

# Sistema de Monitoramento de Grades de Proteção de Tomada de Água da UHE Jupuí

Arthur. J. V. Porto, Julio Adamowski, Roberto H. Tsunaki, Helio M. Kichi, Hamilton Tiba

**Resumo** – Este trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento do protótipo de um sistema de monitoramento de grades de proteção de tomada de água de usinas hidroelétricas. O sistema visa monitorar a quantidade de plantas aquáticas que se alojam nas grades de proteção fornecendo dados para que o operador tome a decisão sobre o melhor momento em que deve-se realizar o processo de limpeza. O sistema de monitoramento tem por base a técnica de ultra-som e utiliza um dispositivo mecatrônico para realizar a varredura das grades de proteção. Os dados da varredura são transmitidos para um computador que realiza o processamento e gera uma imagem, tornando possível que se avalie o grau de entupimento das grades.

**Palavras-chave** — Grades de proteção, Monitoramento, Ultra-Som.

## I. INTRODUÇÃO

O acúmulo intenso de plantas aquáticas em grades de proteção da tomada de água de unidades geradoras de usinas hidroelétricas impacta de forma significativa a sua operação e manutenção. A partir de 1992, com a proliferação de uma nova planta aquática conhecida como egrégia densa, o problema do entupimento das grades, principalmente na época das chuvas, tornou-se um problema freqüente na UHE Eng. Souza Dias (Jupuí). O entupimento ocasiona desde a oscilação/diminuição de potência e desligamento da máquina, como também graves danos na grade ou o seu rompimento levando em ambos os casos à sua substituição, o que também ocasiona o desligamento da unidade por períodos de tempo consideráveis [1].

A usina de Jupuí possui 14 unidades geradoras e duas máquinas limpa grades, mas sua utilização também ocasiona diversos problemas, seja na sua operação ou por limitações de seu próprio projeto. A operação de limpeza exige que as unidades geradoras operem em baixa carga ou mesmo a carga zero por questões de segurança (engolimento da caçamba da máquina) e a velocidade das máquinas limpa grades é relativamente baixa [1].

A partir do contexto descrito, passou-se a elaborar estratégias para solucionar o problema. Uma solução proposta recaiu no projeto e desenvolvimento de máquinas robustas que efetuassem o processo de limpeza sem a necessidade de rebaixamento da carga das unidades geradoras. Por outro lado, num exame detalhado do processo como um todo ficou evidente a necessidade da utilização de um sistema com a capacidade de monitorar o grau de acúmulo de plantas aquáticas nas grades de proteção. Desta forma pode-se otimizar a utilização das máquinas de limpeza, iniciando a limpeza antes que haja alguma oscilação na potência da unidade geradora e somente nas grades onde exista uma determinada quantidade de material vegetal. Um segundo sistema de monitoramento também será estudado, mas com o objetivo de detectar à longa distância grandes agrupamentos de plantas aquáticas flutuantes (ilhas). Os dois sistemas de monitoramento em conjunto com a nova máquina formarão uma nova estratégia para o enfrentamento do problema de entupimento das grades de proteção das unidades geradoras.

Este trabalho apresenta detalhes e resultados do protótipo do sistema de monitoramento das grades de proteção desenvolvido. O projeto foi desenvolvido dentro do programa de P&D da ANEEL sob o título “Desenvolvimento de Sistema Automatizado de Inspeção por Ultrassom de Grades de Proteção de Dutos de Turbinas de Hidrogeradores” 0061-007/2006, com apoio financeiro da CESP e executado pela Universidade de São Paulo - USP e pela Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI.

## II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema desenvolvido é composto por cinco subsistemas: sistema mecânico de posicionamento vertical do transdutor de ultra-som, sistema eletromecânico de varredura por ultra-som, transdutor de ultra-som, sistema eletrônico de controle e de aquisição de dados, e programa de formação de imagem.

### A. Sistema de Posicionamento Vertical

O sistema de posicionamento vertical do transdutor de ultra-som é formado por um tubo de alumínio com 6 m de comprimento, desenvolvido baseado na topologia local utilizando recursos estruturais da usina já existentes. O tubo é então inserido em um dos orifícios do quebra ondas, que estão posicionados em frente ao conjunto de grades de proteção de tomada de água e então é fixado ao quebra ondas através de flange e parafusos. A figura 1 apresenta uma foto da instalação do tubo de posicionamento vertical na UHE Jupuí.

