

CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DE UM VEÍCULO SUBAQUÁTICO AUTÔNOMO

Bruno dos Santos Lima ¹; Douglas Bellini ²; Wânderson de Oliveira Assis ³

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT);

² Monitor de Projeto Voluntário da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT);

³ Professor(a) da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT).

Resumo. *Este projeto propõe o desenvolvimento de um veículo subaquático autônomo (AUV – Autonomous Underwater Vehicle) incorporando tecnologias que o habilite a locomover-se de forma autônoma dentro de um tanque incluindo câmera embarcada e sistema de sensoriamento. O trabalho descreve o desenvolvimento de novo circuito de acionamento para os motores bem como detalhes sobre a programação autônoma a partir do monitoramento de sinais de sensores de distância.*

Introdução

O estudo da robótica autônoma vem sendo efetuado há alguns anos no Instituto Mauá de Tecnologia – IMT principalmente no projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Robôs Autônomos”. Este projeto foi implantado em 2003, inicialmente com o objetivo de incentivar os alunos de graduação a desenvolverem pesquisas acadêmicas relacionadas à mecatrônica e robótica e tendo como atrativo a participação em competições estudantis de robótica, no início utilizando a plataforma do futebol de robôs.

Recentemente, na área de robótica autônoma, pesquisadores de todo mundo veem desenvolvendo aplicações e pesquisas utilizando veículos aquáticos e subaquáticos. Em muitas aplicações é importante que estes robôs tenham algum grau de inteligência que os tornem capazes de executar ações de forma autônoma.

No projeto de iniciação, aplicações de robótica aquática e subaquática, por exemplo, usando UUVs (*Unmanned Underwater Vehicles*) ainda não foram realizadas. Pesquisas utilizando UUVs incluem veículos operados remotamente ou veículos autônomos para desenvolver ações como inspeção, perfuração, exploração de profundidades, enterramento de cabos submarinos, entre outros (Valavanis *et al.*, 1997). Veículos aquáticos operados remotamente (*Remotely Operated Vehicles*), geralmente são utilizados quando o ambiente de navegação na água é desconhecido ou as condições do ambiente não são propícias para uma missão tripulada (Centeno, 2008). Para a navegação utilizam um cabo que permite a conexão entre o veículo e uma embarcação, na superfície. Veículos subaquáticos autônomos, os AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), são veículos não tripulados, com fonte de energia própria e processamento interno que executam ações de forma autônoma a partir de informações obtidas por sensores (Batistella, 2011). Apresentam custo operacional mais reduzido, uma vez que o operador humano não é necessário. Além disso, como as ações são executadas de forma autônoma utilizando processamento embarcado, não é necessário efetuar conexão via cabo podendo por isto atingir distâncias significativas a partir de um navio de apoio ou plataforma. No entanto, seu projeto é relativamente mais complexo e mais limitado em termos de controle e capacidade de processamento, bem como, fica dependente da capacidade da fonte de energia embarcada. Neste sentido, muitas pesquisas estão sendo realizadas em todo o mundo com ênfase em autonomia, navegação, detecção de objetos, fontes de energia e sistemas de informação para veículos autônomos subaquáticos (Gonzales, 2004), (Goheen e Jefferys, 1990), (Yuh, 2000), (Yoerger *et al.*, 2007).

O projeto de um veículo subaquático autônomo foi realizado em 2011, sendo o protótipo desenvolvido ilustrado na Figura 1 (Forni, 2011a), (Forni, 2011b).

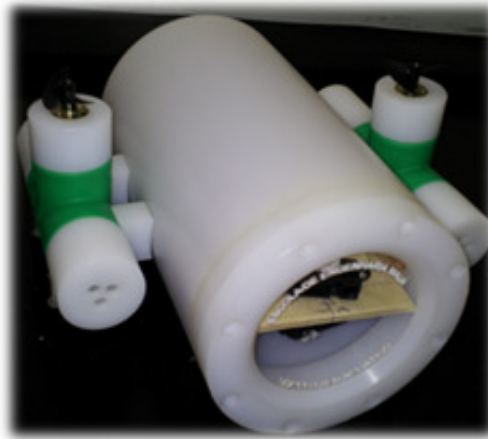


Figura 1 – Veículo Subaquático Projetado.

