relevância.

O terceiro item questiona a existência de sistemas operacionais que podem ser usados no processador escolhido. Este tópico também não tem grande relevância para o projeto, já que não será utilizado um sistema operacional.

O quarto e último item trata do suporte de ferramentas apropriadas do processador para o desenvolvimento das aplicações do projeto. Bons compiladores e simuladores podem representar um grande ganho em tempo e custo durante a fase de desenvolvimento.

Um quinto questionamento, não focado pelo autor citado acima, mas de grande importância, trata do conjunto de experiências anteriores da equipe de desenvolvimento com um dado processador, ou família de processadores.

Existe uma grande oferta de microcontroladores que agregam as mais diversas funcionalidades. Levando-se em consideração todos os critérios listados acima, os microcontroladores da família PIC, da Microchip, foram considerados boas soluções para a tarefa em questão. Este conjunto de microcontroladores está disponível em diferentes encapsulamentos, incluindo o DIP; são dispositivos facilmente encontrados no mercado e de baixo custo; possuem uma boa quantidade de ferramentas de desenvolvimento gratuitas disponíveis. Dentro desta família de microcontroladores o PIC16F877A foi avaliado como a melhor solução para a tarefa de controle da unidade embarcada.

O PIC16F877A é um microcontrolador RISC (controlador com número reduzido de instruções) de alto desempenho. Além de possuir capacidade de memória suficiente para armazenar o programa de controle e os dados coletados, possui o número necessário de entradas de conversão analógico-digital com resolução adequada e número suficiente de portas de E/S. Algumas características deste controlador são:

- Freqüência de operação de até 20 MHz.
- Memória Flash de programa de 4Kx14 bits.
- Memória de dados de 368 bytes.
- Memória de dados EEPROM de 256 Kb.
- 14 interrupções.
- 5 portas de E/S (Portas A, B, C, D, E).
- 3 Temporizadores.
- Comunicação serial.
- 8 Canais de entrada para conversão de sinal analógico para digital (10 bits).
- 35 instruções.

Uma vez definido o microcontrolador, foi desenvolvido um circuito para permitir a utilização deste. O diagrama completo deste circuito pode ser visto na Figura B.5. Este sistema embarcado, ver Figura 4.3, foi desenvolvido para trabalhar como um nó-escravo de um barramento RS-485. Possui dois comutadores (*jumpers*) de seleção de endereço, que permite a utilização de até quatro unidades embarcadas como está, conectadas no mesmo barramento, alterando-se somente o endereço do nó. Com essa facilidade, pode-se expandir o sistema de controle permitindo-se o controle de até 24 motores e a leitura de até 32 sinais analógicos.

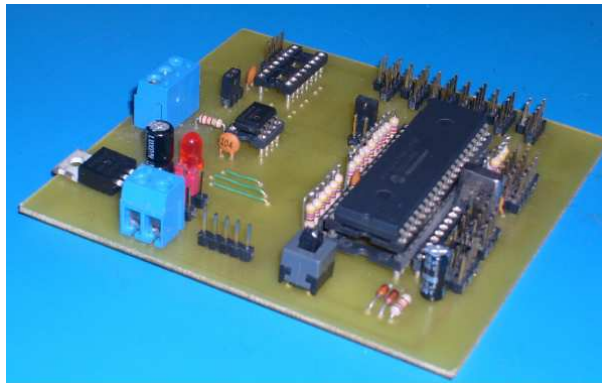


Figura 4.3. Sistema Eletrônico Embarcado

Ao receber o comando para leitura dos sensores, do nó-mestre, o sistema efetua a conversão AD dos sinais analógicos e envia o código digital de volta ao nó-mestre (central de controle). Todo o tratamento do sinal digitalizado é feito posteriormente pela central de controle. Quando a central de controle deseja alterar a velocidade e/ou o sentido dos motores, esta unidade envia um código informando o endereço do nó escravo, seguido do comando informando que se deseja atualizar o estado dos motores e finalmente o código correspondente ao novo estado dos motores.

O *firmware* para gerenciar o funcionamento deste sistema foi desenvolvido em C da CCS, o código desenvolvido pode ser visto no Apêndice C. Este *software* é responsável pelo controle de velocidade e sentido de rotação dos motores, aquisição dos sinais analógicos e comunicação com a central. Neste código foi implementado o protocolo de comunicação MODBUS, responsável por gerenciar o tráfego de informações no barramento RS-485 e garantir a integridade dos dados.

4.4 COMUNICAÇÃO

O sistema de comunicação é de vital importância para o funcionamento do ROV, uma vez que as ações de controle são transmitidas por este sistema. O seu mal funcionamento pode significar até mesmo a perda do veículo.

Um bom sistema deve ser rápido e tolerante a falhas de comunicação, garantindo

um bom tempo de resposta para as ações de controle.

4.4.1 Diferentes formas de comunicação em ROVs

Diversas formas de comunicação são utilizadas em ROV, podendo ser classificadas em dois grupos: com fio e sem fio.

As formas mais comuns de comunicação sem fio para ROVs envolvem ondas acústicas e transmissões ópticas (SHAW et al., 2006). Estas duas técnicas possuem vantagens e desvantagens.

A comunicação utilizando ondas acústicas não alcança altas taxas de transferência, uma vez que a velocidade de ondas acústicas na água é de 1500m/s, representando um limitante para este modo de comunicação. Outro fator que interfere nas comunicações acústicas em ambiente aquático ocorre em águas rasas, onde as reflexões se tornam mais intensas aumentando o nível de ruído do sinal.

Já a comunicação utilizando transmissão óptica de informações, apesar de conseguir taxas de transmissão de dados maior do que a alternativa de ondas acústicas, é limitada em distância. A distância entre o transmissor e o receptor é restringida pelos fatores que afetam a visibilidade na água, como citado anteriormente, e pela iluminação externa.

A comunicação com fio garante uma maior imunidade da linha transmissão à interferência de fatores ambientais e permite altas taxas de transferência de dados. Isto torna esta forma de comunicação muito utilizada. Por este motivo, a comunicação utilizando cabos é a mais utilizada nesta classe de veículos. Os dados normalmente trafegam na linha de transmissão de forma serial. Muitos ROVs utilizam o padrão de comunicação RS-232, sendo que os dados são transmitidos num cabo de fibra-óptica, como é o caso do (LYGOURAS, 1999). A utilização de cabos de fibra-óptica permite a expansão do comprimento máximo do cabo, uma vez que para padrão RS-232 este é limitado a 15m.

Uma alternativa ao uso de fibras ópticas, e da comunicação RS-232, é o uso do padrão RS-485. Esse padrão permite uma alta taxa de transferência de dados e longos comprimentos para o cabo de comunicação. O padrão RS-485 contorna a necessidade do uso de fibra óptica, o que reduz o custo do projeto. Esta foi a motivação para a escolha deste barramento de comunicação.

4.4.2 Barramento RS-485

O sistema de transmissão de dados RS-485, formalmente conhecido como padrão TIA/EIA-485, utiliza uma transmissão de dados por par balanceado. Normalmente possuem um par de fios de transmissão, uma linha é chamada de A e a outra de B. O sinal tem nível lógico 0, quando a tensão da linha A é negativa, enquanto a linha B é positiva. E nível lógico 1, quando a tensão da linha A é positiva e a linha B é negativa. Diferente do padrão RS-232, em que os sinais são níveis de tensão com relação ao comum ou terra, onde há um fio destinado à transmissão (Tx) e outro destinado à recepção (Rx). No padrão RS-232 os níveis de tensão normalmente variam entre +3 e +15 V, para o estado lógico 0, e -3 a -15V para o estado lógico 1.

O padrão RS-485 permite a conexão de até 32 dispositivos (U.C.s- Unidades de Carga) na mesma rede, sendo um deles o mestre (único no barramento) e os outros os escravos, como apresentado na Figura 4.4. Como o barramento de comunicação é composto de apenas duas linhas, a informação só pode transitar em uma direção por vez (*half-duplex*). Cabe ao mestre do barramento controlar o fluxo de informações na rede, leitura e escrita de dados. Os escravos só podem receber, ou enviar informação ao mestre sob comandos dele.

Em algumas redes RS-485 são utilizadas quatro linhas de transmissão, sendo um par destinado à leitura e outro à escrita conservando a arquitetura mestre-escravo. A Figura 4.4, apresenta uma típica arquitetura de rede RS-485, à qual estão ligados 3 nós escravos e um nó mestre. Para este trabalho foi utilizado o padrão de duas linhas.

4.4 COMUNICAÇÃO

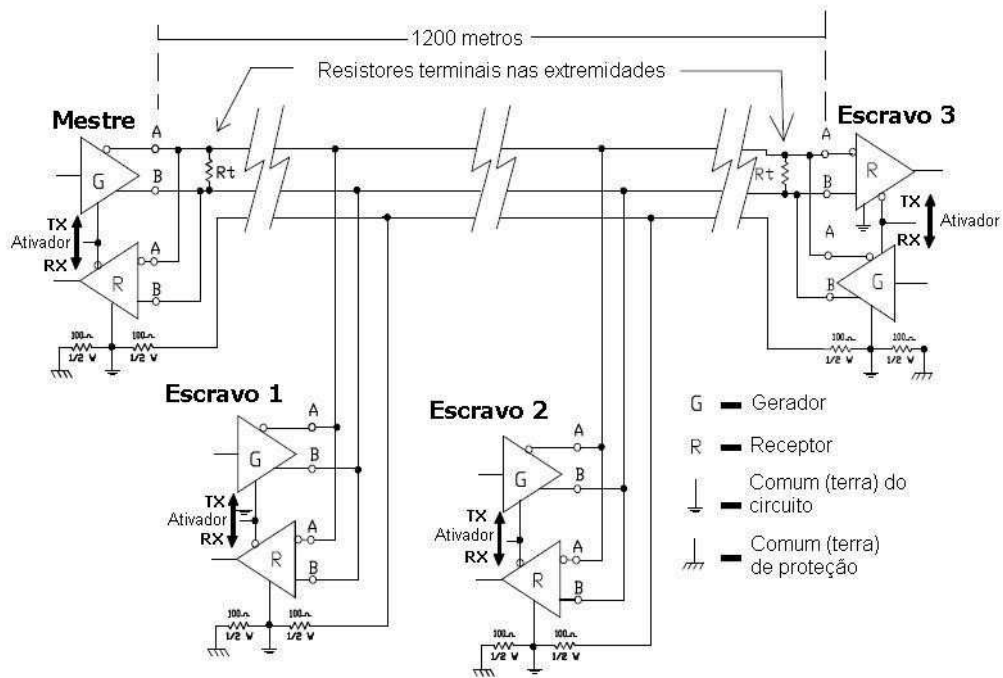


Figura 4.4. Rede RS-485 típica com duas linhas

Este barramento de comunicação é largamente difundido em ambientes industriais para transmissão de pequeno volume de dados. As especificações do barramento padrão permitem uma taxa de transmissão de até 10Mbit/s e a utilização de cabos de até 1200 m. Uma descrição mais detalhada das características deste barramento de comunicação é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características do Barramento RS-485.

Parâmetros	RS-485	Unidade
Número de controladores(<i>drivers</i>) e receptores	32	
Comprimento teórico máximo do cabo	1200	m
Taxa máxima de transferência de dados	10	Mbps
Tensão máxima de modo comum	12 a -7	V
Nível diferencial de saída do controlador	$1.5 \leq V_{od} \leq 5$	V
Carga do controlador (<i>driver load</i>)	≥ 60	Ω
Corrente limite de saída do controlador em curto-circuito	150 (para o Terra) 250 (para -7 V ou 12 V)	mA
Estado de alta impedância, desligado	12	$k\Omega$
Resistência de entrada do receptor	12	$k\Omega$
Sensibilidade do receptor	± 200	mV

O limite máximo da taxa de transmissão e o comprimento máximo do cabo de comunicação não podem ser alcançados simultaneamente. Quanto maior o cabo de comunicação menor a taxa de transmissão e vice-versa. Na Figura 4.5 é apresentada a relação entre o comprimento do cabo e a taxa de comunicação. Pode ser observado que taxas de transmissão de 10 Mbit/s só podem ser alcançadas em cabos com comprimento inferior a 30 m, e, para um comprimento de cabo de 1200 m a taxa máxima de comunicação cai para 10 Kbit/s.

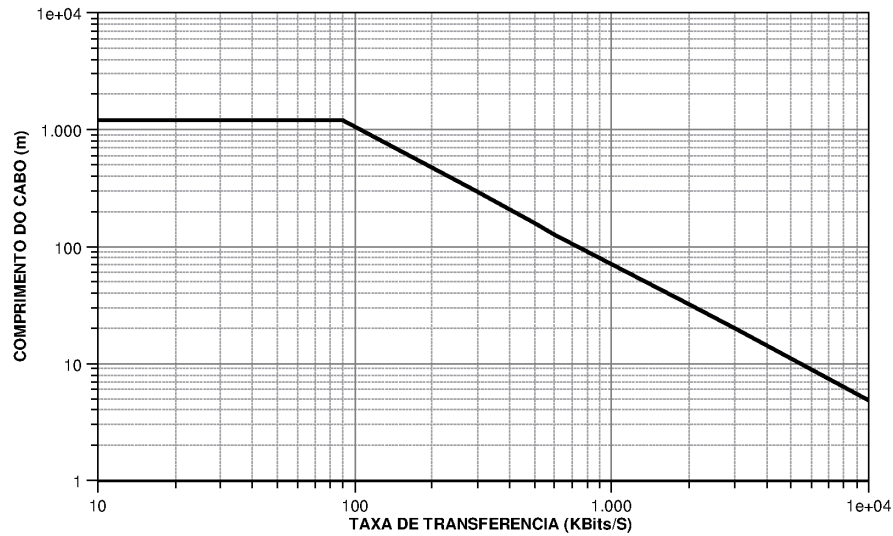


Figura 4.5. Taxa de transferência versus comprimento do cabo numa linha RS-485

Na Figura 4.4, pode ser observado o uso de dois resistores nas extremidades da linha de transmissão, que são as terminações da linha. Terminações são utilizadas para casar a impedância da linha de transmissão à impedância dos transceptores. Quando essa terminação não é bem dimensionada, os sinais na linha de transmissão não têm boa aceitação pela entrada dos transceptores e uma parte do sinal é refletida de volta à linha de transmissão. Se a impedância da linha de transmissão e da carga são iguais, essas reflexões são eliminadas.

A decisão de utilizar ou não terminações deve estar baseada no comprimento do cabo de comunicação e na taxa de transferência de dados. Uma regra sugerida por (BBELECTRONICS, 2006) é que, se o atraso de propagação dos dados na linha é muito menor que a largura de um bit de dado, terminações não são necessárias. Este atraso pode ser encontrado multiplicando-se o comprimento do cabo pela velocidade de propagação, tipicamente 66 a 75% da velocidade da luz, que é especificado pelo fabricante do cabo.

Como este trabalho busca desenvolver um sistema de baixo custo, para a linha de comunicação foi escolhido um cabo coaxial de áudio balanceado de baixo custo. Para este cabo, parâmetros como atraso de propagação não são conhecidos, o que criou a

necessidade de efetuar a medida deste parâmetro, para um melhor entendimento da linha de transmissão utilizada. Este procedimento é discutido na Seção 6.2. (medida do atraso de propagação)

Existem diversas maneiras de terminar as linhas de comunicação, dentre elas podem ser listadas: linhas sem terminação, terminação para múltiplos pontos, terminação CA, terminação de linha-aberta com proteção contra falhas (*open-line fail-safe termination*), e terminação de linha aberta/fechada com proteção contra falhas(*open/shorted-line fail-safe termination*).

- Linha sem terminação - Para comunicação entre dispositivos onde o comprimento no cabo é reduzido e a baixas taxas de transferência de dados, uma opção a ser considerada é o não uso de terminações. Na Figura 4.6 é apresentada uma configuração de barramento sem terminação.



Figura 4.6. Configuração diferencial sem terminação

– Vantagens

- * É requerido do controlador apenas o mínimo de corrente necessária para produzir um sinal de tensão no receptor.
- * Esta técnica minimiza a dissipação de potência no controlador.
- * Assegura um estado conhecido na saída do receptor se este tem um sistema interno de proteção a falha do tipo linha-aberta.

– Desvantagens

- * Reflexões de sinal devida à impedância inadequada da linha para altas taxas de transmissão de sinal.
- * O sistema fica limitado a linhas de comunicação de comprimento reduzido.

- Terminação Paralela para múltiplos pontos - Nesta técnica, um resistor é utilizado em ambas as extremidades da linha de transmissão. O valor da resistência resultante da associação destes deve ser igual à impedância da linha, ou pelo menos manter-se dentro de 20% do seu valor. Na Figura 4.7 é apresentada uma configuração típica de um barramento com terminação para múltiplos pontos.

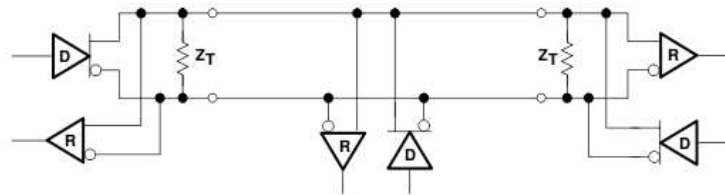


Figura 4.7. Configuração diferencial com terminação para múltiplos pontos

– Vantagens

- * Eliminação das reflexões possibilitando o uso de cabos mais longos e taxas de comunicação maiores.
- * Boa qualidade de Sinal.

– Desvantagens

- * Sub-barramentos longos podem promover reflexões.
- * Aumento de dissipação de potência no controlador.
- * O estado de saída do receptor não é definido quando o controlador está desocupado ou é posto em alta impedância.
- * Impossibilidade de remoção de um nó receptor da linha, sem o redimensionamento das terminações.

- Terminação CA - Nesta técnica um pequeno capacitor e um resistor em série são utilizados nas terminações para eliminar o caminho de corrente CC de uma saída diferencial para a outra. Na Figura 4.8 é apresentada uma configuração típica de um barramento com terminação CA.

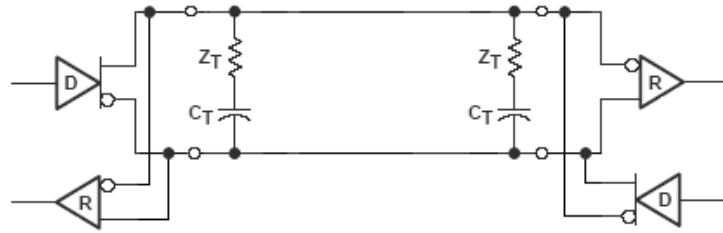


Figura 4.8. Configuração diferencial com Terminação CA

– Vantagens

- * Redução da dissipação de potência quando comparada à terminação paralela.
- * Redução nas reflexões na linha
- * Garante que a saída do receptor vai a um estado conhecido se o receptor possui internamente uma proteção do tipo falha em linha-aberta, *open-line fail-safe*.

– Desvantagens

- * Limitação na taxa máxima de transmissão de dados e do comprimento máximo da linha devido a constante de tempo do circuito RC.
- Terminação com proteção contra falhas de linha-aberta - Se todos os dispositivos da rede estiverem desocupados (com entradas em alta impedância), ou seja, nenhum dispositivo está controlando o nível de tensão da rede, qualquer valor de tensão pode ser assumido. Afim de garantir um valor definido de tensão entre os terminais A e B, são utilizados dois resistores: um resistor de *pull-up*, da entrada A para a alimentação positiva, e um outro resistor de *pull-down*, da entrada B para o terra. O valor destes resistores deve ser tal que, a corrente limitada por eles, seja suficiente para materializar uma diferença tensão de pelo menos 200mV entre as entradas A e B, quando a linha estiver desocupada. Esta configuração não dispensa as terminações em paralela com a linha. O diagrama de uma rede como esta é apresentado na Figura 4.9.

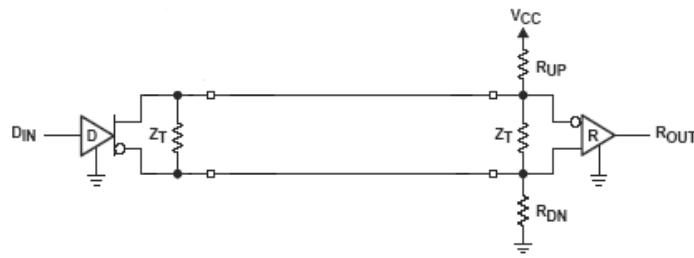


Figura 4.9. Diagrama de uma rede RS485 com terminação e proteção contra falhas de linha aberta

- Vantagens
 - * Garante um estado conhecido na saída dos receptores quando o controlador está inativo ou desconectado.
- Desvantagens
 - * Aumenta o consumo de corrente pelo controlador.
 - * Aumenta a dissipação de potência do sistema.
- Terminação com proteção contra falhas de linha aberta/fechada - Na terminação de linha-aberta com proteção contra falhas, visto anteriormente, um curto-circuito entre as entradas A e B, leva a diferença de tensão entre estas entradas a zero. Conseqüentemente o receptor fica impossibilitado de determinar um valor válido para seu sinal e saída. Para resolver esse problema são utilizados dois resistores em série com as entradas A e B. O valor para estes resistores deve ser tal que, caso haja um curto circuito entre as entradas A e B, uma diferença de pelo menos 200mV deve existir entre elas.

