

# Monitoramento de Estruturas de Barragens e Ecossistemas de Lagos de Reservatórios de UHEs Apoiados por Veículo Submergível Autônomo

Edicarla P. Andrade, José Victor C. Azevedo, Epitácio Kleber F. Neto, Tiago L. Garcia , Antonio T. Varela , Michael S. Duarte, Osmênio dos S. Braz, Tobias G. B. Filho, André Luiz C. Araújo

**Resumo** – Impulsionada pela crescente demanda por operações submarinas nos campos de monitoramento de estruturas de barragens, ecossistemas de lagos de reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHE's) e da prospecção e extração de petróleo, a robótica submarina tem se desenvolvido rapidamente. O aumento das atividades de exploração, prospecção, monitoramento e segurança em lagos, rios e no mar, tanto em aplicações comerciais como em aplicações científicas, tem levado grandes empresas e centros de pesquisa a investir no desenvolvimento de veículos submarinos. A proposta deste trabalho é apresentar o projeto de um veículo submarino autônomo (VSA), abordando os esforços e o dimensionamento dos elementos estruturais e de máquinas, além de dissertar sobre a parte sensorial, a qual inclui sensores de navegação e sensores de condições limnológicas. A integração destes sensores em uma plataforma inteligente propicia um controle satisfatório do veículo, possibilitando a movimentação do submarino nos três eixos espaciais. Pelo fato dos sensores utilizados possuírem resposta satisfatória e em tempo hábil, consegue-se determinar a aceleração e a inclinação, além de sua atitude em relação à trajetória tomada, de modo instantâneo. Este veículo será capaz de monitorar a integridade física de barragens, de fazer aquisição e armazenagem dos parâmetros limnológicos tais como a temperatura, oxigênio dissolvido, PH, alcalinidade e condutividade, além de documentar imagens da biota dos lagos dos reservatórios de UHE's, com custo minimizado, alta disponibilidade e pouca dependência de mão de obra especializada para operá-lo.

**Palavras-chave** – barragens, fusão sensorial, navegação, veículo submarino autônomo.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente, a avaliação da integridade de estruturas submersas é realizada com o auxílio de piezômetros, referências de nível, marcos de superfície e dispositivos de captação e medição de vazões a jusante do aterro, projeto do ano de 2008 realizado pela empresa AgSolve. Em dezembro de 2009, foi apresentado na Áustria um projeto de monitoramento de barragens que utiliza a inteligência computacional para a realização da atividade. Neste projeto três tarefas são desenvolvidas pelo software. A primeira delas é a verificação da eficiência do instrumento de medição, uma varredura detalhada pelos instrumentos utilizados na leitura garante que possíveis erros do equipamento não interfiram no resultado.

Tais dispositivos, apesar de apresentarem argumentos valiosos para a manutenção de estruturas submersas, não permitem inferir sobre a existência e as características de fraturas e a devida localização das mesmas. Tal procedimento de avaliação é realizado por mergulhadores, que enfrentam a dificuldade da turbidez da água, o que reduz a visibilidade, impedindo uma avaliação precisa da estrutura, aumentando ainda mais o risco do mergulho.

Outros importantes elementos de estudo para otimização da operação e manutenção das UHE's, tais como o monitoramento da acidez, açoreamento, controle de moluscos, ictiofauna, macrófitas, bem como a qualidade da água, carecem de mecanismos adicionais, utilizados de modo desassociado aos estudos de manutenção. Isso aumenta o custo e rouba a oportunidade de análises multi-critério de causa e efeito, imprescindíveis para a tomada de decisões estratégicas.

Os Veículos Autônomos Submarinos ou *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) são dispositivos veiculares com autonomia para realizar operações por si só sem a interação humana, ou seja, ele é pré-programado para uma tarefa ou operação específica, depois é lançado ao mar e realiza o que foi programado para realizar. Alguns AUVs possuem um sistema computacional embarcado para tomada de decisões além de sistemas de aquisição de dados e percepção (reali-

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este trabalho foi apoiado parcialmente pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF).

Edicarla P. Andrade, Epitácio Kleber F. Neto, José Victor C. Azevedo, Tiago L. Garcia , Antonio T. Varela , Michael S. Duarte, Osmênio dos S. Braz, Tobias G. B. Filho, André Luiz C. Araújo trabalham no Instituto de Telemática (ITI) vinculado ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Ceará (IFCE) (e-mail: edicarla.andrade@gmail.com, kleber1710@gmail.com, victor2\_0@yahoo.com.br, tiago\_lessa\_garcia@yaho.com.br, themoteo@gmail.com, mikmetal@hotmail.com, osmenio@hotmail.com, andreluiz@ifce.edu.br)

zada por sensores como acelerômetro e bússolas), sistema de atuação, comunicação (via ultra-som), geração de energia.

Em 2011 foi anunciado que o robô submarino TRIMARES, tecnologia portuguesa, fará inspeções em barragens brasileiras. O “TRIMARES” é capaz de inspecionar estruturas de barragens e o assoreamento das bacias com grau de precisão na ordem dos centímetros e em tempo real. O submarino-robô fará a recolha automática de informação permitindo a detecção antecipada de anomalias e a análise do nível de risco de barragens com maior precisão e menos custos do que os processos tradicionais. Além disso, o robô irá recolher dados sobre a qualidade da água e a morfologia da bacia hidrográfica.

