

PROJETO DE UM VEÍCULO SUBAQUÁTICO AUTÔNOMO

Caio Cesar Forni ¹; Wânderson de Oliveira Assis ²; Alessandra Dutra Coelho ²

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

² 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) que seja capaz de locomover-se de forma autônoma dentro de um tanque. O veículo deve possuir câmera embarcada, o que lhe permitirá desenvolver técnicas de processamento de imagem visando exploração e mapeamento do interior do tanque de água de forma a fazer a detecção de objetos pela cor e forma.*

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. A produção científica obtida como resultado destas pesquisas é relativamente extensa e inclui (Guimarães, 2006), (Guimarães, Assis e Coelho, 2006), (Coelho, Assis e Silva, 2009), (Coelho *et al.*, 2006), entre outros. Uma extensão destas pesquisas consiste na utilização de sistemas de visão computacional e a aplicação de técnicas de processamento de imagens os quais proporcionaram o desenvolvimento de várias outras pesquisas e projetos (Denis, 2009), (Assis *et al.*, 2007).

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. 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. 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).

Material e Métodos

O trabalho visa o projeto e a construção de protótipo de um veículo subaquático autônomo que seja capaz de se locomover no interior de um tanque e monitorar a existência de peças de formas e cores padrão no fundo do mesmo de forma autônoma.

Nesta seção pretende-se demonstrar as características, funcionalidades e aplicações dos dispositivos eletrônicos utilizados, bem como os materiais utilizados na construção e os softwares que viabilizaram o projeto.

Materiais e softwares utilizados no projeto mecânico

A construção física do veículo, projetada em duas versões diferentes, foi desenvolvida utilizando o software Solid Works.

Na primeira versão a estrutura mecânica do veículo foi projetada utilizando sistema com tubos em PVC e caixa plástica. Na segunda versão foram utilizados materiais como madeira, nylon, alumínio e acrílico.

Materiais e softwares utilizados no projeto eletrônico

Na concepção do projeto eletrônico considerou-se a utilização de um sistema microprocessado que será responsável pelo monitoramento dos sinais produzidos pelos sensores bem como pelo controle de movimentação por meio do acionamento de motores.

O sistema microprocessado utilizado é a plataforma Arduino Mega. Os sensores utilizados são dois sensores de distância e uma câmera com processamento embarcado (CMU-Cam). O sistema de movimentação utiliza sistema motopropulsor constituído de quatro servomotores de corrente contínua acoplados a hélices. O sistema inclui ainda placa de condicionamento de sinal e conexão de dispositivos, sistema de comunicação por rádio frequência utilizando módulos XBee, além de bateria para alimentação.

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 complicadas (Wikipédia, 2011).

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 outras. 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, que será utilizado no projeto, é mostrado na Figura 1. Ele utiliza 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.

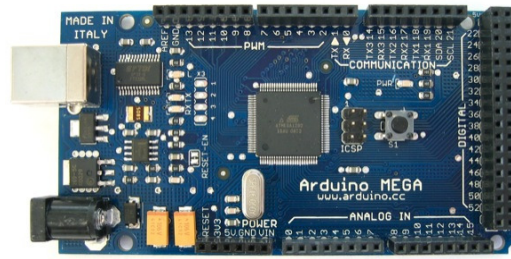


Figura 1 – Arduino Mega . Fonte: Wikipédia, 2011.

Para a transmissão de dados *wireless* do veículo com o computador, foi inserido no projeto o módulo Xbee. Os módulos Xbee são dispositivos com tecnologia ZigBee desenvolvidos pela empresa norte americana DIGI (antiga MaxStream) com o objetivo de simplificar aplicações utilizando RF. Originalmente foram produzidas duas versões disponíveis na linha MaxStream: o XBee e o XBee PRO. São versões compatíveis entre si que se diferenciam apenas pela potência de transmissão: 1mW para o XBee e 63mW para o XBee PRO. 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 ZigBee® 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. A Figura 2 ilustra módulos XBee com diversos tipos de antenas disponíveis.

