

ROSA – Robô para Operação de Stoplogs Alagados

Renan S. Freitas, Gabriel Alcantara, Eduardo Elael de Melo Soares, Julia R. Campana, Breno B. Carvalho, Ramon R. Costa

Resumo – Este trabalho descreve o projeto de pesquisa cujo escopo é desenvolver e implementar um sistema para auxiliar o processo de inserção e remoção de stoplogs em uma usina de energia. O sistema proposto, denominado robô ROSA, possui vários sensores para o monitoramento do status da viga pescadora (ou de içamento) e o seu engate com um stoplog, tais como sensor de inclinação, sensor de pressão e sensores indutivos. Além disso, também possui um sonar acoplado a uma unidade *pan & tilt* para a inspeção do leito na entrada da tomada d'água. ROSA é inovador em seu conceito: montado na viga de içamento, ele fornece informações sobre o que ocorre debaixo d'água em operações com stoplogs, auxiliando o operador na tomada de decisões. O conceito representa uma melhoria significativa para as práticas atuais do setor e resulta em um ganho não somente financeiro mas também na segurança do trabalho, através da redução de problemas com as operações de stoplogs e de mergulhos de intervenção. Em Jirau, durante um período de dois anos, os problemas de operação com stoplogs resultaram em uma perda de disponibilidade de produção de 37 dias, energia suficiente para abastecer uma cidade de 160.000 habitantes durante esse período. O resultado dessa pesquisa é um protótipo, testado na UHE Jirau e cuja aplicabilidade pode ser estendida para outras UHEs nacionais.

Palavras-chave – eletrônica embarcada, inspeção por sonar, monitoramento, stoplog, viga de içamento.

I. INTRODUÇÃO

A fim de aumentar a segurança no trabalho e otimizar as operações na usina hidrelétrica de Jirau, com capacidade prevista de 3.750 MW e localizada no Rio Madeira em Rondônia, a ESBR estabeleceu uma parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e mapeamento subaquático, denominado robô ROSA, para auxiliar nas operações de ensacamento para a manutenção do circuito hidráulico. A Figura 1 mostra uma foto de um conjunto de stoplogs utilizados na barragem de Jirau. O robô ROSA começou em 2013 e será concluída em fevereiro de 2015, com investimentos de R\$ 3,1 milhões (PD: 6631-0002/2013).

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 VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, no período de 17 a 19 de agosto de 2015. Este trabalho foi apoiado pela Energia Sustentável do Brasil (ESBR).

Renan S. Freitas, trabalha no LEAD, UFRJ (e-mail: renan028@gmail.com)

Breno B. Carvalho, trabalha na ESBR (e-mail: Breno.Carvalho@energiasustentaveldobrasil.com.br)



Figura 1 - Barragem da UHE Jirau, Rondônia

Stoplogs são barreiras físicas modulares que são empilhadas, debaixo de água, na jusante e na montante do circuito hidráulico, permitindo o isolamento e a drenagem da água da região para a sua manutenção. Em Jirau, cada stoplog (de montante) pesa aproximadamente 12 toneladas e são necessários no total 16 stoplogs (?? de montante e ?? de jusante) para o isolamento de uma turbina.



Figura 2 - Conjunto de 8 stoplogs para o isolamento da jusante do circuito hidráulico

Um operador instala e remove os stoplogs usando um guindaste equipado com uma viga de içamento. Os stoplogs são inseridos e retirados em vãos específicos para sua utilização na barragem. A viga é um dispositivo puramente mecânico e, atualmente, a única informação disponível para o operador é a tensão do cabo. Esta operação, praticamente realizada às cegas, as vezes resulta em falhas operacionais causadas por incertezas mecânicas e/ou ambientais, como por exemplo:

- Falha no engate de uma das garras da viga com o olhal do stoplog, resultando no stoplog sendo arrastado num plano inclinado e danificando a estrutura;
- Falha de vedamento devido ao acúmulo de detritos na soleira do vão e a consequente incapacidade de drenagem da água.

Tais falhas de operação só podem ser resolvidas através de mergulhos interventivos, uma das atividades mais perigosas em uma UHE, onde o mergulhador está sujeito a fortes correntezas e, no caso específico de Jirau, a visibilidade é praticamente nula.

O principal aspecto inovador deste projeto é o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar o mapeamento do leito e o monitoramento das operações com stoplogs, resultando em um ganho econômico, devido à redução do tempo de inatividade de produção e um aumento na segurança do trabalho, pela redução da necessidade de mergulhos interventivos.

O protótipo do ROSA está atualmente em fase de testes, sendo que o mesmo será entregue e permanentemente implantado na UHE Jirau ao fim do projeto. Durante os testes, o sistema mostrou-se capaz de monitorar corretamente todas as etapas de operação e também de mapear o vão do stoplog com limiar de 20cm.

Para o desenvolvimento deste projeto foi realizado uma ampla pesquisa bibliográfica acompanhada por um levantamento detalhado dos equipamentos disponíveis no mercado além de várias iterações de projeto e testes com protótipos em campo. O foco foi alcançar um equilíbrio que garanta robustez para operar repetidamente em um ambiente hostil, implantação fácil e rápida para garantir a usabilidade do sistema, interface de usuário intuitiva para reduzir a formação necessária e aplicabilidade abrangente.

O resultado final é um sistema composto por uma unidade de controle de terra com nível de classificação IP68 capaz de resistir a altas temperaturas e umidade, uma unidade submarina com nível de classificação IP69K capaz de suportar até 100 metros de pressão de água, um procedimento de instalação de 10 a 20 minutos, um mínimo de treinamento para procedimentos de instalação e nenhum treinamento para o uso do sistema.

O projeto representa uma inovação para a prática atual de operações com stoplogs, sendo aplicável a qualquer usina que utilize viga de içamento.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A inserção ou remoção de stoplogs no vão da barragem é feito por um operador experiente utilizando um guindaste ou pórtico rolante equipado com uma viga de içamento. A viga é uma ferramenta puramente mecânica, com um chaveamento manual para modo de liberação ou engate, e duas garras para engatar nos olhais dos stoplogs. A Figura 3 mostra uma viga pescando um stoplog. O mecanismo da viga é robusto em sua simplicidade, entretanto, devido às folgas mecânicas e detritos carregados pelo rio, a operação pode falhar. Estas falhas geralmente não são percebidas pelo operador na sua ocorrência inicial, uma vez que a informação disponível é a

tensão no cabo do guindaste, resultando em um agravamento do incidente.

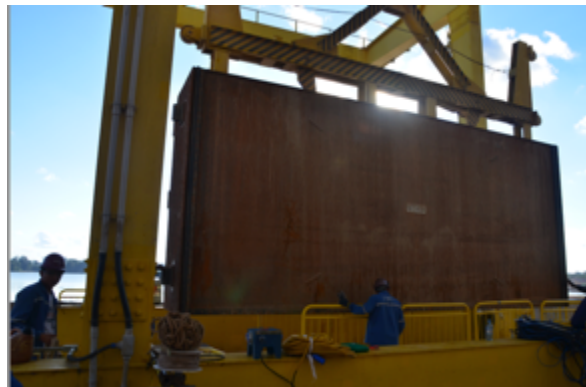


Figura 3 - Viga pescando um stoplog

Os seguintes problemas em operações com stoplogs foram registrados em Jirau nestes últimos 2 anos:

- Apenas uma das garras se prendeu ao olhal do stoplog em fevereiro de 2013, causando danos estruturais ao vão do stoplog e uma perda de produção de 10 dias.
- O mesmo tipo de falha ocorreu novamente em dezembro de 2013, causando quatro dias de perda de produção. O stoplog saiu do vão e precisou ser achado e recuperado.
- Falha causada por um cabo frouxo. O cabo do pórtico se emaranhou com o stoplog e se rompeu durante a tentativa de içamento. Foram necessários 7 dias para retirada do stoplog e 90 dias para a chegada de um novo cabo. Levando-se em conta todos os problemas, o pórtico ficou limitado por mais de 100 dias
- Não ensecamento da unidade geradora devido a detritos na soleira e guiamento lateral:
 - UG 01, em outubro/2014, duração de 4 dias;
 - UG 03, em outubro/2014, duração de 4 dias;
 - UG 05, em setembro/2014, duração de 4 dias;
 - UG 32, em setembro/2014, duração de 4 dias.