Quanto a tecnologia brasileira, referente a dados de 2008, a Poli-USP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) tem dois projetos, ambos de pesquisadores do Departamento de Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. Um deles é o Laurs (sigla do Laboratório de Ultrassom e Robótica Submarina), coordenado pelo professor Julio Cezar Adamowski, que foi projetado para atuar em águas profundas através de uma iniciativa do Cenpes (Centro de Pesquisa da Petrobras). Segundo Adamowski, o objetivo foi atender à necessidade da companhia de um veículo que atuasse na recuperação de *transponders* (sinalizadores acústicos utilizados em navios para perfuração de poços de petróleo). O robô desenvolvido na Poli não precisa de equipe na superfície para o seu controle. Possui bateria, oito propulsores, computador de bordo, *software* e sensores de fibra ótica, giroscópio, de imersão, profundidade e velocidade. Utiliza um cabo fino para o controle remoto do veículo, sinais de vídeo e transmissão de dados. Pirajuba (do tupi, peixe amarelo) é outro robô da Poli, o veículo fará o mapeamento de atividades geológicas do fundo do mar e auxiliará à prospecção de petróleo.

Na Coppe (Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia), pertencente à UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), criou-se um robô aquático, desenvolvido inicialmente para inspecionar túneis subaquáticos das usinas hidrelétricas da Ampla, companhia de distribuição de energia. O robô é um veículo submarino de controle remoto ligado a um cabo. Com 90 centímetros de comprimento, 60cm de altura e 70cm de largura, pesa cerca de 30kg e foi construído para mergulhar a 40m de profundidade, porém está sendo adaptado para coletar material em até 500m.

Percebe-se que os submarinos brasileiros desenvolvidos não são direcionados para a inspeção de barragens, além disso são veículos semi- autônomos.

Diante desta realidade, principalmente visando projetos nacionais, o projeto visou desenvolver um Veículo Submarino Autônomo (AUV) com capacidade autônoma de locomoção, para realizar o monitoramento das estruturas físicas das barragens e captar informações sobre a biota local.

## II. ESTRUTURA FÍSICA

### A. Composição

O Submarino é composto por duas partes, um corpo central, constituído por um cano, e duas bases laterais. No corpo central está localizada toda a rede sensorial que controla o submarino. Nas bases laterais, encontra-se o sistema de flutuação, emersão e submersão do submarino. Acima dos canos laterais, encontram-se os propulsores que atuam no deslocamento do submarino. A estrutura física pode ser vista na figura 1.



Figura 1-Estrutura física do submarino

### B. Flutuação

O submarino tem um volume inicial de aproximadamente  $70,685 \text{ dm}^3$  em cada uma das bases laterais e  $35,342 \text{ dm}^3$  no corpo central, conseqüentemente, para se manter em equilíbrio o mesmo poderá suportar uma massa, aproximadamente, de no máximo 175 kg, assim o empuxo é um pouco maior que o peso o que faz ele flutuar.

Inicialmente o submarino tem que estar na superfície da água, neste caso o empuxo é maior que o peso para que ele fique sempre flutuando na superfície, o que não gera transbordo, pois é possível compensar o equilíbrio com bóias ou pesos.

### C. Controle de flutuação

Para controlar a flutuação e realizar sua emersão e submersão serão usados dois êmbolos (Figura 2), acoplados individualmente nas bases laterais. Alguns submarinos atuais utilizam um sistema de propulsores para a realização desta tarefa, foi escolhido para este projeto um sistema de emboloplasto, pois, além da economia de energia para realizar as tarefas de imersão e emersão, não polui a captação de imagens que é feita para a verificação da estrutura das barragens.

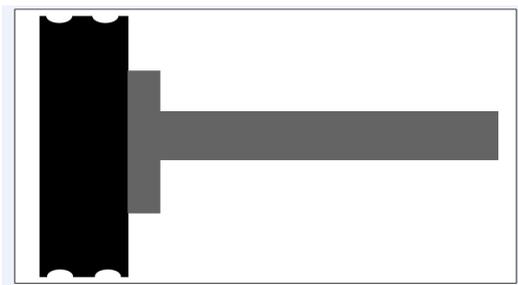


Figura 2-Êmbolo

De acordo com as leis da conservação da massa, não se pode variar a massa de um corpo, mas é possível variar seu volume. Essa variação é que faz que o submarino realize a submersão e a emersão.

Uma pequena variação na diferença entre massa e volume altera o ponto de equilíbrio do corpo, fazendo que ele afunde, fique em equilíbrio ou venha a tona no líquido. Para controlar essa diferença é usada toda a extensão de cada uma das bases laterais que a partir de agora se chamará: cilindros de compressão.

Cada um dos cilindros de compressão é constituído por um êmbolo, um motor, uma cremalheira (Figura 3), um trilho e a base de suporte para todos esses componentes.