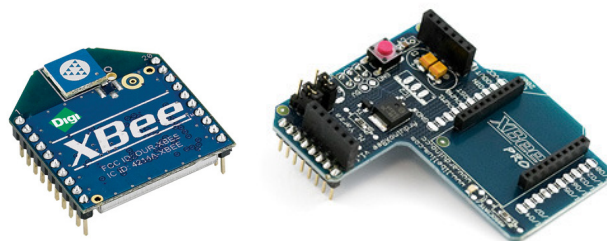


Figura 2 – Módulo XBee e Placa de Conexão ao Arduino (*shield*).

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 3 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).

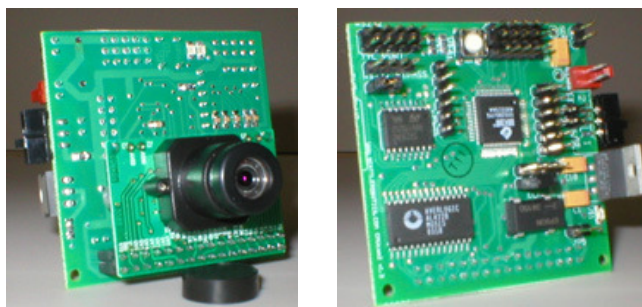


Figura 3 – CMUcam2 - Vista Frontal Com Câmera e Vista Posterior.

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.

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 4) 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.

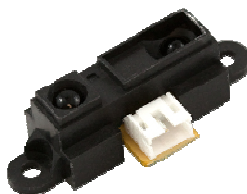


Figura 4 – Sensor de Distância

O controle da movimentação dos robôs é conseguido por servomotores DC. Foram utilizados *minimotors* fabricados pela *Falhaber*, modelo 1516E012S (Figura 5). *Esse* modelo é controlado por uma tensão contínua de, no máximo, 2V, 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.

A alimentação foi produzida por bateria Li-Po Turnigy de 500 mAh constituída de três células e com tensão nominal de 11,1 V (Figura 5).



Figura 4 – Servomotor DC

A alimentação foi produzida por bateria Li-Po Turnigy de 500 mAh constituída de três células e com tensão nominal de 11,1 V (Figura 5).



Figura 5 – Bateria Li-Po

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.

Resultados e Discussão

A concepção de todo o projeto foi dividida entre as etapas de projeto mecânico, eletrônico e programação, as quais serão descritas nos itens subsequentes.

Projeto Mecânico

O projeto mecânico iniciou-se buscando uma configuração adequada para a aplicação, para tal foi realizada uma intensa pesquisa na busca de soluções já existentes para projetos similares. Dentre as diversas opções encontradas, duas se destacaram pela facilidade construtiva, baixo custo e boa estanqueidade do compartimento de eletrônicos. Adaptando estas configurações para o presente trabalho foram realizados desenhos em software de CAD os quais são ilustradas na Figura 6. Por apresentar maior estanqueidade e simetria e menor empuxo, a segunda opção de configuração foi selecionada para o projeto.

Para a movimentação do veículo foram selecionados motoredutores de 12 V (Figura 4), blindados e de alto torque acoplados a hélices náuticas utilizadas na prática do nautimodelismo. A disposição dos conjuntos motopropulsores no veículo faz com que o mesmo apresente quatro graus de liberdade, translação nos eixos x e z e rotação nos planos xy e yz . A Figura 7 ilustra o conjunto motopropulsor montado, bem como sua disposição no veículo.