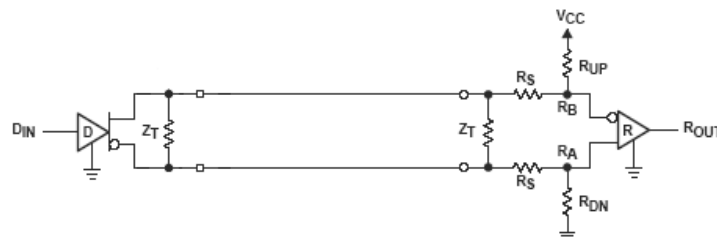


Figura 4.10. Diagrama tipo de uma rede RS-485, terminação com proteção contra falhas de linha aberta/fechada

- Vantagens
 - * Promove uma proteção para linha aberta e linha em curto.
 - * Receptor passa a ser capaz de resistir a uma maior gama de tensão de modo comum.
- Desvantagens
 - * Aumento do custo do projeto
 - * Não é aplicável a transceptores, uma vez que Rs também estaria no caminho do controlador.

Além do uso correto das terminações, outro fator, muitas vezes negligenciado, pode garantir uma redução de ruídos na linha, o uso da malha de terra no cabo de comunicação. Na Figura 4.11 é apresentado um barramento de comunicação RS-485 com terminação paralela, onde o cabo utilizado possui uma malha de terra.

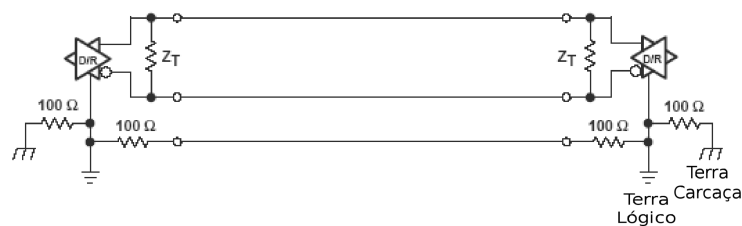


Figura 4.11. Rede RS-485 utilizando malha de terra.

Nenhum protocolo de transmissão de dados é definido para o barramento RS-485, no entanto, diversos protocolos utilizam este barramento como sua estrutura física de transmissão de dados. Dentre estes protocolos podem ser citados o Profibus (EN 50170), Interbus-S, e MODBUS, sendo o último adotado neste projeto.

4.4.3 Protocolo MODBUS

O MODBUS é um protocolo de comunicação de dados serial do tipo mestre-escravo. Um dos nós da linha de transmissão corresponde ao mestre, que envia comandos e lê

informações de um nó escravo por vez.

A definição do protocolo MODBUS só permite a conexão de um mestre por vez ao barramento de comunicação, enquanto até 247 nós escravos podem ser conectados ao mesmo tempo a este barramento. A comunicação é sempre iniciada pelo mestre e este só inicia uma conversa por vez. Os nós escravos nunca transmitem dados sem que antes estes tenham sido solicitados pelo mestre. Os escravos também nunca transmitem dados entre si.

O mestre pode fazer a comunicação com os escravos de duas maneiras:

- Modo *Unicast* - o mestre envia comandos para um dos nós escravos. Após o processamento do comando, o nó escravo envia uma mensagem de resposta ao mestre.
- Modo *Broadcast* - o mestre envia comandos a todos os nós escravos, o comando é processado e não há resposta.

O protocolo MODBUS define que cada dispositivo deve possuir um endereço de 8 bits, possibilitando até 256 possíveis endereços. Na Tabela 4.2 é apresentada a organização dos endereços do protocolo.

Tabela 4.2. Organização de endereços no protocolo MODBUS.

0	De 1 a 247	De 248 a 255
Endereço de Broadcast	Endereços individuais de nós escravos	Endereços reservados

Todos os nós tipo escravo conectados ao barramento de comunicação devem possuir um endereço específico entre 1 e 247. O nó mestre não possui um endereço específico e o endereço 0 (zero) é reservado para comunicações em modo Broadcast.

O protocolo suporta dois modos de transmissão serial de dados, o modo RTU e o modo ASCII. Por definição do protocolo, todos os dispositivos devem capazes de

4.4 COMUNICAÇÃO

fazer comunicação em modo RTU, sendo o modo ASCII algo opcional. Neste trabalho iremos tratar apenas do modo RTU de comunicação.

A janela de comunicação do protocolo é composta por uma Unidade de Dado do Protocolo (PDU - *Protocol Data Unit*) contendo o código de uma função e o dado a ser transmitido. Quando essa janela é enviada pela linha de transmissão, a ela são acrescentados o endereço do dispositivo de destino e uma checagem de erro, checagem de redundância cíclica (CRC - *Cyclical Redundancy Checking*) ou checagem de redundância longitudinal (LRC - *Longitudinal Redundancy Checking*). Uma linha de comando MODBUS é esquematizada na Figura 4.12.

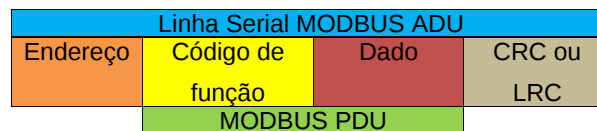


Figura 4.12. Janela de Comunicação do protocolo MODBUS.

No modo de comunicação RTU, cada palavra de 8 bits da mensagem contém dois caracteres hexadecimais de 4 bits. As mensagens são transmitidas como uma frase contínua de caracteres. Para o envio de uma palavra de 8 bits, são necessários 11 bits de comunicação serial, ou seja, 1 bit de início, 8 bits de dados (bits menos significantes primeiro), 1 bit de paridade e um bit de parada. A organização dos bits em uma palavra RTU é apresentada na Figura 4.13.

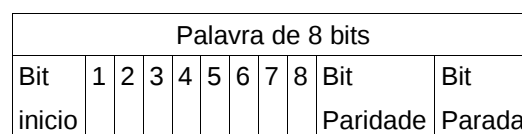


Figura 4.13. Organização dos bits de uma palavra MODBUS RTU.

O Tamanho máximo da janela de informação da linha serial MODBUS, ADU, é de 256 bytes, onde 1 byte é o endereço do nó escravo, 1 byte é o código da função, 2 bytes são o CRC e os bytes restantes são a informação a ser transmitida, ou seja, o tamanho do pacote pode ter até 252 bytes.

4.4.4 Checagem de CRC

O CRC ou checagem de redundância cíclica, é um método de detecção de erros em mensagens. Este método foi inventado por W. Wesley Peterson, e publicado em seu artigo de 1961 (CYCLIC..., 1961). Este método se assemelha a uma divisão polinomial sobre campos finitos em $GF(2)$ (A), onde o quociente é descartado e o resto passa a ser o importante. O comprimento do resto é sempre igual ou inferior ao comprimento do divisor, que, por conseguinte, determina o quão longo o resultado será. Para o CRC-16, utilizado no protocolo MODBUS RTU, o resultado terá 16 bits.

A eficiência do CRC depende diretamente do polinômio gerador utilizado. O padrão de CRC utilizado define o polinômio gerador a ser utilizado. Na Tabela 4.3 são apresentados alguns polinômios amplamente usados.

Tabela 4.3. Exemplos de Polinômios de CRC (KOOPMAN, 2002).

CRC	Nome	Polinômio
4	CCITT-4	$0x9 = (x^4 + x + 1)$
4	CRC-4	$0xF = (x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$
5	CRC-5	$0x15 = (x + 1)(x^4 + x^3 + 1)$
6	DARC-6	$0x2C = (x + 1)(x^5 + x^4 + x^2 + x + 1)$
6	CRC-6	$0x21 = (x^6 + x + 1)$
7	CRC-7	$0x48 = (x^7 + x^4 + 1)$
7	FT2	$0x72 = (x^7 + x^6 + x^5 + x^2 + 1)$
8	DARC-8	$0x9C = (x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1)$
8	C2	$0x97 = (x + 1)(x^7 + x^6 + x^5 + x^2 + 1)$
8	DOWCRC	$0x98 = (x + 1)(x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1)$
8	ATM-8	$0x83 = (x + 1)(x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1)$
8	WCDMA-8	$0xCD = (x + 1)(x^7 + x^3 + 1)$
8	CRC-8	$0xEA = (x + 1)(x^2 + x + 1)(x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1)$
10	CRC-10	$0x319 = (x + 1)(x^9 + x^4 + 1)$
12	CRC-12	$0xC07 = (x + 1)(x^{11} + x^2 + 1)$
14	DARC-14	$0x2402 = (x + 1)(x^{13} + x^{12} + x^{11} + x + 1)$
15	CAN	$0x62CC = (x + 1)(x^7 + x^3 + 1)(x^7 + x^3 + x^2 + x + 1)$
16	C_3	$0xAC9A = (x^{16} + x^{14} + x^{12} + x^{11} + x^8 + x^5 + x^4 + x^2 + 1)$
16	CRC-16	$0xA001 = (x + 1)(x^{15} + x^{14} + 1)$
16	ANSI-16	$0xC002 = (x + 1)(x^{15} + x + 1)$
16	CCITT-16	$0x8810 = (x + 1)(x^{15} + x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$

Para o padrão MODBUS RTU, que uso o CRC-16, o polinômio gerador é $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$. Após efetuada a divisão, o resto é o código CRC, que é incorporado ao final da mensagem transmitida. O cálculo desta divisão é efetuado por meio operações XOR (ou exclusivo). Na Figura 4.14 é apresentado o algoritmo para cálculo do CRC-16. Inicialmente é calculado o CRC para o primeiro byte da mensagem, ao valor encontrado para CRC é efetuada uma operação de XOR com byte seguinte, este procedimento é reproduzido até o último byte.

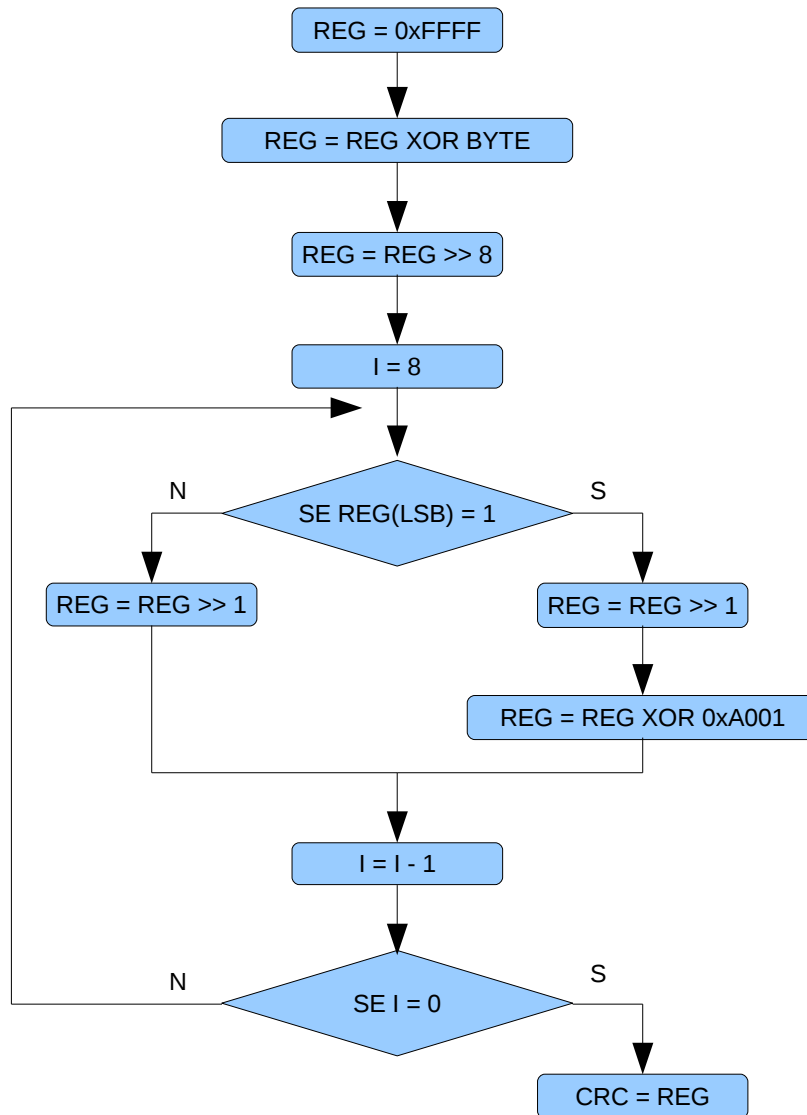


Figura 4.14. Fluxograma do algoritmo para cálculo do CRC-16.

O processo de cálculo do CRC-16 é iniciado pelo carregamento, em um registrador, do valor 0xFFFF. Em seguida é efetuada uma operação de XOR entre o conteúdo deste registrador e o primeiro byte da mensagem, sendo que o resultado desta operação é armazenado no próprio registrador. Então é efetuado um deslocamento de 8 bits do registrador na direção dos bits menos significativos. O bit menos significativo é então extraído e analisado. Caso este bit seja 0, é efetuado um deslocamento de 1 bit na direção dos menos significativos e o procedimento de extração e análise do bit menos

4.4 COMUNICAÇÃO

significativo é refeito. Caso o bit menos significativo seja 1, é efetuada uma operação de XOR entre o registrador e o polinômio utilizado (0xA001). Novamente é efetuado o procedimento de extração e análise do bit menos significativo. Esse teste do bit menos significativo é feito 8 vezes. Um exemplo deste cálculo é apresentado abaixo para um byte exemplo 0xAA.

	1111 1111 1111 1111	- REG = 0xFFFF
XOR	1010 1010	- 1º byte da mensagem

	0101 0101 1111 1111	- REG = REG XOR BYTE
	1111 1111 0101 0101	- REG = REG >> 8 (REG(LSB) = 1)
1º	0111 1111 1010 1010	- REG = REG >> 1
XOR	1010 0000 0000 0001	- Polinômio (0xA001)

	1101 1111 1010 1011	- REG = REG XOR 0xA001 (REG(LSB) = 1)
2º	0110 1111 1101 0101	- REG = REG >> 1
XOR	1010 0000 0000 0001	- Polinômio (0xA001)

	1100 1111 1101 0100	- REG = REG XOR 0xA001 (REG(LSB) = 0)
3º	0110 0111 1110 1010	- REG = REG >> 1 (REG(LSB) = 0)
4º	0011 0011 1111 0101	- REG = REG >> 1 (REG(LSB) = 1)
5º	0001 1001 1111 1010	- REG = REG >> 1
XOR	1010 0000 0000 0001	- Polinômio (0xA001)

	1011 1001 1111 1011	- REG = REG XOR 0xA001 (REG(LSB) = 1)
6º	0101 1100 1111 1101	- REG = REG >> 1
XOR	1010 0000 0000 0001	- Polinômio (0xA001)

	1111 1100 1111 1100	- REG = REG XOR 0xA001 (REG(LSB) = 0)
7º	0111 1110 0111 1110	- REG = REG >> 1 (REG(LSB) = 0)
8º	0011 1111 0011 1111	- REG = REG >> 1 (REG(LSB) = 0)
	CRC = REG = 0011 1111 0011 1111	

4.5 CIRCUITO DE CONVERSÃO RS-232 - RS-485

Um vez que a grande maioria dos computadores pessoais não dispõe de uma interface RS-485, faz-se necessário o desenvolvimento de um conversor do padrão RS-485 para o padrão RS-232, comum nesse tipo de máquina. Para tanto, foi utilizado o circuito integrado (CI) SN75176, um transceptor de barramento serial. Este circuito é capaz de converter os sinais diferenciais da comunicação RS-485 para o padrão TTL. Este sinal foi então aplicado a um MAX-232 que converte os sinais TTL em níveis do padrão RS-232. O diagrama completo deste circuito é apresentado na Figura B.6.

Para prover uma interface de comunicação entre o homem, operador do veículo, e o veículo propriamente dito foi desenvolvido um aplicativo em linguagem de programação Gambas. O Gambas é um ambiente de desenvolvimento gratuito baseado em uma plataforma Basic com orientação a objeto.

Este aplicativo permite ao operador o controle da velocidade dos motores, visualização do sinal dos sensores e monitoramento da tensão da bateria. A interface de controle é apresentada na Figura 4.15.

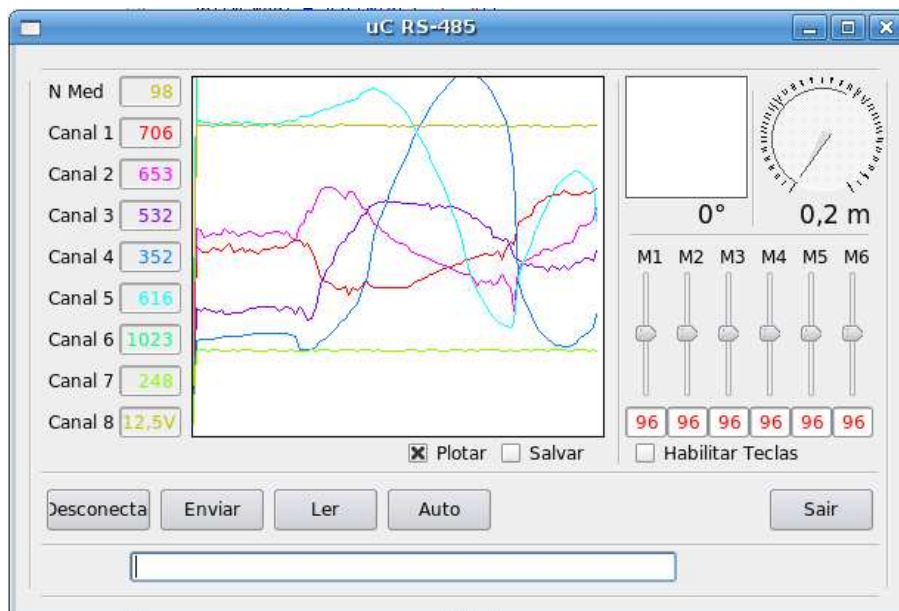


Figura 4.15. Interface de controle.

Nesta tela, os canais 1, 2 e 3 apresentam o sinal de medida da aceleração nos eixos X, Y, e Z respectivamente. Os canais, 4, 5 e 6 apresentam respectivamente os sinais de medida da componente do campo magnético terrestre nos eixos X, Y e Z. Nos canais 7 e 8 são apresentados os sinais da medida do sensor de pressão e tensão na bateria. Os sinais são adquiridos e visualizados em tempo real.

As barras de rolagem à direita da tela, nomeadas de M1 a M6, correspondem ao controle dos 6 sinais de PWM gerados, sendo que, ao centro, o *duty-cycle* é nulo, o que corresponderia a uma situação de motor parado. Quando selecionado o botão “Habilitar Teclas” é possível controlar os sinais de PWM utilizando atalhos no teclado do computador, segundo a Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Teclas de Atalho

Barra de Rolagem	Aumenta	Reduz
M1	“a”	“z”
M2	“s”	“x”
M3	“d”	“c”
M4	“f”	“v”
M5	“g”	“b”
M6	“h”	“n”

SISTEMA DE SENSORIAMENTO

Existe no mercado uma grande variedade de unidades de controle e sensoriamento para veículos submersíveis, com diferentes exatidões e preços. No entanto, estas não atendiam às necessidades deste projeto no que tange tamanho, preço e aptidão para trabalhar em ambiente aquático. Foi então decidido pelo desenvolvimento das unidades de sensoriamento e controle a fim de obter um *hardware* que melhor atenda às necessidades do projeto. Uma vez que existem diferentes tipos de robôs, existe também uma grande variedade de maneiras pelas quais estes veículos fazem o sensoriamento do ambiente ao seu redor (EVERETT, 1995).

Para o projeto em questão, o sistema de sensoriamento foi composto de um sensor de pressão para medida de profundidade, um sensor de aceleração e uma bússola eletrônica. Cada um destes sensores, bem como seus módulos de condicionamento de sinal serão discutidos nos itens seguintes.

5.1 SENSOR DE PROFUNDIDADE

A medida de profundidade foi obtida com o uso de um sensor de pressão, ou seja, essa grandeza foi medida indiretamente como função da pressão exercida pela coluna de água sobre o elemento ativo do sensor. Utilizando a Equação 3.1, pode-se correlacionar os valores de pressão medidos pelo sensor com a profundidade.

Como o valor de pressão aumenta aproximadamente 98,07 kPa a cada 10 m de profundidade, e a profundidade de operação para o sistema de controle aqui proposto é de até 30 m, o fundo escala escolhido para o sistema de medida foi de 400 kPa. Uma vez que, a 30 m de profundidade, se teria aproximadamente 294,2 kPa de coluna

d'água mais 101,33 kPa correspondentes à pressão atmosférica que seria medida pelo sensor quando ao nível do mar.

Uma pesquisa dos sensores de pressão disponíveis no mercado, mantendo-se a exigência de baixo custo do projeto, aponta o MPXH6400A da (SEMICONDUCTOR, 2007), Figura 5.1, como sendo uma boa solução para a medição de profundidade.

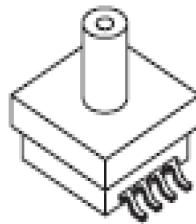


Figura 5.1. Sensor de Pressão MPXH6400A

5.1.1 O sensor MPXH6400A

Os sensores da série MPXH6400A são transdutores piezoelétricos de pressão feitos em silício que já possuem um sistema de condicionamento de sinal interno. Algumas características destes dispositivos são:

- Faixa de medição de 20 a 400 kPa.
- Tensão de alimentação de 4,64 a 5,36 V, tipicamente alimentado com 5 V.
- Consumo de corrente médio de 6 mA DC, sendo o máximo de 10 mA DC.
- Sensibilidade de 12 mV/kPa.
- Faixa de sinal de saída de 0,2 a 4,8V.

A Figura 5.2, ilustra o diagrama interno do sensor. É importante notar uma camada de gel de fluoro silicone existente logo acima do elemento sensível, que serve para protegê-lo, e suas conexões, do ambiente externo. Esta proteção constitui um

elemento importante, uma vez que se estará trabalhando com o sensor em ambiente molhado.