A construção mecânica do veículo foi realizada com sucesso incluindo estudo da estabilidade quando submerso e definição do centro de gravidade e do ponto de atuação do empuxo. Um circuito eletrônico também foi desenvolvido incluindo sistema microcontrolado, sensores de distância para detecção de obstáculos, câmera e circuito de acionamento. Contudo o circuito de acionamento projetado apresentou problemas, tornando necessário a realização de um projeto mais elaborado e com maior capacidade de corrente.

Materiais e Métodos

O trabalho visa a adaptação do protótipo e a programação de um veículo subaquático autônomo que seja capaz de se locomover no interior de um tanque, fazendo a detecção e desviando de obstáculos de forma autônoma.

Nesta seção pretende-se demonstrar as características, funcionalidades e aplicações dos dispositivos eletrônicos utilizados, bem como os materiais utilizados na adaptação e programação do projeto.

Servomotores

O controle da movimentação dos robôs é conseguido por servomotores DC. Foram utilizados *minimotors* fabricados pela *Falhauber*, modelo 1516E012S (Figura 2). Esse modelo é controlado por uma tensão contínua de, no máximo, 12V, com uma redução interna de 11,8:1 o que resulta numa rotação de aproximadamente 800rpm e com um torque de 7mN.m em sua tensão nominal.

Ao todo, quatro servomotores foram instalados no veículo, sendo dois para movimentos horizontais, e os outros dois para movimentos verticais.

Microcontrolador e Microprocessador

O microprocessador utilizado é um Arduino, que é uma plataforma de hardware livre, projetada com um microcontrolador Atmel AVR de placa única, com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão, essencialmente C/C⁺⁺. O objetivo do projeto com Arduino é criar ferramentas que são acessíveis, com baixo custo, flexíveis e fáceis de se usar por profissionais experientes, mas também por amadores. Destina-se principalmente para aqueles que não teriam alcance aos controladores mais sofisticados e de ferramentas mais complexas (Wikipédia, 2012).

Uma das grandes vantagens que o Arduino apresenta é em relação à disponibilidade de *shields* (escudos em inglês) que são placas de circuito impresso normalmente fixados no topo do aparelho, através de uma conexão alimentada por pinos-conectores. Alguns exemplos de

módulos acopladores (*shields*) são: Ethernet, XBee, InputShield, TouchShield dentre outros. Hoje, existem mais de 10 tipos diferentes de Arduino, desde o mais básico incluindo microcontrolador com poucas portas analógicas e digitais, até placas complexas capazes de proporcionar o uso de tecnologias avançadas.

O Arduino Mega, utilizado no projeto, possui processador ATmega1280 com clock de 16 MHz que incorpora maior capacidade de memória e entrada e saída de dados e é construído utilizando tecnologia de montagem superficial (SMT – *Surface Mount Technology*). Apresenta as mesmas características elétricas do Arduino 2009, mas disponibiliza 54 pinos para entradas e saídas digitais (I/O), 14 destes podendo ser utilizados como saída PWM, além de 16 entradas analógicas. A memória SRAM é de 8 KB a EEPROM 4 KB e a Flash de 128 KB.

LED's (*Light Emitting Diode*)

Foram utilizados LED's de alto brilho para sinalização de forma a identificar o movimento do veículo. Ao todo foram instalados 6 leds, 3 de cada lado.

Dois LED's brancos se acendem indicando o movimento para frente ou para baixo, dois LED's vermelhos se acendem caso o veículo esteja realizando o movimento para trás ou de subida. Um LED verde se acende se o veículo estiver utilizando apenas um dos motores do lado esquerdo. Um LED amarelo se acende se o veículo estiver utilizando apenas um dos motores do lado direito no movimento.

Sensores de Distância

Os sensores utilizados para detecção de obstáculos bem como para identificar as bordas do tanque são os sensores de distância Sharp GP2D120XJ00F. Tratam-se de sensores de infravermelho (IR) onde um sinal luminoso é emitido e a distância entre o sensor e o obstáculo é determinada por meio da variação da potência luminosa refletida que é captada por um fototransistor.

As principais características elétricas do sensor de distância (Figura 2) são:

- tensão de operação de 4,5 V a 5,5 V;
- consumo médio de corrente de 33 mA (típico);
- faixa de distância operacional: 4 cm a 30 cm;
- tempo de resposta: 38 ± 10 ms.

