

DESENVOLVIMENTO DE UM VEÍCULO SUBAQUÁTICO AUTÔNOMO PARA SUPERVISÃO INTELIGENTE DE RESERVATÓRIOS

ELIAS R. VILAS BOAS*, LEONARDO M. HONÓRIO*, ANDRÉ LUÍS M. MARCATO*, EDIMAR J. OLIVEIRA*, PEDRO G. BARBOSA*, DANIELE A. BARBOSA*, ANA SOPHIA C. A. VILAS BOAS*, NUNO A. CRUZ†, ANÍBAL MATOS‡, BRUNO M FERREIRA‡, NUNO ABREU‡, ANTÔNIO P. MOREIRA‡, ALEXANDRE ROCCO‡, FÁBIO J. MICERINO‡, EXUPERRY B. COSTA*, LUCAS C. N. MACHADO*

*GRIN - Grupo de robótica Inteligente. Departamento de Energia.
Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil

†INESC-Porto. Universidade do Porto. Porto, Portugal

‡EDP do Brasil

Emails: elias.ramos@engenharia.ufjf.br, leonardo.honorio@ufjf.edu.br, andre.marcato@ufjf.edu.br, edimar.oliveira@ufjf.edu.br, pedro.gomes@ufjf.edu.br, danielealcantara@gmail.com, sophia.cavalcanti@ufjf.edu.br, nacruz@fe.up.pt, anibal@fe.up.pt, bm.ferreira@fe.up.pt, nabreu@inescporto.pt, amoreira@fe.up.pt, a.rocco@terra.com.br, fabio.micerino@edpbr.com.br, exuperry.costa@engenharia.ufjf.br, lucas.correa@engenharia.ufjf.br

Abstract— This paper describes the partial results of a Intelligent-Georeferenced Supervision System of reservoirs by an autonomous vehicle, related to the design, construction and early test of a submarine robot. So, this document presents the conception parameters, working topology, hardware and software used, low-level control techniques, communication methodologies and internal protocol developed to the robot building. Also will be presented wich are the benefit of these equipments to the dam and reservoir surveying

Keywords— Underwater Robotics, AUV, ROV, Reservoirs Inspection.

Resumo— Este artigo descreve os resultados parciais de um Sistema Inteligente de Supervisão Georeferenciada de Reservatórios Através de Veículo Autônomo referentes ao projeto, construção e testes iniciais de um robô submarino. Desta forma este documento apresenta os parâmetros de concepção, topologia de funcionamento, hardware e *software* utilizados, técnicas de controle de baixo nível, metodologias de comunicação e protocolo interno desenvolvidos para a construção do robô. Também serão apresentados quais os resultados e benefícios deste equipamento para o monitoramento de reservatórios e barragens

Palavras-chave— Robótica Subaquático, AUV, ROV, Inspeção de Reservatórios.

1 Introdução

A fartura de recursos hídricos presentes no Brasil incentiva a construção de barragens hidroelétricas. Tais barragens são construções cuja longevidade e rendimento são fortemente dependentes da integridade de sua estrutura, bem como da morfologia da bacia hidrográfica onde a extensão de seu ciclo de vida depende da qualidade de suas vistorias e recondicionamentos estruturais. Outro ponto importante é que, por sua estrutura física muitas vezes alterar a geografia local, uma barragem apresenta um grande impacto no meio envolvente, uma vez que geram uma redução das velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos sedimentos carregados pelo curso de água e conseqüente assoreamento.

Em relação à estrutura física da barragem, é necessário que um controle rigoroso seja realizado para suprimir qualquer possibilidade de rupturas ou acidentes. Este fator de segurança é tão crítico que foi criado um Projeto de Lei (no 1.181 / 2003) estabelecendo que as barragens devam passar por inspeções em prazos determinados. Já em relação ao assoreamento, apesar de não existir uma legis-

lação sobre o assunto, a literatura mostra que em todo mundo são gastos 6 bilhões de dólares anuais para a remoção dos volumes assoreados. Sem falar no custo ambiental que é inimaginável.