Ressalta-se que, devido ao acúmulo de detrito recorrente, todas as paradas de máquinas a partir de outubro de 2014 necessariamente têm sido acompanhadas de mergulho preventivo.

Um agravante para estas falhas de operações é que só podem ser resolvidas através de mergulhos interventivos (vide Figura 4). Este é um trabalho de alto risco, devido às fortes correntes e ao peso do equipamento submerso. Em particular, em Jirau, a água tem uma grande quantidade de sedimento em suspensão, resultando em visibilidade nula. Assim, os mergulhadores só pode orientar-se através do tato.

Em 2013, ocorreu um acidente de mergulho interventivo em Jirau. Um mergulhador foi arrastado pela correnteza para uma entrada adjacente, a corda de segurança o segurou inicialmente, mas a pressão da água era muito alta, tornando a respiração e a movimentação impossível. Ele teve que cortar a corda e se permitir ser arrastado rio abaixo. Por sorte, o acidente não foi fatal.



Figura 4 - Mergulho interventivo na UHE Jirau

III. ESTADO DA ARTE

Lewin [1], em 1995, estudou stoplogs e as propriedades físicas e mecânicas de içamento por viga. O stoplog ideal, como mencionado no livro, tem um sensor mecânico de contato, e uma válvula reguladora de pressão hidrostática, que resolve a maioria dos problemas em operações com stoplogs. No entanto, em 2006, na Inglaterra, uma norma técnica foi proposta para a sua fabricação, privilegiando a redução de custo, e dessa forma eliminando o sensoriamento [2]. Em 2006, uma consultoria de engenharia propôs um sistema composto por uma viga de içamento com sensores de proximidade submersíveis e servomotores elétricos para atuar de forma independente as garras [3].

Em uma solução semelhante, a Atlas Polar criou uma viga pescadora automatizada, composta por um sensor indutivo para detectar o contato, um sensor de força para indicar a libertação dos stoplogs e motores para o içamento [4] (vide Figura 5).

As soluções propostas na literatura consideram a criação de uma viga com os sensores integrados no momento da construção. A proposta do ROSA é de um sistema que possa ser instalado na infraestrutura já existente, sem necessidade da compra de uma nova viga. Nenhum trabalho anterior foi encontrado na literatura descrevendo a aplicação de um sonar para a inspeção do vão do stoplog.



Figura 5 - Viga pescadora automatizada da Atlas Polar

IV. DESCRIÇÃO DO ROSA

O robô ROSA foi projetado para superar os problemas mais comuns de inserção e remoção de stoplogs. Um conjunto de sensores subaquáticos instalados na viga monitora o status do sistema em tempo real. As informações dos senso-

res são processadas e transmitidas para uma interface de usuário instalada em um *tablet* que fica na cabine do operador do guindaste.

O robô ROSA pode ser considerado um tipo de veículo submarino operado remotamente (ROV - *remotely operated vehicle*). Em um ROV existem dois sistemas que se comunicam através de um cabo umbilical: um sistema embarcado, o qual submerge e faz aquisição de dados com determinados sensores e um sistema de superfície, que envia comandos de missão ao sistema embarcado, monitora, e realiza o pós processamento dos dados recebidos. Os ROVs tradicionais utilizam propulsores para navegar no ambiente submarino e levar os sensores para onde são necessárias as medições. Entretanto, devido à forte correnteza gerada pelas turbinas adjacentes àquela sendo ensecada, não é possível utilizar um ROV tradicional. O ROSA utiliza a viga e o guindaste para se locomover e medir as variáveis desejadas. A viga desce ao longo de um trilho no vão do stoplog, parte da infraestrutura padrão da represa, garantindo assim a estabilidade do sistema contra a correnteza.

O ROSA compreende seis subsistemas: sensores de monitoramento, sensores de inspeção, unidade de controle submarino, unidade de controle de superfície, interface de controle e software robótico. A Figura 6 mostra uma foto do ROSA e seus subsistemas.

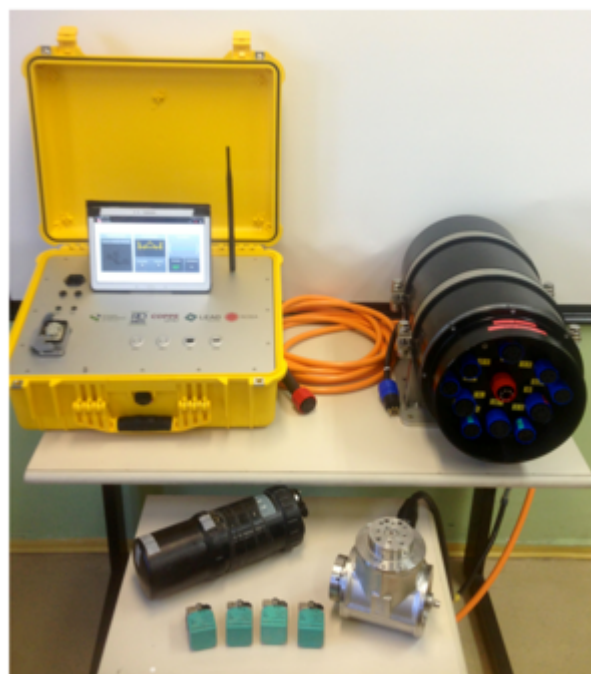


Figura 6 - ROSA e seus subsistemas

O monitoramento da viga é realizado por dois sensores indutivos que detectam o contato entre as garras e o olhais do stoplog, dois sensores indutivos que detectam se a chave da viga está em posição de engate ou desengate, um sensor de inclinação e um profundímetro. Dessa forma, cada etapa do processo de captura e libertação dos stoplogs pode ser monitorada. Um algoritmo de controle monitora o processo e sinaliza para o operador através de alarmes qualquer falha de funcionamento detectada.

A inspeção é realizada através do mapeamento e localização 3D obtida a partir das medições feitas pelo sonar. Um sonar tipo *profiler* é acoplado a uma unidade *pan & tilt* e

preso em uma posição fixa na viga. A informação do sonar é apresentada ao operador sobreposta ao CAD 3D da barra-gem, permitindo assim uma visualização intuitiva de possíveis detritos.

A unidade de controle submarina é composta de uma eletrônica embarcada encapsulada em um vaso de pressão. O vaso é vedado contra água e partículas, submersível até 100 metros, resistente a uma ampla faixa de temperaturas, protegido contra impacto e vibração, e eletricamente blindado. Receptáculos e conectores submarinos apropriados são empregados para os sensores de monitoramento e inspeção. Um computador embarcado realiza a leitura dos sensores, agregação dos dados e a sua transmissão para a unidade de controle de superfície. A transmissão de energia e dados é realizada através de um cabo umbilical de 60m de comprimento e resistente à tração.