Figura 3-Cano lateral e cremalheira.

O motor faz que a cremalheira se desloque horizontalmente sobre o trilho empurrando o êmbolo para frente e para trás num movimento de “vai e vem” de acordo com a necessidade do submarino em ficar emerso ou submerso.

Nas extremidades de cada cilindro há uma abertura por onde a água preenche o cilindro. Quando o êmbolo está em seu ponto inicial (3/4 do comprimento total), o empuxo é igual ao peso e o submarino emerge em equilíbrio. Quando o êmbolo é deslocado para que ocupe 2/4 do cilindro o volume diminuirá, pois o restante está ocupado por água, e o submarino afunda. Ao ser deslocado ao longo de toda a extensão do cilindro, o volume aumenta e o submarino vem à tona, lembrando que para mantê-lo em equilíbrio basta deslocar o cilindro para seu ponto inicial (3/4 do comprimento total).

No interior de cada cilindro da base, há um sistema de placas e baterias. O sistema de placas é composto por uma para alimentação e outra para a recepção de mensagens, nas quais está o comando a ser realizado.

#### D. Motor

Este é um ponto delicado do projeto, pois o motor indica a profundidade máxima de trabalho eficiente do submarino. A profundidade de submersão adotada foi de 10m, com este dado foi escolhido o motor ideal.

De acordo com os cálculos utilizados, um motor com torque de 300 kg foi considerado ideal para conseguir empurrar o êmbolo bem lubrificado a uma profundidade de 10m com segurança.

O controle do motor é realizado por meio de *encoders* e pelo CI LMD 18200. Em motores CC basta variar a tensão de alimentação para fazer o controle. O LMD fará a variação. O encoder dirá se o motor fez corretamente.

#### E. Redução

O método utilizado na redução é o de Coroa e sem-fim, pois, devido a dimensões e a estabilidade do submarino, o motor deve ficar no mesmo eixo do tubo, assim a força no eixo de saída da redução deverá ser aplicada a 90° do eixo de entrada.

O par coroa e sem-fim é confeccionada mais facilmente, transmite grandes potências, tem menor custo, possui maior durabilidade, transmite altos torques com relações relativamente pequenas, ocupa pouco espaço se comparada às outras opções e possui a opção do auto-travamento.

Apesar de tantas vantagens também possui desvantagens. Para o caso do submarino o ideal é uma redução de apenas 3:1, mas para reduções na escala de 10:1 a 2:1 é necessário um grande número de entradas no sem-fim e um ângulo de hélice muito elevado tornando sua fabricação extremamente complicada e cara.

Para esta redução possuir as vantagens citadas ela foi dimensionada com apenas uma entrada. Além do sem-fim possuir somente poucas entradas foi preciso dimensionar o ângulo de hélice de forma que garantisse o auto-travamento, para isso o cosseno do ângulo de atrito deve ser maior que o cosseno do ângulo de hélice, assim para os cálculos de dimensionamento a redução tem uma relação de 14,5:1 e um ângulo de hélice de 20°.

A coroa desta redução não pôde ser utilizada para transferir movimento à cremalheira devido ao seu formato de acoplamento com o sem-fim, assim no mesmo eixo dela foi colocada uma engrenagem de dentes **helicoidais** para transmitir o movimento para a cremalheira, assim a caixa de redução é dividida em duas partes o que facilitou o dimensionamento (Figura 4):

**Transferência de Potência** – Temos o par ‘coroa e sem-fim’ que aumentam o torque do motor para o valor especificado para o projeto.

**Transmissão de Movimento** – Temos o par Coroa e Cremalheira que utiliza a potência adquirida com a Coroa e o sem-fim para movimentar o êmbolo.

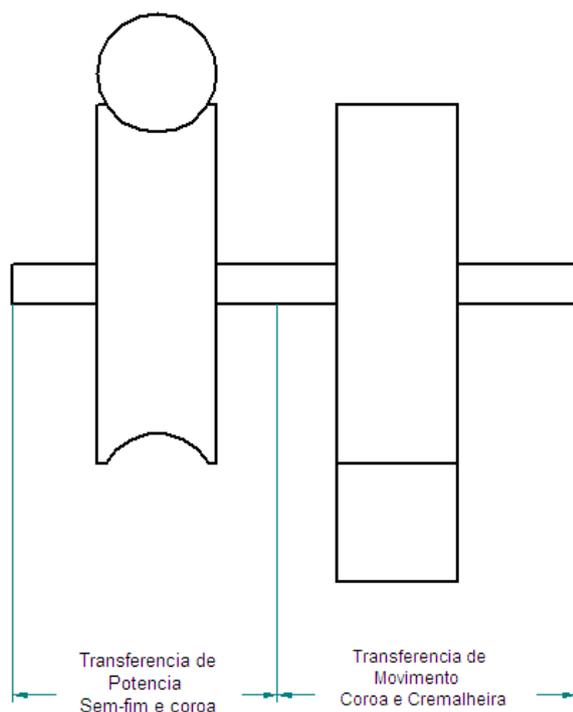


Figura 4-Caixa de redução

#### F. Vedação

A vedação do submarino é feita de peças de tecnil devidamente usinadas com suportes para parafusos e o-rings, na extremidade de cada cano de 300 mm. No êmbolo, a vedação é feita por dois o-rings que dependendo da espessura suportam pressões até profundidades de 3000m.