Foram introduzidos dois sensores de distância no projeto, um apontado levemente para a esquerda e outro apontado levemente para a direita, sendo que cada um deles também abrange a parte frontal do veículo.

Módulo de Transmissão de dados

Para a transmissão de dados *wireless* do veículo para um computador, foi inserido no projeto um módulo XbeeTM.

Os módulos XbeeTM são dispositivos com tecnologia ZigBeeTM desenvolvidos pela empresa norte americana DIGI (antiga MaxStream) com o objetivo de simplificar aplicações utilizando RF (radiofrequência). Originalmente foram produzidas duas versões disponíveis na linha MaxStream: o XBeeTM e o XBee PROTM. São versões compatíveis entre si que se diferenciam apenas pela potência de transmissão: 1mW para o XBeeTM e 63mW para o XBee PROTM. O alcance do produto final depende da potência de transmissão; no entanto esse não é o único fator a ser levado em conta. Os módulos trabalham com transmissão e recepção de sinais com a vantagem de já possuírem toda pilha de comunicação incluindo protocolo de comunicação baseado nos padrões ZigBeeTM e IEEE 802.15.4.

O Padrão IEEE 802.15.4 define as duas primeiras camadas da pilha de protocolos: a camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) e a camada física que tem como características: alcance máximo de 150 m, operação na frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz.

O Padrão ZigBEE™ compreende mais duas camadas de protocolos: a camada de rede, que define endereçamento e roteamento, e a camada de suporte à aplicação que estabelece o conjunto de objetos manipuláveis pelo usuário.

Câmera

Para monitorar as imagens no fundo do tanque e localizar objetos utilizou-se sistema de captura e processamento de imagens o qual deve possuir as seguintes características: a) uma câmera colorida com uma resolução suficiente para o reconhecimento de objetos tanto pela forma quanto pela cor; b) um processador capaz de capturar a imagem da câmera e fazer o reconhecimento dos objetos; c) um meio de transmissão do sistema de captura para o veículo autônomo de forma rápida e eficiente.

O sistema escolhido foi a CMUcam2 ilustrada na Figura 2 devido ao seu baixo custo, por já possuir toda a estrutura projetada e também a forma de comunicação utilizando o padrão RS-232 ou TTL, presente na maioria dos microcontroladores existentes no mercado, portanto facilitando a elaboração da placa de controle do robô (Rowe, Rosenberg & Nourbakhsh, 2002).

As principais características presentes na CMUcam2 são:

- programável utilizando microcontrolador SX52;
- inclui câmera OV6620;
- apresenta resoluções de 88x143 e 176x255;
- conexão serial RS232 ou TTL com taxa de transferência de 1.200 bps a 115.200 bps;
- alimentação: 6 a 15V, 200 mA;
- suporta o controle de até 5 servomotores.

Bateria

A alimentação foi produzida por bateria Li-Po Turnigy de 500 mAh constituída de três células e com tensão nominal de 11,1 V.

Fiação, Conexão e Vedação

Para a transmissão de sinais entre os servomotores, LED's e o microcontrolador foram utilizados cabos do tipo manga blindados, constituídos de 15 fios de 1 mm de diâmetro, tranças de cobre nú para a blindagem e revestido de PVC, protegendo os fios de qualquer contato com a água.

Nas extremidades de cada fio foram soldados plugues fêmeas, e em seguida plugues machos facilitando a ligação nos pinos do Arduino.

Os braços do veículo foram colados com cola Epóxi, com características próprias na colagem de Nylon e outros polímeros.

A vedação foi realizada utilizando silicone em cada encaixe do veículo, para a parte frontal utilizou-se de parafusos para lacrar a tampa.

Placa de Circuito Eletrônico

Foi desenvolvida uma placa com um circuito eletrônico que possibilita que o microcontrolador controle os servomotores, pois este não possui a corrente necessária para o funcionamento dos servomotores, e ainda torna possível a inversão do sentido de rotação dos

motores sem a necessidade de inverter seus pólos manualmente. Este circuito denomina-se ponte H, e é encontrado em circuitos integrados.

Neste projeto foram utilizados dois destes CIs, L298N fabricados pela ST Microeletronics.