A unidade de controle de superfície é composta por uma eletrônica embarcada encapsulada em uma caixa tipo Pelican para fácil transporte e instalação em campo. Todos os equipamentos são especificados para operações em altas temperaturas e umidade, típica do ambiente da floresta amazônica. O computador embarcado realiza o processamento dos sensores e transmissão via *Wi-Fi* das informações para a interface de controle instalada no *tablet* na cabine do operador.

A interface de controle permite o acesso *on-line* à distância a todos os dados do robô. O software pode ser instalado em qualquer *tablet* com sistema operacional *Android*. O acesso aos dados é feito por uma conexão *Wi-Fi*.

O software do robô é baseado no sistema operacional Linux e no framework de robótica ROCK. O ROCK é um framework baseado em componentes sob uma licença de código aberto. O software de inspeção utiliza uma metodologia probabilística para acumular os dados volumétricos oriundos do sonar. Esse acúmulo permite a resolver a ambiguidade dos dados, pois um eco falso positivo a partir de um ponto de vista, provavelmente desaparecerá a partir de outro ponto de vista, assim como a sobreposição irregular da região medida por diferentes ecos permite alcançar uma resolução maior do que a resolução do sonar. O princípio por trás do software de monitoramento é uma tabela de decisão, que processa as informações provenientes dos sensores e mostra alarmes visuais e sonoros no caso de uma falha durante a operação com os stoplogs.

V. SISTEMA EMBARCADO SUBMARINO

Os sistemas embarcado e de superfície são projetos interdisciplinares, desenvolvidos por quatro grupos: (1) mecânica, responsável pelo invólucro (*housing*), montagem dos sensores e roteamento de cabos; (2) eletrônica, responsável pela especificação dos sensores, atuadores e demais dispositivos, projeto das placas de circuito impresso (PCBs), e pela integração do sistema; (3) eletrônica de potência, responsável pelo projeto do sistema de alimentação e proteção tendo em vista os requisitos de robustez, resistência à vibração, alta temperatura e outros e (4) software, responsável pela comunicação entre os diversos componentes.

A. Mecânica

Os principais requisitos de projeto para o invólucro do sistema embarcado são: submersibilidade mínima de 50 metros de profundidade, resistência a vibrações e choques e facilidade de manuseio e montagem sem realizar modificações na viga. Durante a execução do projeto, foram testados três protótipos para o invólucro do sistema embarcado.

O *protótipo 1* é um invólucro utilizado para testes preliminares de conceito da eletrônica e do software. Este *housing* é composto por um tubo de PVC de 600mm de comprimento e 160mm de diâmetro com tampas de alumínio. Os conectores utilizados são do tipo *Rubber Molded* da SeaCon. O protótipo 1 é submersível até 90m de profundidade. A Figura 7 mostra o *housing* e sua montagem na primeira expedição.

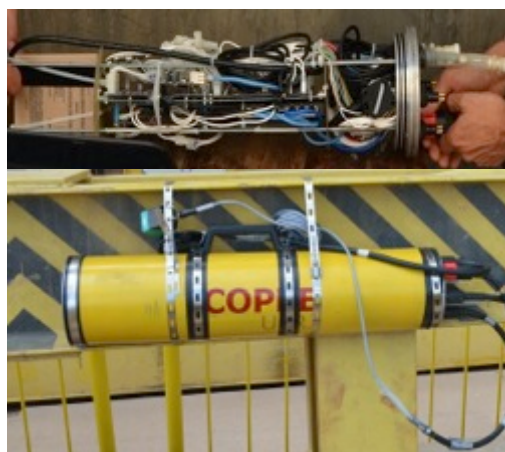


Figura 7 - Protótipo 1 da eletrônica embarcada submarina

O *protótipo 2* é otimizado para as operações de monitoramento, ou seja, não possui conectores nem a eletrônica necessária para os sensores de inspeção, resultando em uma solução de baixo custo. Seu material é alumínio, dimensões 400x250x100mm para profundidades de até 50m. Os conectores empregados são modelo Wet-Con da Seacon. A Figura 8 mostra o *housing* do protótipo 2.



Figura 8 - Protótipo 2 da eletrônica embarcada submarina

O *protótipo 3*, mostrado na Figura 9, é o invólucro final sendo mais robusto contra choque, vibrações e profundidade (acima de 100m). É um tubo de alumínio com 455mm de comprimento e 300mm de diâmetro. Os conectores empregados são do modelo Wet-Con da Seacon. O vaso de pressão foi desenhado com um alongamento para proteção dos conectores contra possíveis choques e com uma base para montagem rápida do sistema.

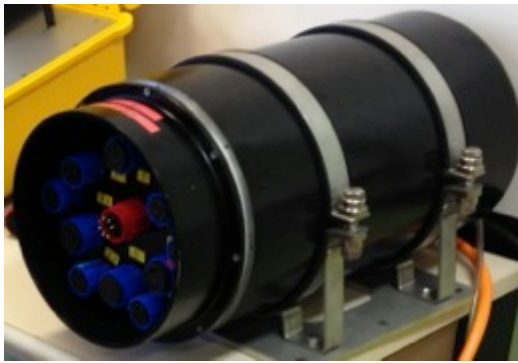


Figura 9 - Protótipo 3 da eletrônica embarcada submarina

B. Sensores

Os sensores que compreendem o sistema embarcado são:

- Sensores indutivos modelo NBB20-L2-E3-V1, Pepperl-Fuchs;
- Sensor de inclinação EC2019, IFM;
- Sensor de pressão HPX de 0 a 5 bar, Velki;
- Sonar Super Seaking DFP, Tritech;
- Sonar Micron, Tritech e
- Sistema *pan & tilt* (PTU) oe102-02, Kongsberg.

Os sensores indutivos NBB20-L2-E3-V1, IP69K são alimentados por 24VDC/200mA, e sua saída é um sinal digital de 0V ou 24VDC quando sensibilizados. Eles são utilizados para detectar o contato das garras da viga pescadora com o stoplog (lados esquerdo e direito da viga), e a posição da chave de operação (desengate ou engate). O sensor é sensibilizado com a aproximação frontal de metais entre 0 a 30mm.

O princípio de funcionamento do sensor NBB20-L2-E3-V1 é a indução magnética. Quando alimentado, o oscilador interno do dispositivo gera uma corrente alternada que passa por uma bobina, produzindo um campo magnético. Aproximando-se um material condutor diretamente na face frontal do sensor, o campo magnético produzido induz correntes de Foucault, de acordo com a lei de indução de Faraday. Pela lei de Lenz, as correntes de Foucault criam um campo magnético contrário e de intensidade variável conforme a proximidade do objeto metálico. O campo magnético oposto reduz a amplitude do campo magnético gerado pelo dispositivo, o qual é medido por um transdutor de campo magnético [5], [6]. Um circuito Schmitt trigger é acionado quando a amplitude atinge valores inferiores ao padrão, indicando detecção do metal.

O sensor de inclinação EC2019, IP67, é alimentado por 24VDC/50mA, e sua saída é analógica de 0 a 10VDC. Este sensor é instalado no interior do invólucro da eletrônica embarcada, à prova d'água, e fornece o ângulo de inclinação (*pitch*) da viga pescadora, o qual deve ser zero durante a inserção de stoplogs.

O EC2019 é um sensor de inclinação eletrolítico. O dispositivo possui três eletrodos em um fluido condutor (eletrolito), eletrodos positivo, negativo e comum. Em inclinação zero, os eletrodos estão igualmente submersos pelo fluido, produzindo um sinal de saída equilibrado, igual a zero. Ao girar o dispositivo em seu eixo sensível, o fluido cobrirá mais um eletrodo do que outro, gerando um desequilíbrio na saída. Esse desequilíbrio é proporcional ao ângulo girado [7], [8].