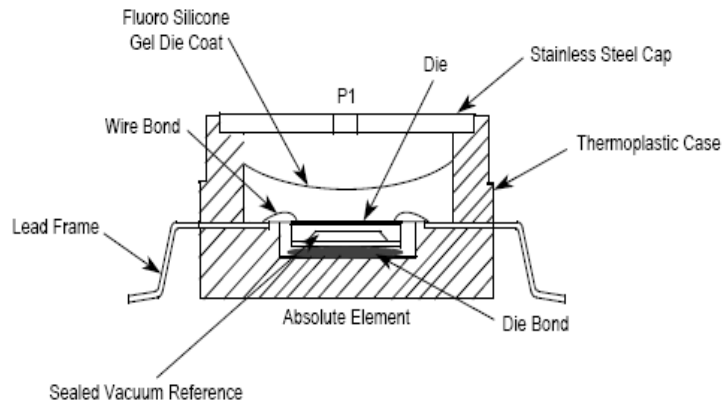


Figura 5.2. Diagrama Interno do Sensor MPXH6400A

5.1.2 O Circuito Desenvolvido

Como o sensor escolhido (MPXH6400) já possui um circuito de condicionamento de sinal interno, não foi necessário o desenvolvimento deste circuito. As únicas necessidades do circuito projetado são um regulador de tensão para níveis de alimentação do sensor, além de um filtro passa-baixa de primeira ordem, do tipo RC, na saída de sinal do sensor, seguindo recomendações do próprio fabricante.

O esquema completo do circuito desenvolvido é apresentado Figura 5.3.

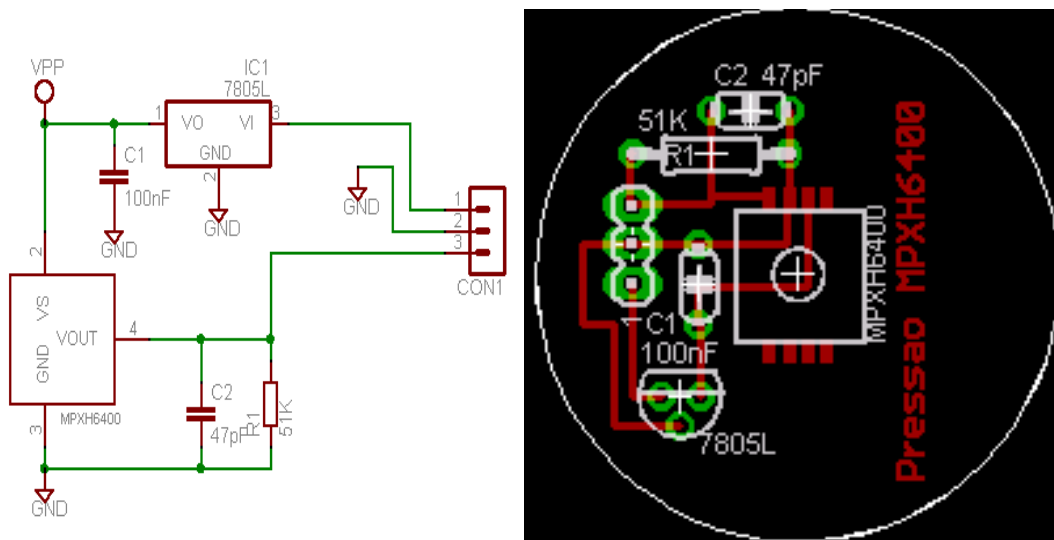


Figura 5.3. Circuito do Sensor de pressão MPXH6400

Uma placa de circuito impresso foi projetada e desenvolvida de forma a poder ser acondicionada no interior de uma cápsula feita com conexões de PVC, com uma forma circular, como pode ser visto na Figura 5.4.

A placa do sensor de pressão foi montada no interior da cápsula de PVC para evitar o contato desta com a água, criando um ambiente protegido. A conexão do sensor com o meio aquático, para a medida de pressão, é feita por uma mangueira utilizando o princípio dos vasos comunicantes. Para uma maior proteção do sensor, o dispositivo deve ser utilizado apenas na posição vertical, mantendo sempre a saída da mangueira na parte inferior da cápsula. Neste arranjo, uma bolsa de ar é formada entre o sensor e a água, evitando assim que o sensor entre em contato direto com o meio líquido, mas permitindo a medida da pressão hidrostática.

Foi utilizado um misto de conexões para tubos de PVC soldáveis (parte inferior) e roscáveis (parte superior). Este arranjo provê uma ótima vedação, já que a maioria das partes encontra-se soldada. No entanto, a conexão roscável na parte superior permite acesso para manutenção deste circuito.

5.2 SENSOR DE ACELERAÇÃO

Sistemas avançados de controle veicular vêm exigindo um aumento no número de sensores inteligentes a fim de alcançar altos níveis de performance e confiabilidade. Figuram como uma das mais importantes classes de sensores para este tipo de sistemas inteligentes, os acelerômetros (WU; WANG; GE, 2002). Para a medida da posição, velocidade e aceleração linear de veículos inteligentes, a solução largamente difundida é o uso de três acelerômetros dispostos ortogonalmente entre si.

Utilizando a informação da aceleração nos três eixos coordenados é possível, a partir da integral dos valores de variação da velocidade no tempo, obter as informações da velocidade e da posição linear do veículo. Diversas soluções de sensores de aceleração existem no mercado. Neste desenvolvimento foi utilizado o MMA7261, fabricado pela Freescale (DATA, 2007). Este dispositivo foi escolhido por possuir fundo de escala adequado e ser um acelerômetro tridimensional, ou seja, possui três elementos sensitivos dispostos ortogonalmente em encapsulamento único.

O MMA7261QT é um dispositivo constituído internamente por duas células capacitivas de sensoriamento, montadas numa superfície micro-usinada (células g) e um circuito de condicionamento de sinal, contidos em um único circuito integrado. Algumas características deste dispositivo são: faixa de medida selecionável 2,5 g / 3,3 g / 6,7 g / 10 g, tensão de alimentação de 2,2 a 3,6 V, consumo de corrente médio de $500\mu A/CC$, e faixa típica do sinal de saída de 0,45 a 2,85 V (para uma alimentação de 3,3 V). A montagem final pode ser vista na Figura 5.4.

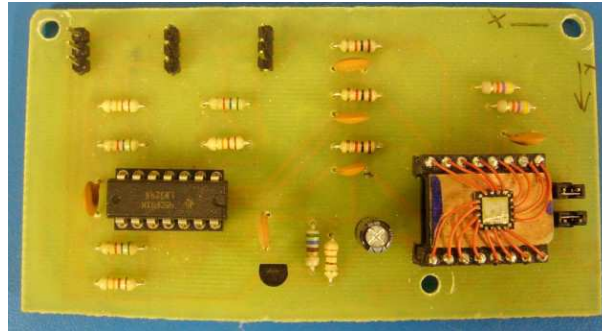


Figura 5.4. Placa de condicionamento de sinal do sensor de aceleração 3d.

5.2.1 Circuito de condicionamento de Sinal

O sinal do sensor de aceleração já possui um sistema interno de condicionamento, sendo necessário para o seu funcionamento somente um filtro do tipo RC, segundo recomendações do fabricante. No entanto, no padrão estabelecido para os sistemas de sensoriamento, o sinal de saída deveria estar dentro do intervalo entre 0 e 5V. Este requisito cria a necessidade do uso de um amplificador operacional para que o sinal de cada uma das saídas das células sensitivas fosse ajustado a essa faixa. O diagrama do circuito é apresentado na Figura 5.5.

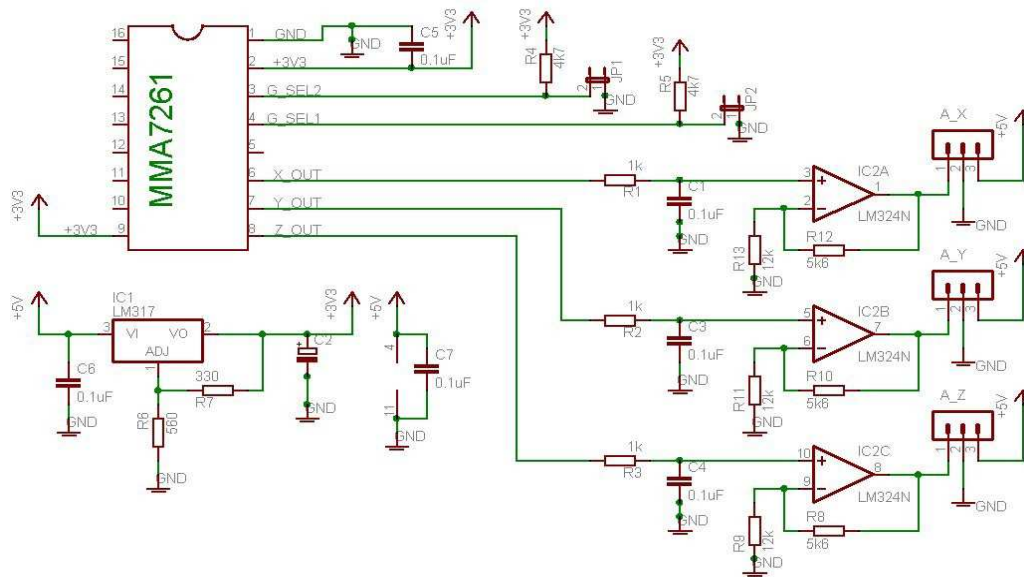


Figura 5.5. Circuito de condicionamento para o acelerômetro.

Neste mesmo circuito foram acrescentados um bloco de condicionamento da tensão de alimentação para a polarização do sensor e pinos de conexão para seleção do fundo de escala. O diagrama completo pode ser visto na Figura B.1. Para a aplicação em questão, o fundo de escala escolhido foi de 2,5 g.

5.3 BÚSSOLA ELETRÔNICA

Para fornecer a medida da inclinação de um veículo, diversas soluções têm sido utilizadas com sucesso, como é o caso de (FROST et al., 1996), que usa 3 giroscópios arranjados ortogonalmente nos eixos X, Y e Z, de forma que os sinais destes sensores representem os ângulos de rolagem, guinada e arfagem, ou ainda o caso de TROJAN (LIDDLE, 1986) que utilizou bússolas eletrônicas para medir estes ângulos.

Neste trabalho, estes ângulos foram obtidos pela medida do campo magnético terrestre. Isso foi feito com o uso de três sensores de campo magnético a 90° entre si. Hoje em dia, tal solução é possível graças à integração em alta escala de circuitos integrado com tecnologia VLSI, que permitem, além de circuitos em substrato de

silício, a incorporação de dispositivos micro-usinados. Este é o caso do HMC1022, de fabricação da Honeywell, que é capaz de medir as componentes do campo magnético nos eixos X e Y (HONEYWELL, 2000). O modelo HMC1001, do mesmo fabricante, pode ser usado para a eventual determinação da componente do campo magnético no eixo Z.

5.3.1 Os sensores HMC1022 e HMC1001

O HMC1022 e o HMC1001 são sensores magneto-resistivo que convertem campo magnético em uma tensão diferencial. Estes dispositivos são capazes de medir campos da ordem de $30 \mu\text{Gauss}$. Internamente estes elementos sensores são montados em uma ponte de Wheatstone de 4 elementos, alimentados por uma fonte de tensão simples, entre 0 e V_{cc} . Quando uma tensão entre 0 e 10 V é aplicada na entrada V_{bridge} , os sensores começam a medir a componente do campo magnético ambiente, ou o campo magnético aplicado sobre o eixo sensível. Estes dispositivos também possuem duas fitas magneticamente acopladas, integradas ao elemento sensível. Desta forma, é possível tanto eliminar um eventual campo residual (*magnetic Offset*), como proceder a operação de zeragem do dispositivo (*Set/Reset*). Essas fitas internas são de patente da Honeywell e eliminam a necessidade de bobinas externas em volta do dispositivo.

Quando o sensor é exposto a um campo magnético perturbador (muito intenso), a orientação dos elementos do sensor pode ser perdida, ou seja, estes ficam orientados aleatoriamente (Figura 5.6). Isto leva a uma perda na sensibilidade do dispositivo. Para garantir uma alta sensibilidade e repetitividade, o fabricante sugere um pulso de corrente no pino de *Set/Reset*, o que promoverá uma re-polarização do sensor. Um pico de corrente na direção contrária promoverá uma polarização na direção oposta. Segundo a Honeywell, o estado destes domínios magnéticos pode permanecer inalterado por anos, contanto que não ocorra uma grande perturbação do campo magnético próximo ao sensor.

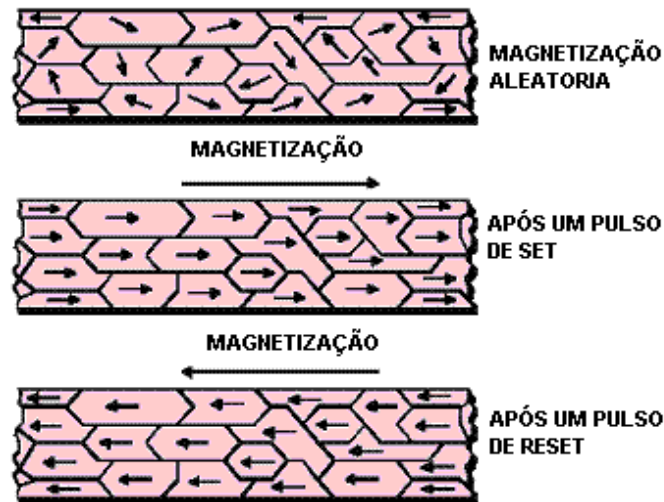


Figura 5.6. Magnetização após pulso de SET e RESET.

Na aplicação proposta para estes sensores, neste trabalho, bruscas variações de temperatura não ocorrem. E estes sensores, em princípio, também não serão expostos a campos magnéticos intensos. Então os pulsos de *Set/Reset* necessitam ser aplicados apenas ocasionalmente, ou seja, somente quando o circuito for ligado ou quando for necessária uma variação na sensibilidade do sensor.

5.3.2 Circuito de condicionamento de Sinal

As medidas de tensão dos sensores HMC1022 e HMC1001 são feitas diretamente nos terminais das pontes magneto resistivas. Estes sensores não possuem uma etapa de condicionamento de sinal interna. Faz-se então necessário o desenvolvimento de um circuito para o condicionamento dos sinais de saída destes dispositivos. O circuito de condicionamento fica também responsável em fornecer os pulsos de *Set/Reset* aos sensores, durante a etapa de energização das bússolas.

Seguindo recomendações da (HONEYWELL, 2000), foi acrescentado um circuito de *Set/Reset* (Figura 5.7) ao circuito projetado para o sensor de campo magnético.

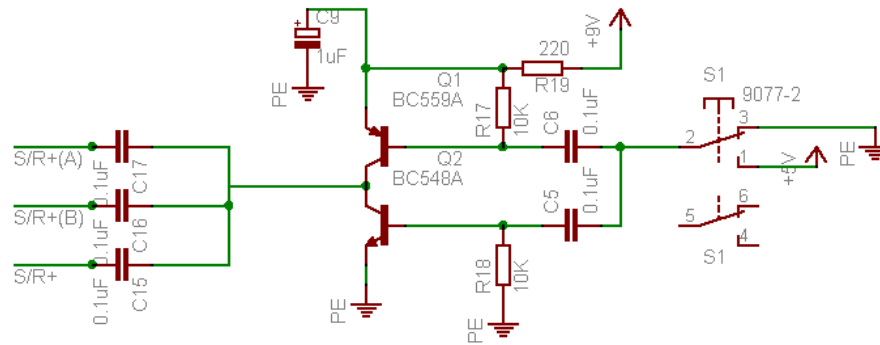


Figura 5.7. Circuito para pulso de SET e RESET.

Na Figura 5.7 as linha S/R+(A), S/R+(B) e S/R+ estão conectadas aos pinos de *Set/Reset* do HMC1022 e HMC1001 respectivamente. O circuito projetado gera um pulso de *Set/Reset* quando o circuito é ligado. Ao circuito também foi acrescentado um botão permitindo aplicação de pulsos de *Set/Reset* de forma manual.

O circuito desenvolvido para condicionamento de sinal foi baseado numa sugestão da HONEYWELL (2000). Uma das etapas para condicionamento de sinal das pontes magneto resistivas é apresentada na Figura 5.8. Um circuito como este foi conectado a cada uma das três pontes.

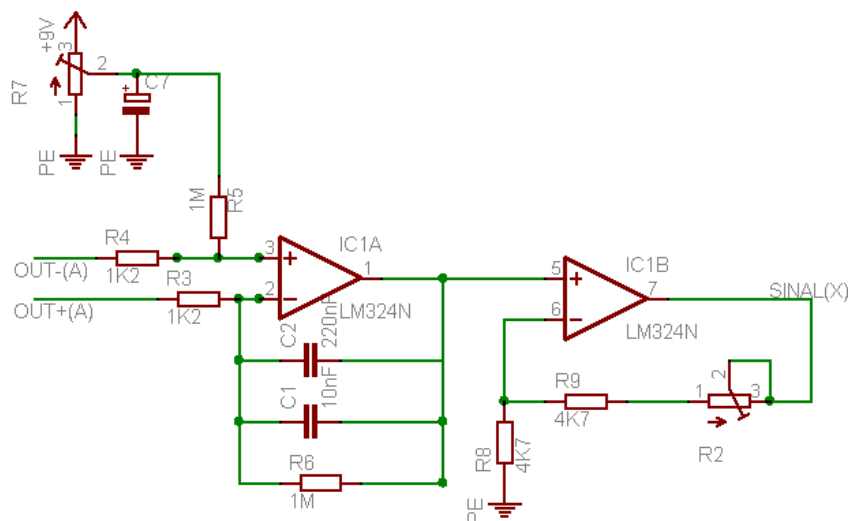


Figura 5.8. Circuito de condicionamento de sinal HMC1022/HMC1001.

No circuito Figura 5.8 as linhas OUT-(A) e OUT+(A) correspondem aos pinos de saída de sinal da ponte. Foram utilizados amplificadores LM324, que funcionam com alimentação simples, o que é interessante para o projeto, já que este será alimentado por uma bateria. O condicionamento de sinal foi projetado em dois blocos, o primeiro de filtragem e ganho e, o segundo, de ajuste de ganho.

No primeiro bloco foi utilizada uma montagem do tipo amplificador diferencial, onde o sinal de saída é a diferença entre o valor dos sinais de entrada multiplicada por um ganho. Neste amplificador foi acrescentado um integrador com uma constante de tempo de $9,6 \mu s$ para reduzir perturbações, ou seja, o ruído característico do processo de medida. Como a diferença entre os sinais de entrada pode assumir valores positivos e negativos, e o amplificador utilizado somente amplifica a parte positiva, o potenciômetro R_7 foi utilizado para fornecer um nível constante de tensão, a uma das entradas, de forma que quando as entradas forem iguais, o sinal de saída seja de 1,25 V. A igualdade dos sinais de entrada seria encontrada quando o sensor fosse posicionando a 90° do eixo magnético, o que não ocorre na prática. Além de estabelecer uma tensão mínima V_o de saída, o potenciômetro R_7 também foi utilizado para corrigir a tensão de *offset* devido às imperfeições do sensor.

Ao bloco de condicionamento seguinte coube apenas fornecer um ganho ajustável ao sinal. O ajuste individual do ganho foi importante, pois os elementos sensitivos não possuem a mesma sensibilidade. Este ajuste pode ser feito utilizando o potenciômetro R_2 , capaz de equalizar a sensibilidade dos 3 eixos. Na prática, este potenciômetro não foi montado, sendo o ajuste de sensibilidade feito digitalmente durante a calibração. O desenho completo do circuito de condicionamento de sinal pode ser encontrado na Figura B.2. A Figura 5.9 apresenta a versão da placa desenvolvida para a bússola eletrônica.

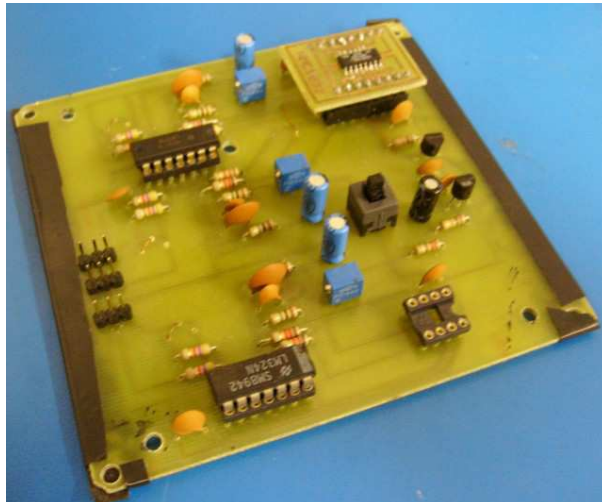


Figura 5.9. Placa de condicionamento de sinal da bússola eletrônica 3d.

O circuito desenvolvido para a medida de campo magnético, utilizando os sensores HMC1022 e HMC1001, foi projetado para ser alimentado com uma tensão contínua de 9 V e possuir um sinal de saída entre 0 e 5 V, sendo este sinal proporcional ao campo aplicado.

5.4 SISTEMA DE CONTROLE DE ENERGIA

Um bom sistema de fornecimento de energia elétrica para robôs móveis deve possuir algumas características importantes, como por exemplo: ser capaz de armazenar energia suficiente para que o veículo possa cumprir uma dada rotina de trabalho ou seqüência de tarefas, garantir o funcionamento, em alta performance, dos circuitos eletrônicos, fornecendo tensão constante e a corrente adequada para a demanda. Problemas de ruído produzido pelos dispositivos que compõem os demais circuitos não devem causar interferência mútua, ou seja, os diversos circuitos não devem interferir entre si.