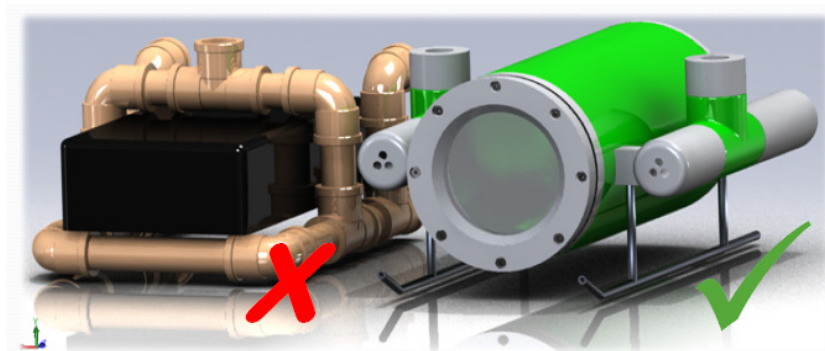


Figura 6 – Desenho em CAD das Configurações Pré-Selecionadas

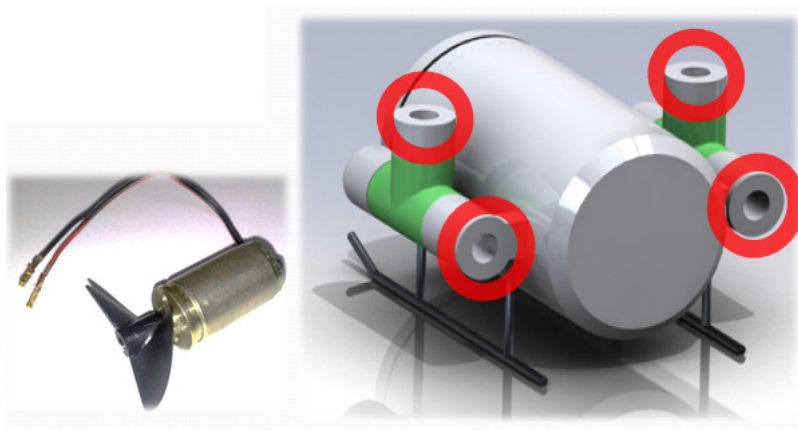


Figura 7 – Conjunto Motopropulsor e Sua Disposição no Veículo

Com o objetivo de concentrar os eletrônicos e protegê-los de choques e umidade, foi desenvolvido um compartimento para fixação na forma de gaveta proporcionando assim uma maior versatilidade na colocação e retirada do mesmo, facilitando assim a manutenção e a recarga da bateria. O projeto e o protótipo podem ser observados na Figura 8.

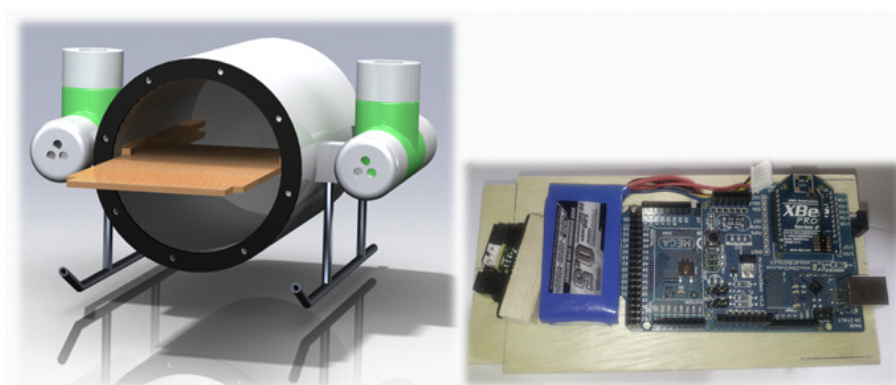


Figura 8 – Projeto e Protótipo do Compartimento de Eletrônicos

Uma das grandes dificuldades no projeto de um veículo subaquático é com relação à vedação. No presente trabalho, para aumentar a estanqueidade do veículo, e assim garantir sua estabilidade e a proteção dos componentes eletrônicos nele inseridos, o projeto contemplou a utilização de uma flange para o fechamento do compartimento. Esta flange foi projetada para ter a maior área de contato possível com o corpo, aumentando assim a vedação. Para diminuir ainda mais o risco de vazamento foi projetada uma peça produzida de borracha sintética a qual foi posicionada entre o corpo e a flange e que na condição de aperto dos parafusos é comprimida, maximizando assim a vedação. A Figura 9 reúne as soluções adotadas no projeto.