Atualmente a supervisão da estrutura física da barragem é realizada por uma equipe de mergulhadores com câmeras de alta precisão que percorrem a parede em busca de danos físicos e/ou obstruções na entrada dos dutos de adução. Além desta tarefa ser morosa, a inspeção visual pode levar a conclusões distorcidas uma vez que, no caso de rachaduras em estágios iniciais, barro e lodo podem dar apenas uma visão parcial do verdadeiro cenário. Outro ponto é que não existe nenhuma georeferenciação de precisão e os problemas encontrados são mapeados em relação à posição do início da missão, profundidade e tempo decorrido da missão até a detecção de alguma não conformidade. Em relação a vistoria do reservatório, apenas algumas medidas de profundidade isoladas são realizadas em pontos isolados e uma previsão muito rústica é realizada. Este tipo de solução, apesar de dar um vislumbre de supervisão, não é compatível com a importância deste tipo de missão.

Não existem muitas pesquisas presentes na literatura para inspeção de barragens, a maioria de sistemas baseados em veículos submarinos para vistoria têm como aplicação a vistoria de cascos de navios, para verificar rachaduras ou a presença de ouriços e cracas (Djapic, 2009), (Negahdaripour and Firoozfam, 2006).

Até o presente momento alguns projetos de supervisão de cascos derivou para a inspeção de barragens. Das diversas companhias que apresentam soluções de inspeção de represas pela utilização de robôs a maioria absoluta propõe a utilização de veículos de pequeno porte remotamente operados (ROV - *Remotely operated vehicles*), gravando imagens de alta resolução com câmeras teleoperadas. Esta solução substitui os mergulhadores, consegue realizar mais inspeções com o custo reduzido, e gera imagens mais precisas e confiáveis.

Apesar de mais antigas, as soluções mais inovadoras baseadas em ROV são mostradas na literatura pelas referências (Poupart et al., 2001), (Batlle et al., 2004). Embora ainda sendo de operação remota, possuem diversas funcionalidades como imagens acústicas, sistemas anticollisão e sistema parcial de localização através de técnicas de SLAM (*Simultaneous Location and Mapping*) (Englot and Hover, 2009).

O projeto mais desenvolvido de robôs submarinos para inspeção de barragens encontrado na literatura (Ridao et al., 2010) está sendo desenvolvido em paralelo com esta proposta. O referido projeto também faz uso de câmeras de alta precisão, imagens ultrassônicas e sistema de posicionamento utilizando boias acústicas, entretanto a classe de represas que este projeto propõe vistoriar é muito inferior à do nível da Represa de Lajeado (onde o submarino aqui proposto será utilizado). Desta forma, cuidados com a hidrodinâmica, economia de energia e autonomia de missão e técnicas de controle objetivando a segurança do robô não precisaram ser desenvolvidas.

Desta forma o projeto em curso propôs um conjunto de soluções integradas, baseadas em um veículo submarino autônomo, que têm por objetivo primário a supervisão completa do reservatório das hidroelétricas; tanto as barragens como o assoreamento dos reservatórios. No caso das barragens, além da inspeção visual com câmera de alta resolução, imagens de um sonar multifeixe irão gerar um mapa estrutural livre da interferência de lodo ou impurezas que dificultem a visualização, obtendo-se assim informações precisas sobre a situação estrutural da barragem. Em relação ao reservatório, o mesmo sistema será utilizado; o sonar multifeixe irá realizar a batimetria do fundo do reservatório identificando pontos de sedimentação e redução de volume do reservatório.

Este artigo detalha os resultados obtidos no projeto proposto, onde foi desenvolvido um sub-

marino autônomo. Na seção 2 será realizada uma apresentação geral do projeto, na seção 3 a definição do projeto da estrutura e os hardwares utilizados, na seção 4 a estrutura de *software*, na seção 5 a técnica de controle utilizada, na seção 5 os resultados parciais e as conclusões.

2 Apresentação do Projeto

O projeto de P&D reportado neste artigo é financiado pela EDP Brasil e executado por um consórcio formado pela UFJF, INESC e INERGE.

Por definição, um robô submarino autônomo para inspeção deve executar as missões sem a intervenção do operador. Para que isso seja possível ele deve ser capaz de executar e controlar três níveis de ações; missão, tarefa e comportamento.