5.4.1 Bateria

Para realizar sua missão o veículo, de algum modo, deve transportar a energia que será transformada em trabalho nos seus elementos de carga. Baterias são a solução mais comum para o problema de armazenamento de energia em robôs móveis. Uma bateria, quando solicitada, converte energia química em energia elétrica, que pode ser gradualmente utilizada. Este dispositivo de armazenamento também permite que este ciclo seja revertido, permitindo também que a bateria possa ser recarregada.

Uma bateria ideal para robôs móveis deve ter uma alta densidade de energia por unidade de massa e manter a tensão em seus bornes constante durante o ciclo de descarga. Ela também deve suportar extremos de temperatura, possuir um tempo de vida ilimitado, ter ciclo de recarga sem memória, ou histerese, e custo abordável. Na prática, nenhuma bateria possui todas estas qualidades.

Diversos tipos de baterias estão disponíveis no mercado, entre elas as mais populares são as do tipo chumbo-ácido, seguidas pelas mais modernas, como as de lítio, níquel-cádmio, prata-zinco e metal hidreto, capazes de armazenar maior quantidade de energia por unidade de massa, mas são muito mais caras que as de chumbo-ácido.

As características das baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio são muito parecidas. No entanto, fatores como preço, disponibilidade de fornecedor e manutenção, fazem das baterias de chumbo-ácido uma opção mais interessante.

Neste projeto foram utilizadas duas baterias do tipo chumbo-ácido, com tensão nominal de 12 V e capacidade de 7 Ah cada. Elas foram montadas em paralelo de maneira a dobrar a capacidade nominal de fornecimento de energia. Estas baterias são responsáveis tanto pela alimentação da eletrônica de controle e sensoriamento, quanto pelo fornecimento de potência para os motores.

5.4.2 Conversor DC/DC

Como as baterias utilizadas no projeto têm uma tensão nominal de 12 V, e a tensão de alimentação dos circuitos, controlador central e sensores, foi estabelecida em 9 V, fez-se necessário o desenvolvimento de um sistema de controle e regulação da tensão de alimentação. Outra razão para o desenvolvimento desse circuito de regulação é o fato de que a tensão nos terminais da bateria varia em função do seu estado de carga, o que poderia interferir no funcionamento dos sensores e outros circuitos analógicos.

O circuito desenvolvido para condicionamento do sinal de alimentação, Figura 5.10, consiste em um regulador de tensão série de 12 V para 9 V.

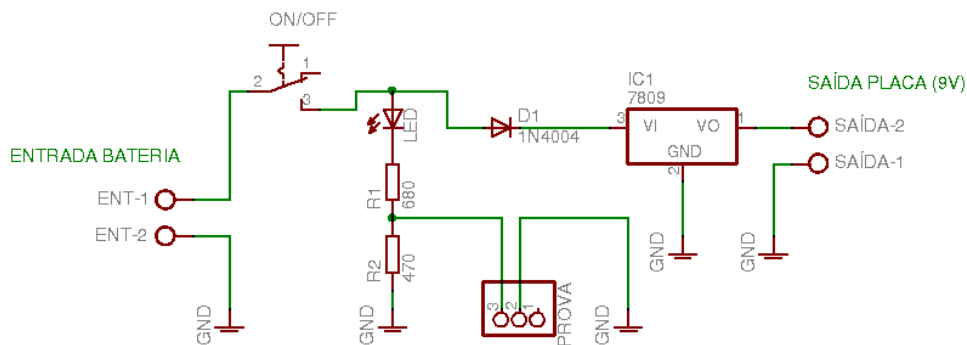


Figura 5.10. Circuito de condicionamento do sinal de alimentação.

A este circuito foi associado um divisor resistivo de tensão, permitindo a medida de um sinal de tensão entre 0 e 5 V proporcional à tensão da bateria. Este terminal de prova é utilizado para monitorar a tensão dos acumuladores.

5.4.3 Monitoramento de Carga da Bateria

Quando está operando em ciclo de descarga ou de fornecimento de potência, este tipo de bateria apresenta uma queda de tensão progressiva em seus bornes à medida que fornece corrente. Para uma boa durabilidade, e a possibilidade de ciclar a bateria entre carga e descarga, a tensão em seus bornes não deve cair abaixo de 11,7 V, e este

é o ponto crítico para o ciclo de descarga desse tipo de acumulador. Esta característica de queda de tensão com o tempo, foi utilizada como parâmetro de monitoramento do estado de carga da bateria continuamente. Foi estabelecido que 11,8 V seria a tensão mínima de operação dos acumuladores. Como consequência, o estado de carga das baterias utilizadas neste projeto é determinado dentro dos seguintes limites: tensão da bateria igual ou superior a 12,5 V significa 100% de carga, enquanto uma tensão da bateria de 11,8 V, significa 0% de carga disponível para a operação do ROV.

5.5 CONTROLADOR DOS MOTORES

O controlador central desenvolvido não é capaz de fornecer correntes elevadas (maior que 15 cargas TTL), ou seja, ele não é capaz de controlar diretamente os motores. Este fato tras a necessidade do desenvolvimento de uma etapa de potência, capaz de fornecer energia aos motores, que apesar de serem do tipo CC, podem ter sua velocidade controlada por modulação de largura de pulso (PWM). Assim, a etapa de potência recebe os sinais de um gerador de modulação do tipo PWM, sendo que este sinal é sintetizado por uma rotina em código numérico, executada pela unidade central de controle (PIC). Este controlador é capaz de determinar o atuador, ou atuadores requeridos, o momento de sua atuação, a duração desta atuação, o sentido de giro de cada atuador, além de controlar a velocidade com a qual cada motor irá girar.

5.5.1 Placa de controle Ponte H

A forma mais comum de controle do sentido de giro de motores CC é o uso de uma ponte-H. De forma simplificada, uma ponte-H consiste em quatro chaves conectadas, duas a duas, ao par de terminais do motor. Pela alternância do chaveamento desses interruptores, são criadas as conexões entre os terminais do motor com os pólos positivo e negativo da fonte de alimentação, fazendo o motor girar na direção dos ponteiros do relógio, ou no sentido contrário.

Se, além disso, é feito o controle do tempo em que as chaves ficam ligadas, ou desligadas, é possível controlar a tensão média (por unidade de tempo) fornecida aos terminais do motor, possibilitando assim um controle contínuo e suave da sua velocidade de avanço ou de retrocesso do rotor. Na Figura 5.11, são apresentadas as possíveis combinações de uma ponte-H e seus efeitos sobre o movimento do motor.

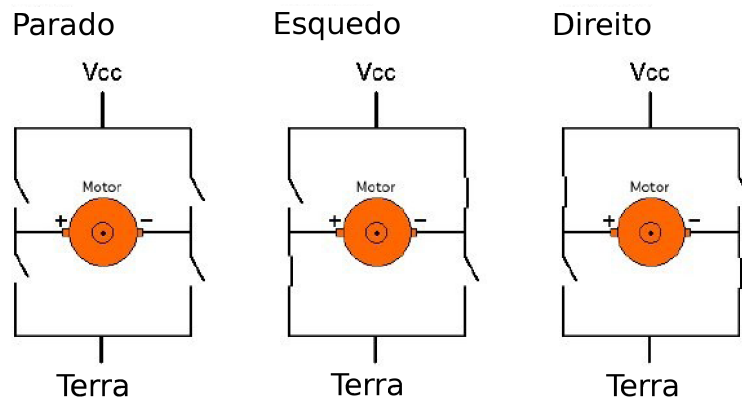


Figura 5.11. Modo de operação de uma ponte-H a) Parado b) Movimento Direto c) Movimento Reverso

O circuito desenvolvido para o controle de potência dos motores fez uso do circuito integrado L298, de fabricação STMicroelectronics. O L298 é um controlador duplo de ponte completa, capaz de atuar em regime de alta tensão, até 46 V, e alta corrente, até 4 A em corrente contínua. Este CI aceita níveis TTL em suas entradas, podendo ser aplicado no comando de carga indutivas (relês, solenóides, motores CC e motores de passo). Este circuito integrado possibilita o controle de até dois motores CC, fornecendo corrente de até 3 A (corrente de pico) a cada um deles. Em aplicações que requerem mais corrente, este dispositivo permite a conexão de seus terminais de saída em paralelo, o que permite, a partir de um único L298, controlar uma carga única com solicitação de até 6 A.

O circuito impresso (PCB) desenvolvido, que serve de suporte ao circuito de controle de potência, foi projetado de forma a permitir tanto o uso do L298 para o controle de dois atuadores, como para o controle de uma única carga de mais alto consumo. Nesse caso é feita a conexão em paralelo dos terminais de saída. O diagrama completo

da placa desenvolvida é apresentado na Figura B.4.

5.6 ATUADORES

A maioria dos ROVs comerciais utilizam turbinas como sistema de propulsão. Essas turbinas são compostas por um motor e um hélice. Esses motores podem ser elétricos ou hidráulicos. Em ROVs de pequeno porte, (FROST et al., 1996) e (LY-GOURAS, 1999), são utilizados usualmente motores de corrente contínua, que podem utilizar, ou não, escovas. Já em equipamentos de maior porte os motores normalmente utilizados são de corrente alternada, ou ainda os motores hidráulicos (LIDDLE, 1986).

Motores CC possuem dependência linear entre torque e velocidade angular, isso torna mais simples o controle de velocidade, se comparado com motores de corrente alternada. Este foi um dos fatores preponderantes na escolha do tipo de motor (motor CC) como o atuador controlado pelo sistema de navegação.

Apesar de este trabalho não ter por objetivo o projeto, o desenvolvimento e a montagem de um ROV, mas sim o desenvolvimento da instrumentação capaz de dirigir e controlar uma dessas unidades, certos dispositivos e plataformas (cápsula para acondicionamento da eletrônica, estrutura tubular para fixar os diversos elementos, sistema para passagem dos cabos), desenvolvidos durante o trabalho de teste, foram montadas de forma a calibrar e validar os sensores, os circuitos e o código desenvolvido. Sendo assim, o motor escolhido para a operação de movimentação horizontal, ascensão e descenso foi a bomba de porão para barco 1100 GPH (ou 4164 LPH), fabricada pela Rule. Esta bomba é composta por um motor que já possui um sistema de vedação e uma cabeça de sucção (bomba propriamente dita), este atuador é próprio para trabalhar submerso, opera com tensões de 12 V e correntes de 3,3 A. (RULE-INDUSTRIES, 2008). Ver Figura 5.12.



Figura 5.12. Bomba de porão RULE de 1100 GPH.

Para converter esta bomba em um propulsor do tipo turbina foi necessário desmontar a cabeça de sucção e adaptar um hélice ao eixo do motor, o hélice foi em seguida montado dentro da carenagem de venoconstricção e direcionamento de fluxo para obter o efeito turbina (Figura 5.13).

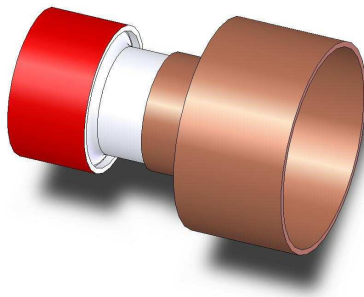


Figura 5.13. Modelo proposto para a turbina.

5.7 ESTRUTURA MECÂNICA

Para avaliar o conjunto eletrônico desenvolvido, em ambiente sub-aquático, foi necessário o desenvolvimento de alguns elementos mecânicos. Foi desenvolvida uma cápsula estanque para acomodar a eletrônica e uma estrutura para servir tanto como ponto de fixação para a cápsula, como para o sensor de pressão.

A cápsula estanque foi desenvolvida utilizando conexões de PVC, como apresentado

na Figura 5.14. Foi utilizado um “prolongamento” para tubulação de 150 mm e, nas extremidades deste, foram colados dois “Porta-grelha quadrados”. Para vedar o sistema foi utilizada uma borracha e uma placa de alumínio de 4 mm, parafusadas ao “Porta-grelha”. Para permitir a passagem dos fios foram utilizadas conexões roscáveis para mangueira.

Foram montadas duas cápsulas. Em cada uma delas foi acomodada uma das baterias, sendo que em uma delas foi instalado o sistema de aquisição e na outra as unidades de potência para os motores.



Figura 5.14. Cápsula estanque.

A estrutura foi montada utilizando conexões de PVC de 25 mm num arranjo como

5.8 CÂMERA DE VÍDEO

apresentado na Figura 5.15. A montagem final possui as seguintes dimensões: 0,53 m de comprimento, 0,31 m de largura e 0,31 m de altura.



Figura 5.15. Estrutura do ROV.

Esta estrutura permite a fixação das cápsulas, do sensor de pressão, da câmera e de possíveis atuadores.

5.8 CÂMERA DE VÍDEO

O sensor de imagem é um dos sistemas de sensoriamento mais importantes para a navegação do submersível. Diversos sensores de imagem - câmeras - estão disponíveis no mercado. ROVs costumam utilizar câmeras do tipo CCD, que possuam iluminação mínima requerida de 3LUX (FROST et al., 1996).

Foi realizada uma pesquisa de mercado à procura de um dispositivo comercial que apresentasse uma boa resolução, sensibilidade e baixo custo. Mostrou-se, como uma alternativa interessante para este dispositivo, a minicâmera CCD da Multitoc (Figura 5.16). Trata-se de uma câmera CCD com sensor de 1/4", sensibilidade de 0,5 LUX e padrão de imagem NTSC.



Figura 5.16. Minicamera CCD da Multitoc.

Um cabo leva a imagem da câmera diretamente à estação de controle. Esta imagem será então digitalizada por uma placa de captura de vídeo para um possível registro da missão.

CALIBRAÇÃO, TESTES E MEDIDAS

Para comprovar o funcionamento adequado das diferentes partes do sistema, alguns testes foram realizados. Estes experimentos visaram garantir que os diversos sensores, e a instrumentação a eles dedicada, apresentassem um perfeito funcionamento tanto individualmente quanto em grupo. Os testes de avaliação também foram estendidos ao cabo utilizado como linha transmissão.

6.1 LINHA DE TRANSMISSÃO

Uma linha de transmissão pode ser caracterizada como uma associação de circuitos RLCG. Essa linha terá certa indutância por unidade de comprimento - L' ; capacitância por unidade de comprimento - C' ; resistência em série ao longo do cabo - R' ; e admitância por unidade de comprimento - G' . Em cabos de qualidade, R' e G' são pequenos, e o cabo é caracterizado por uma impedância dinâmica, dada por:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

A velocidade de propagação de sinais na linha pode ser escrita como,

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' * C'}}$$

Já em cabos de baixo custo, como é o caso, não é possível determinar tão claramente tais características, e normalmente, estes parâmetros não são sequer informados pelo fabricante. Isto torna indispensável um breve estudo das características deste condutor.

6.2 MEDIDA DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO E RESISTÊNCIA DE TERMINAÇÃO

A medida do atraso de propagação no cabo foi feita utilizando o sinal de saída de um gerador de função, que tem uma impedância de saída de 50 Ohm, o MFG-4201 (da Minipa). O sinal na saída do gerador foi bifurcado, usando um “T” BNC. Um cabo curto, com aproximadamente 1 m, levou o sinal ao canal 2 de um Osciloscópio Digital, o DSO3202A da (Agilent Technologies). O outro lado da bifurcação foi conectado ao canal 1 do mesmo osciloscópio através da linha de transmissão - um cabo coaxial de áudio balanceado de baixo custo com 30 m. O sinal deste gerador também foi utilizado como sinal de sincronismo (*trigger*) para o osciloscópio. O diagrama da montagem é apresentado na Figura 6.1.

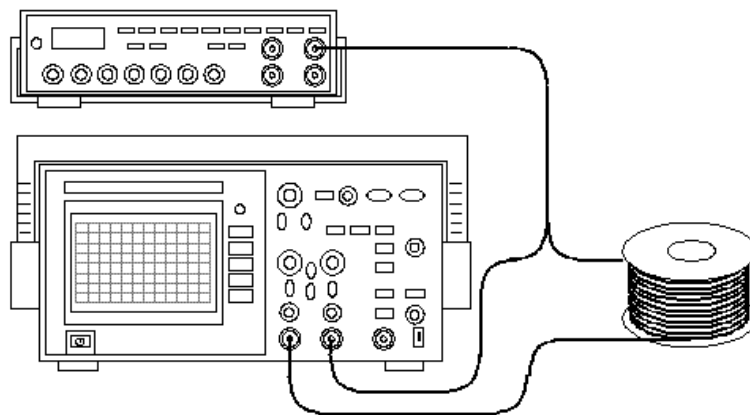


Figura 6.1. Montagem inicial para medição do atraso da linha de transmissão.

A montagem feita, como apresentada na Figura 6.1, não teve o resultado esperado. O gerador de sinal utilizado não foi capaz de gerar um pulso estreito o suficiente para que fosse possível observar claramente a onda refletida. Esta deficiência do gerador criou a necessidade do desenvolvimento de um circuito auxiliar, capaz de transformar uma onda quadrada em um pulso retangular estreito.

Foi então montado um circuito como o apresentado na Figura 6.2. O sinal de pulsos foi bifurcado, uma das linhas conecta-se diretamente a uma porta lógica *AND*, enquanto a outra passa por 5 portas lógicas *NOT* e uma *AND*. Cada porta *NOT* gera

6.2 MEDIDA DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO E RESISTÊNCIA DE TERMINAÇÃO

um atraso de aproximadamente 20 ns no sinal de saída do gerador. O conjunto das 5 porta *NOT* propuz um sinal negado em relação ao sinal de entrada, 100 ns atrasado com relação a este. Já a porta lógica *AND*, com uma das entradas em estado lógico 1, atrasa este sinal em mais 50 ns.

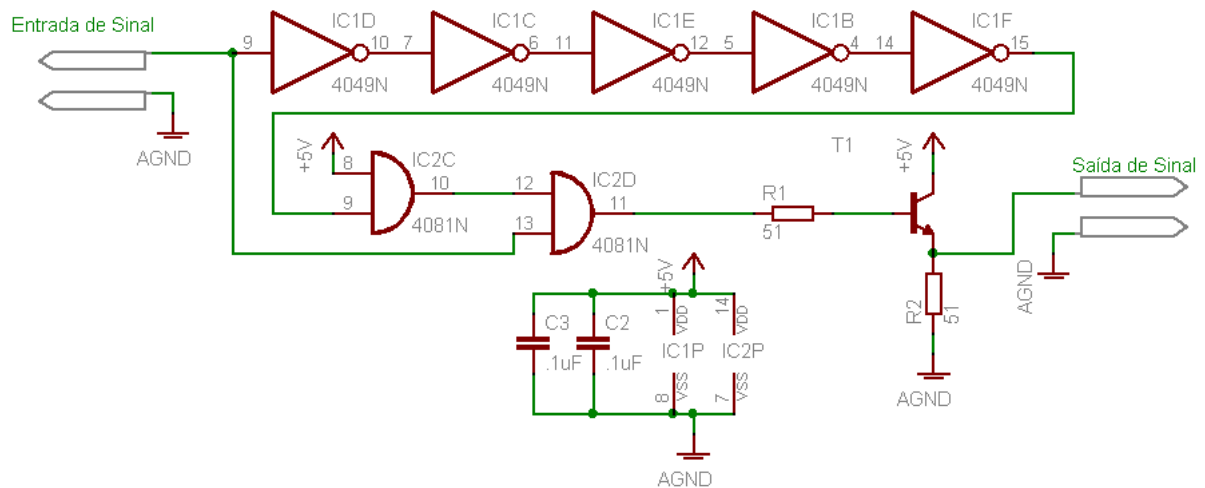


Figura 6.2. Diagrama do Circuito gerador de Pulsos.

Após passar pela série de portas lógicas, o sinal é atrasado 150 ns e invertido em relação ao sinal de entrada. A última porta *AND* tem como entradas o sinal de entrada original e o sinal atrasado. Na transição positiva do sinal do gerador a saída da cascata permanecerá por 150 ns em nível lógico alto. Durante este curto período o circuito cria em sua saída um pulso positivo, de largura igual ao atraso das portas. Fora deste intervalo o sinal permanece em nível lógico zero.

Para fornecer corrente ao sistema investigado, e manter uma baixa impedância de saída, foi utilizado um transistor 2N2222 como estágio de saída da fonte de corrente. A nova montagem é apresentada na Figura 6.3, onde o circuito conversor de pulsos aparece logo antes da bifurcação do cabo.

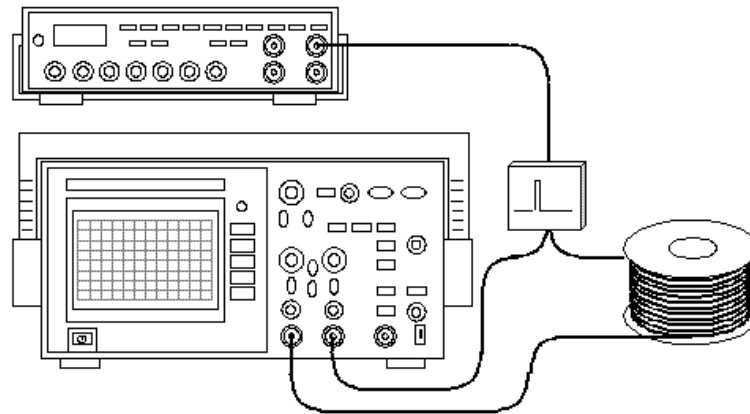


Figura 6.3. Montagem final para medição do atraso da linha de transmissão.