Para aumentar a vedação e a vida útil é usada graxa de silicone nos o-rings (mais conhecida como graxa de vácuo), pois não é solúvel em água e previne bem a corrosão.

Toda vez que é aberto um compartimento que possua o-ring, deve-se retirá-lo e limpar a sua estrutura com um cotonete com freon e limpar o compartimento, antes de colocar o o-ring novamente. A lubrificação é feita com graxa de silicone usando apenas uma leve película que, além de aumentar a vedação, funcionará como lubrificante permanente, diminuindo o atrito. Esta graxa possui uma resistência fora do comum à água.

#### G. Propulsores

Para o deslocamento horizontal do submarino são utilizados dois propulsores da marca *Sea-Doo* (Figura 5). Estes propulsores são largamente utilizados por mergulhadores e suportam arrastar aproximadamente um peso de 150 kg, que, de acordo com o dimensionamento do submarino, são totalmente aplicáveis para a tarefa de “arrasto” do móvel.



Figura 5-Propulsor

No interior de cada propulsor, encontra-se um sistema de placas e bateria. O sistema de placas inclui uma para alimentação do propulsor e outra para a recepção de mensagens, nas quais está o comando a ser realizado.

### III. FUSÃO SENSORIAL

O sistema sensorial do submarino é composto por duas partes: uma referente à navegação do veículo e outra referente à captação dos dados de meio ambiente.

#### A. Sensores de navegação

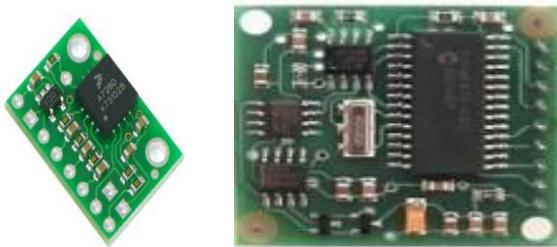
Sensores são dispositivos que mudam o comportamento quando submetidos à ação ou forma de energia, onde muitos são montados na forma de CIs ( Circuito Integrado). São empregados em inúmeras aplicações na eletrônica em geral, principalmente, em sistemas de controle e regulação, instrumentação, processamento e geração de sinais ou de uma grandeza física, podendo fornecer diretamente ou indiretamente um sinal que indique esta grandeza. Robôs que trabalham inseridos em ambientes reais, estáticos ou dinâmicos, possuem sensores que lhes conferem a capacidade de adquirir informações sobre o modo como interagem com o ambiente em que operam, como também sobre o próprio estado interno.

A navegação é um dos aspectos mais importantes dos Veículos Subaquáticos, na medida em que qualquer utilização de um veículo deste tipo depende, grandemente, da capacidade de percorrer uma determinada trajetória, ou de saber o local em que está quando ocorre algum evento importante. Um grande problema da navegação resume-se a conseguir determinar, em cada instante, o ponto do espaço em que o veículo se encontra. Para tal finalidade, foram usados dois sensores distintos, um de aceleração e um de orientação.

O sistema de navegação do submarino é constituído por um acelerômetro, modelo MMA7260QT da Freescale (Figura 6.a) e bússola modelo CMPS03 - *Robot Compass Module* (Figura 6.b).

Os acelerômetros são sensores inerciais utilizados em sistemas de navegação inercial para determinar as acelerações

do veículo, além do uso como inclinômetro, fundamental para manter a estabilidade e linearidade do veículo.



(a) (b)  
Figura 6-a)Acelerômetro ; b) Bússola;

O acelerômetro usado, MEMS da Freescale Semiconductor, modelo MMA7260QT, é um sensor inercial, triaxial, que possui uma escala selecionável de +/-1.5g, +/-2g, +/-4g ou +/- 6g, opera numa gama de temperaturas entre -20° a 85°.

Este sensor possui um elemento sensível, capaz de sentir aceleração, e uma interface ASIC, capaz de transformar a informação proveniente do elemento sensível em sinal analógico, permitindo assim sua captação. É necessário salientar que a detecção da direção do sinal é imediata, em qualquer um dos três eixos, o que ajuda a perceber qual a direção do movimento, sem serem necessários quaisquer cálculos.

O diagrama de blocos e a descrição dos pinos do acelerômetro estão representados na figura 7.