Assim foi definido que cada servomotor necessita de três sinais, um para rodar no sentido-horário, outro para rodar no sentido anti-horário, e outro para controlar o nível de tensão para alimentá-lo, fornecido por um modelador de largura de pulsos (PWM) enviado pelo Arduino.

Softwares

Para realizar o projeto eletrônico foram utilizados os softwares Multisim e Ultiboard da National Instruments, nos quais foram realizados os projetos da placa de condicionamento de sinal e conexão de sensores. A produção da placa foi concretizada utilizando uma máquina alemã LPKF Laser & Electronics ("Leiterplatten Kopier Fräsen"), ou seja, uma máquina de prototipagem e fabricação de placas de circuito impresso, disponível na própria instituição.

Para realizar a programação do microcontrolador foi utilizado o Arduino IDE, que é um ambiente integrado para o desenvolvimento de software para o Arduino.

Resultados e Discussão

Detecção de Objetos

Os sensores utilizados no veículo assim que detectam um obstáculo emitem uma tensão proporcional a distância do objeto. A curva característica dos sensores utilizados é apresentada na Figura 3.

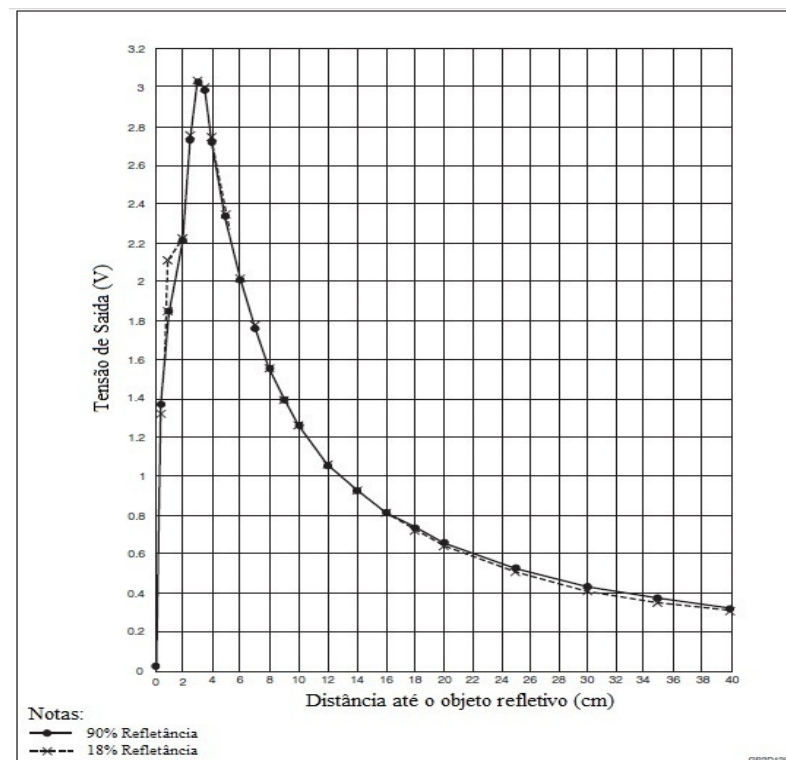


Figura 3 – Curva característica do fabricante.

A partir da curva (Figura 3) aplicou-se metodologia para linearização obtendo-se uma curva linear por partes constituída de três retas, como mostrado na Figura 4. As equações

produzidas em cada trecho para calcular a distância L (cm) em função da tensão medida no sensor V_S (V) resultou em:

Com V_S variando de 0,2 a 3 V:

$$1/L = (V_S + 0,1)/14 \quad (1)$$

Com V_S variando de 3 a 3,05 V:

$$1/L = (V_S - 2,575)/1,667 \quad (2)$$

Com V_S variando de 3,1 a 2,2 V:

$$1/L = (-V_S + 4,9667)/6,6667 \quad (3)$$

A título de programação optou-se por utilizar a primeira equação, devido a *range* de distância ser a mais utilizada no projeto com a desvantagem de limitar a faixa de detecção.

Ainda na programação, utilizou-se uma interrupção, que é uma forma de fazer com que em um determinado tempo a programação pare de rodar e execute uma tarefa; assim que concluída a tarefa o processamento retorna para o ponto onde havia parado. Parte do código desenvolvido em Arduino é apresentado na Figura 5, onde observa-se que a interrupção ocorre a cada um décimo de segundo para medir o sinal dos sensores e verificar se algum objeto foi detectado e qual a sua distância em relação ao veículo (Arduino, 2012a).