O nível mais simples de inteligência é o controle de comportamento que representa a estratégia de estabilidade e controlabilidade do robô. Este nível pode possuir inteligência de forma a se adaptar a mudanças no ambiente ou ser fixo com parâmetros que não garantem ações ótimas, mas definem a estabilidade do equipamento para uma grande faixa de operação. A execução desta etapa depende da configuração física da estrutura do submarino, da modelagem dinâmica, da quantidade, torque e disposição dos motores, do sistema de instrumentação inercial, da eletrônica básica como controle de tensão, do sistema de posicionamento local e da capacidade de processamento.

O nível intermediário de inteligência é o controle de tarefas. Neste nível o sistema possui uma sequência de ações previamente definidas que devem ser executadas. A cada ação realizada com sucesso a próxima da fila assume, informando para o nível de controle quais as novas condições operacionais do sistema. Esta etapa depende do sistema de localização global do submarino, da capacidade das baterias (o que determina o tamanho do conjunto de tarefas que podem ser executadas), do protocolo de comunicação interno do robô.

O nível final de inteligência é o de planejamento da missão, ou seja, dado um problema, quebrar este problema em tarefas para que estas possam ser executadas pelo nível intermediário. Este nível é responsável também por monitorar as ações acima e determinar se a ação corrente pode ser executada ou caso haja uma impossibilidade, como a presença de um obstáculo, replanejar parte da missão de forma a evitar uma colisão. Este nível é dependente do sistema de percepção, da câmera, do sonar multifeixe, do sonar frontal e do profundímetro.

As fases de construção do submarino que atenda as necessidades descritas anteriormente podem ser dividida em três etapas:

1. O projeto e desenvolvimento do hardware, formado pelo design da estrutura física do

robô (responsável pela capacidade de carga, resistência mecânica, profundidade alcançada e hidrodinâmica), definição e escolha do conjunto de baterias, sistema de controle de energia, sensores de integridade física, sistema de acionamento dos motores, sistemas de processamento de dados, sensores de medidas inerciais, comunicação física com dispositivos de superfície além da integração dos sensores externos ao submarino tais como câmeras de vídeo, iluminação, sonar multifeixe, sonda paramétrica e outros a princípio não definidos. Ou seja, além de atender a demanda atual, o submarino pode ser reconfigurado para novas e diferentes missões sem prejuízo de sua estrutura.

2. Desenvolvimento do *softwares* de aquisição e tratamento de dados, filtros digitais, projeto e implementação dos sistemas de controle de baixo nível, arquitetura e protocolo de comunicação entre os diversos sistemas, arquitetura de controle de missão, sistemas de segurança e monitoramento de parâmetros associados a integridade física do submarino, sistema de visão computacional, sistemas de identificação de marcos e referências, sistemas de mapeamento e localização simultânea, sistema de tratamento de dados do sonar multifeixe, sistema de percepção sensorial, integração com centro de controle em terra.
3. Desenvolvimento da estação de terra, responsável pela programação e controle das missões, visualização dos dados de forma compreensível para o utilizador, supervisão remota do submarino e interferência do operador em situações críticas com a possibilidade de abortar ou alterar uma missão em tempo de execução.

As seções subsequentes irão descrever em detalhes cada uma destas etapas.

3 Projeto e Desenvolvimento do Hardware

O TRIMARES foi projetado para ser um robô não-tripulado constituído por 3 partes rigidamente conectadas e possuir significante capacidade de carga e ter inteligência reativa à missão e possuir a capacidade de operar autônoma ou remotamente e portanto é um veículo híbrido AUV/ROV (*Autonomous Underwater Vehicle* e *Remote Operated Vehicle*) (Cruz and Matos, 2008; Cruz et al., 2011). Em missões nas quais o Trimares atua como AUV os dados são armazenados localmente, ao passo que nas missões em que opera como ROV os dados são transmitidos em tempo real através de um cabo de fibra ótica próprio para tarefas subaquáticas.