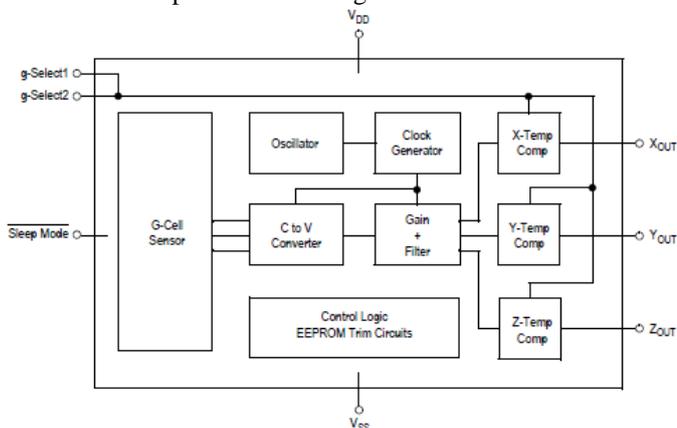


Figura 7- Diagrama de blocos simplificado do acelerômetro (Freescale Semiconductor, 2006)

O esquema da placa de desenvolvimento do acelerômetro tri-axial é mostrado na figura 8. O dispositivo pode ser alimentado diretamente através do pino Vcc, na faixa de 2,2 a 3,6 V. De modo alternativo, o circuito pode ser alimentado por tensões mais elevadas, até 16 V, utilizando o pino VIN que é conectado a um regulador de 3,3 V. Nesta configuração o pino Vcc pode servir como uma saída de referência de tensão ou como fonte de alimentação para outros dispositivos, até 50 mA, dependendo da tensão da alimentação.

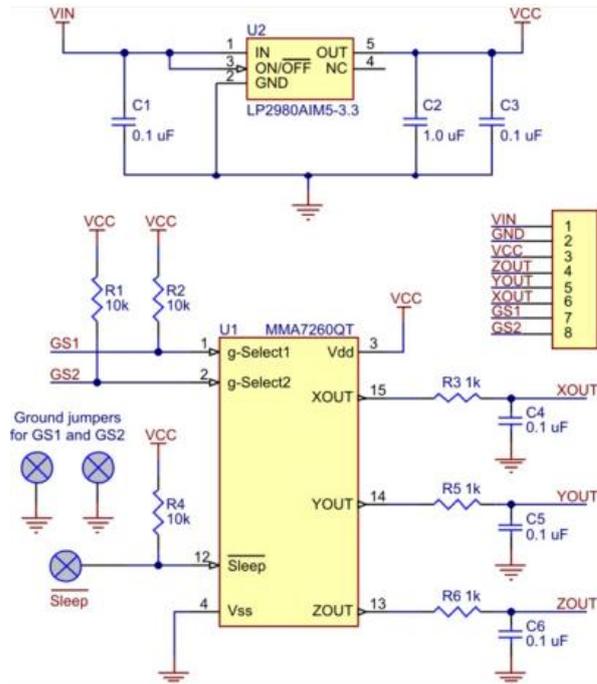


Figura 8- Esquema para o acelerômetro triaxial (RobotShop)

Os pinos de seleção de sensibilidade GS1 e GS2 são conectados a resistores de *pull-up*, fazendo com que a sensibilidade padrão seja 6g. Estes pinos podem ser conectados a um terra por um microcontrolador ou através de jumpers. Para aplicações com microcontroladores de 5 V estas linhas não devem ser elevadas.

Para realizar os testes no módulo do acelerômetro, um programa em linguagem C foi implementado. O acelerômetro utilizado contém três saídas analógicas que variam de 0 a Vcc. Para aplicações de 5 V a saída irá variar de 0 a 3,3 V. A saída de 3,3 V pode ser utilizada como referência para conversores de analógico para digital (ADC) para obtenção de leituras à escala completa. O programa desenvolvido lê as três entradas do acelerômetro e envia o resultado da conversão analógico-digital para ser mostrado no PC.

O acelerômetro pode ser utilizado de duas maneiras: uma das maneiras é utilizar como sensor de aceleração e a outra maneira é utilizar como inclinômetro.

Para converter o sinal em aceleração, utiliza-se uma escala obtida com os valores de saída de tensão selecionáveis pelos pinos GS1 e GS2, figura 9, monta-se uma tabela onde a variável de entrada será o valor fornecido em tensão. Assim, será estimado o valor da aceleração como também a direção que o veículo segue.

g-Select2	g-Select1	g-Range	Sensitivity
0	0	1.5g	800 mV/g
0	1	2g	600 mV/g
1	0	4g	300 mV/g
1	1	6g	200 mV/g

Figura 9- Diagrama de seleção de tensão em GS1e GS2 (Freescale Semiconductor, 2006)

A bússola fornece a direção no espaço que o móvel está seguindo.

A bússola eletrônica CMPS03, figura 10, foi especialmente desenvolvida para ser utilizada em robôs, como auxílio à navegação. Esta bússola apresenta uma saída digital que representa a direção que o robô está tomando. A bússola contém um microcontrolador PIC16F872 conectado a um sensor de campo magnético Philips CMPS03.

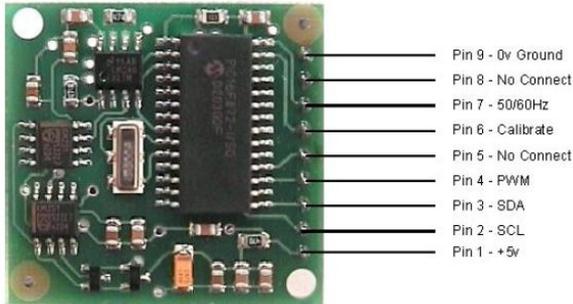


Figura 10-- Bússola CMPS03: placa contendo o PIC e o sensor Philips KMZ51

Para seu funcionamento, o módulo da bússola requer a alimentação de 5 V com corrente nominal de 15mA. Há duas maneiras de se obter o valor fornecido pela bússola. Um sinal PWM é fornecido no pino 4, ou uma interface I2C é fornecida nos pinos 2 e 3.