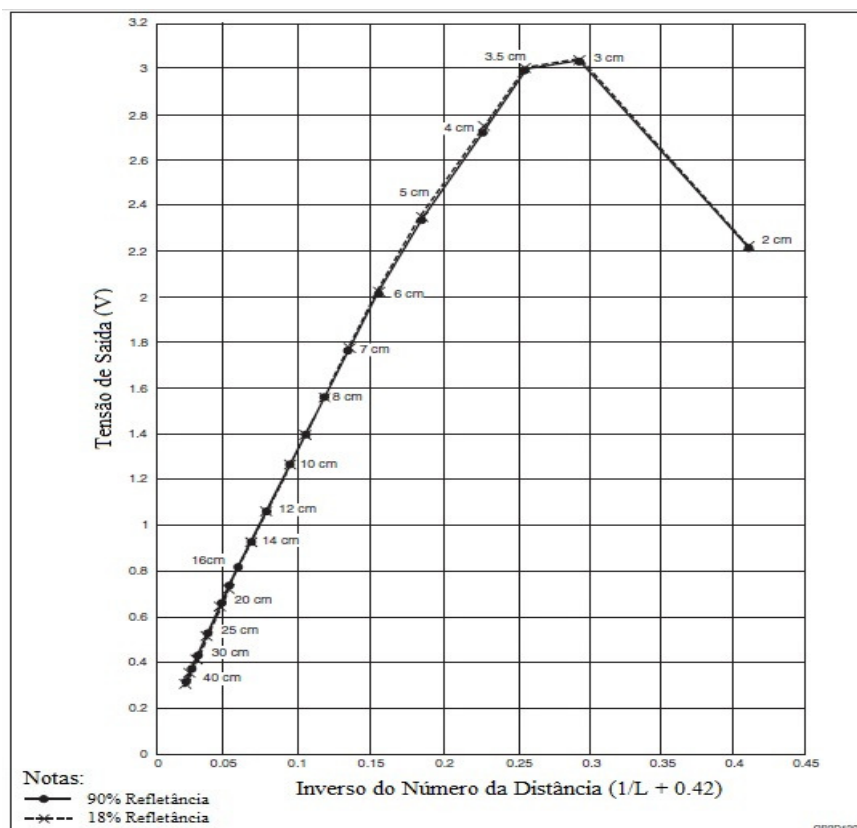


Figura 4 – Linearização da curva característica do sensor de distância.

```

Timer1.initialize(100000); // define um periodo de interrupção de 100000 us (ou 0.1s - ou 10Hz)
Timer1.attachInterrupt( timerIsr ); // liga a interrupção
}

void timerIsr()
{
  int sensorValue1 = analogRead(A15);
  int sensorValue2 = analogRead(A14);
  // Converte a leitura analogica (no intervalo de 0 - 1023) para a tensão de (0 - 5V):
  float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);
  float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);
  float inverseDistance1 = (voltage1 + 0.1)/14;
  float inverseDistance2 = (voltage2 + 0.1)/14;
  float distance1 = 1/inverseDistance1 + 0.42;
  float distance2 = 1/inverseDistance2 + 0.42;
  Serial.print("Cima:");
  Serial.println(distance1);
  Serial.print("Baixo:");
  Serial.println(distance2);
}

```

Figura 5 – Programação de uma Interrupção no Arduino IDE.

Controlando os Servomotores

Para a programação dos servomotores, foi necessária a utilização de uma função que modela a largura de pulsos utilizando sinal com modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM), como mostrado na Figura 6. Essa função é denominada `AnalogWrite()` no Arduino IDE, sendo que a escala varia de 0 a 255 (Arduino 2012b). Essa função consiste em ligar e desligar rapidamente o sinal, sendo que o tempo em que o sinal permanece ligado é a largura do pulso, assim faz com que a tensão na saída varie com essa escala.