O arranjo físico do robô desenvolvido com exclusividade para este projeto (Figura 1) garante a sua movimentação na água com baixa resistência e uma estabilidade estrutural auxiliando o controle de posicionamento de baixo nível e no auxílio a acoplar novos sensores gerando cargas maiores. O controle de movimentação e estabilidade do Trimares são garantido através de 7 hélices independentes com arranjo que permite realizar funções importantes como pairar, navegar próximo a superfície e realizar gravação de vídeo posicionando-se na proximidade de estruturas submersas. Além de suas vantagens cinemáticas e dinâmicas, este arranjo físico permite a redução do custo de manutenção, pois esta pode ser realizada individualmente em cada módulo. Observa-se também que o custo de produção de novas unidades é reduzido, pois a estrutura dos três módulos que compõem o TRIMARES são exatamente iguais, embora as características internas de cada um seja distintas. A Figura 1 mostra o submarino TRIMARES, onde 1a mostra a vista frontal, 1b mostra a vista superior, 1c a vista lateral e, finalmente, 1d a foto do submarino em testes na piscina.

Observa-se que o TRIMARES possui um arranjo modular com três corpos idênticos rigidamente acoplados entre si através de uma estrutura mecânica leve que também serve como dutos para os cabos que interligam os três corpos. Cada corpo é construído com um cilindro a prova d'água com 20 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, para armazenar as baterias e eletrônica embarcada. A interface com o exterior é realizada por uma tampa com 9 orifícios contendo conectores subaquáticos específicos para evitar a entrada de água na profundidade projetada. Cada cilindro contém também uma tampa de ventilação que pode ser removida durante os períodos de carregamento das baterias para exaustão de gases e onde pode ser conectada uma bomba de vácuo para confirmar que a vedação está adequada.

As baterias recarregáveis e o sistema de gerenciamento de potência, por serem mais pesados são localizados no cilindro inferior, isto diminui a altura do centro de massa e aumenta sua separação do centro de flutuabilidade.

3.1 Sistema de Propulsão

O TRIMARES requer não somente um grande número de motores ou hélices para assegurar a sua manobrabilidade (com 5 graus de liberdade) como também um potência suficiente para vencer uma força de arrasto relativamente alta. Para propiciar a utilização dos mesmos drivers para os motores, foram escolhidos motores iguais para todas as funções. Os motores escolhidos são fornecidos pela Seabotix e são motores DC sem escova (brushless) com capacidade de prover impulso nominal de 35 N, com transitórios permitidos de até 45N.

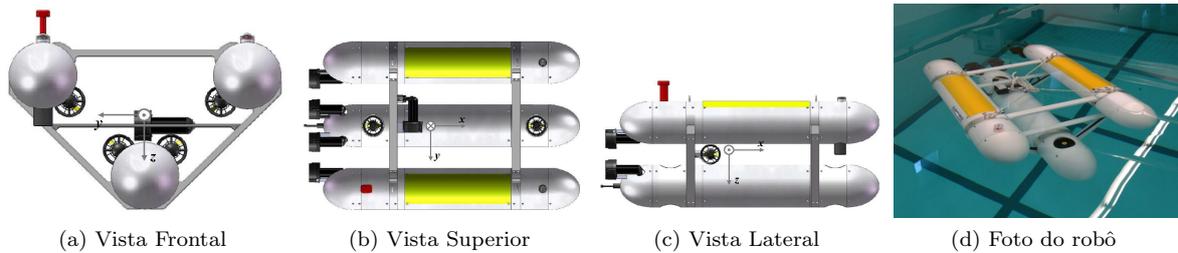


Figura 1: Robô Trimares - (a) Vista Frontal, (b) Vista Superior, (c) Vista Lateral, (d) Foto do robô

Um único motor para permitir o deslocamento lateral é colocado próximo ao centro de massa para minimizar sua interferência nos outros graus de liberdade. Para a propulsão longitudinal e mudanças de direção são utilizados 4 motores situados na parte traseira do veículo. E para o movimento de subir, descer e inclinação em relação ao eixo vertical são utilizados dois motores intrínsecos ao corpo inferior juntamente com as baterias.