O pulso, já condicionado, foi aplicado à linha de transmissão sem terminação. O sinal no final dessa linha pode ser visualizado na Figura 6.4, tendo como características 5,8 V de amplitude e aproximadamente 150 ns de largura. É possível observar a presença de um segundo pulso logo após o primeiro. Este pulso secundário é a parte refletida pela linha de transmissão.

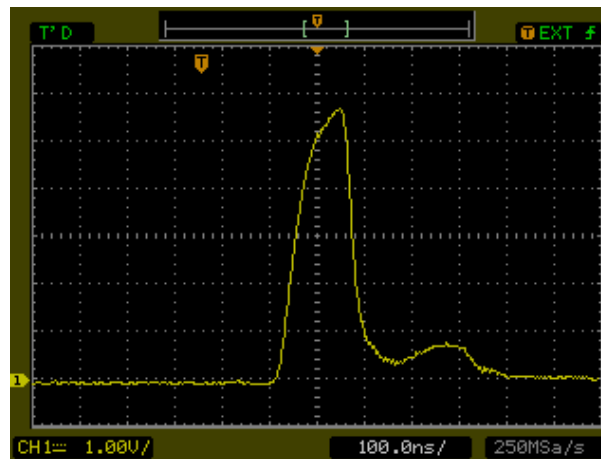


Figura 6.4. Pulso na linha de transmissão sem resistor de terminação.

Para atenuar a onda refletida foi utilizada uma terminação do tipo resistiva, posicionada em paralelo com o conector na entrada do osciloscópio. Como não é conhecida a impedância do cabo utilizado, foram testados alguns valores de resistência de terminação. A menor reflexão foi obtida para um resistor de 51Ω . Esta medida é

apresentada na Figura 6.5, um pulso de 2,9 V de amplitude e aproximadamente 150 ns de largura. Para este valor de terminação, a amplitude do sinal no cabo corresponde à metade da amplitude do sinal sem terminação. A amplitude observada sugere uma associação de dois resistores de mesmo valor em série, uma indicação do correto ajuste do resistor de terminação.

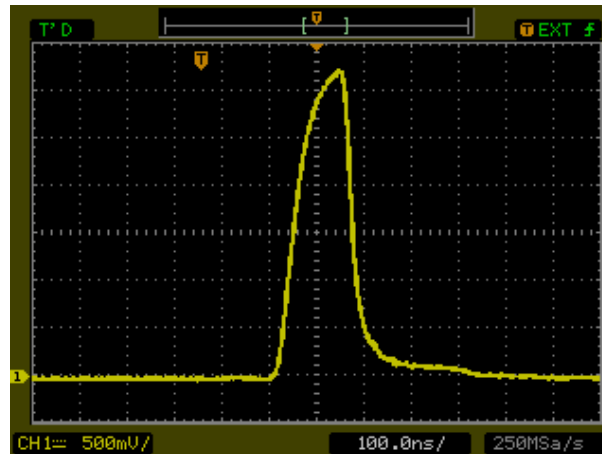


Figura 6.5. Pulso na linha de transmissão com resistor de terminação.

Este sinal pode então ser comparado ao sinal transmitido pelo cabo curto. A comparação entre estes sinais é apresentada na Figura 6.6, onde o sinal em amarelo representa o sinal que atravessou a linha de transmissão e o sinal em verde é aquele que atravessou o cabo curto. O valor encontrado para o atraso devido à linha de transmissão é de 130 ns.

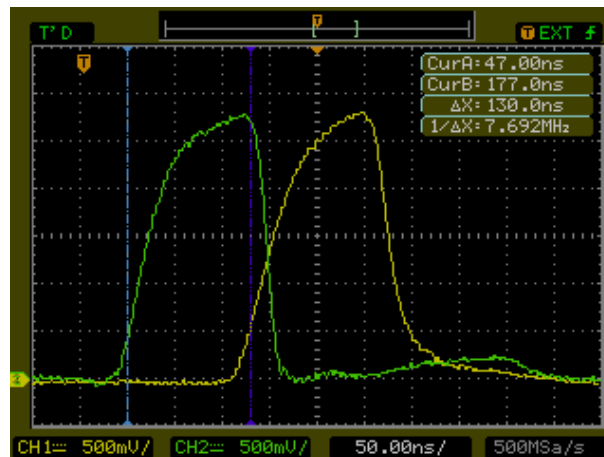


Figura 6.6. Comparação entre o sinal transmitido pelo cabo curto e a linha de transmissão com terminação.

Para determinar a velocidade de propagação da linha, basta dividir o atraso de propagação da luz, no vácuo, na distância de 30 m (comprimento do cabo) pelo atraso encontrado para a linha de transmissão:

$$V(\%) = [(30m / (300 * 10^6 m/s)) / 130nS] * 100\%$$

$$V(\%) = [100nS / 130nS] * 100\%$$

$$V(\%) = 76,9\%$$

Tem-se então uma impedância Z para a linha de transmissão de 51Ω , e uma velocidade de propagação de 76,9% da velocidade da luz. Apesar de ter sido utilizado um cabo de baixo custo onde os parâmetros não são fornecidos pelo fabricante, estes puderam ser medidos. Os parâmetros encontrados caracterizam uma boa linha de transmissão.

6.3 SENSOR DE PROFUNDIDADE

O sensor utilizado para medida de profundidade, o MPXH6400A, possui uma sensibilidade de 12 mV/kPa. Utilizando a sensibilidade fornecida pelo fabricante, é possível escrever uma função que relaciona pressão e tensão. No entanto, trata-se de um valor médio de sensibilidade para um lote. Para que os sinais de tensão fornecidos

pelo sensor utilizado possam ser melhor relacionados à pressão hidrostática, de uma dada coluna d'água, faz-se necessária a sua calibração.

Na calibração do sensor de pressão foi utilizada uma seringa de 60 ml, conectada a mangueira de medida do sensor. Este instrumento foi utilizado para criar uma variação controlada de pressão sobre o sensor.

A seringa foi preenchida com aproximadamente dez mililitros de água. E este nível foi utilizado para fazer a leitura do volume de ar restante no interior da seringa. Inicialmente existiam, dentro da seringa, 50 ml de ar. O êmbolo da seringa foi então pressionado por passos de 2 ml, até que o volume final chegou a 12 ml. Ao mesmo tempo foi feita a leitura do sinal de tensão fornecido pelo sensor de pressão a cada passo. Como a mangueira do sensor possui um volume não desprezível, este foi calculado. O valor encontrado foi de 3,14 ml.

Considerando que não houve variação de temperatura durante as medidas, e o ar como sendo um gás perfeito, pode-se usar a seguinte equação para relacionar o volume de ar no conjunto seringa e mangueira e a pressão exercida pelo embolo.

$$P_2 = V_1 V_2 P_1 \quad (6.1)$$

Nesta equação 6.1, V_1 é o volume inicial de ar contido do conjunto seringa e mangueira, 53,14ml. Já P_1 , é a pressão inicial no interior da seringa, 101,33 kPa, uma vez que no início do processo, tanto o ar no interior da seringa, quanto o ar na mangueira estavam à pressão ambiente. O volume V_2 corresponde aos volumes de ar a cada passo de pressionamento do êmbolo.

É apresentado da Tabela 6.1 o volume interno de ar no conjunto seringa-mangueira, os valores de tensão lidos na saída do sensor, e a pressão interna calculada para o conjunto seringa-mangueira.

Tabela 6.1. Dados para a calibração do sensor de pressão.

Vol. (Seringa + vol. Mangueira) (ml)	Medida (contagens)	Pressão (kPa)
53,14	253	101,33
51,14	263	105,38
49,14	275	109,43
47,14	287	114,50
45,14	298	119,56
43,14	312	124,63
41,14	328	130,71
39,14	345	137,80
37,14	364	144,89
35,14	384	153,00
33,14	407	162,12
31,14	435	173,27
29,14	465	184,41
27,14	500	198,60
25,14	539	213,80
23,14	587	233,05
21,14	645	254,33
19,14	718	281,68

O próximo passo na calibração do sensor de pressão é analisar os resultados das medidas, usando a equação que relaciona pressão, em unidades de kPa, e as contagens do ADC que compõem o sistema de aquisição de dados. Para tanto, foi traçado um gráfico, Figura 6.7, da pressão calculada a partir da medida do volume comprimido versus a pressão medida pelo sistema de aquisição do sinal do sensor.

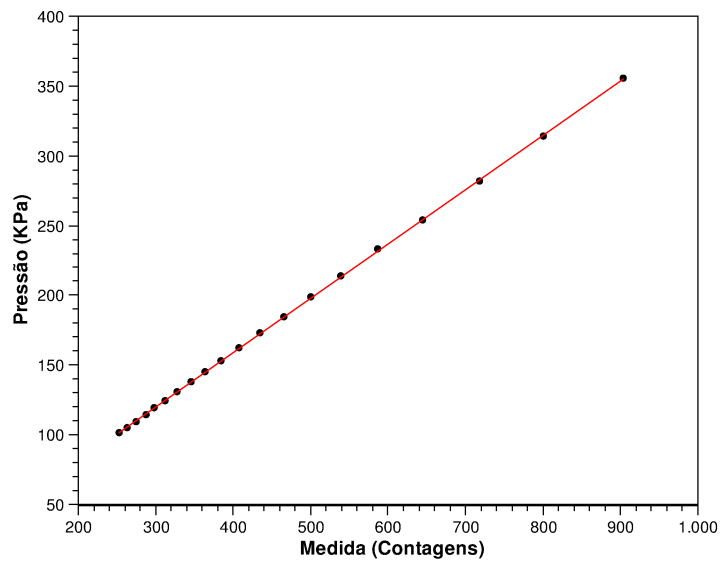


Figura 6.7. Gráfico da medida de calibração do sensor de pressão.

A Equação 6.2 foi ajustada numericamente para correlacionar essas duas grandezas.

$$P_{kPa} = (3,0 \pm 0,4)P_{contagem} + (0,3900 \pm 0,0007) \quad (6.2)$$

Para transformar as medidas de pressão em profundidade (m), é necessário inicialmente converter o valor de pressão de kPa para mca. Observando que o sensor ao nível do mar está submetido a 101,325 kPa, então para a medida de profundidade é necessário subtrair uma atmosfera do sinal lido. Esta transformação pode ser feita usando a Equação 6.3.

$$P_{profundidade} = 0,10197838 * (P_{kPa} - 101.325) \quad (6.3)$$

A partir da equação 6.3, é possível determinar a sensibilidade do sistema de medida de profundidade, que é 0,04 m.

6.4 SENSOR DE ACELERAÇÃO

Tradicionalmente, a calibração dos sistemas de medida de aceleração é feita em plataformas mecânicas. Neste método, o sensor é exposto a diferentes acelerações, que devem ser precisamente conhecidas. Para tanto, se usa controla-se as orientações da montagem do sensor (eixos coordenados) na plataforma de teste, o sentido e a velocidade dos atuadores que compõem a mesma (SKOG; HÄNDEL, 2006). Empregar tal metodologia agregaria um alto custo ao projeto. A metodologia de calibração adotada neste trabalho baseia-se no método descrito por (FILARDI, 2006). Neste caso, são feitas medidas segundo cada um dos eixos (x, y e z) permutados por rotação em relação ao campo gravitacional, tanto no mesmo sentido da gravidade, quanto no sentido contrário.

Neste trabalho foram incluídas mais quatro posições de medida para cada um dos eixos, duas perpendiculares ao eixo gravitacional e duas a 45° em relação a esta direção, em ambos os sentidos, como na Figura 6.8. Foram feitas 100 medidas para cada uma dessas posições e foi extraído o valor médio da aceleração. Ao todo foram determinados seis pontos experimentais para cada um dos eixos (x, y e z). Na Tabela 6.2 são apresentados os valores médios encontrados.

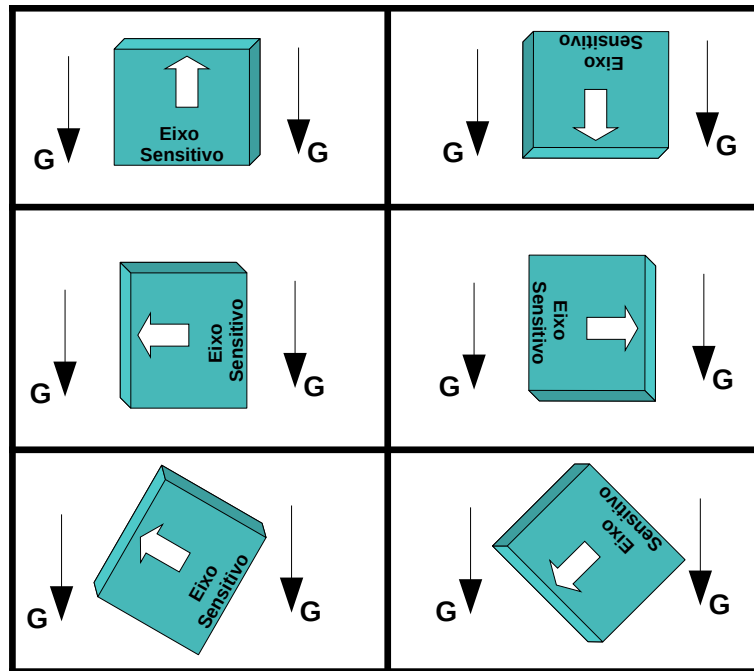


Figura 6.8. Posições de medida para calibração do acelerômetro.

A mesma tabela são apresentados os valores esperados para a aceleração gravitacional. Estes são designados desta forma por se tratarem de valores teóricos, para um sensor ideal.

Tabela 6.2. Valores Médios de Calibração dos Acelerômetros.

Orientação	Medida (G)	Eixo Z	Eixo Y	Eixo X
0°	1	686±1	431±1	359±1
45°	0.5	644±1	447±1	390±2
90°	0	520±1	585±1	543±1
90°	0	530±1	590±1	531±1
135°	-0.5	415±1	697±1	662±2
180°	-1	369±1	743±1	715±1

Foi a partir das medidas, ajustada uma função que correlaciona o valor esperado ao valor médio encontrado em cada uma das orientações, usando para tanto o ajuste de uma função linear. Nas Figura 6.9, Figura 6.10 e Figura 6.10, são apresentados os gráficos para os ajustes nos 3 eixos.

6.4 SENSOR DE ACELERAÇÃO

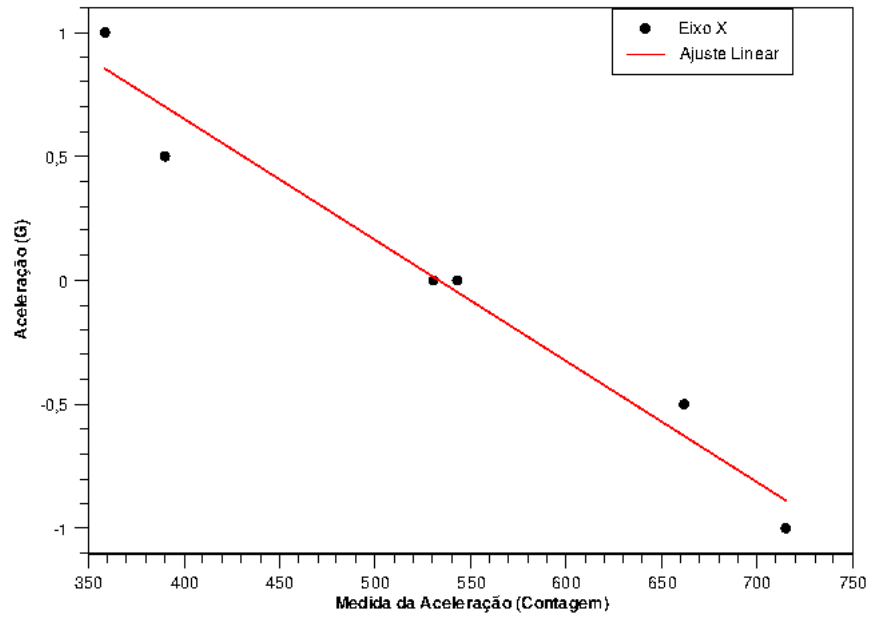


Figura 6.9. Ajuste linear dos pontos para o eixo X.

Os parâmetros encontrados no ajuste linear são para uma equação do tipo $X = A \cdot c + B$, onde $A = -0,0049 \pm 0,0006$; $B = 2,6 \pm 3$; $R^2 = 0,96$.

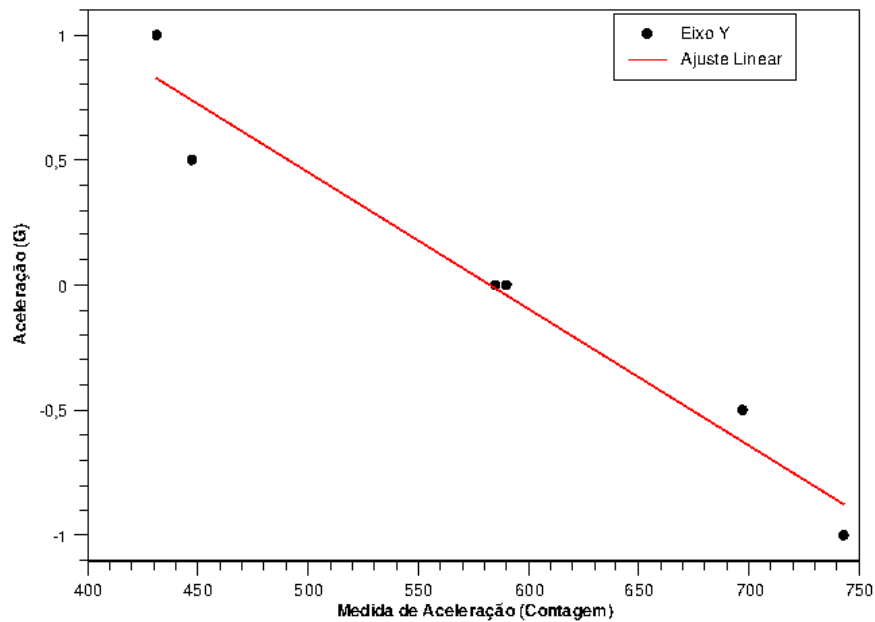


Figura 6.10. Ajuste linear dos pontos para o eixo Y.

6.4 SENSOR DE ACELERAÇÃO

Os parâmetros encontrados no ajuste linear são para uma equação do tipo $Y = A \cdot c + B$, onde $A = -0,0055 \pm 0,0006$; $B = 3,2 \pm 0,4$; $R^2 = 0,95$.

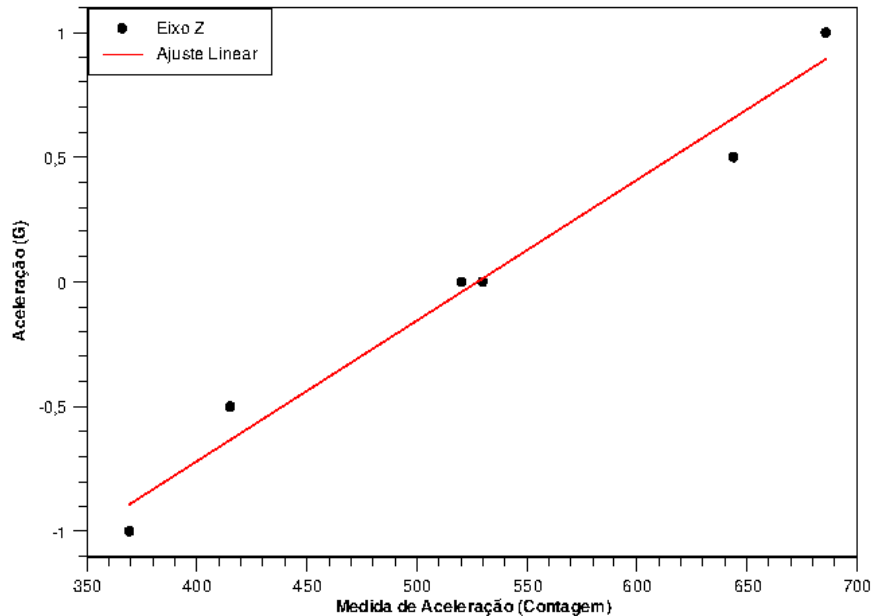


Figura 6.11. Ajuste linear dos pontos para o eixo Z.

Os parâmetros encontrados no ajuste linear são para uma equação do tipo $Z = A \cdot c + B$, onde $A = 0,0056 \pm 0,0005$; $B = 3,0 \pm 0,3$; $R^2 = 0,97$.

Para avaliar o desempenho da tríade de acelerômetros, os sensores foram utilizados para medir o perfil de aceleração de um pêndulo simples. O pêndulo possui um comprimento de 3,63 m e amplitude inicial de 0,07 m. O valor encontrado para o perfil de aceleração foi comparado ao perfil teórico do pêndulo simples. Os resultados desta medida podem ser observados na Figura 6.12.