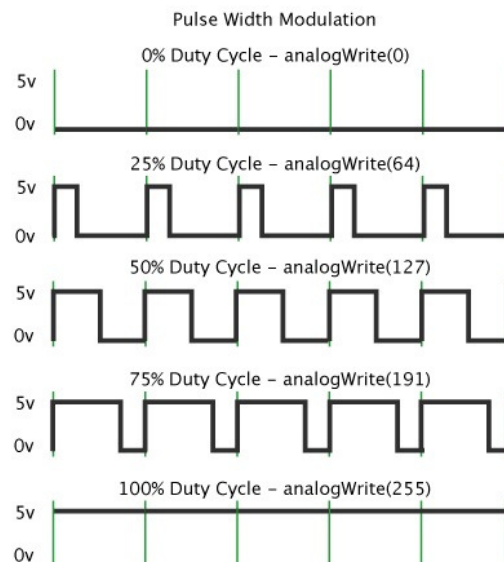


Figura 6 – Exemplos de PWM utilizados no Arduino.

Placa de Interface

A conexão dos sensores, motores, LED's, sensor de distância e fontes de alimentação foi realizada por meio de placa de interface, como demonstrado na Figura 7. Esta placa inicialmente produzida está ilustrada na Figura 8. O layout da placa desenvolvida foi realizado utilizando os softwares Multisim e Ultiboard da National Instruments e está apresentado na Figura 9.