Para realizar os testes no módulo da bússola, um programa em linguagem C foi implementado. O sinal da bússola é transmitido por PWM, assim foi utilizada a interrupção externa do microcontrolador PIC 18F452. O programa consiste basicamente em calcular o tempo em que o sinal emitido pela bússola permanece em alto e depois fornecer o valor do ângulo em graus.

A integração destes sensores em uma plataforma inteligente propicia um controle satisfatório do veículo, possibilitando a movimentação do submarino nos três eixos espaciais.

Pelo fato dos sensores utilizados possuem resposta satisfatória e em tempo hábil, consegue-se determinar a aceleração e a inclinação do veículo, além de sua atitude em relação à trajetória tomada, de modo instantâneo

### B. Sensores de meio ambiente

A parte sensorial referente ao monitoramento das condições ambientais das barragens é constituída por: sensor de PH(Figura 11.a), de temperatura(Figura 11.b), de nível de oxigenação(Figura 12.a) e de condutividade elétrica(Figura 12.b).

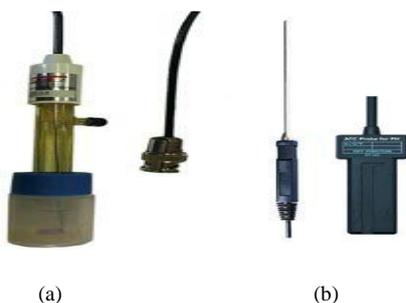


Figura 11-(a) Sensor de PH e (b) Sensor de temperatura

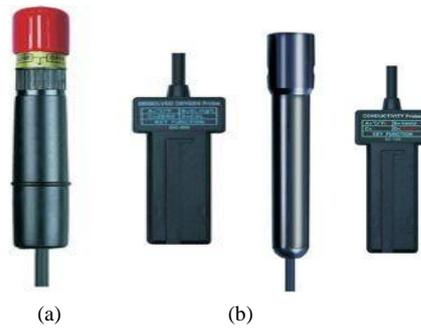


Figura 12-(a)Sensor de oxigenação, (b) Sensor de condutividade

Os sensores ficam localizados fora da estrutura do submarino, anexados a estrutura por meio de estruturas fixas. Os cabos dos sensores entram na estrutura por meio de uma abertura, que é devidamente vedada, para evitar que entre água na estrutura interna.

Os dados provenientes dos sensores são capturados por uma rede de comunicação e armazenados em um microcomputador embarcado. Posteriormente, estes dados serão enviados a um Engenheiro Ambiental que fará um estudo das condições do meio.

### C. Comunicação Interna ( Rede CAN)

Os robôs móveis autônomos geralmente são controlados a partir de um sistema de controle que é composto por unidades de sensores, atuadores e central de processamento. Os sensores e atuadores podem estar ligados a um único sistema de processamento formando uma arquitetura centralizada ou ligados a diferentes unidades de processamento interconectadas entre si formando uma arquitetura distribuída.

Os sistemas de processamentos de sistemas robóticos moderno geralmente são do tipo distribuído, o que exige uma memória compartilhada ou uma rede de comunicação de dados entre as unidades de processamento que garanta as restrições temporais para transmissão das mensagens. Uma rede de comunicação de dados que possui essa capacidade de comunicação em tempo real é a rede CAN.

A rede CAN é um barramento serial multi-mestre que usa transmissores para enviar para todos os “nós” da rede, possuindo um sistema sofisticado e robusto de detecção de erro.

Tratando especificamente do submarino, as informações que trafegam pela rede CAN são os dados de navegação: acelerações nos três eixos (x, y e z) e a orientação de uma bússola digital, além dos dados dos sensores de qualidade da água: nível de oxigenação, condutividade, temperatura da água e pH. Têm-se dados de temperatura interna e pressão interna.

A rede CAN é formada por 5 nós constituídos como segue na figura13:

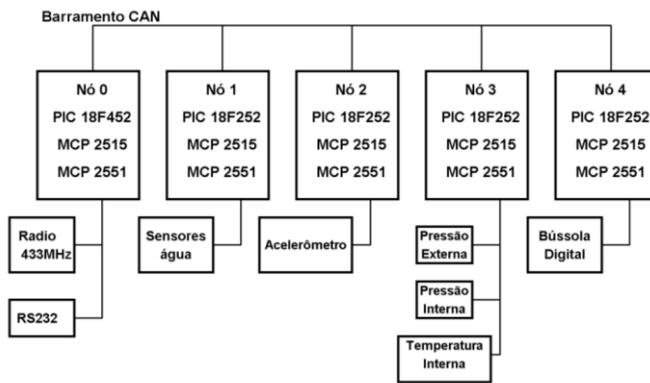


Figura 13-Barramento da Rede CAN

Nó 0: responsável pelo recebimento dos dados dos sensores via rede CAN, envio desses dados via RS232 para um computador portátil que armazena esses dados e comunicação via rádio para programação do teste e controle dos propulsores e lastros.