---

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 Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) foi apoiado pela Companhia Energética de São Paulo (CESP).

A. J. V. Porto, e R. H. Tsunaki trabalham na Escola de Engenharia de São Carlos - USP ([ajvporto@sc.usp.br](mailto:ajvporto@sc.usp.br); [rtsunaki@sc.usp.br](mailto:rtsunaki@sc.usp.br)).

J Adamowski trabalha na Escola Politécnica - USP ([jadamow@usp.br](mailto:jadamow@usp.br)).  
H. Kichi e H. Tiba trabalham na CESP ([helio.kichi@cesp.com.br](mailto:helio.kichi@cesp.com.br); [hamilton.tiba@cesp.com.br](mailto:hamilton.tiba@cesp.com.br)).

O Transdutor de ultra-som fica posicionado na extremidade deste tubo e um sistema de posicionamento vertical composto por um motor trifásico e por correia de transmissão permite movimentar verticalmente o tubo, podendo ser retirado e inserido totalmente na água. A figura 2 traz uma foto do dispositivo já fixo no quebra ondas e com o tubo em

para suportar a máxima velocidade alcançada pelo fluxo de água com as unidades de geração em plena carga. A figura 3 mostra as relações geométricas do posicionamento do transdutor de ultra-som em relação à topologia local da entrada de tomada de água da unidade geradora e sua grade de proteção.



sua posição mais baixa. O tubo de alumínio foi projetado



Figura 2. Detalhe da fixação e sistema na posição mais baixa.

Figura 1. Instalação do sistema de posicionamento vertical.

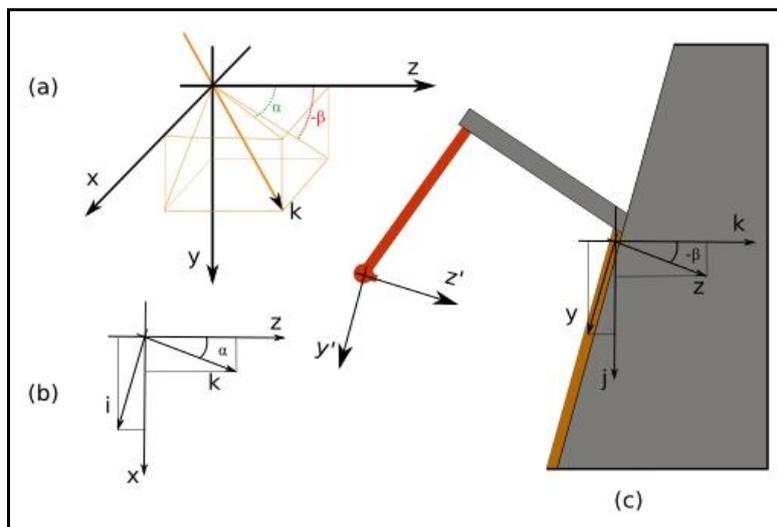


Figura 3. Geometria relativa entre o transdutor de ultra-som e a grade de tomada de água.

### B. Sistema Eletro-Mecânico de Varredura

Um sistema de mecanismos foi desenvolvido e inserido dentro do tubo de alumínio. Este sistema de mecanismos é composto por redutores mecânicos e motores de passo que permitem que o transdutor seja rotacionado em torno de dois eixos. A figura 4 apresenta uma foto da parte superior do sistema com as correias e motores de passo e na figura 5 pode-se observar o desenho de conjunto do projeto do sistema de mecanismos. A transmissão do movimento para a outra extremidade é feita por tubos concêntricos.

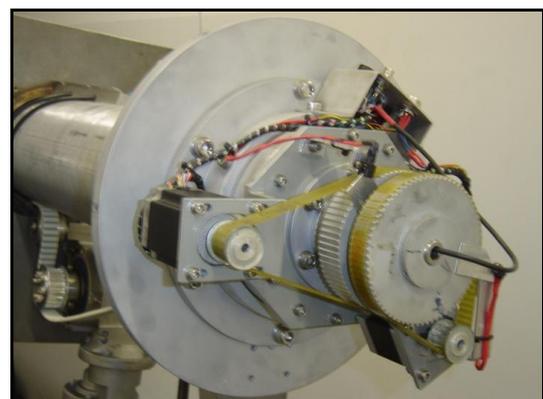


Figura 4. Foto da parte superior do sistema de rotação do transdutor.