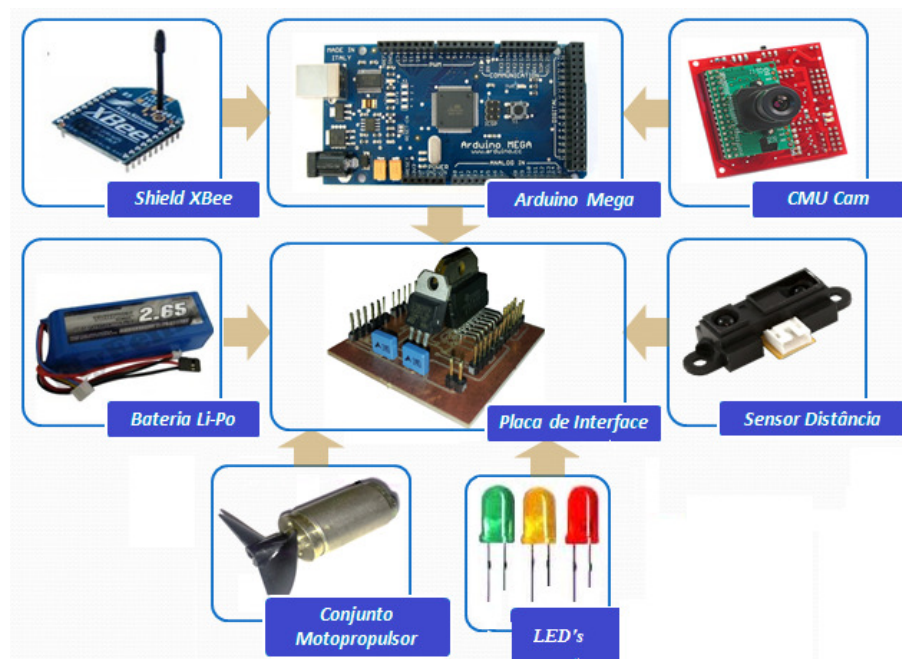


Figura 7 – Diagrama de Conexão por meio da Placa de Interface

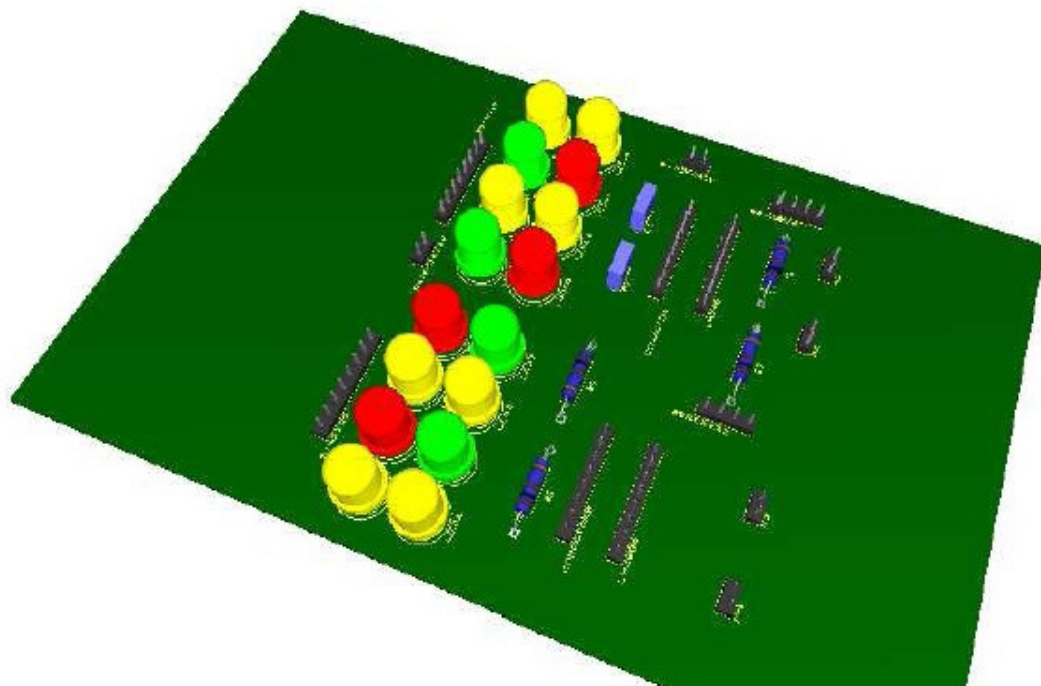


Figura 8 – Nova placa de interface desenvolvida.

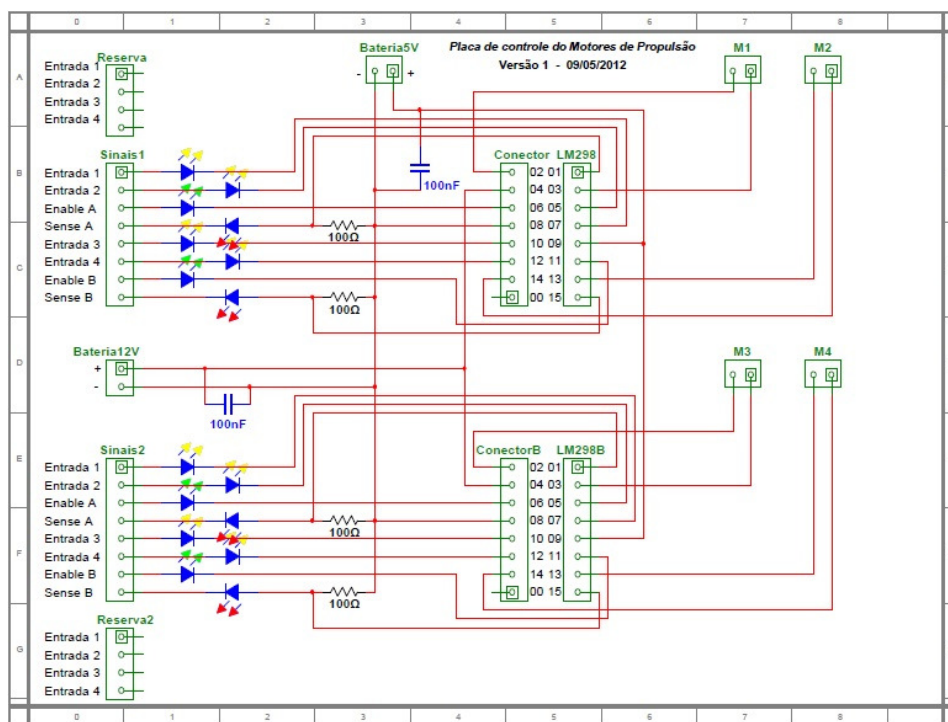


Figura 9 – Layout da nova placa de interface.

Conclusões

Este projeto propôs a adaptação de um veículo subaquático autônomo para que seja capaz de locomover-se de forma autônoma dentro de um tanque. Embora a etapa de transmissão de sinal *wireless* através do módulo ZigBee™ e transmissão de imagem através da CMUCam2 ainda não tenham sido implementadas, é possível realizar testes com os motores e sensores através de um cabo conectado a um computador.