Figura 9 – Soluções para Estanqueidade Adotadas

Para garantir a estabilidade do veículo quando submerso foi realizada uma análise para o correto posicionamento do centro de gravidade e do ponto de atuação do empuxo. Partindo do pressuposto de que os dois pontos dever coincidir nos eixos x e y para que o veículo se mantenha nivelado, existem duas possibilidades de posicionamento, a primeira com o centro de gravidade localizado acima do ponto de atuação do empuxo, e a segunda com o centro de gravidade abaixo deste ponto. Na primeira situação, para um distúrbio que altere o ângulo de ataque do veículo, a força peso e empuxo, que não mais atuam na mesma reta vertical, irão gerar um momento que tende a acentuar a rotação do veículo no sentido do distúrbio, sendo este momento denominado desestabilizador. Já no segundo caso, as forças irão provocar um momento que tende a se contrapor ao sentido de rotação causada pelo distúrbio, denominado estabilizador, fazendo com que o veículo retorne à sua posição de equilíbrio. A Figura 10 exemplifica os dois casos de posicionamento dos pontos e sua relação quanto a estabilidade.

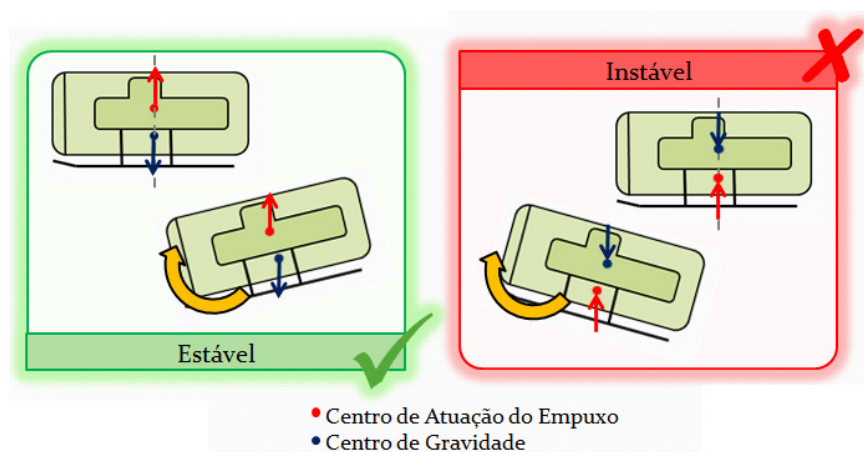


Figura 10 – Conceito de Estabilidade do Veículo

Uma vez dimensionado o veículo, a magnitude do empuxo e seu ponto de atuação resultante não podem ser alterados. Para verificar o valor destes parâmetros foi realizada uma análise na qual foi modelado o veículo de forma maciça e especificando a densidade do material igual à densidade da água para temperatura ambiente. Com isso, partindo do princípio de que a magnitude do empuxo é igual ao peso do volume de água deslocado e que seu ponto de atuação resultante pode ser relacionado ao centro de gravidade deste volume de água, foi utilizada a ferramenta de propriedade de massa do software de CAD, obtendo assim a massa do volume, empuxo, e o ponto de aplicação. A Figura 11 mostra o resultado da análise.

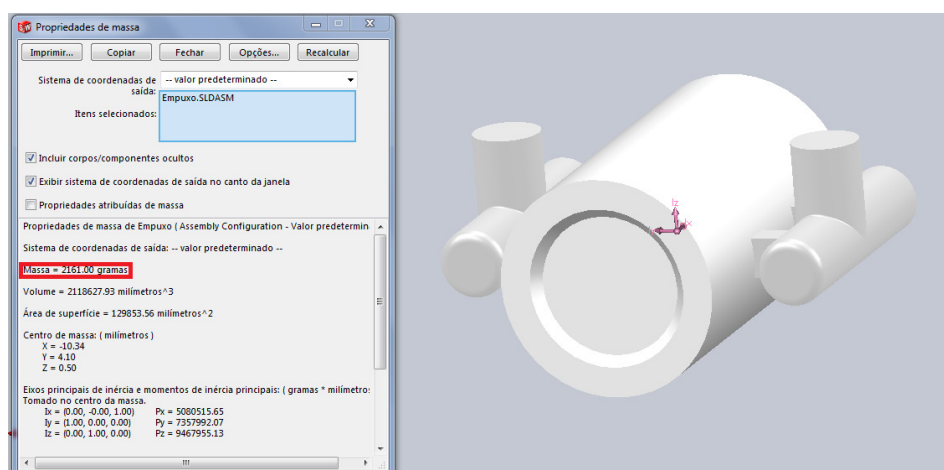


Figura 11 – Resultado da Análise para Verificação dos Parâmetros de Empuxo.