Nó 1: responsável pelo envio, via rede CAN, dos dados medidos pelos sensores de qualidade da água.

Nó 2: medição da aceleração e envio desses dados via rede CAN.

Nó 3: medição da pressão e temperatura interna e pressão externa do AUV e envio desses dados via rede CAN.

Nó 4: responsável pela medição da orientação a partir da bússola digital e envio desse dado via rede CAN.

Cada mensagem é enviada para o nó 0 a cada 200ms a seguir tem-se o conjunto de mensagens que circulam na rede CAN(Tabela I):

Tabela I. Relação entre mensagem nó origem e nó destino

Este sistema está localizado no tubo central, juntamente com o complemento da parte eletrônica de sensoriamento. Os dados adquiridos dos sensores trafegam na rede CAN (Control Area Network) para uma placa que se comunica serialmente com um computador embarcado (Figura 14).

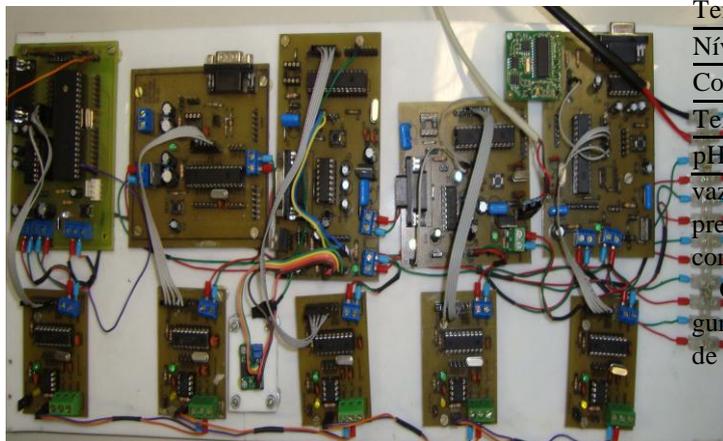


Figura 14-Plataforma da Rede CAN

#### D. Comunicação externa

O submarino deve atuar em conjunto, ou seja, todos ele-

mentos: lastro, propulsor e rede CAN, devem trabalhar em harmonia para que ele se locomova. Para esse trabalho em conjunto é necessário que mensagens e comandos sejam enviados a cada parte da estrutura do submarino.

A placa mestre da rede CAN envia por meio de rádio frequência mensagens para os sistemas de lastros e para os propulsores, utilizando um protocolo previamente implementado. Esta mensagem é formada pelo código do receptor mais o comando a ser realizado, que para o sistema de lastro é subir ou descer e para os propulsores frente, trás ou parar. Quando se trata de comunicação debaixo d'água, encontram-se sérios problemas, já que teoricamente ondas de rádio não se propagam na água. Entretanto, depois de alguns testes foi encontrado um rádio que tem um limite de propagação de onda na água de até 2 metros. Tal característica desse rádio tornou possível a integração dos 3 sistemas: rede CAN, lastro e propulsores em um único sistema.

## IV. TESTES

### A. Fase I

A fase I consistiu na verificação da existência de problemas de vedação do submarino.

Durante esses testes, também foi verificado o sistema de emersão e submersão, processos os quais são realizados pelos lastros localizados nos tubo laterais.

A missão, termo utilizado para indicar a trajetória no teste, consistia no envio de comandos para o sistema de lastros para imersão e emersão. Atuando de maneira quase que instantânea, o móvel descia satisfatoriamente sem que fosse verificada qualquer alteração de inclinação.

Posteriormente a cada teste, era verificada a presença de

Mensagem	Nó origem	Nó destino
Orientação dado pela bússola	4	0
Aceleração no eixo $x$	2	0
Aceleração no eixo $y$	2	0
Aceleração no eixo $z$	2	0
Pressão interna	3	0
Temperatura interna	3	0
Nível de oxigenação	1	0
Condutividade	1	0
Temperatura externa	1	0
pH	1	0

vazamentos na estrutura do material. Quando era constatada a presença de água no interior do móvel, esse vazamento era corrigido com silicone.

Os primeiros testes foram realizados em uma piscina (Figura 15), onde o submarino respondeu de modo satisfatório, de acordo com a fase em que estava.



Figura 15-Teste em piscina

### B. Fase 2

A fase 2 consistiu, além das atividades já realizadas na fase 1, na captação de dados dos sensores de navegação e dos sensores de meio ambiente.

À princípio, esses dados foram utilizados para um estudo da trajetória do submarino no meio aquático.

Ao fim da segunda fase, depois de alguns testes em piscina, foi realizado um teste em campo desconhecido, o açude Gavião, de posse da COGERH (Figura 16).

Novamente, o veículo respondeu de acordo com a fase em que estava.