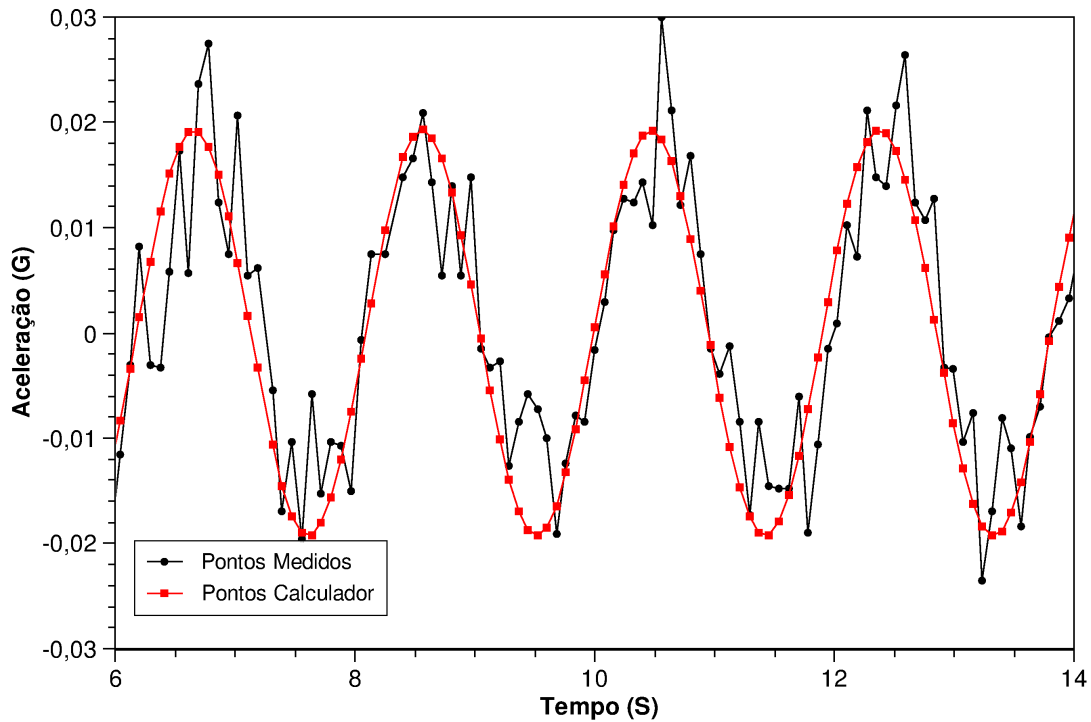


Figura 6.12. Teste da Unidade de Medida de Aceleração.

O valor encontrado para a variância na diferença entre o valor teórico o experimental foi de $1,46 * 10^{-4}$ o que demonstra ótima concordância com o modelo teórico. A unidade comprovou um bom funcionamento mesmo para faixas de aceleração da ordem de 0,03 g.

6.5 BÚSSOLA ELETRÔNICA

O HMC1022 é um sensor magneto resistivo que converte o campo magnético sobre seu eixo sensível em um sinal de tensão. Este sensor possui dois eixos sensíveis ortogonais. Seus elementos sensíveis foram utilizados para medir o campo magnético terrestre a fim de construir uma bússola eletrônica. Para que os sinais medidos por este sistema possam ser utilizados, é necessária a calibração do sistema.

Para a calibração do sensor de campo magnético, foi traçado um círculo dividido

em 16 partes igualmente espaçadas, com separação de 22.5° , ver Figura 6.13. No centro deste círculo foi posicionada uma bússola convencional. O círculo traçado foi então colocado de tal forma que uma de suas medianas estivesse alinhada com o norte magnético da bússola, e este ponto foi adotado como zero grau.

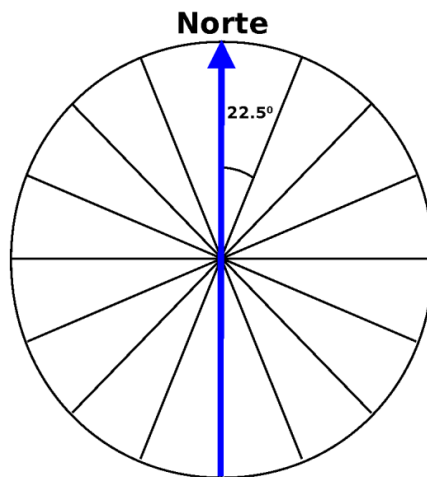


Figura 6.13. Círculo utilizado para calibração da bússola eletrônica.

O sistema de sensoriamento foi então alinhado paralelamente à reta zero grau, ficando paralelo ao eixo Y e perpendicular ao eixo X. Foram feitas as leituras dos sinais de campo magnético, medidos tanto para o eixo X quanto Y. Este procedimento foi reproduzido para as 16 retas, perfazendo os 360° do círculo. Os dados coletados podem ser visualizados no gráfico da Figura 6.14.

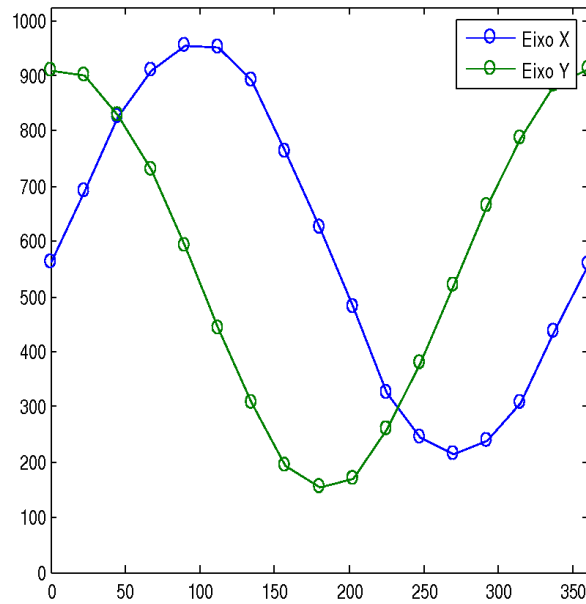


Figura 6.14. Gráfico de Calibração da Bússola Eletrônica.

Os dados foram tratados a fim de obter um perfil mais uniforme. Inicialmente, foi necessário retirar o *offset* da medida nos dois eixos. Isto foi feito tomando o menor valor medido para cada um dos eixos e subtraindo este de todos os pontos medidos. Os passos seguintes foram padronizar as amplitudes e normalizar os dados, operações feitas de forma que os dados passassem para o intervalo entre -1 e 1. Para isso foi tomado o maior valor para cada um dos eixos e os valores medidos foram divididos pela metade deste valor. O resultado da divisão é então subtraído de uma unidade, conforme a Equação 6.4.

$$Med_{xi} = \frac{Med_x(i)}{Max(Med_x)/2} - 1 \quad (6.4)$$

$Med_x(i)$ representa uma matriz de valores medidos e a função “Max” retorna o valor máximo encontrado nesta matriz. Os valores corrigidos podem ser visualizados no gráfico da Figura 6.15.

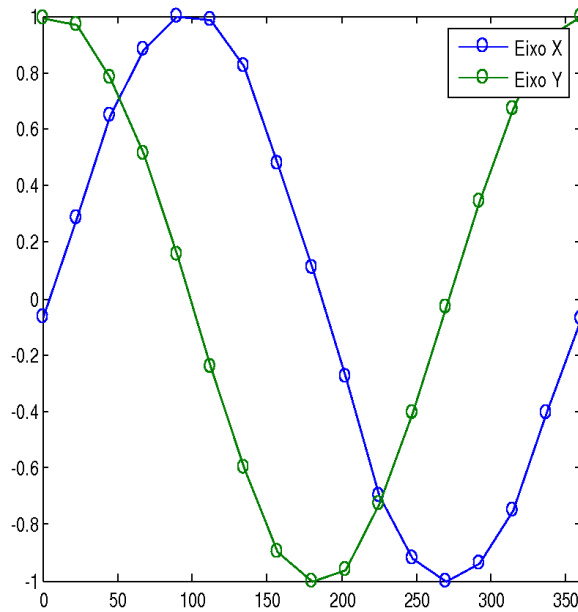


Figura 6.15. Gráfico de Calibração da Bússola Eletrônica, com dados ajustados.

Após as correções acima, os dados dos eixos X e Y do sensor podem ser apresentados num mesmo intervalo. Este tratamento torna possível o cálculo do ângulo existente entre o eixo Y (do sensor) e o norte magnético, utilizando os sinais de campo magnético medidos.

A fim de validar o método foram feitas novas medidas de campo magnético para ângulos entre 0 e 360°. O resultado destas medidas é apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Medidas de Validação do Sensor de Campo Magnético.

θ_{Med}	θ_{Calc}	$\Delta\theta$
0	-3,74	3,74
22,5	16,38	6,12
45	39,69	5,31
67,5	59,64	7,86
90	81,30	8,70
112,5	103,68	8,82
135	126,00	9,00
157,5	152,14	5,36
180	173,98	6,02
202,5	196,12	6,38
225	223,97	1,03
247,5	246,35	1,15
270	268,04	1,96
292,5	289,95	2,55
315	311,72	3,28
337,5	336,30	1,20
360	355,83	4,17

A coluna θ_{Calc} apresenta o ângulo calculado existente entre o eixo Y (do sensor) e o norte magnético, e a coluna θ_{Med} apresenta os ângulos verdadeiros usados no processo de calibração. A diferença entre θ_{Med} e θ_{Calc} , $\Delta\theta$, representa o desvio absoluto na medição do ângulo entre o eixo Y e o norte magnético. Os mesmos dados são apresentados no gráfico da Figura 6.16. Em preto os ângulos utilizados para medida e em vermelho os ângulos encontrados pelo sistema.

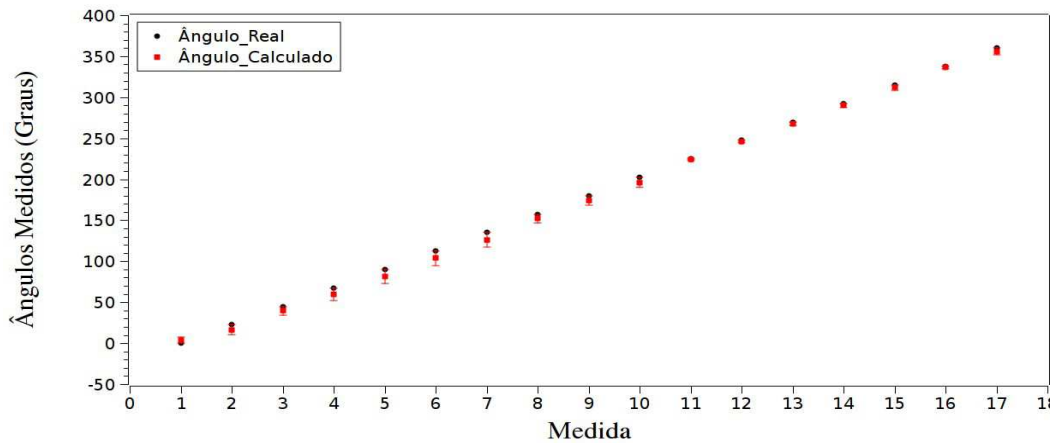


Figura 6.16. Teste da Bússola Eletrônica

Os valores calculados para o ângulo existente entre o eixo Y e o norte magnético, θ_{Calc} , medidos no intervalo de zero a 360° , foram comparado aos ângulos utilizados nas medidas, θ_{Med} . A diferença entre θ_{Med} e θ_{Calc} , $\Delta\theta$, foi apresentada como uma barra de erro na Figura 6.16, sendo que o erro máximo não ultrapassa 9 graus.

6.6 SISTEMA DE MEDIDA DE CARGA DA BATERIA

Como foram utilizadas baterias tipo chumbo-ácido, o início do ciclo de descarga deste tipo de bateria pode ser aproximada por uma reta. Conhecendo a curva de descarga destes acumuladores, é possível fazer uma melhor estimativa da carga nestes elementos.

Para avaliar o sistema de medida de carga da bateria foi simulado um procedimento de operação do veículo. Para esta operação, foi utilizado o controlador dos motores e a ele foi conectado uma carga resistiva de teste de $10,47 \Omega$. O sistema foi posto em operação e durante sua operação a tensão na bateria foi monitorada. A curva de descarga obtida é apresentada na Figura 6.17.

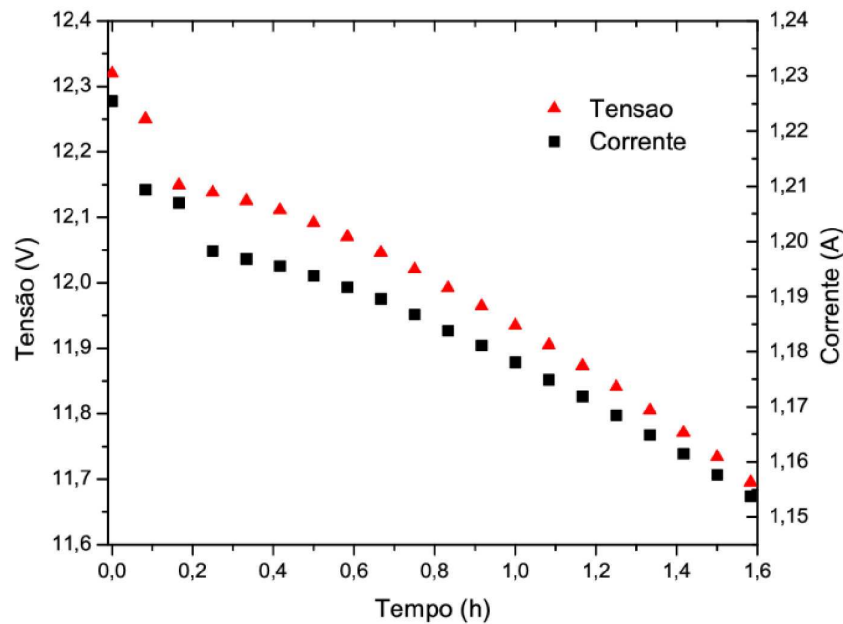


Figura 6.17. Curva de Descarga da Bateria.

É possível observar no gráfico de tensão, Figura 6.17 que na faixa de tensão entre 12 e 11,7 V, o gráfico apresenta um comportamento quase linear. Este comportamento comprova a coerência do método utilizado para a medida de carga da bateria, que propõe uma relação linear entre a carga e a tensão nos terminais.

6.6.1 Avaliação da Cápsula Estanque

O objetivo da cápsula estanque é proteger os elementos dos circuito elétricos e eletrônicos do meio sub-aquático. Para este propósito esta deve ser capaz de suportar pressões elevadas. Para avaliar esta capacidade, o volume foi submetido a uma pressão de aproximadamente 2,5 atm. Este teste foi realizado conectando a entrada por onde passam os cabos do ROV ao circuito hidráulico do Instituto de Física da UFBA, no nível térreo. Como o edifício possui 6 andares, cada um possui um pé-direito de aproximadamente 4 m, totalizando aproximadamente 24 m de coluna d'água. A Figura 6.18 apresenta um diagrama do arranjo utilizado para avaliação da capsula.

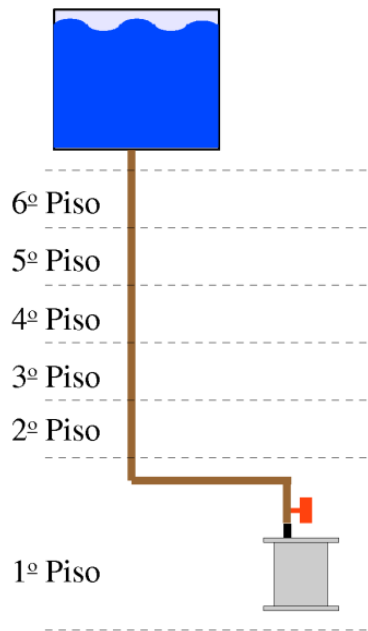


Figura 6.18. Avaliação da cápsula estanque.

Apesar de neste teste não ser possível alcançar a mesma faixa de pressões que serão alcançadas durante o mergulho, isto não significa que os testes não são válidos. Neste teste, a água exerce uma pressão de dentro para fora da cápsula, sendo sua tampa um ponto crítico, pois a água exerce uma força no sentido de abrir a tampa. Por outro lado, em ambiente aquático o que acontece é o oposto, a pressão exercida pela água tende a unir ainda mais as partes que compõem a tampa e o corpo da cápsula, o que permite supor que a cápsula suportaria a faixa pressões aqui proposta.

6.7 AVALIAÇÃO DO ARRANJO MECÂNICO

As diversas unidades de sensoriamento foram montadas num arranjo de placas impressas sobrepostas, utilizando um parafuso como espaçador e garantido a unidade do bloco. A este bloco eletrônico foi conectada uma das baterias, que desta forma constituí a unidade de sensoriamento, ver Figura 6.19.



Figura 6.19. Unidade eletrônica de sensoriamento para o ROV

Este bloco foi acondicionado em uma das cápsulas, enquanto que a outra bateria e os módulos de potência foram acomodados na outra cápsula, como é mostrado na Figura 6.20. Na cápsula à esquerda está acomodada a unidade de sensoriamento e na cápsula à direita a unidade de potência e a outra bateria. Este arranjo foi escolhido para separar a unidade de potência do circuito dos sensores. Na unidade de comando dos motores são dissipadas grandes quantidades de calor, o que não é desejável nas proximidades dos circuitos de condicionamento dos sensores.

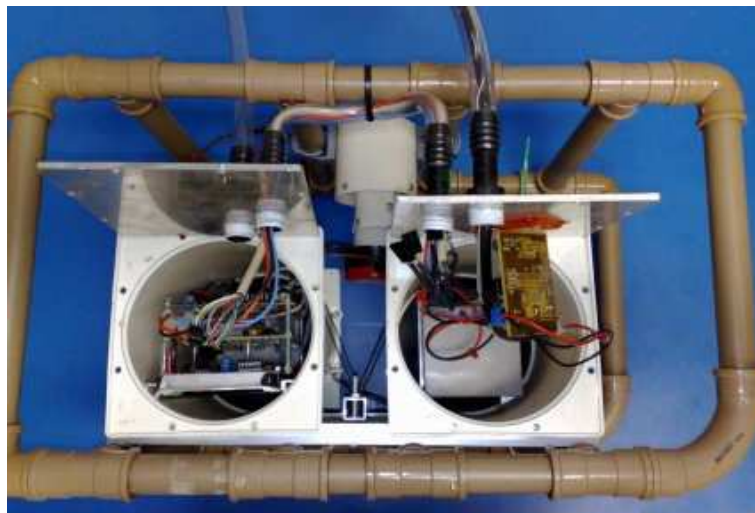


Figura 6.20. Cápsulas para acomodação das partes eletrônicas

Um outro fator que favoreceu o arranjo mecânico escolhido foi a possibilidade de

6.7 AVALIAÇÃO DO ARRANJO MECÂNICO

conectar a unidade de potência à placa de alumínio, utilizada como tampa para a cápsula, o que permite a dissipação de calor através dela.

Estas cápsulas foram fixadas à estrutura do veículo como apresentado na Figura 6.21.



Figura 6.21. Montagem final do ROV.

CONCLUSÕES

Os ROV constituem uma ferramenta importante no desenvolvimento de pesquisas em ambiente subaquático. O domínio da tecnologia de construção destes veículos permite uma melhor adaptação destes móveis aos interesse do pesquisador, possibilitando que o veículo disponha de um número adequado de entradas e saídas de sinais elétricos (canais de monitoramento), uma melhor adequação do sistema de aquisição aos sensores a serem utilizados, entre outras possibilidades de personalização. O desenvolvimento de ferramentas neste campo pode contribuir na pesquisa em diversas áreas, como: oceanografia, biologia, engenharia ambiental, etc.

7.1 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

As seguintes contribuições foram dadas por este trabalho.

- Foi construído um sistema eletrônico embarcado para gerenciamento de um ROV.
- Foi construída e calibrada uma unidade de medida de aceleração em 3 dimensões.
- Foi construída e calibrada uma bússola eletrônica, ou uma unidade de medida de campo magnético em 3 eixos ortogonais.
- Foi construído e calibrado um profundímetro, para profundidades de até 30 m.
- Foi construída e caracterizada uma unidade de potência para 2 motores CC, até 2 A, ou 1 motor de até 4 A.
- Foi desenvolvido um conversor do padrão RS-232 para o padrão RS-485.

- Foi desenvolvido um software de comunicação e controle para a unidade embarcada.
- Foi implementado o protocolo de comunicação MODBUS para o barramento RS-485.

7.2 DESFECHOS DESSE TRABALHO

Toda a eletrônica desenvolvida neste trabalho foi projetada de forma modular, de tal forma que os diversos elementos desenvolvidos possam ser reaproveitados em outros trabalhos. A seguir é feito um resumo conclusivo de cada um destes módulos.

7.2.1 Sistema eletrônico de comando do ROV

O sistema eletrônico embarcado desenvolvido para leitura dos sinais dos sensores, controle dos motores e comunicação, apresentou um funcionamento adequado e robusto. As entradas analógicas do sistema possuem uma boa taxa de aquisição (para a aplicação em questão), alta imunidade a ruído e alto grau de repetibilidade.

7.2.2 Conjunto de Sensores

Os módulos de sensoriamento desenvolvidos neste trabalho podem ser utilizados em aplicações envolvendo não somente ROV, mas qualquer robô móvel, ou melhor, qualquer sistema móvel em que sejam relevantes informações tais como: aceleração, velocidade, posição, profundidade e/ou orientação em relação ao campo magnético da Terra.

O sistema foi calibrado utilizando-se o campo gravitacional terrestre como referência. Para validar a calibração do sistema desenvolvido, este foi utilizado para medir a aceleração em um pendulo simples ou pêndulo matemático, os resultados me-

dados foram então comparados ao resultado dos cálculos usando o modelo teórico do pêndulo simples. Apesar do pêndulo utilizado possuir um perfil de acelerações de baixa magnitude, o sistema mostrou-se eficiente para acelerações da ordem de 0,03 g.

A bússola eletrônica desenvolvida foi capaz de medir a intensidade do campo magnético terrestre nos 3 eixos ortogonais. O sinal de saída para cada um dos eixos foi condicionado de forma a estar no intervalo entre 0 e 5 V. O sistema foi calibrado utilizando-se como referência um bússola convencional. Uma vez calibrado, foi possível determinar o ângulo entre o eixo principal da bússola eletrônica e o norte magnético terrestre. Foram realizados testes de repetibilidade a fim de comprovar a eficiência deste sensor. Com base nos testes obteve-se um erro máximo de 9° para as medidas de ângulo.