De posse destes dados foi possível dimensionar a massa e a posição dos lastros de chumbo para igualar a força-peso ao empuxo e deslocar o centro de gravidade para uma posição abaixo do ponto de atuação do empuxo, tomando os cuidados necessários para que o centro de gravidade não se afaste das linhas de tração dos conjuntos motopropulsores, provocando uma decomposição de movimento indesejado.

Projeto Eletrônico

O projeto eletrônico tem por finalidade fazer a integração de todos os dispositivos eletrônicos de forma simples e organizada. O diagrama de ligação elétrica do veículo com as informações dos componentes embarcados pode ser visualizado na Figura 12.

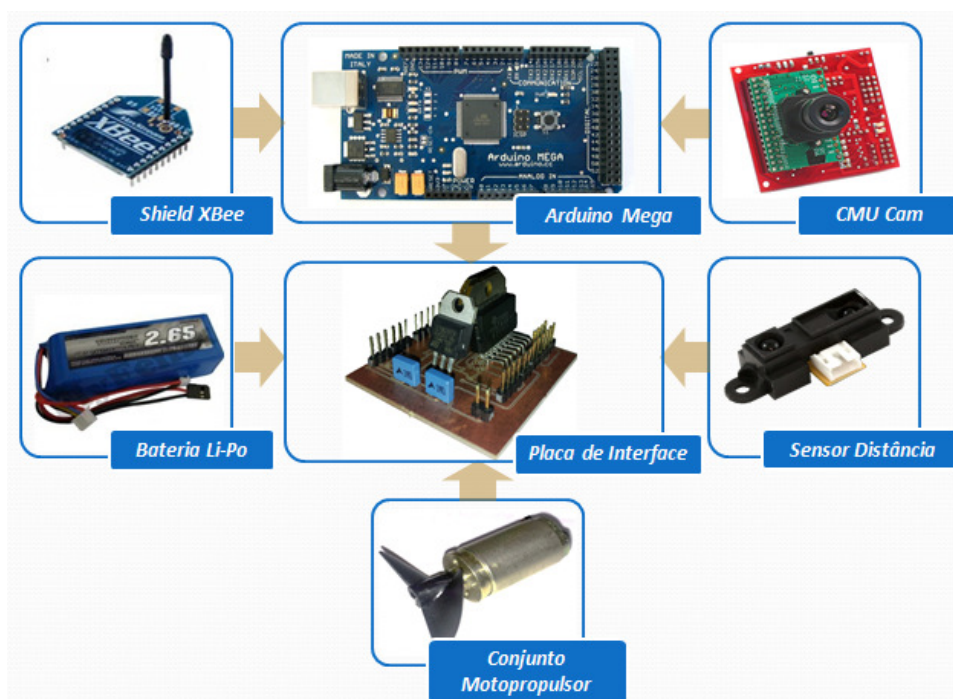


Figura 12 – Diagrama de Ligação Elétrica

Para seleção da bateria foi levada em consideração a maior tensão de alimentação dentre os componentes eletrônicos, sendo 12 V do conjunto motopropulsor o maior valor. Portanto foi selecionada para a aplicação uma bateria de LiPo com três células e tensão de 11,1 V. Uma vez que a máxima tensão de alimentação admissível dos outros componentes ser de 5 V, faz-se necessária a utilização do circuito integrado regulador de tensão 7805.

Para o controle da velocidade e sentido de rotação do conjunto motopropulsor foram utilizados amplificadores de potência L298.

Com o objetivo de organizar os cabos de ligação entre os componentes e incluir os circuitos integrados necessários foi desenvolvida uma placa de circuito impresso para esta interface. O projeto da placa, bem como sua construção, podem ser visualizados na Figura 13.