O sensor de pressão HPX, IP65, é alimentado com 24VDC/200mA e sua interface é digital padrão RS485. Este sensor, instalado no interior do invólucro da eletrônica embarcada, mede a pressão exterior e, assim, permite inferir a profundidade, o que auxilia o operador durante o procedimento de inserção e remoção.

O HPX é um sensor de pressão piezoresistivo. De acordo com o efeito piezoresistivo, quando um esforço mecânico deforma um semicondutor ou metal, a resistência elétrica é alterada proporcionalmente [9]. O dispositivo apresenta um transdutor piezoresistivo na extremidade, que está em contato com o exterior, e um microprocessador com conversor A/D de 16 bit. Quando a pressão externa aumenta, o transdutor sofre deformação, alterando a resistência elétrica e que se traduzirá em aumento de profundidade.

O sonar (*Sound Navigation and Raging*) Super Seaking DFP, IP69K, é alimentado com 24VDC/1A, e sua interface é digital padrão RS232. Ele é acoplado ao PTU no centro da viga pescadora e fornece a distância de objetos através do som. Com esses dados é possível realizar visualizações e reconstruções 3D do ambiente subaquático, possibilitando a análise de sedimentos no vão do stoplog. Vale observar que a utilização de uma câmera não faz sentido para esta aplicação, visto que o Rio Madeira tem visibilidade nula.

O Super Seaking é um *profiling* sonar, isto é, ele gera um perfil preciso do solo, ressaltando os objetos presentes na água. O sonar opera com um transdutor acoplado a um motor de passo com resolução máxima de 0.45°. Para cada passo, o transdutor emite *pings*, feixes estreitos de energia acústica em forma cônica. Alguns feixes são refletidos de volta ao dispositivo, e o tempo e intensidade são gravados e enviados à base para análise [10].

O sonar Micron DST, IP69K, é alimentado com 24VDC/170mA, e sua interface é digital padrão RS232. Ele, como o sonar SeaKing, é acoplado ao PTU no centro da viga pescadora. O Micron é o menor sonar digital CHIRP do mercado, utilizado principalmente para desvio de obstáculos e navegação de pequenos ROVs. Sua classificação é *imaging* por fornecer uma imagem do ambiente, em vez de um perfil como o sonar *profiling*. Este sonar será utilizado para testes dos algoritmos de visualização e reconstrução 3D.

O sistema *pan & tilt* oe102-02, IP69K, é alimentado com 24VDC/2A, e sua interface é digital padrão RS232. Ele é instalado no centro da viga pescadora e é um atuador para movimentação dos sonares, nos sentidos panorâmico (*pan*) e inclinação (*tilt*). O PTU é formado por dois motores de passo, um em cada eixo (*pan & tilt*), com resolução de 1 grau. A movimentação do sonar é essencial para a visualização 3D.

C. Eletrônica

As placas de circuito impresso do robô ROSA são responsáveis por alimentar e realizar a integração dos diversos sensores e atuadores. Foram desenvolvidos três projetos de PCBs: placa supervisória completa, placa simplificada somente para os sensores indutivos e placa simplificada somente para o sonar. O projeto, layout e roteamento das placas foram realizados empregando-se o software Altium.

A placa supervisória completa (dimensões 150x125mm) foi projetada para gerenciar quatro sensores de inclinação (chave de operação, garras e viga), três sensores indutivos (chave de operação e garras), dois sonares (sonar Micron e

Super Seaking), um sensor de pressão e um PTU. Além disso, ela apresenta as seguintes características: medição das tensões de entrada do sistema, medição das correntes de entrada dos sensores, acionamento individual de dispositivos e proteção individual contra sobrecorrente.

Os principais componentes da PCB supervisória são:

- Microcontrolador AVR AT90CAN64. Sua função é converter a saída analógica dos sensores de inclinação, ler saídas digitais dos sensores indutivos, medir tensões de entrada e correntes dos sensores e acionar os dispositivos (liga/desliga).
- Relés LCA701 e CPC1708 para acionamento dos dispositivos.
- MAX485 e MAX232 para converter as interfaces digitais RS485 e RS232 para UART.
- Sensor de efeito Hall ACS712 para medição de corrente.
- ADC AD7490-EP para fazer a conversão analógico/digital de 12 bit das medidas de corrente.
- SR01E12 para fazer a conversão UART-Ethernet.

A PCB simplificada para os sensores indutivos (75x84mm) foi idealizada para uma eletrônica embarcada de baixo custo, utilizada em operações padrão de remoção e inserção de stoplogs. A PCB gerencia um sensor de inclinação, quatro sensores indutivos e um sensor de pressão. Os sensores de inclinação para a chave e garras mostraram-se uma redundância desnecessária. A fim de possibilitar diversos umbilicais, há a possibilidade de selecionar a interface de saída da PCB entre Ethernet ou RS485, por *jumpers*.

Os principais componentes da PCB para os sensores indutivos são:

- Microcontrolador AVR AT90CAN64. Se selecionada a interface de saída Ethernet, o microcontrolador exerce apenas o papel de conversor entre o SR01E12 e o sensor de pressão. Usando a interface de saída RS485, o microcontrolador gerencia todos os sensores da operação padrão: entradas digitais dos indutivos, entrada analógica do sensor de inclinação e RS485 do sensor de pressão.
- MAX485 e MAX232.
- SR01E12. Em caso de interface de saída Ethernet, o SR01E12 gerencia todos os sensores da operação padrão, com exceção do sensor de pressão. Em caso de interface de saída RS485, o SR01E12 não é utilizado.

A Figura 10 mostra uma PCB supervisória completa.

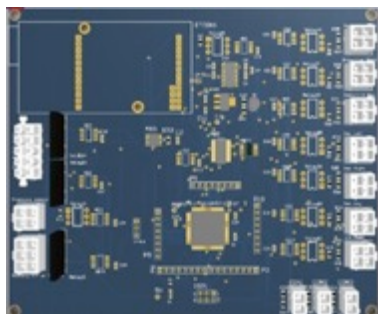


Figura 10 – PCBs supervisória

D. Integração

A integração do sistema eletrônico é o gerenciamento das diversas interfaces de comunicação que compõem o sistema e interligação física entre as partes. Como já foi exposto, o robô ROSA é composto por diversos sensores, tendo as seguintes interfaces: digital TTL, analógica, digital RS232 e digital RS485. Os componentes de hardware que gerenciam as interfaces são microcontroladores AVR AT90CAN64 ou o módulo SR01E12, composto por microcontroladores PIC. Dessa forma, a comunicação com a eletrônica embarcada é realizada através de umbilical Ethernet ou RS485.

Os dispositivos externos à eletrônica embarcada, sensores indutivos, sonar e PTU, são interligados ao invólucro através de conectores modelo Wet-Con da SeaCon, com 6 vias para sonar e PTU e 4 vias para os sensores indutivos. O cabo umbilical se conecta à eletrônica embarcada por um conector SubConn de 6 vias, também à prova d'água. A tecnologia Wet-Con permite que as conexões possam ser realizadas dentro ou fora d'água em até mil metros de profundidade. Internamente, as conexões são realizadas com conectores Molex mini-fit.

E. Eletrônica de potência

Os principais requisitos de projeto da eletrônica de potência do sistema são: capacidade de operação em ambiente com temperatura entre 25° e 45°C, alta umidade e robustez a vibração e choque moderados.

A fim de garantir vinte e quatro horas de operação contínua e a utilização de um umbilical simples, apenas para dados, foi especificada uma bateria militar recarregável de lítio-íon de 24VDC/9.6Ah, temperatura de operação entre -20°C a 60°C, 1.4Kg, 112x61x127mm, BT-70791CG da Bren-Tronics. Foi projetada uma PCB com conversor DC/DC da empresa Vicor, V24B24E200BL3, de 36-24VDC para a alimentação dos sensores/atuator e um conversor DC/DC, VAWQ6-Q24-S5H, de 36-5VDC para alimentar as PCBs e o switch ethernet.