3.2 Sistema de Localização

Para determinar a sua posição em tempo real, o submarino TRIMARES utiliza um filtro de Kalman, onde faz a fusão dos dados provenientes de um sensor de pressão (para saber a profundidade), um sensor inercial (com bússola, acelerômetros e giroscópios) e um sistema acústico por triangulação. O sistema acústico baseia-se na obtenção de distâncias a faróis acústicos colocados no local de operação e cuja posição é previamente conhecida. Para tal, o veículo emite sinais acústicos que são detectados pelos faróis, que respondem com outros sinais específicos. A distância é calculada pelo tempo entre a emissão de cada sinal e a recepção da respectiva resposta. O alcance máximo e a exatidão das medidas dependem do ruído ambiente e das condições de propagação do meio, mas em geral é possível obter precisões de 1 metro em distâncias entre 1 e 2 km.

Para além do sistema de decodificação e transmissão de sinais acústicos, os faróis acústicos possuem um computador de baixo consumo, baseado num processador ARM, com o qual se pode comunicar através de ligações rádio RS232 ou *WiFi*. A sua posição absoluta pode também ser monitorada em tempo real, uma vez que possuem um pequeno receptor de GPS. O sinal de PPS do GPS é usado para sincronização dos tempos de emissão dos sinais acústicos. A energia do sistema é fornecida por uma bateria recarregável de ions de lítio, com 100Wh, que pode ser alimentada por um painel solar. A Figura 2 mostra uma foto da boia de comunicação desenvolvida.



Figura 2: Bóia de Comunicação

4 Projeto e Desenvolvimento do *Software*

A arquitetura geral do *software* de bordo do veículo TRIMARES foi desenvolvida para a plataforma Linux em linguagem C/C++, e é constituída por diferentes módulos implementados como processos independentes ou threads procurando-se garantir modularidade, robustez, configurabilidade e fácil expansibilidade.

A Figura 3 mostra um diagrama topológico do desenvolvimento do *software* do TRIMARES. Como dito anteriormente a arquitetura se apresenta em camadas com funcionalidades e níveis de inteligência diferentes. A primeira camada é a de localização que inclui os drivers de leitura de diversos sensores (pressão, IMU, GPS, acústica), os filtros digitais e realiza a fusão dos dados da camada de sensores com o objetivo de estimar em tempo real a posição georeferenciada do veículo, bem como sua orientação tridimensional e suas velocidades de translação e de rotação. O segundo nível é o de controle e é responsável pela atitude do submarino. É o responsável por dotar o TRIMARES de cinco graus de liberdade (surge, sway, heave, yaw, pitch) e para isto atua diretamente sobre o módulo responsável pelo controle dos motores ou hélices. Necessita dos dados sensoriais e dos pontos de referencia definidos pela camada de tarefas. A camada superior, a de tarefas, determina um conjunto de ações de alto nível que são desmembradas em malhas de controle específicas, como será descrito à frente. Esta etapa pode ser realizada por um operador utilizando o *software* de estação de solo (*groundstation*), ou pode ser reativo, sendo gerado de forma independente pelo módulo de planeamento da missão (MPM). O MPM é responsável pela alteração do plano de missão em função da análise das informações provenientes no módulo de percepção. Por fim, o módulo de percepção é responsável pela integração

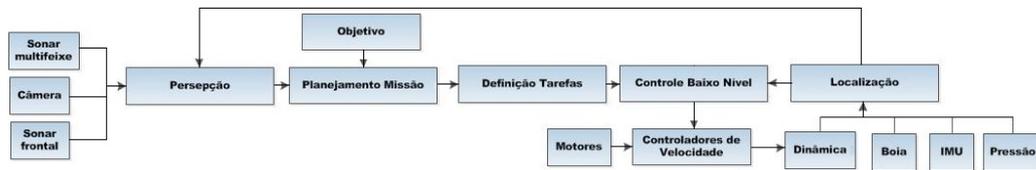


Figura 3: Topologia da Arquitetura do Submarino

de cada sensor de alto nível (câmera, sonar multifeixe e sonar direcional), interpretando e definir as informações relevantes do ambiente a volta do submarino. Na etapa atual apenas a informação analisada é se existem obstáculos à frente do submarino. Caso haja o módulo de planejamento da missão rearranja as ações de forma a evitar a colisão e desviar do obstáculo, se possível.