Para cálculo da largura das trilhas foi verificada a maior corrente de projeto, sendo esta medida em teste prático do motor para rotor bloqueado, resultando em 400 mA. De posse deste dado foi possível calcular o valor da largura das trilhas por meio de:

$$L = \frac{I_{m\acute{a}x}}{0,2} = \frac{0,4}{0,2} = 2 \text{ mm} \quad (1)$$

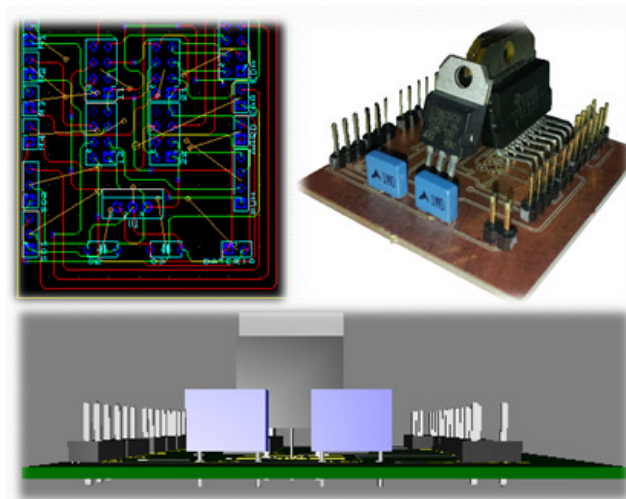


Figura 13 – Projeto e construção da placa de interface

Programação

A programação será realizada na continuidade do projeto. Contudo é possível definir a priori as tarefas que devem ser desenvolvidas pelo algoritmo o qual será introduzido pela programação do Arduino.

Inicialmente a programação será realizada de forma a permitir o controle remoto de movimentação do veículo. Para isto utilizar-se-á um computador com software de comunicação serial por meio do qual será possível enviar comandos remotos para o veículo, os quais serão recebidos no módulo XBee. Nesta etapa deve-se antes de tudo definir um protocolo para a comunicação entre o computador e o veículo. Em seguida deve-se criar o algoritmo para realizar o seguinte procedimento cíclico:

- recepção de dados seriais enviados pelo módulo XBee;
- decodificação da informação recebida;
- controle de acionamento dos motopropulsores, conforme o comando recebido, de forma a produzir a movimentação desejada; aqui um estudo do modelo matemático do veículo e a utilização deste modelo na definição das tensões que devem ser aplicadas a cada motor podem ser indispensáveis.

Na etapa seguinte realizar-se-á a programação do veículo para que este realize operações de forma autônoma. Neste caso o objetivo é localizar objetos no fundo do tanque, a partir do processamento da imagem para reconhecimento de formas e cores. Para isto os seguintes procedimentos serão realizados:

- captura e processamento de imagens utilizando a CMU-Cam2;
- controle de movimentação do veículo em todas as direções com o objetivo de se aproximar do objeto de busca;
- monitoramento contínuo dos sinais dos sensores de distância de forma a permitir o desvio de obstáculos, bem como a detecção das bordas do tanque;

Após concluída esta etapa, na continuidade do projeto, podem ser incorporados outros dispositivos ao veículo, como por exemplo, materiais ferromagnéticos fixados na estrutura. Estes dispositivos permitirão a captura do objeto após a sua localização.

Conclusões

Este projeto de pesquisa propôs a construção de um veículo subaquático autônomo que seja capaz de locomover-se de forma autônoma dentro de um tanque. Embora a etapa de programação não tenha sido realizada, a construção completa do veículo foi realizada com sucesso, incluindo montagem da estrutura mecânica e do sistema eletrônico. O projeto contemplou a inclusão de sistema de captura e processamento de imagens, sensores de distância para detecção de obstáculos e motopropulsores para produzir a movimentação em todas as direções. Um estudo da estabilidade do veículo quando submerso foi realizado de forma a definir o correto posicionamento do centro de gravidade e do ponto de atuação do empuxo. Adicionalmente o projeto desenvolvido apresenta excelentes características de estanqueidade, para garantir sua estabilidade e a proteção dos componentes eletrônicos inseridos. A Figura 14 apresenta o protótipo construído.