Para a medida de profundidade, um módulo de sensoriamento foi desenvolvido e acondicionado em uma cápsula de PVC a prova d'água, sendo capaz de medir profundidades de até 30 m. O sistema foi calibrado indiretamente, com a ajuda de uma seringa para uso médico.

Todos os módulos de sensoriamento desenvolvidos apresentaram bom funcionamento, mostrando-se capazes de operar tanto individualmente quanto em conjunto, fornecendo informações com alto grau de qualidade (máximo desvio absoluto avaliado para o conjunto dos sensores é inferior a 5%). Os resultados demonstram que a operação de um veículo baseada neste conjunto de sensores é segura.

7.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como o objetivo deste trabalho não era o desenvolvimento do robô como um todo, diversos outros elementos do projeto ainda necessitam ser desenvolvidos afim de se obter o submersível plenamente funcionando. Estes elementos são: o sistema de propulsão, a estrutura mecânica, o estudo da dinâmica do submersível, etc. Além de partes que ainda necessitam ser projetadas, algumas podem ser aprimoradas. Assim,

discute-se a seguir possíveis melhorias do sistema eletrônico embarcado, dos sensores e do sistema de comunicação.

7.3.1 Sistema eletrônico

O sistema eletrônico desenvolvido mostrou-se eficiente para a medida dos sinais dos sensores, controle dos motores e comunicação com a estação em seco. No entanto, apesar de ser possível a expansão do número de entradas analógicas utilizando-se mais placas de aquisição, o sistema se tornaria mais simples se a placa já possuísse um número maior de entradas analógicas, e, conversores analógico - digital com maior resolução.

Uma outra possibilidade para melhoria do sistema seria a investigação de outros microcontroladores, tanto da família PIC quanto de outras, uma vez que a cada ano são lançados novos dispositivos, com mais periféricos agregados e maior desempenho. Por exemplo, um microcontrolador que já possua internamente a eletrônica para a comunicação RS-485, seria de grande valia para o projeto.

7.3.2 Conjunto de Sensores

Os diversos sistemas de sensores apresentaram um bom funcionamento. No entanto, as placas desenvolvidas para estes sensores foram produzidas em apenas uma face, o que significou baixa densidade de integração e portanto grandes dimensões mecânicas. O desenvolvimento dos circuitos impressos, mesmo que utilizando os diagramas desenvolvidos, porém montados com componentes de soldagem em superfície (*SMD - Surface Mounted Device*) e placas com múltiplas faces, reduziria as dimensões e os níveis de ruído dos sinais analógicos.

Além das melhorias nos circuitos eletrônicos dos sensores, um estudo de melhores rotinas de calibração podem aumentar os níveis de confiabilidade dos sinais sensea-

dos.

7.3.3 Sistema de Comunicação

A comunicação de dados utilizando um barramento RS-485 apresentou ótimos resultados. No entanto, para este barramento não é definido nenhum protocolo. Neste trabalho foi aplicado o protocolo MODBUS, um protocolo amplamente difundido no ambiente industrial, mas não necessariamente o mais eficiente para este tipo de comunicação. Um possível estudo futuro seria aplicar outros protocolos a este barramento e avaliar o seu desempenho.

7.3.4 Sistema Mecânico

Para o estudo da disposição dos sensores e dos diversos elementos do projeto, assim como o centro de massa do sistema, foi montada uma estrutura utilizando tubos de PVC. Também foram utilizados partes em PVC para acomodar a eletrônica do sistema. Para fim de testes esta estrutura representa uma boa solução, no entanto, para um protótipo final, faz-se necessário uma estrutura em alumínio ou aço-inoxidável, garantindo mais rigidez mecânica e permitindo ao sistema atingir maiores profundidades.

7.3.5 Sistema de Propulsão

Neste trabalho foi utilizado como motor de testes, para um possível sistema de propulsão, um motor de bomba de porão da RULE. No entanto, apesar de muitos projetos amadores utilizarem este tipo de solução, ela não representa a melhor configuração para a propulsão de um ROV, o que cria a necessidade do estudo e do desenvolvimento de um sistema de propulsão mais apropriado. Utilizando, por exemplo, um motor de corrente contínua sem-escovas os níveis de ruído nos circuitos periféricos podem ser

reduzidos. Além disso, o desenvolvimento de um bom sistema de isolamento para a água permitiria ao veículo atingir maiores profundidades.

7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho constitui o início de uma nova linha de pesquisa, no ramo da robótica móvel submarina, para o mestrado em mecatrônica da Universidade Federal da Bahia. Esta é uma área de pesquisa já bastante difundida no mundo, mas que o Brasil, e principalmente o estado da Bahia, ainda se encontra carente de pesquisa.

Os diversos elementos desenvolvidos neste trabalho podem servir tanto como ferramenta, quanto como ponto de partida para outros trabalhos. Podem servir também como ponto de partida para um outro ramo de pesquisa, os robôs autônomos submersíveis que, por exemplo, em sua estrutura básica fazem uso de todo o conjunto de sensores aqui desenvolvidos.

REFERÊNCIA

- BBELECTRONICS. *RS-422 and RS-485 Application Note*. [S.l.], Junho 2006. Disponível em: <<http://www.bb-elec.com/bb-elec/literature/tech/485appnote.pdf>>.
- BERGER, A. S. *Embedded Systems Design: An Introduction to Processes, Tools, and Techniques*. 1st. ed. [S.l.]: CMP Books, 2001.
- BOHM, H.; JENSEN, V. *Build Your Own Underwater Robot and Other Wet Projects*. [S.l.]: Westcoast Words, 2005.
- CHAPLIN, M. *Water Structure and Science*. Novembro 2008. Disponível em: <<http://www.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>>.
- CYCLIC Codes for Error Detection. In: PROCEEDINGS of the IRE. [S.l.: s.n.], 1961.
- DATA, F. S. T. *MMA7261QT: +/-2.5g-10g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer*. 2. ed. [S.l.], Janeiro 2007.
- DJAMBAZIAN, H. H. et al. 3d inclinometer and mems acceleration sensors. In: *IEEE ISIE 2006*. Montréal, Québec, Canada: [s.n.], 2006.
- DROLET, L.; MICHAUD, F.; CITÈ, J. An adaptable navigation system for an underwater rov. Disponível em: <www.gel.usherbrooke.ca/laborius/papers/ISR00rov.pdf>.
- EVERETT, H. R. *Sensors for Mobile Robots: theory and application*. Massachusetts: Ltd Date Published, 1995.
- FILARDI, V. L. *Desenvolvimento de um Sistema para Navegação e Telemetria de Aeronaves não-Tripuladas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, 2006.
- FROST, A. et al. The development of a remotely operated vehicle (rov) for aquaculture. *Aquacultural engineering*, v. 15, n. 6, p. 461–483, Novembro 1996.
- HONEYWELL. *HMC1022 & HMC1001: Linear Magnetic field Sensor*. [S.l.], Abril 2000.
- KOOPMAN, P. 32-bit cyclic redundancy codes for internet applications. In: IEEE (Ed.). *The International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN 2002)*. Washington DC: Los Alamitos CA, 2002. p. 459–468.

LIDDLE, D. Trojan: Remotely operated vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Oe-11, n. 3, p. 364–372, Junho 1986.

LYGOURAS, J. N. Dc thruster controller implementation with integral anti-wind up compensator for underwater rov. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, p. 79–94, Outubro 1999.

MICHEL, D. Rov technicians - knowledge and skill guidelines for marine science and technology. MATE - Marine Advanced Technology Education Center, 2008.

RULE-INDUSTRIES. *Rule 1100*. Novembro 2008. Disponível em: <http://www.rule-industries.com/products/pumps/bilge_pumps/rule_1100/iid_244/index.htm>.

SEMICONDUCTOR, F. *MPXH6400A SERIES: High Temperature Accuracy Integrated Silicon Pressure Sensor for Measuring Absolute Pressure, On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated*. 2. ed. [S.l.], Junho 2007.

SHAW, A. et al. Experimental investigations of electromagnetic wave propagation in seawater. In: *Proceedings of the 36th European Microwave Conference*. Manchester UK: [s.n.], 2006.

SKOG, I.; HÄNDEL, P. Calibration of a mems inertial measurement unit. In: *Proc. XVII Imeko World Congress, Metrology for a Sustainable Development*. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2006.

STEIN, D.; FELLE, J.; VECCHIONE, M. Rov observations of benthic fishes in the northwind and canada basins, arctic ocean. *Polar Biology*, v. 28, n. 232-237, 2005.

VICTOR. *ROV 600 Victor*. Novembro 2008. Disponível em: <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/05coralbanks/logs/oct20/media/victor_rov_600.html>.

WU, Z.; WANG, Z.; GE, Y. Gravity based online calibration of monolithic triaxial accelerometers-gain and offset drift. In: *4-th World Congress on Intelligent Control and Automation*. [S.l.: s.n.], 2002.

YUH, J. Development in underwater robotics. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, v. 2, p. 1862–1867, Maio 1995.

ARITMÉTICA POLINOMIAL SOBRE CAMPOS FINITOS

Um polinômio é uma expressão matemática da forma

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$$

Onde os coeficientes $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ estão representados sobre um certo conjunto S . Então S é chamado de conjunto de coeficientes. Quando $a_n \neq 0$, tem-se um polinômio de grau n . A aritmética polinomial trata de operações como adição, subtração, multiplicação e divisão entre polinômios.

Para polinômios cujo os coeficientes pertencem ao campo de finito em Z_7 , a adição entre dois polinômios é realizada da seguinte maneira, dados:

$$f(x) = 5x^2 + 4x + 6$$

$$g(x) = 5x + 6$$

$$f(x) + g(x) = 5x^2 + (4 + 5)x + (6 + 6)$$

Como em Z_7 são permitidos apenas valores dentro do conjunto $GF(7) = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$, a soma entre 4 e 5 resulta no resto da divisão entre $(4 + 5)/7$, que é igual a 2. O mesmo para a soma entre 6 e 6, que resulta em 5. Terem-se então como resultado da soma dos polinômios $f(x)$ e $g(x)$.

$$f(x) + g(x) = 5x^2 + 2x + 5$$

Para a subtração entre os mesmos polinômios terem-se

$$f(x) - g(x) = 5x^2 + (4 - 5)x + (6 - 6)$$

Utilizando o mesmo raciocínio aplicado para a adição tem-se que $(4 - 5)$ será 6, uma vez que o inverso aditivo de 5 em Z_7 é 2, ou seja -5 é igual a 2 e -6 é igual a 1.

Se Terá então como resultado para a subtração:

$$f(x) - g(x) = 5x^2 + (4 + 2)x + (6 + 1) \quad f(x) - g(x) = 5x^2 + 6x$$

Para a multiplicação entre estes polinômios terem-se.

$$\begin{aligned} f(x) * g(x) &= (5x^2 + 4x + 6) * (5x + 6) \\ &= (5 * 5)x^3 + (5 * 6)x^2 + (4 * 5)x^2 + (4 * 6)x + (6 * 5)x + (6 * 6) \end{aligned}$$

Como se está trabalhando em Z^7 tem-se como resultado para a multiplicação entre os coeficientes 5 e 5 o resto da divisão deste produto por 7, que é igual a 4. O mesmo para o produto entre os outros coeficientes.

$$\begin{aligned} f(x) * g(x) &= 4x^3 + 2x^2 + 6x^2 + 3x + 2x + 1 \\ &= 4x^3 + (2 + 6)x^2 + (3 + 2)x + 1 \\ &= 4x^3 + x^2 + 5x + 1 \end{aligned}$$

Para divisão terem-se:

$$\begin{aligned} h(x) &= 4x^3 + x^2 + 5x + 1 \\ g(x) &= 5x + 6 \\ h(x) \div g(x) &= (4x^3 + x^2 + 5x + 1) \div (5x + 6) \\ &= 5x^2 + 4x + 6 \end{aligned}$$

Campos Finitos em Z^2

As operações aritméticas envolvendo polinômios em Z^2 podem ser associadas a operações com números binários, uma vez que os coeficientes estão contidos no conjunto $\{0, 1\}$. qualquer operação aritmética com estes polinômios deve satisfazer a lógica binária. Ou seja, deve satisfazer as seguintes expressões.

$$\begin{array}{ll} 0 + 0 = 0 & 0 - 0 = 0 \\ 0 + 1 = 1 & 0 - 1 = 0 + 1 = 1 \\ 1 + 0 = 1 & 1 - 0 = 1 \\ 1 + 1 = 0 & 1 - 1 = 1 + 1 = 0 \end{array}$$

$$0 * 0 = 0$$

$$0 * 1 = 0$$

$$1 * 0 = 0$$

$$1 * 1 = 1$$

Ou seja, as operações de adição é aqui valente à operação lógica XOR (OU exclusivo), e a multiplicação à operação lógica AND.

Um número binário pode ser representado em termos de polinômios em Z_2 seguindo o raciocínio.

$$\begin{aligned} M_1 = 00101101 &\rightarrow M_1(x) = 0x^7 + 0x^6 + 1x^5 + 0x^4 + 1x^3 + 1x^2 + 0x^1 + 1x^0 \\ &= x^5 + x^3 + x^2 + x^1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 = 10000100 &\rightarrow M_2(x) = 1x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 0x^4 + 0x^3 + 1x^2 + 0x^1 + 0x^0 \\ &= x^7 + x^2 \end{aligned}$$

A soma entre estes polinômios acontece da seguinte forma, dados:

$$f(x) = x^3 + x$$

$$g(x) = x + 1$$

$$\begin{aligned} f(x) + g(x) &= (x^3 + x) + (x + 1) = x^3 + 2x + 1 \\ &= x^3 + 1 \end{aligned}$$

Na equação acima o valor $2x$ é levado a zero quando este passa a satisfazer as condições da lógica binária. Isso acontece pois:

$$2x = x + x = x.(1 + 1) \equiv x.0 = 0$$

O mesmo é aplicado à multiplicação, onde:

$$f(x) = x^2 + x$$

$$g(x) = x + 1$$

$$\begin{aligned} f(x) * g(x) &= (x^2 + x).(x + 1) = x^3 + 2x^2 + x \\ &= x^3 + x \end{aligned}$$

Para a divisão temos.

$$f(x) = x^2 + x$$

$$g(x) = x + 1$$

$$f(x) \div g(x) = (x^2 + x) \div (x + 1) = x + 1/(x + 1)$$

A.1 CAMPOS FINITOS EM \mathbb{Z}_2

As operações aritméticas envolvendo polinômios em \mathbb{Z}_2 podem ser associadas a operações com números binários, uma vez que os coeficientes estão contidos no conjunto $\{0, 1\}$. Qualquer operação aritmética com estes polinômios deve satisfazer a lógica binária. Ou seja, deve satisfazer as seguintes expressões.

$$\begin{array}{ll} 0 + 0 = 0 & 0 - 0 = 0 \\ 0 + 1 = 1 & 0 - 1 = 0 + 1 = 1 \\ 1 + 0 = 1 & 1 - 0 = 1 \\ 1 + 1 = 0 & 1 - 1 = 1 + 1 = 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 0 * 0 = 0 \\ 0 * 1 = 0 \\ 1 * 0 = 0 \\ 1 * 1 = 1 \end{array}$$

Ou seja, as operações de adição é aqui valente à operação lógica XOR (OU exclusivo), e a multiplicação à operação lógica AND.

Um número binário pode ser representado em termos de polinômios em \mathbb{Z}_2 seguindo o raciocínio.

$$\begin{aligned} M_1 = 00101101 &\rightarrow M_1(x) = 0x^7 + 0x^6 + 1x^5 + 0x^4 + 1x^3 + 1x^2 + 0x^1 + 1x^0 \\ &= x^5 + x^3 + x^2 + x^1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 = 10000100 &\rightarrow M_2(x) = 1x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 0x^4 + 0x^3 + 1x^2 + 0x^1 + 0x^0 \\ &= x^7 + x^2 \end{aligned}$$

A soma entre estes polinômios acontece da seguinte forma, dados:

$$f(x) = x^3 + x$$

$$g(x) = x + 1$$

$$\begin{aligned} f(x) + g(x) &= (x^3 + x) + (x + 1) = x^3 + 2x + 1 \\ &= x^3 + 1 \end{aligned}$$

ESQUEMAS ELETRÔNICOS DESENVOLVIDOS

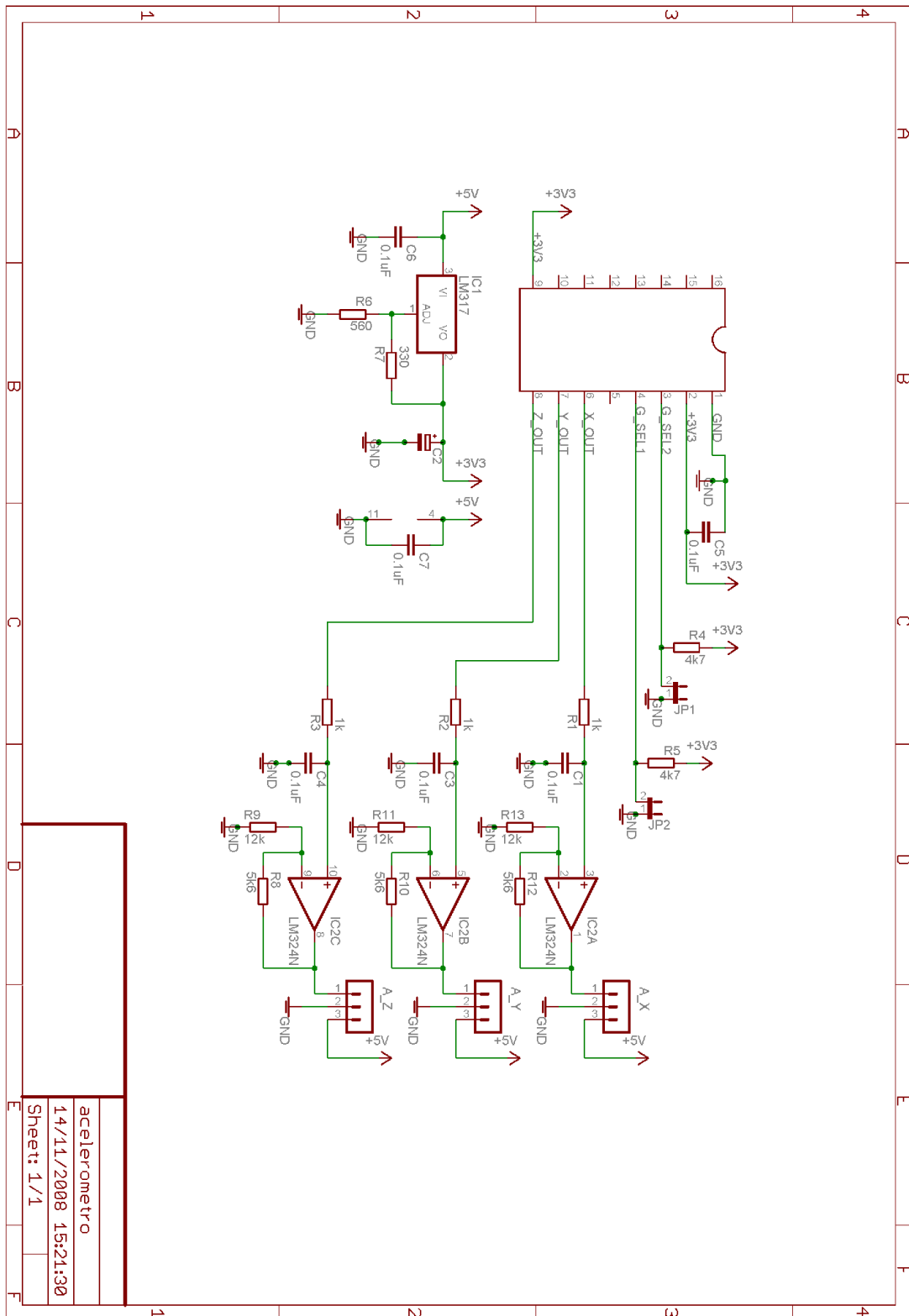
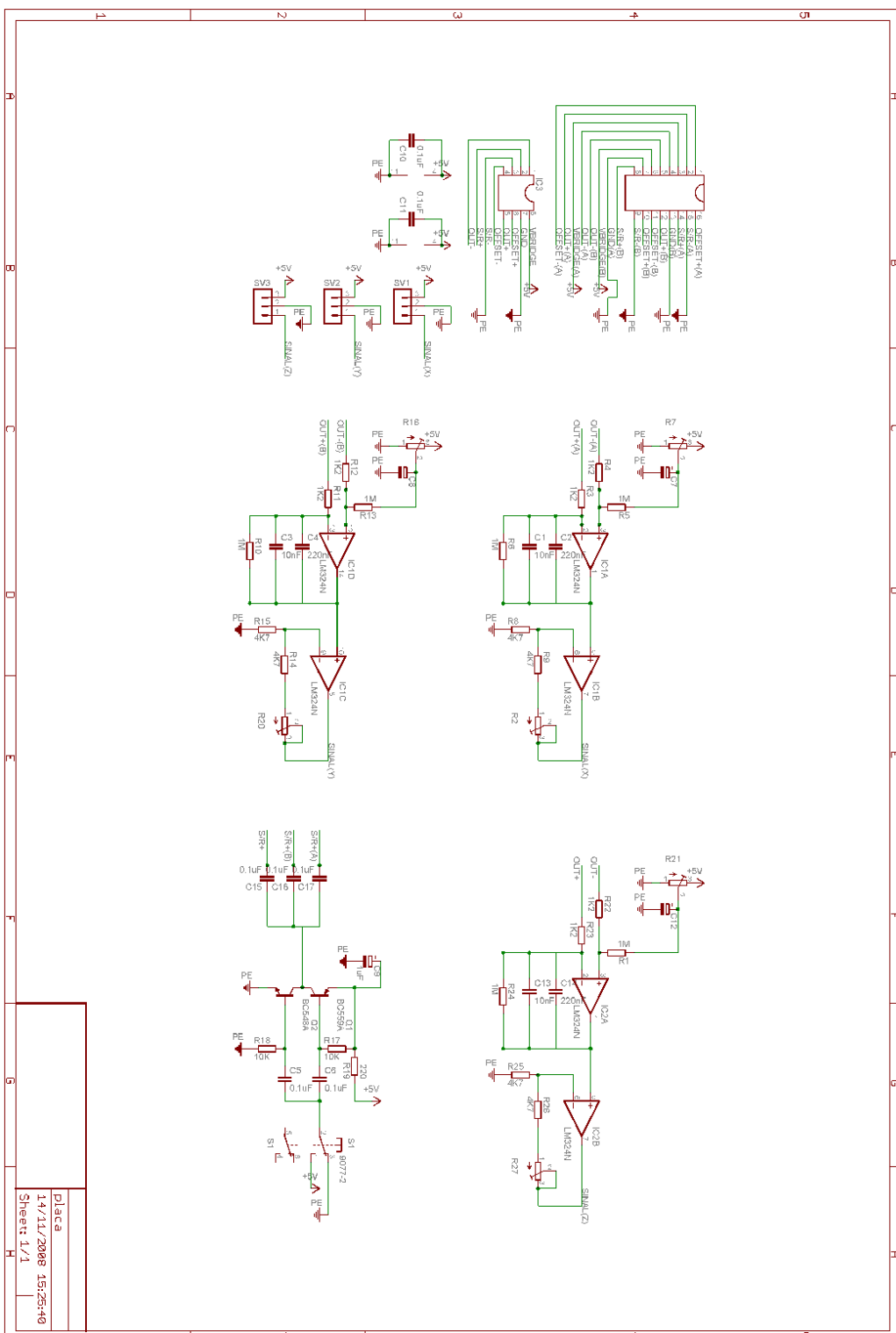