Figura 16-Teste no açude do Gavião

### C. Fase 3

A fase 3, além das atividades já realizadas na fase 1 e 2, consistiu na realimentação do sistema navegação com os dados dos sensores : acelerômetro e bússola. A trajetória a ser seguida é alimentada pelos valores da bússola e do acelerômetro.

O submarino é programado para seguir uma determinada missão. Por exemplo, o veículo segue em frente durante certo tempo, depois faz curvas e, ao fim da missão, retornava a posição de início, realizando assim a trajetória de um quadrado.

A correção da trajetória é feita através da realimentação sensorial. No início de uma missão é definido o valor tido

como norte para o submarino, o que não necessariamente precisa coincidir com o norte geográfico. A partir desse Norte, o submarino navega durante certo tempo, previamente determinado. Durante este trajeto, o móvel pode sofrer alterações de direção, as quais são corrigidas pelo sistema bússola- propulsor. Esse sistema funciona desse modo: ao ser verificada uma direção diferente do Norte inicial definido, mensagens são enviadas para os propulsores para que sejam feitas correções de velocidades e assim o móvel voltar à trajetória retilínea.

Para a realização de curvas também é utilizado o sistema bússola- propulsor. As curvas podem ser dos tipos fechadas ou abertas, onde, nas fechadas, um dos motores é desligado e o outro é mantido ligado até que se atinja a direção especificada, e nas abertas os dois motores são mantidos ligados, mas com velocidades diferentes.

Foram realizados diversos testes com diferentes missões para que se verificasse a confiabilidade desse sistema bússola- propulsor.

Novamente, o submarino respondeu de modo satisfatório aos testes realizados.

## V. CONCLUSÕES

No Brasil, atualmente, existem cerca de 110 usinas hidrelétricas, onde estão incluídas as de pequeno, médio e grande porte. Realizar a avaliação das condições físicas das barragens cada uma delas é uma tarefa que demanda tempo, dinheiro e trabalhadores especializados. Tendo em vista que a matriz energética brasileira possui 74% de potência gerada pelas usinas hidrelétricas, a garantia de que as represas desses reservatórios estão em bom estado, garante a produção eficaz de energia para toda a população brasileira. Uma tarefa de inspeção sendo realizada por uma equipe de mergulhadores pode levar cerca de um mês para o término, dependendo do tamanho do reservatório, com a inserção de um veículo autônomo submarino esta tarefa duraria muito menos tempo. A utilização de um veículo autônomo e não tripulado para a manutenção dessas barragens garante segurança e eficácia para a atividade.

Com o avançar do projeto, pretende-se incluir ao produto alguns sensores como sonar e o giroscópio para aprimorar o sistema de localização do submarino. Deveram ser feitas algumas mudanças em sua estrutura para garantir uma maior segurança e eficácia ao produto. Além disso, na próxima fase do projeto, será incluída uma câmera “on-board” que fará as imagens das paredes dos reservatórios. Um grande desafio seria a inserção de braços robóticos que atuariam no reparo instantâneo das falhas encontradas nas represas.

Aliar a segurança e a eficácia a uma atividade é o desafio de qualquer projeto de inspeção, o robô submarino integra essas duas habilidades, sendo uma solução imediata e alcançável para o setor energético brasileiro.

## VI. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação Ciência e

Tecnologia do Ceará pelo apoio cedendo instalações para os testes do submarino e a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) por ceder uma de suas instalações para testes em campo.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### *Periódicos:*

- [1] J BORENSTEIN, H. R. Navigation Mobile Robots: Systems and Techniques, AK Peters. et al., 1996.
- [2] COSTE-MANIÈRE, E. e SIMMONS, R. Architecture, the backbone of robotic systems. IEEE International Conference on Robotics and Automation , 2000.

### *Livros:*

- [3] Farines, J. M., Fraga,J.S e De Oliveira,R.S. (2000),”*Sistemas de tempo real*” ,Volume 1, Escola de Computação 2000,IME?USP,São Paulo,SP
- [4] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.
- [5] J. Jones. (1991, May 10). *Networks*. (2nd ed.) [Online]. Disponível: <http://www.atm.com>

### *Relatórios Técnicos:*

- [6] FREESCALE Semiconductor. Technical Data:  $\pm 1.5g$  - 6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer MMA7260QT.

### *Artigos em Anais de Conferências (Publicados):*

- [7] De Barros, E.A.e Ferreira G.A.N. (2000), “ Plataformas de teste aplicadas ao desenvolvimento de robôs móveis oceânicos”,Anais do XII do Congresso Brasileiro de Automática,Anais do CBA,UFSC,SBA,Florianópolis/SC, Brasil,PP 2144 2149
- [8] ROBOSHOT. Pololu MMA720QT 3-Axis Accelerometer. 2009. Disponível : <http://www.robotshop.ca/content/PDF/rb-pol-48-datasheet.pdf>

### *Dissertações e Teses:*

- [9] S. Hwang, "Frequency domain system identification of helicopter rotor dynamics incorporating models with time periodic coefficients," Tese de Doutorado, Dept. Aerosp. Eng., Univ. Maryland, College Park, 1997.

### *Normas:*

- [10] BOSH, Robert GmbH. CAN Specification 2.0, 1991.