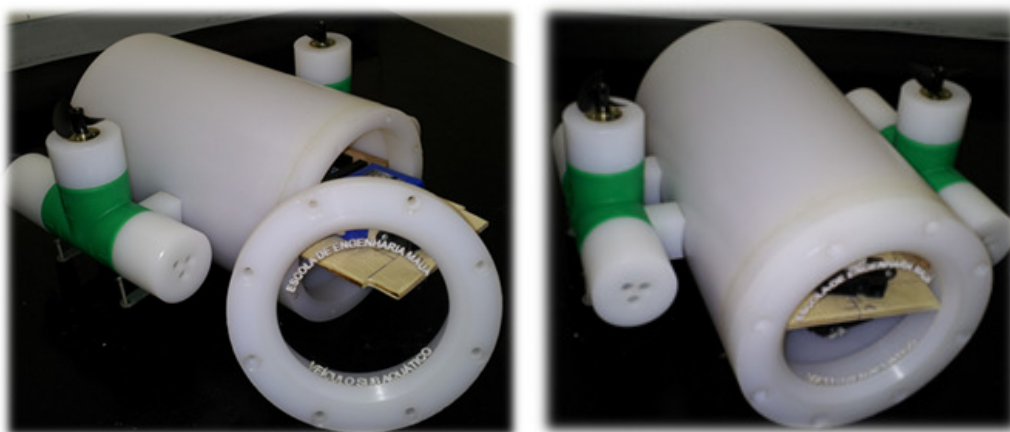


Figura 14 – Fotografias do Veículo Subaquático Projetado

Na continuidade do projeto pretende-se desenvolver a programação do sistema microprocessado embarcado de forma que o veículo consiga movimentar-se de forma autônoma, ou ainda seja possível o controle remoto, por computador, neste caso utilizando módulos com tecnologia ZigBee inseridos na estrutura.

Agradecimentos

Agradecimentos à Escola de Engenharia Mauá pela infraestrutura disponibilizada, bem como pela bolsa de iniciação científica que possibilitou o desenvolvimento deste projeto.

Referências Bibliográficas

- Assis, W. O., Genova, W. J., Gomes, M. M., Coelho, A. D. (2007) *Aplicação de Tecnologias de Controle de Processos Contínuos e Processamento de Imagem no Futebol de Robôs*, SBAI 2007 – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – Brazilian Robotics Competition, Florianópolis, SC.
- Coelho, A. D., Assis, W. O., Silva, J. G. (2009) *The Scientific Initiation as an Instrument of Training for Future Researchers*, Proceedings of 9th IFIP World Conference on Computers in Education, Bento Gonçalves, RS, Brasil.

- Coelho, A. D., Gomes, M. M., Assis, W. O., Silva, A. R., Pegorelli Neto, A., Fernandes, D. C., Santos, D. P. (2006) *Development of Autonomous Constructor Robot*, Proceedings of LARS 2006 – 5th IEEE Latin American Robotics Contest for Student, Santiago – Chile.
- Denis, C. (2009) *Seleção de Tomates para Processamento Industrial por Meio de Redes Neurais Aplicadas em Sistema de Visão Computacional*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Instituto Mauá de Tecnologia.
- 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.
- Guimarães, F. A. (2006) *Desenvolvimento de Robô Móvel Utilizado para a Exploração de Ambientes Hostis*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Instituto Mauá de Tecnologia.
- Guimarães, F. A., Assis, W. O., Coelho, A. D. (2009) *A Radio Frequency Communication Protocol Applied on Mobile Robot Control System*, COBEM 2009 – International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brasil.
- 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, p. 48-64, December.
- Wikipédia, A Enciclopédia Livre (2011), *Arduino* Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Arduino>>. Acesso em: 12 Out de 2011.
- 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, Springer Berlin / Heidelberg, **28**, 416 – 429.
- Yuh, J. (2000) *Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey*, Journal Autonomous Robots, Springer Netherlands, **8**, 7-24.