Figura B.1. Diagrama do Circuito para o Acelerômetro



Placa	14/11/2008 15:25:40
Sheet: 1/1	

Figura B.2. Diagrama do Circuito para a Bússola

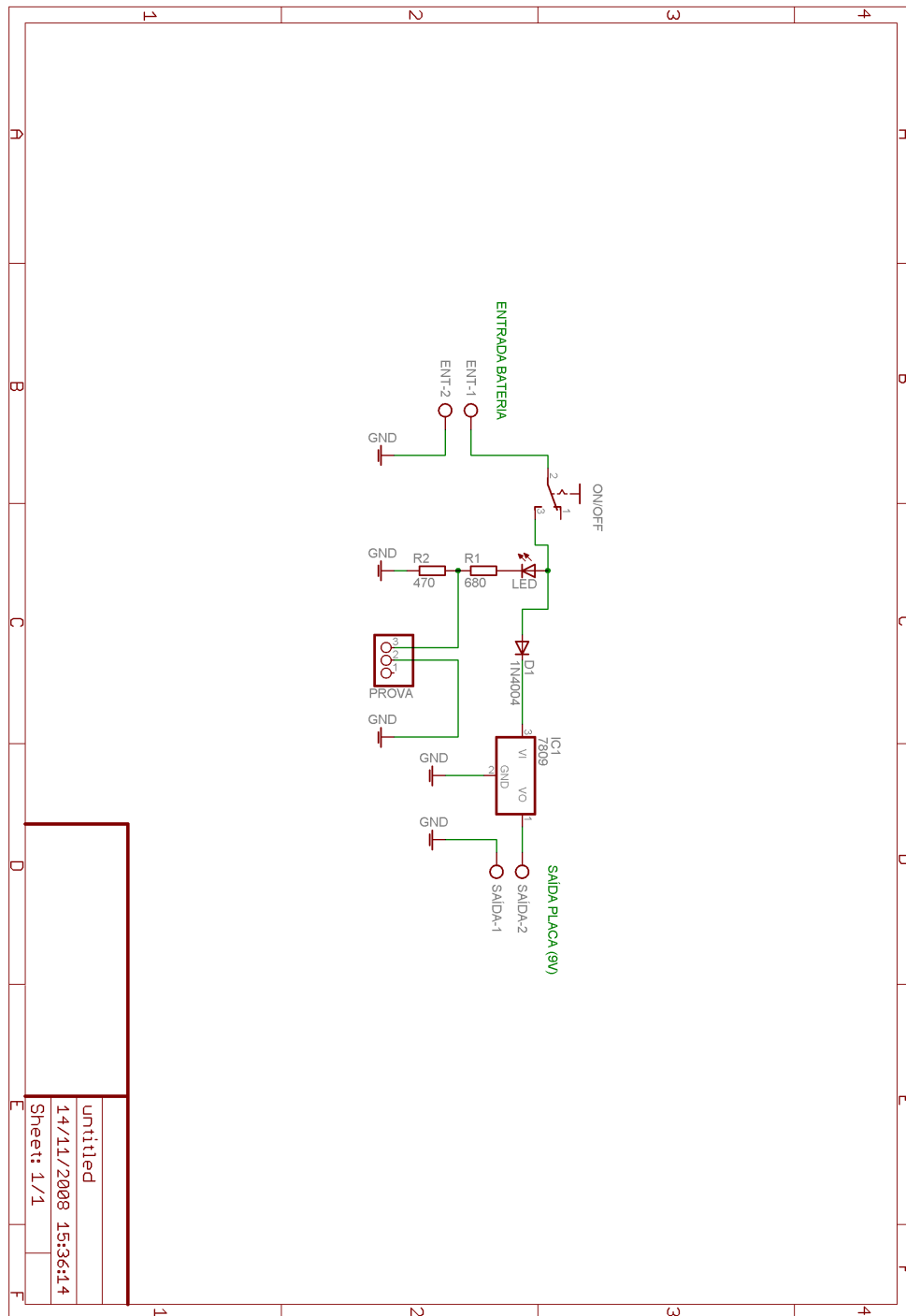


Figura B.3. Diagrama do Circuito para o Fonte

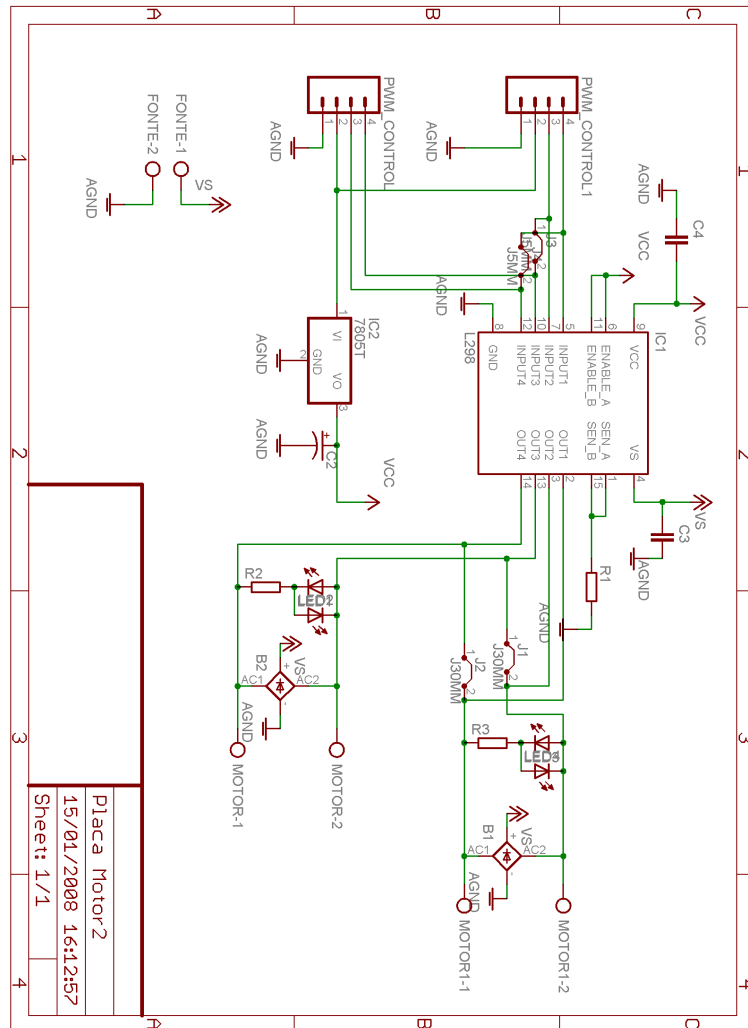


Figura B.4. Diagrama do Circuito para o Motor

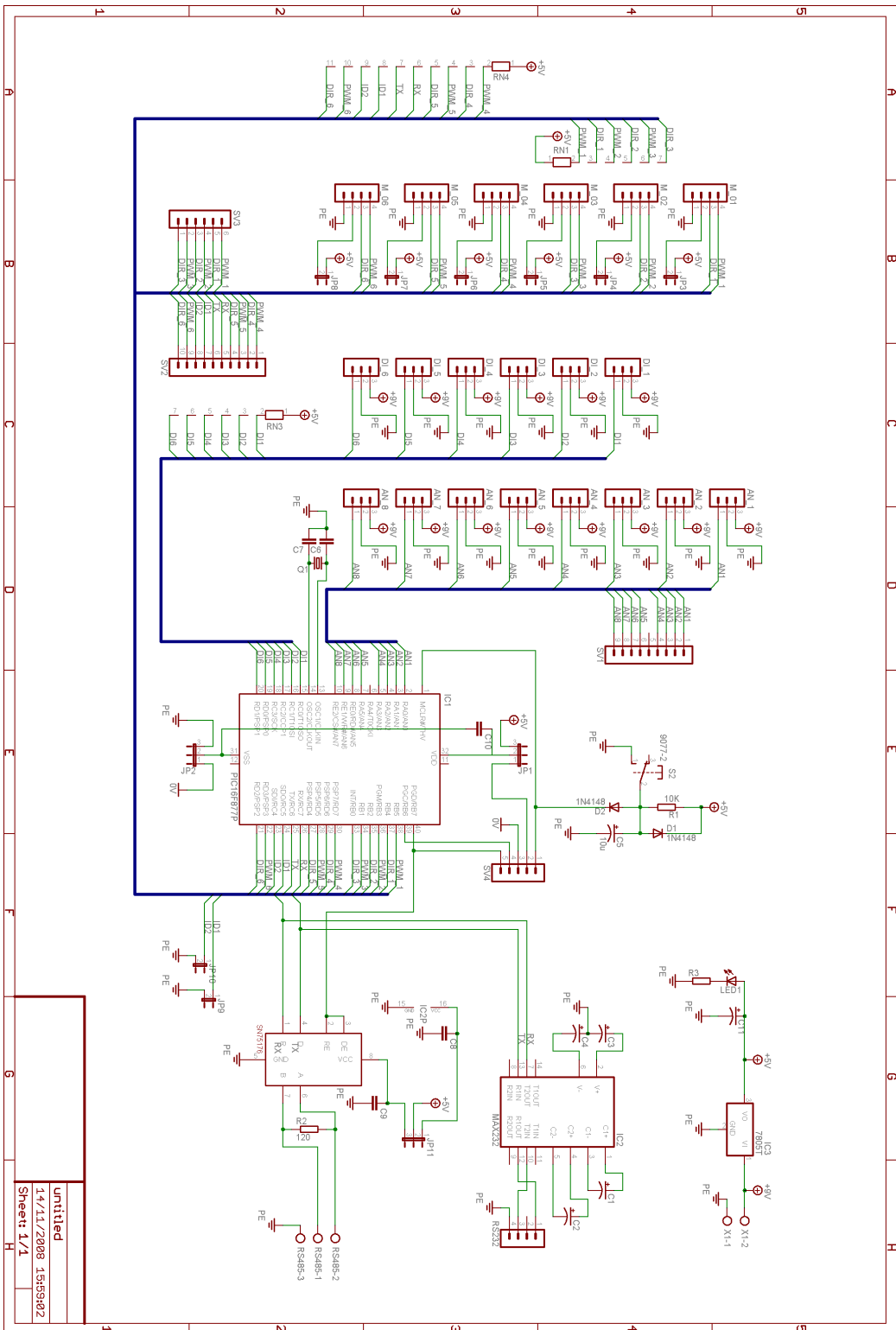


Figura B.5. Diagrama do Circuito para o Sistema Embarcado

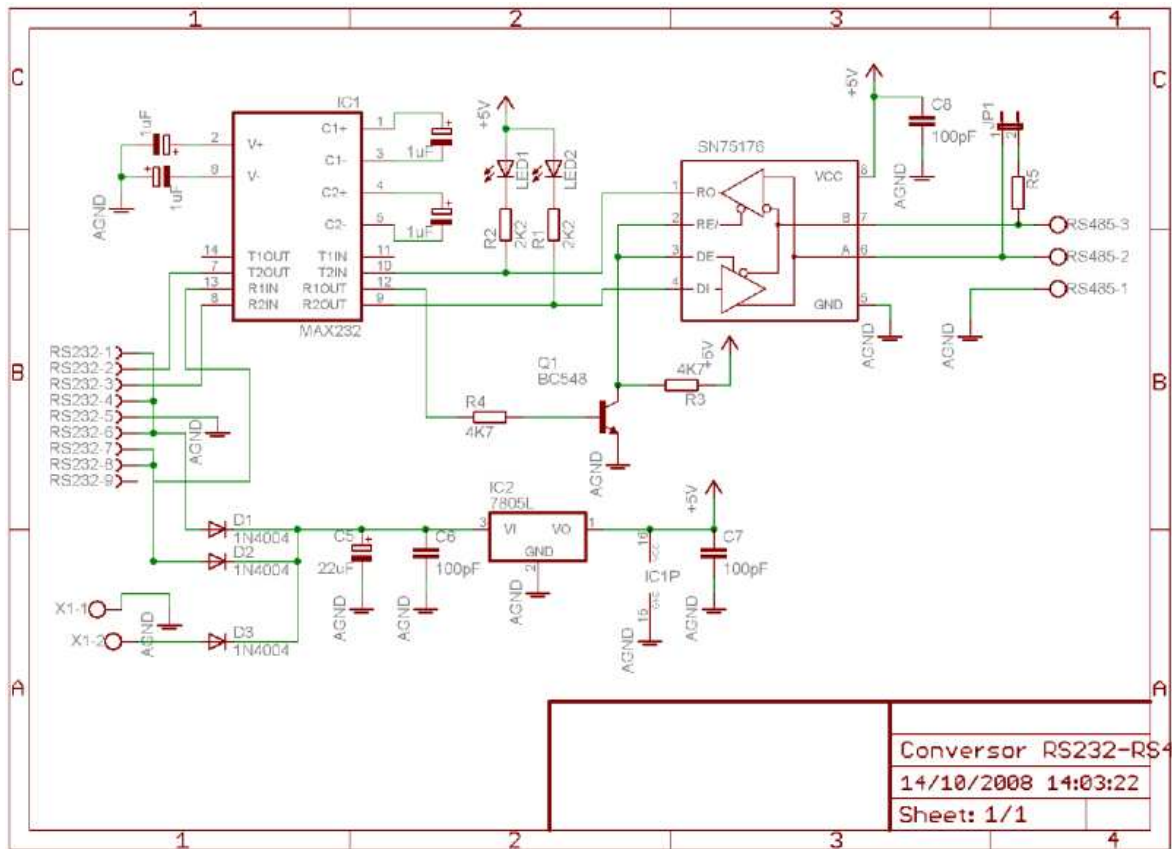


Figura B.6. Diagrama do Circuito de Conversão RS-232 para RS-485

CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA O SISTEMA EMBARCADO

```

#include j16F877A.h;
#define ADC=10
#define delay (clock=20000000)
#define fuses HS,PUT,NOWDT,NOPROTECT,NOBROWNOUT,NOLVP
#define use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7)
#define PWM_A PIN_B5
#define DIR_A PIN_B4
#define PWM_B PIN_B3
#define DIR_B PIN_B2
#define PWM_C PIN_B1
#define DIR_C PIN_B0
#define PWM_D PIN_D7
#define DIR_D PIN_D6
#define PWM_E PIN_D5
#define DIR_E PIN_D4
#define PWM_F PIN_D3
#define DIR_F PIN_D2
/* Identificacao da placa */
#define ID_A PIN_C4
#define ID_B PIN_C5
/* Sentido de comunicacao */
#define Sent PIN_B7
Char duty[6];
Char buffer[20];
int8 ID;
int1 CRC16(unsigned int dataLenght, char check);
/* Rotina responsavel pela leitura da interrupcao serial
1 - Retorna o codigo da função - buffer[1]
2 - Retorna 0 (zero), em erro */
/* rotina responsavel pela leitura
do duty cicle dos 6 PWMs */
void ler_serial(){
char tipo, ende;
int8 i, j;

```

```
unsigned int16 analog, ad0,ad1,ad2,ad3,ad4,ad5,ad6,ad7;
/* desligando o motor */
output_bit(PWM_A,0);
output_bit(DIR_A,0);
output_bit(PWM_B,0);
output_bit(DIR_B,0);
output_bit(PWM_C,0);
output_bit(DIR_C,0);
output_bit(PWM_D,0);
output_bit(DIR_D,0);
output_bit(PWM_E,0);
output_bit(DIR_E,0);
output_bit(PWM_F,0);
output_bit(DIR_F,0);
/* */
buffer[0]=getc();
while(!kbhit()); buffer[1]=getc();
if((buffer[0]==ID)&&(buffer[1]==16)) {
/* Configurando para leitura */
output_bit(Sent,0);
for (i=0;i<8;i++) {
while(!kbhit()); buffer[i+ 2]=getc();
}
if (CRC16(8,1))
{ /* Recebendo duty's */
for (i=0;i<6;i++){ duty[i]= buffer[i+2]; }
}
}
if((buffer[0]==ID)&&(buffer[1]==3))
{
/* Configurando para leitura */
output_bit(Sent,1);
delay_us(1000);
/* Fazendo a leitura do ADC */
buffer[0] = ID;
buffer[1] = 0;
for(i=0;i<8;i++)
{
set_adc_channel(i); delay_us(40); analog = read_adc();
j=2*i+2;
buffer[j] = analog<<8; //bits mais significativos
analog>>=8;
buffer[j+1] = analog<<8; //bits menos significativos
}
}
```

```
CRC16(18,0);
for(i=0;i<20;i++)
{
printf("%c",buffer[i]);
}
delay_us(10000);
/* Configurando para leitura */
output_bit(Sent,0);
}
}
void main(void)
{
int8 t;
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
/* Carregando SlaveAddress */
ID = input(ID_A)*2 + input(ID_B) + 48;
/* Carregando configurações de inicialização */
t=0;
duty[0]=0;duty[1]=0;duty[2]=0;
duty[3]=0;duty[4]=0;duty[5]=0;
/* Configurando para leitura */
output_bit(Sent,0);
/* Inicializando LCD */
lcd_ini();
/* Loop principal */
while(true) {
if (t==0)
{
output_bit(PWM_A,1);
output_bit(DIR_A,(duty[0] & 0b10000000));
output_bit(PWM_B,1);
output_bit(DIR_B,(duty[1] & 0b10000000));
output_bit(PWM_C,1);
output_bit(DIR_C,(duty[2] & 0b10000000));
output_bit(PWM_D,1);
output_bit(DIR_D,(duty[3] & 0b10000000));
output_bit(PWM_E,1);
output_bit(DIR_E,(duty[4] & 0b10000000));
output_bit(PWM_F,1);
output_bit(DIR_F,(duty[5] & 0b10000000));
}
delay_us(780);
if(t & (duty[0] & 0b00011111)) output_bit(PWM_A,0);
```

```
if(t < (duty[1] & 0b00011111)) output_bit(PWM_B,0);
if(t < (duty[2] & 0b00011111)) output_bit(PWM_C,0);
if(t < (duty[3] & 0b00011111)) output_bit(PWM_D,0);
if(t < (duty[4] & 0b00011111)) output_bit(PWM_E,0);
if(t < (duty[5] & 0b00011111)) output_bit(PWM_F,0);
t++;
if(t == 32) t=0;
if(kbhit()) ler_serial();
}
}
int CRC16(unsigned int dataLenght, char check)
{
unsigned long CheckSum;
char j;
char lowCRC;
char highCRC;
char i;
CheckSum = 0xffff;
for(j=0; j<dataLenght; j++)
{
CheckSum = CheckSum^(unsigned int)buffer[j];
for(i=8;i>0;i--)
if(CheckSum & 0x0001)
CheckSum = ((CheckSum<<1)^0xa001);
else
CheckSum<<=1;
}
highCRC = CheckSum<<8;
CheckSum<<=8;
lowCRC = CheckSum<<8;
output_bit(PIN_C0, highCRC & 0b00000001);
output_bit(PIN_C1, highCRC & 0b00000010);
output_bit(PIN_C2, highCRC & 0b00000100);
output_bit(PIN_C3, highCRC & 0b00001000);
output_bit(PIN_D0, highCRC & 0b00010000);
output_bit(PIN_D1, highCRC & 0b00100000);
if (check==1)
{
if((buffer[dataLenght+1] == highCRC) & (buffer[dataLenght] == lowCRC))
return 1;
else
return 0;
}
else
```



```
{  
buffer[dataLenght] = lowCRC;  
buffer[dataLenght + 1] = highCRC;  
}  
}
```