VI. SISTEMA DE SUPERFÍCIE

A. Mecânica

O sistema de superfície foi projetado para ser robusto e resistente a vibrações e choques. Como invólucro, foi utilizada uma Pelican case e uma máscara/tampa com todos os conectores necessários para o acesso às entradas do PC interno: Ethernet, VGA, DB9 e HDMI. Há também um conector externo para entrada do cabo umbilical.

B. Eletrônica

A eletrônica de superfície é composta por um PC embarcado para o processamento dos dados do sonar e dos demais sensores e um dispositivo para a interface com o usuário (operador da viga). Essa eletrônica é bem simples se comparado ao sistema embarcado por não conter sensores ou placas customizadas.

O PC de superfície deve ter memória RAM e processamento suficiente para processar os dados do sonar e carregar um sistema operacional com o sistema ROCK. Portanto, foi especificado o PC104 ADLD25PC por suas reduzidas dimensões, expansibilidade, flexibilidade e processamento.

A interface com o usuário será realizada através de um *tablet* Galaxy S Note 10.1. Essa escolha foi motivada pela experiência prévia da equipe em programação com o sistema operacional Android.

C. Eletrônica de potência

A eletrônica de potência do sistema de superfície assemelha-se ao do sistema embarcado. É composta por baterias e conversores DC/DC para o PC104, um SSD e um roteador *Wi-Fi*. Além disso, possui também um circuito para o carregamento das baterias, com a possibilidade de alimentação externa de 110 a 220VAC, e uma fonte chaveada para a conversão AC/DC.

VII. INSPEÇÃO

O ambiente subaquático de interesse para a inspeção é a região onde os *stoplogs* entram em contato direto com o leito do rio e que, consequentemente, apresenta acúmulo de sedimentos. Os detritos podem ser de diferentes tipos, mais comumente o sedimento, argila, rochas e pedaços de madeira trazidos pelo rio.

O mapeamento consiste em capturar informações sobre o ambiente ao longo de um período de tempo e condensá-las, podendo ser usado como parte integral de um sistema de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping* – Localização e Mapeamento Simultâneos, em tradução livre) ou apenas para visualização de uma área.

Esses dados coletados podem ser processados utilizando-se diversas formas de representação do espaço de 3 dimensões. A forma mais simples seria utilizar um mapa de 2 dimensões, como uma planta baixa, o que pode ser útil quando a região de interesse se localiza majoritariamente em um plano. Existe, também, a representação chamada 2,5D, ou mapa de elevação, útil quando a maior preocupação é representar o relevo do ambiente, aí se encontram casos como o mapeamento do leito do oceano. Os mapas de elevação podem ser empilhados para possibilitar a reconstrução de ambientes onde as elevações não são contínuas, como é o caso da presença de túneis. Por fim temos as representações completamente 3D.

O mapeamento e a reconstrução 3D do vão do *stoplog* e seus entornos só podem ser realizados caso o sistema desenvolvido seja capaz de se localizar no ambiente que o cerca. Ou seja, todas as medições realizadas pelo sensor hidroacústico, situado na cabeça do sonar, devem ser calculadas em relação a uma origem previamente estabelecida. Essa necessidade é acentuada pela natureza do sonar, que produz medidas naturalmente ruidosas. Sendo assim, é necessário que haja uma filtragem dos dados por meio de um algoritmo adequado.

A. Mapeamento

Dentre as representações intrinsecamente 3D destacam-se dois tipos. *Point cloud* é um tipo bruto de representação no qual as informações colhidas do ambiente são expressas como uma nuvem de pontos que visa reconstruir a superfície do ambiente. Ainda bastante utilizado em mapeamos a laser, pode ser pós-processado para construir malhas poligonais e vetores normais a partir dos dados brutos, para se ter uma informação mais refinada e uma melhor renderização do

ambiente em 3 dimensões. Com essa representação perdemos uma informação que é invisível ao observador de uma imagem criada por mapeamento, mas importante para o melhor funcionamento dos algoritmos de mapeamento, a diferença entre regiões do espaço que não possuem objetos e outras das quais ainda não temos informações. Em contraponto com esta temos a representação volumétrica.

Assim como os pixels que são as unidades de uma tela em duas dimensões, os *voxels* (amálgama de volume e pixel) são comumente a unidade de volume de uma representação volumétrica. Recortando o espaço em cubos de mesmo tamanho e colorindo cada cubo de acordo com um valor atribuído a ele, essa é a ideia por detrás da representação volumétrica por *voxels*.

A *octree* é uma estrutura de dados em árvore em que cada nó tem exatamente oito filhos. Assim como um cubo pode ser dividido em oito cubos idênticos, onde todos os oito compartilham um vértice no centro do cubo original. Dessa maneira, a *octree* se torna uma maneira atraente de se organizar os *voxels* de um volume, podendo conter *voxels* de diferentes tamanhos. Uma vez que se escolha tornar um determinado nó uma folha, ele não mais é subdividido. Isso é útil quando a informação de um grupo de *voxels* vizinhos for a mesma, assim é possível agrupá-los em um “*voxel* maior” e, consequentemente, guardar na memória apenas uma vez a informação para todo o grupo de *voxel*, o que torna essa solução eficiente do ponto de vista de memória. A figura 11 mostra a representação dos *voxels* e da *octree*.

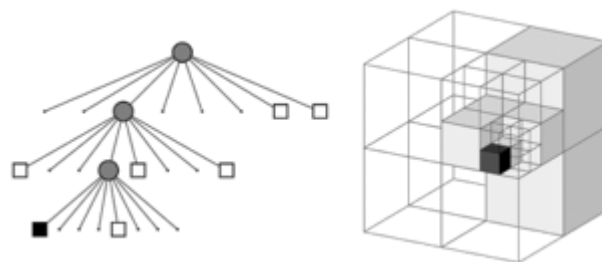


Figura 11 – Octree e Voxels

Sobre essa estrutura de dados volumétrica, organizada em *octree*, serão inseridas as informações vindas das leituras do sonar. Para isso é necessário entender um pouco melhor o que são os valores que serão guardados em cada *voxel* e como as medidas feitas pelo sonar vão influenciar esses valores.

O algoritmo do mapeamento é probabilístico, onde as medidas do sonar e suas incertezas são discretizadas e armazenadas em *voxels*. Para melhor ilustrar, considere o seguinte exemplo numérico. Imagine que se deseje mapear um ambiente de 5x2x10 m, que seria o tamanho aproximado de uma região de interesse dentro do vão de um *stoplog*. Então, assumindo-se uma resolução desejada de 100mm, o equivalente a um *voxel* de 100x100x100 mm, o ambiente de 100 m³ possui 10⁵ *voxels*. Dessa forma, como cada *voxel* pode conter ou não algo dentro dele, o número total de mapas diferentes é de aproximadamente 10³⁰¹⁰³, um número intratável para se considerar a possibilidade de cada mapa. Uma maneira de se contornar esse problema, é considerar apenas as probabilidades marginais de cada *voxel* estar ocupado, ou

seja, a chance de um determinado estar preenchido ou não, independente da condição dos demais. Por um lado isso acarreta a perda da informação de como a presença de um *voxel* ocupado impacta na probabilidade dos outros também estarem, o que nos força assumir a independência estatística entre eles. Por outro lado, o problema torna-se tratável e a informação estatística associada é armazenada de maneira similar como seria armazenada a cor de um objeto 3D.