Durante este ano de pesquisa, foi possível a visita a duas conferências internacionais que ocorreram simultaneamente na cidade de Rio Grande/RS, o que ajudou no aprimoramento do projeto. As conferências foram a NAVTEC - Conferência Internacional em Tecnologias Naval e Offshore: Ciência e Inovação e o WTSUB - Workshop de Desafios Tecnológicos em Monitoramento, Inspeção e Automação em Ambiente Subaquático (NAVTEC, 2012) (WTSUB, 2012). Os eventos ocorreram no período de 22 a 24 de março na cidade de Rio Grande - RS. O WTSUB incluiu a I Escola de Robótica Subaquática, abordando várias palestras relacionadas a projetos com veículos aquáticos e subaquáticos. Algumas palestras no evento mostraram as dificuldades de implementação de projeto que utilizam comunicação por meio de módulos ZigBee™. Estudos mostraram que as ondas eletromagnéticas fluem bem submersas, porém a potência de transmissão de sinais entre o meio ar e água é reduzida consideravelmente. Assim é comum o uso de antenas duplas flutuantes em bóias, uma antena acima do nível da água, outra submersa, garantindo o sinal de qualidade.

Referências Bibliográficas

- Arduino, Interruption Timer 1 (2012a), Disponível em < <http://www.arduino.cc/playground/code/timer1>> Acesso em 27/09/2012.
- Arduino, Pulse Width Modulation, (2012b). Disponível em < <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>> Acesso em 15/10/2012.
- Barros, E.A. (2012) AUVs, Veículos Autônomo Submarinos: Panorama Internacional e o Projeto Pirajuba. Disponível em < http://wtsub.c3.furg.br/arquivos/download/apre_lvnt_2012.pdf> Acesso em 13/04/2012.

- Battistella, S.; Queiroz, M.H. (2011) Sistemas de Controle de Missão para Autonomous Underwater Vehicles – AUVs, Disponível em < http://www.das.ufsc.br/~raffo/SeminariosRobotica_DAS/06.Seminario_24.11.2011_S.Battistella/8.SCM%20de%20AUVs.11.2011.pdf > Acesso em 15/04/2012.
- Centeno, M.L.; Gomes, S.C.P.; Pereira, I.M. (2008) Controle em Profundidade de um Veículo Subaquático do Tipo ROV, Disponível em < <http://www.semengo.furg.br/2008/13.pdf> > Acesso em 15/04/2012.
- Forni, C.C.; Assis, W.O.; Coelho, A.D. (2011a) Projeto de um Veículo Subaquático Autônomo. 3. Seminário Mauá de Iniciação Científica, São Caetano do Sul.
- Forni, C.C.; Assis, W.O.; Coelho, A.D. (2011b) Projeto de um Veículo Subaquático Autônomo. CONIC - SEMESP - 11. Congresso Nacional de Iniciação Científica, Santos.
- Goheen, K.R., Jefferys, E.R. (1990) Multivariable Self-Tuning Autopilots for Autonomous and Remotely Operated Underwater Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **15**, 144-151.
- Gonzalez, L.A. (2004) *Design, Modelling and Control of an Autonomous Underwater Vehicle*, Bachelor of Engineering Thesis, The University of Western Australia, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Crawley, Australia.
- NAVTEC, Conferência Internacional Naval e Tecnológica (2012). Disponível em < <http://www.polonavalrs.com.br/> > Acesso em 10/03/2012
- Rowe, A.; Rosenberg, C.; Nourbakhsh, I. (2002) *A Low Cost Embedded Color Vision System*. Proceedings of IROS 2002 – IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Switzerland, September / October.
- Valavanis, K.P., Gracanin, D., Matokasevic, M., Kolluru, R., Demetriou, G.A. (1997) Control Architectures for Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Controls Systems*, 48-64.
- Wikipédia, A Enciclopédia Livre (2012). *Arduino* Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Arduino>>. Acesso em: 12/09/2012.
- WTSUB Workshop de Desafios Tecnológicos em Monitoramento, Inspeção e Automação em Ambiente Subaquático (2012). Disponível em < http://wtsub.c3.furg.br/index.php?Itemid=1524&option=texto&id_site_componente=2224 > Acesso em 10/03/2012.
- Yoerger, D.R., Jakuba, M.; Bradley, A.M.; Bingham, B. (2007) Techniques for Deep Sea Near Bottom Survey Using an Autonomous Underwater Vehicle. *Robotics Research*, **28**, 416-429.
- Yuh, J. (2000) Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey. *Journal Autonomous Robots*, **8**, 7-24.