4.1 Sistema de Controle de Baixo Nível

O modelo dinâmico geral de um veículo submarino segue os 6 graus de liberdade de modelo apresentado em (Fossen, 1994). É um modelo completo que leva em conta todas as forças e os momentos que atuam sobre um corpo submerso, entretanto dificulta um projeto adequado dos controladores. Tipicamente, AUVs se movimentam de acordo com dois movimentos dimensionais, quer em relação à vertical ou no plano horizontal. Assim, a abordagem tradicional para o controle destes veículos é baseado no modo de desacoplamento (Healey and Lienard, 1993) o que permite ampla movimentação no meio, apesar de não permitir manobras individuais em três dimensões.

4.2 Organização do Sistema de Controle

No nível mais baixo, os quatro controladores são assumidos independentemente. Nesta abordagem, os acoplamentos entre os modos são tratados como perturbações externas, que devem ser levados em conta na elaboração de controladores de feedback dissociados. Isto normalmente resulta em uma pequena redução de desempenho, que é amplamente equilibrado pela simplicidade do design e pela estabilidade apresentada pelo projeto da estrutura.

Uma vez que o sistema de controle foi projetado, sua organização no TRIMARES é realizada em quatro movimentos básicos: emergir (*surge*), Direcionar (*heading*), Inclinado (*pitch*) e submergir (*depth*). Os dois primeiros determinam o movimento horizontal do veículo e as suas saídas são combinadas para se obter o acionamento para os propulsores horizontais. As saídas dos controladores de *pitch* e *depth* são combinadas para proporcionar o acionamento para os propulsores verticais. Cada um dos quatro controladores de base podem operar tanto em uma malha de controle de ciclo fechado ou aberto.

A possibilidade de definir de forma independente cada controlador de base possibilita ao veí-

culo comportamentos muito diferentes, tornando a operação muito flexível.

É possível também, alterar as estratégias de controle durante a execução. Atualmente a metodologia de controle é a definida em (Ferreira et al., 2010), porém outras estão em fase de testes finais como X, Y e Z mostradas em (Cavalcanti, 2012). Um ponto de pesquisa futuro é o desenvolvimento de técnicas de controle ótimo que mantenham a estabilidade do submarino minimizando o consumo.

4.3 Plano de Missão e Manobras Elementares

A operação autônoma de TRIMARES é definida por um plano de missão que é formado por uma lista de tarefas. Esta lista pode ser gerada de forma autônoma pelo módulo de planejamento de missão, interagindo com o sistema de percepção e, desta forma, possuir reatividade ou pode ser realizado através da execução contínua de uma lista de tarefas definidas pelo operador.

Além de configurar um grande conjunto de variáveis que afetam o comportamento do veículo (tais como ganhos do controlador, profundidade máxima de operação, as frequências de funcionamento dos sistemas acústicos, etc), o plano da missão inclui também um conjunto de manobras elementares que o veículo deve executar em seqüência.

Cada manobra prescreve o comportamento de todos os quatro controladores básicos (portanto, define o movimento do veículo). Ele também define a sua condição final, e um tempo limite por razões de segurança. Além de algumas manobras que são utilizadas principalmente para fins de depuração, as manobras básicas TRIMARES são: **Mergulhar**: uma manobra para baixo, normalmente executado no início de uma missão ou em transições de profundidade. **Superfície**: uma manobra para cima, normalmente executado no final de uma missão ou em transições de profundidade. **Pairar**: uma manobra que estabiliza o veículo na posição corrente. **Waypoint**: uma manobra plano horizontal que conduza o veículo, ao longo de uma linha reta. **Apontar**: uma manobra plano horizontal alinha o veículo com um ângulo desejado em relação ao norte.

5 Conclusões

O projeto apresentado por este trabalho entrou no último ano de desenvolvimento. O que foi desen-

volvido e demonstrado neste artigo indica a complexidade e os desafios impostos pelo tema abordado.