Para popular o mapa, utiliza-se as medidas do sonar. A potência do eco da onda emitida é um indicador da probabilidade de haver um objeto no local. Sua resposta é dividida em células, que são faixas onde se avalia a potência do eco. O número de células define a resolução do sonar. Com o feixe dividido desta maneira, não é possível distinguir, dentro de uma célula, a origem exata do eco. Para tentar contornar esse problema, utiliza-se o ganho direcional do hidrofone do sonar para ponderar a probabilidade do eco ter vindo de uma determinada direção. Em outras palavras, dá-se um peso maior para a probabilidade do eco quando este vem de uma direção onde o sonar tem melhor captação e menor onde não tem. A figura 12 mostra a configuração do ganho direcional do sonar.

Com a estrutura de mapa em *octree* e o modelo do sonar com seu ganho direcional e segmentado por células, é necessário integrar a informação vinda de diferentes medidas. Para isso lança-se mão de um filtro *Bayesiano* binário, pois só existem duas possibilidades para um local: ocupado ou vazio. Esse filtro assume que o estado subjacente é estático. Na prática, isso equivale a assumir o mapa do ambiente não muda enquanto o sistema está em execução. Nele, suas entradas são o mapa com as probabilidades atuais mais a nova medida do sonar, e sua saída um mapa atualizado. Matematicamente, o que ocorre é a seguinte atualização para cada *voxel*:

$$l_t(x) = l_{t-1}(x) + \log \frac{p(x|z_t)}{1 - p(x|z_t)} - l_0(x) \quad (1)$$

Nessa equação, $p(x|z_t)$ representa a probabilidade do *voxel* estar cheio segundo a resposta do sonar. Esse valor é obtido pelo que se tem do modelo (o ganho direcional, a potência recebida pelo sonar e a distância, ou célula do feixe de emissão em que o eco se encontra) e a posição do *voxel* com relação ao sonar.

$l_t(x)$, $l_{t-1}(x)$ e $l_0(x)$ são, respectivamente, os *logodds* das probabilidades do *voxel* estar preenchido no mapa atualizado, no mapa antes da atualização e o valor *a priori*. O valor em *logodds* é um mapeamento da faixa de 0 a 1 para a faixa de $-\infty$ a $+\infty$ que torna os cálculos computacionalmente menos sensível a erros de truncamento, da seguinte forma:

$$l_t(x) = \log \frac{p(x|z_{1:t})}{1 - p(x|z_{1:t})} \quad (2)$$

O valor de $p(x|z_{1:t})$ é a probabilidade do *voxel* estar preenchido levando-se em consideração todas as medidas recebidas até o momento t . A equação é análoga para os outros *logodds*. No caso da probabilidade *a priori*, o valor de pro-

babilidade é baseado no conhecimento prévio sobre o ambiente. No caso do vão de inserção do *stoplog*, existe um conhecimento sobre o entorno que pode ser utilizado para tornar mais preciso o mapa.

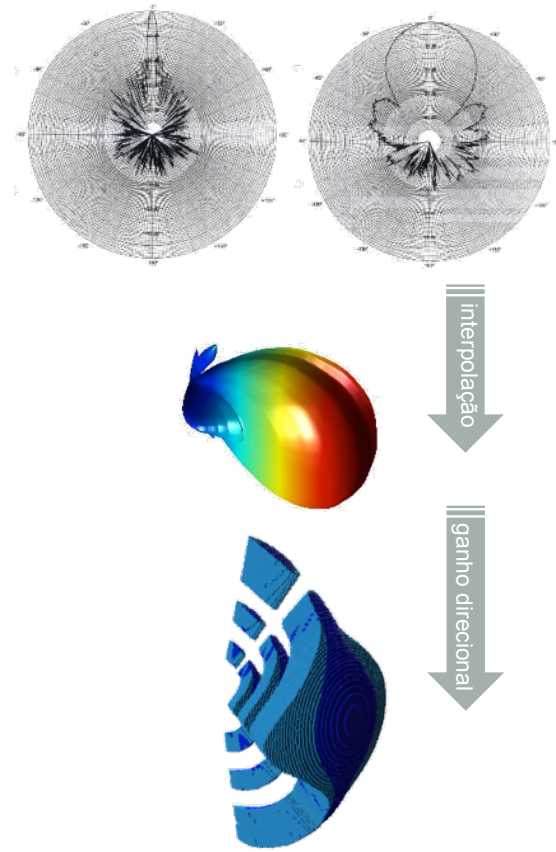


Figura 12 – O ganho direcional do Sonar

Os três elementos principais do sistema de mapeamento são agora integrados: o mapa em *octree* guarda as informações de probabilidade (em *logodds*) que são atualizadas pelo filtro *Bayesiano* fazendo uso do modelo de resposta do sonar. Todavia, o mapeamento tem como premissa que a posição do sonar e a direção da emissão do seu feixe são conhecidos. Para que isso seja verdade é imprescindível a existência de um sistema de localização. Figura 13 representa o ciclo dos três elementos de mapeamento.

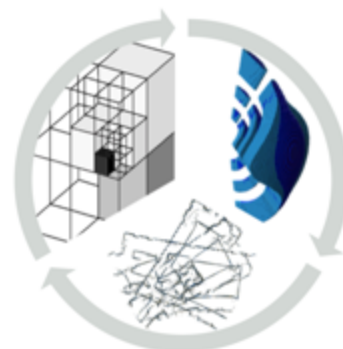


Figura 13 – três elementos principais do mapeamento: octree, modelo resposta sonar e filtro Bayesiano de múltiplos mapas.

B. Localização

O cálculo do volume dos detritos acumulados no fundo do leito do rio e na soleira de concreto depende do conhecimento da posição do robô em relação à usina, uma vez que o nível do espelho d'água e dos sedimentos depositados são variáveis. Portanto, é necessário o posicionamento do mapa gerado em relação a um mapa de referência para que o operador possa inferir o estado do leito inspecionado.

Devido às incertezas no posicionamento do sistema durante a sua instalação, não se pode afirmar que ele irá realizar o mapeamento sempre na mesma posição. A movimentação da viga pescadora não pode ser monitorada com a precisão necessária, mesmo com a adição do sensor de pressão e do inclinômetro. O sistema ROSA também se propõe a ser um dispositivo portátil e que funcione em diversas condições e em diferentes tipos de vigas pescadoras. Neste sentido, não se pode afirmar, tampouco, que a posição de instalação do robô na viga pescadora é constante. O processo de localização, portanto, tem papel fundamental no desenvolvimento e na aplicação do sistema proposto.

No ROSA a localização será realizada aplicando-se uma abordagem probabilística, ou seja, a posição deixa de ser um valor determinístico e passa a ser caracterizado por suas propriedades estatísticas. A abordagem estatística possibilita incorporar explicitamente as incertezas intrínsecas aos sensores e modelos utilizados, e filtrando as medidas através de um filtro recursivo e estocástico é possível produzir medidas de melhor qualidade, do ponto de vista estatístico, reduzindo a incerteza da posição do sistema.

O problema de localização subaquática utilizando implementações práticas do *Filtro de Bayes* vem sendo abordada na literatura, porém cada aplicação deve ser estudada cuidadosamente para que seja desenvolvido um filtro que atenda aos requisitos exigidos. Em sistemas onde a posição inicial do robô é conhecida e o modelo para a dinâmica do robô e dos sensores são lineares, pode-se implementar um Filtro de Kalman. No caso de aplicações em que não se pode afirmar a linearidade dos modelos, é possível a utilização de abordagens variantes nas quais os modelos são linearizados [11]-[18], como o *Extended Kalman Filter* ou o *Unscented Kalman Filter*.