Algumas das inovações e vantagens são:

1. Ao permitir que o AUV analise em tempo real possíveis problemas, é possível identificar falhas e aumentar a precisão das informações adquiridas em regiões críticas.
2. Utilizando as mesmas técnicas de inspeção o veículo poderá ser ajustado tanto para inspeção de barragens, realização de batimetria, análise de assoreamento e coleta de análise da qualidade de água e sedimentos.
3. Fazendo a precisa georeferenciação destes dados, é possível, a posteriori, construir um modelo 3D temporal, contendo toda a informação previamente levantada, possibilitando identificar pontos de menor conformidade e realizar previsões precisas de manutenção.
4. O produto resultante desta proposta permitirá iniciar um ciclo de desenvolvimento tecnológico, na área de supervisão subaquática de barragens a partir da elaboração de um protótipo validado em laboratório e em campo, para que em fase subsequente se torne exequível sua complementação, passando então pela elaboração de um modelo cabeça de série, lote pioneiro e inserção no mercado.

Desta forma considera-se esta, uma contribuição de grande relevância para agregação de valor tecnológico a empresa proponente e ao setor elétrico brasileiro como um todo, dada a predominância da participação de centrais hidroelétricas no setor, que poderão vir a se beneficiar com esta tecnologia, otimizando recursos de manutenção, maximizando resultados financeiros e operacionais através de conveniente supervisão de seus reservatórios.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo programa de incentivo à pesquisa e desenvolvimento, bem como a EDP Brasil que escolheu o consórcio formado pela Universidade Federal de Juiz de Fora e o INESC-Brasil. A sinergia dos dois grupos de pesquisa e a interação com os engenheiros da EDP Brasil propiciaram o desenvolvimento de um novo produto que a partir de agora passa a ser uma plataforma de pesquisa que poderá ser utilizada em uma série de outras aplicações.

Referências

Battle, J., Nicosevici, T., Garcia, R. and Carreras, M. (2004). Rov-aided dam inspection:

Practical results, *Manoeuvring and Control of Marine Craft 2003 (MCMC 2003): A Proceedings Volume from the 6th IFAC Conference, Girona, Spain, 17-19 September 2003*, Elsevier Science Limited.

Cavalcanti, A. S. (2012). *Estudo e Aplicação de Técnicas de Controle Aplicadas em Veículos Aéreos Não-Tripulados*, PhD thesis, Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Cruz, N. A. and Matos, A. C. (2008). The mares auv, a modular autonomous robot for environment sampling, *OCEANS 2008*, IEEE, pp. 1–6.

Cruz, N. A., Matos, A. C., Almeida, R. M., Ferreira, B. M. and Abreu, N. (2011). Trimares-a hybrid auv/rov for dam inspection, *OCEANS 2011*, IEEE, pp. 1–7.

Djapic, V. (2009). Unifying behavior based control design and hybrid stability theory for auv application.

Englot, B. and Hover, F. (2009). Stability and robustness analysis tools for marine robot localization and slam applications, *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, pp. 4426–4432.

Ferreira, B., Matos, A., Cruz, N. and Pinto, M. (2010). Modeling and control of the mares autonomous underwater vehicle, *Marine Technology Society Journal* **44**(2): 19–36.

Fossen, T. I. (1994). Guidance and control of ocean vehicles, *New York*. DOI: [10.4031/MTSJ.44.2.5](https://doi.org/10.4031/MTSJ.44.2.5)

Healey, A. J. and Lienard, D. (1993). Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* **18**(3): 327–339.

Negahdaripour, S. and Firoozfam, P. (2006). An rov stereovision system for ship-hull inspection, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* **31**(3): 551–564.

Poupart, M., Benefice, P. and Plutarque (2001). Subaquatic inspections of edf (electricite de france) dams, *OCEANS, 2000*, Vol. 2, MTS/IEEE Conference and Exhibition, Providence, RI, pp. 939–942.

Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D. and Garcia, R. (2010). Visual inspection of hydroelectric dams using an autonomous underwater vehicle, *Journal of Field Robotics* **27**(6): 759–778. DOI: [10.1002/rob.20351](https://doi.org/10.1002/rob.20351)