No contexto deste projeto, a posição inicial do robô não é conhecida e o sensor utilizado nas medições do ambiente possui grandes não-linearidades. Logo, será utilizado um filtro de partículas que é capaz de lidar com o problema de distribuições de probabilidades genéricas (não-lineares), ambiguidades e distribuições multimodais.

O filtro de partículas [19]-[22] é uma implementação recursiva e não paramétrica do *Filtro de Bayes*, na qual as distribuições de probabilidade das variáveis a serem medidas são representadas, a cada instante, por um número finito M de amostras $\chi_t = x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^M$, chamadas partículas. Cada partícula é considerada uma instância concreta do sistema e deve, idealmente, ser proporcional à distribuição de probabilidade do estado do sistema, condicionado às entradas de controle u_t e às medidas z_t , isto é,

$$x_t^m \sim p(x_t | z_{1:t}, u_{1:t}) \quad (3)$$

Quanto maior o número de partículas maior é o poder de aproximação, porém, à medida que se aumenta a quantidade de amostras utilizadas, a capacidade computacional necessá-

ria para se realizar os cálculos em tempo hábil também aumenta. Neste sentido, é importante que os estados a serem representados por cada partícula sejam escolhidos de forma a minimizar o número de partículas necessárias.

Ao analisar a estrutura mecânica do vão de descida, pode-se perceber que o maior limitante de movimentação do sistema (viga pescadora e robô ROSA) é o trilho guia. Sua tarefa é permitir que o sistema desça alinhado paralelamente à estrutura de concreto da represa e que a movimentação no plano x,y seja apenas as inerentes às folgas mecânicas.

A localização do sistema no plano x,y se resume, portanto, ao problema da estimação do estado inicial. O rastreamento da posição do robô é realizado somente no eixo z , que tem seu estado inicial também desconhecido. Uma vez que a convergência seja alcançada, o filtro de partículas não precisa mais realizar o rastreamento da altura, pois o escaneamento deve ser realizado estaticamente, situação na qual o filtro de partículas não se mostra eficaz.

Na estimação da orientação do sistema, o único ângulo a ser amostrado é o ângulo de roll ψ , pois os demais ângulos, pitch θ e yaw ϕ têm variações desprezíveis. O estado do sistema pode ser representado pela variável aleatória $x_t = [x, y, z, \psi]$, sendo que as dimensões x e y tem um intervalo restrito a poucos centímetros de incerteza, devido a guia da viga pescadora.

O algoritmo do filtro de partículas pode ser dividido em dois passos: predição e correção. A etapa de predição é realizada recursivamente para cada partícula, a partir do valor no instante anterior x_{t-1}^m , do modelo dinâmico do robô e da entrada de controle mais recente u_t , gerando um novo estado hipotético x_t^m . Para o sistema proposto, o deslocamento é calculado a partir da diferença de pressão medida entre o instante atual e o anterior mais um erro gaussiano centralizado em zero. A resposta do sensor de pressão não pode ser considerada uma medida absoluta, pois, conforme já discutido, o sensor não mede a altura em relação ao mapa de referência, mas apenas a profundidade a partir do espelho d'água, que tem a sua altura variável, assim como os sedimentos acumulados. A medida realizada pelo sensor de inclinação é considerada absoluta e tem seu erro incorporado à medida.

Na etapa de correção, após a atualização de cada partícula com os dados dos sensores da ação de controle, a medida z_t deve ser incorporada ao sistema. Cada partícula recebe um peso $\omega_t^m \sim p(z_t | x_t)$, ou seja, cada partícula é avaliada pela probabilidade da medida z_t ocorrer, visto que o sistema se encontra no estado x_t . Essa avaliação depende de como o sensor foi modelado.

Cada sonar é modelado diferentemente de acordo com as suas propriedades de medição. O Sonar Seaking é um sensor do tipo *profiling*, isto é, a onda sonora emitida é um cone estreito e concentrado e seu modelo é do tipo *range finder*, no qual apenas a coordenada do eco recebida é considerada como ocupada e todo o caminho entre o emissor e o alvo é considerado vazio. Por sua vez, o sonar *Micron* é um sonar do tipo *imaging*, o qual tem um feixe de emissão em forma de leque e atribui um valor de intensidade recebida para cada *bin*, ou subdivisão do mesmo. A escolha do sonar a ser utilizado é influenciada tanto pelo preço do equipamento, assim como na resposta do sensor nas condições do ambiente. Embora o *profiling* tenha, teoricamente, uma precisão maior, sua cobertura é muito menor quando comparada com

o do *Micron*, necessitando um tempo maior para a aquisição de dados suficientes para cobrir todo o ambiente a se mapear.

VIII. RESULTADOS

O ROSA ainda está em desenvolvimento. Atualmente encontra-se em fase de testes finais. Os resultados disponíveis são baseados em 5 testes de campo realizados na UHE Jirau. Durante os ensaios de campo, foram executados tanto testes individuais com seus componentes quanto testes com o sistema completo.

A. Eletromecânica

Design e construção de 3 protótipos de eletrônica embarcada. Todas as versões foram testadas em campo na UHE Jirau, a versão do protótipo 3 operou continuamente por 8 horas sem falhas durante operações de monitoramento e inspeção. 1 Engenheiro e 2 técnicos instrumentistas da ESBR foram treinados na instalação e manutenção do equipamento. A figura 14 mostra a eletrônica instalada na viga na UHE Jirau.



Figura 14 – Eletrônica em testes na UHE Jirau.

B. Monitoramento

Um operador da ESBR inseriu e removeu os stoplog, enquanto visualizava a operação a partir do *tablet* instalado na cabine de controle do guindaste. O sistema funcionou como esperado, monitorando em tempo real todas as etapas da operação. Após o experimento, o operador foi consultado em termos de entendimento da interface e sua usabilidade, 3 iterações foram necessárias para determinar uma representação ideal para o usuário. A Figura 15 mostra a interface resultante. Durante os testes não houve ocorrência de uma falha operacional. Logo, as condições de falhas foram forçadas em testes a seco. O sistema de monitoramento acusou as falhas operacionais simuladas, levantando alarmes visuais e sonoros. 2 operadores de pórtico rolante da ESBR foram treinados na utilização do sistema de monitoramento.



Figura 15 - Interface de monitoramento

C. Inspeção

Em Jirau, os sensores de inspeção foram montados na viga de içamento e submersos no vão de um *stoplog*. As medições foram feitas em 3 profundidades diferentes e em vários ângulos de *pan & tilt*, fornecendo pontos de vista distintos de uma mesma região. Devido ao alto grau de sedimentação fluando no rio Madeira, local do experimento, o sonar apresentou um nível de ruído maior do que o padrão. A incerteza alcançada no mapeamento foi de 200mm. Nenhum detrito maior do que 200mm de diâmetro foi detectado na soleira ou entorno do vão do *stoplog*. A configuração e uso do software de inspeção está restrito a um especialista no sistema, sendo o resultado operacional. A figura 16 mostra a visualização da inspeção do vão.

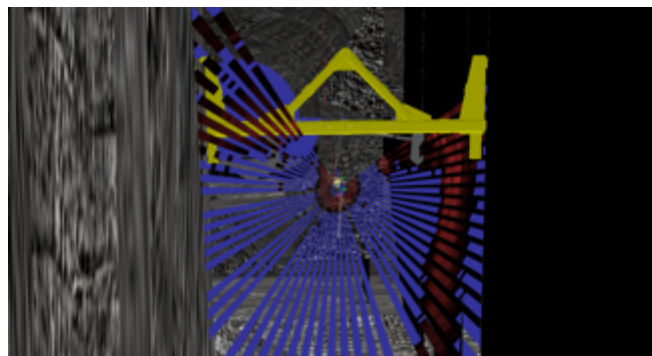


Figura 16 - Visualização da inspeção 3D

IX. BENEFÍCIOS

O ganho econômico do sistema ROSA pode ser estimado pela quantidade de problemas operacionais com *stoplogs* que poderiam ter sido evitados, caso o sistema já estivesse em uso diário na UHE Jirau. Em Jirau, ao longo de um período de 2 anos, falhas na operação com *stoplogs* resultaram em uma perda de disponibilidade de produção de 37 dias. Cada turbina têm capacidade instalada para produzir 75 MW, logo uma perda de 66.000MW. O esperado ao início do projeto era gerar um ganho de 22.000MW ao longo de um período de 2 anos.

O ganho em segurança pode ser estimado pela redução do número de mergulhos intervencionais. O nível de risco desta tarefa é classificado como máximo, uma vez que representam um risco real de perda de uma vida humana.

As falhas na operação com *stoplogs* causaram aproximadamente 25 dias de mergulhos interventivos nestes últimos

dois anos. O tempo de inatividade na produção está relacionado com o tempo necessário para mobilizar os mergulhadores, o mergulho propriamente dito e a resolução dos problemas. O sistema ROSA é um sistema de monitoramento e inspeção, desenvolvido para auxiliar as tarefas do operador, reduzir as ocorrências de falhas e, evitar ações agravantes decorrentes de operar sob condições de falha. Considerando-se as ocorrências relacionadas na seção II, o uso do ROSA teria resultado em uma redução de 75% de dias de mergulho interventivo.

X. CONCLUSÕES

O *hardware* do ROSA apresentou a robustez necessária para operar nas condições ambientais adversas da Amazônia, tanto na superfície quanto debaixo d'água.

O sistema de monitorização foi capaz de medir todos os parâmetros necessários para detectar os defeitos esperados. Mergulhos interventivos ainda são necessárias para corrigir qualquer erro operacional, mas as condições agravantes, como dano estrutural, podem ser evitadas, reduzindo o tempo de parada de produção e o número de dias de mergulho. O sistema de monitorização representa uma inovação para a prática padrão onde as operações são realizadas às cegas, bem como uma inovação no que se refere à literatura sobre o assunto.

O *software* de inspeção foi capaz de mapear o vão com uma resolução de 200mm. A elevada quantidade de sedimentos flutuantes, característico do rio Madeira, resultou em uma proporção maior do que o esperado no nível de ruído, limitando o sonar para frequências mais baixas e, consequentemente, reduzindo a resolução de medição. Novos testes são necessários para verificar se a precisão de 200mm é suficiente para evitar a necessidade de mergulhos preventivos, como vêm ocorrendo atualmente. O método representa uma inovação com relação à prática de mapeamento 3D por sonar. Testes comparativos entre a acumulação probabilística proposta e as práticas padrões da indústria não foram executadas.

Em conclusão, o conceito proposto para o sistema ROSA representa um ganho em termos econômico e de segurança do trabalho. Sua aplicabilidade pode ser estendida para outras UHEs nacionais, pois o sistema pode ser adaptado para qualquer operação com *stoplogs* que utilize viga de içamento. UHE Jirau e UHE Santo Antônio se mostraram interessadas na continuidade do projeto como lote pioneiro.

XI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lewin, J. (1995). Hydraulic Gates and Valves: In Free Surface Flow and Submerged Outlets. Thomas Telford.
- [2] Group, I.W. (2006). Design of movable weirs and storm surge barriers. In InCom report of WG 26.
- [3] Hatch (2009). Innovative log lifter improves safety and efficiency at the ivanhoe dam. Hatch news website. [http://hatch.ca/news/publications/Energy Innovations](http://hatch.ca/news/publications/Energy%20Innovations). Accessed on January 4th, 2015.
- [4] Polar, A. (2015). Stop log lifter systems. Atlas Polar website. <http://www.atlaspolar.com/trash-rake/stop-log-lifter-systems.html>. Accessed on January 4th, 2015.
- [5] Electronics engineers' Handbook. Fink, D., Christiansen, D. McGraw-Hill, Jan 1, 1989.
- [6] Instrumentation Reference Book. Boyes, W. 2002.
- [7] Electrolytic tilt sensor selection & operation. Disponível em http://www.fredericks.com/sens_tech_select.tpl. Acessado em 08/02/2015.
- [8] Electrolytic Tilt sensor – a Primer. Puccio, M.
- [9] Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. Smith, C. Phys. Rev., vol. 94, no. 1, pp. 42–49, 1954.
- [10] Learn More about Profiling Sonars. Tritech Knowledge Base. Disponível em http://www.tritech.co.uk/uploaded_files/Knowledge%20Base%20-%20Profiling%20Sonars.pdf. Acessado em 08/02/2015.
- [11] A. Plueddemann, A. Kukulya, R. Stokey, and L. Freitag, "Autonomous underwater vehicle operations beneath coastal sea ice," IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol. 17, no. 1, pp. 54–64, Feb. 2012.
- [12] M. Morgado, P. Oliveira, and C. Silvestre, "Tightly coupled ultrashort baseline and inertial navigation system for underwater vehicles: An experimental validation," J. Field Robot., vol. 30, no. 1, pp. 142–170, 2013.
- [13] M. V. Jakuba, C. N. Roman, H. Singh, C. Murphy, C. Kunz, C. Willis, T. Sato, and R. A. Sohn, "Long-baseline acoustic navigation for under-ice autonomous underwater vehicle operations," J. Field Robot., vol. 25, no. 11–12, pp. 861–879, 2008.
- [14] B. Bingham and W. Seering, "Hypothesis grids: Improving long baseline navigation for autonomous underwater vehicles," IEEE J. Ocean. Eng., vol. 31, no. 1, pp. 209–218, Jan. 2006.
- [15] D. Ribas, P. Ridao, J. D. Tardós, and J. Neira, "Underwater SLAM in man-made structured environments," J. Field Robot., vol. 25, no. 11–12, pp. 898–921, 2008.
- [16] Burguera, A. and González, Y. and Oliver, G., "Underwater SLAM with robocentric trajectory using a mechanically scanned imaging sonar", IROS, Sept. 2011, pp. 3577-3582
- [17] Mallios, A. and Ridao, P. and Hernandez, E. and Ribas, D. and Maurelli, F. and Petillot, Y., "Pose-based SLAM with probabilistic scan matching algorithm using a mechanical scanned imaging sonar", OCEANS 2009 - EUROPE, May 2009, pp 1-6
- [18] Hongqian Zhu and Huosheng Hu and Weihua Gui, "Adaptive unscented kalman filter for deep-sea tracked vehicle localization", ICIA, Junho 2009, pp 1056-1061
- [19] N. Fairfield and D. Wettergreen, "Active localization on the ocean floor with multibeam sonar," in Proc. OCEANS Conf., Sept. 2008, DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5151853
- [20] Maurelli, F. and Petillot, Y. and Mallios, A. and Ridao, P. and Krupinski, S., "Sonar-based AUV localization using an improved particle filter approach", OCEANS 2009 – EUROPE, Maio 2009, pp 1-9
- [21] Maurelli, F. and Krupinski, S. and Petillot, Y. and Salvi, J., "A particle filter approach for AUV localization", OCEANS, Sep. 2008, pp 1-7
- [22] Müller, J. and Rottmann, A. and Reindl, L.M. and Burgard, W., "A probabilistic sonar sensor model for robust localization of a small-size blimp in indoor environments using a particle filter", ICRA, Maio 2009, pp 3589-3594