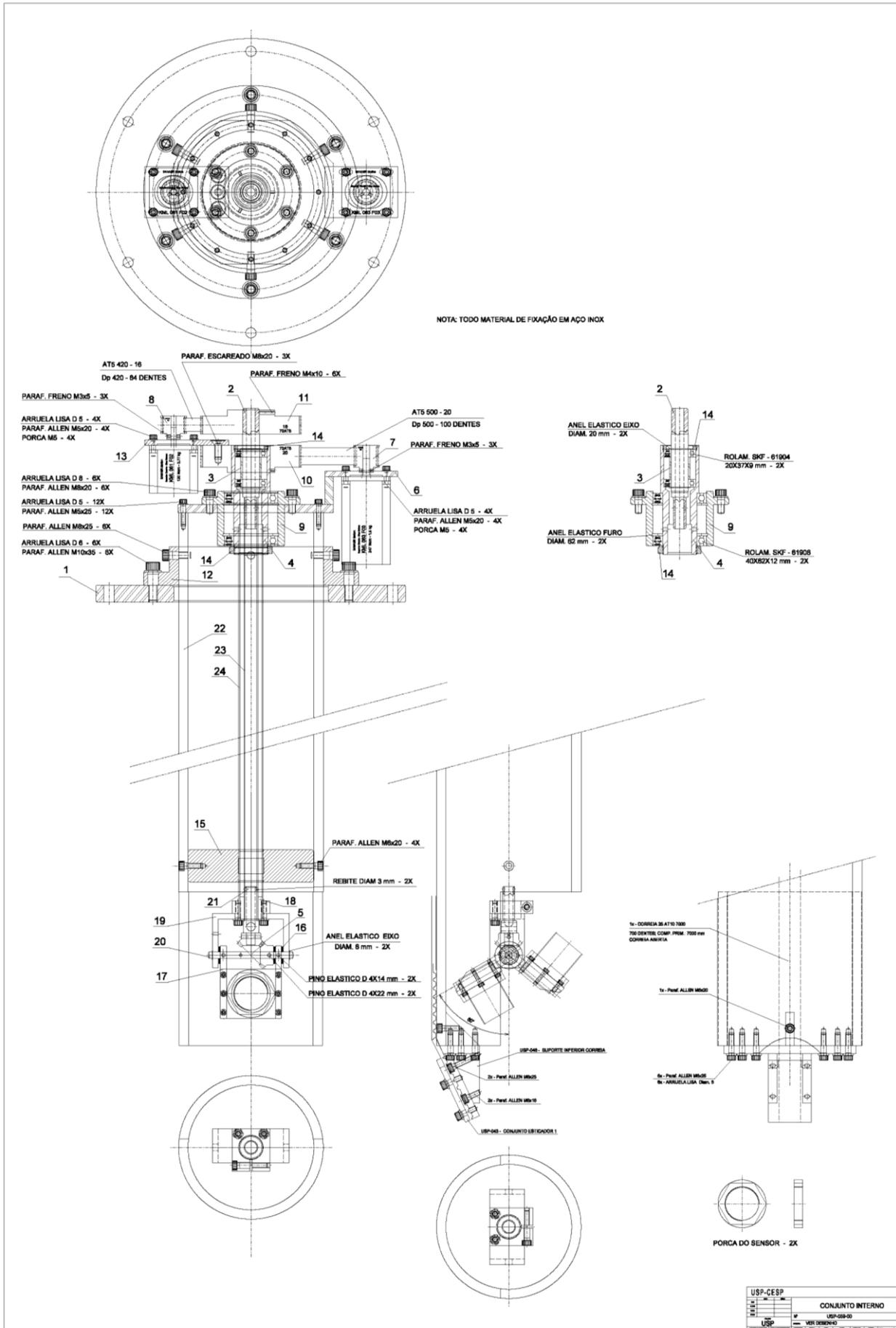


Figura 5. Desenho de conjunto do projeto do sistema de mecanismos.

### C. Transdutor de Ultra-som

O transdutor é formado por um elemento sensor fabricado em cerâmica piezoelétrica PZ37 com 25 mm de diâmetro e frequência de operação de 500 KHz. A figura 6 traz um esquema da montagem do transdutor de ultra-som. A cerâmica é inserida inicialmente em um tubo de latão com 1 mm de

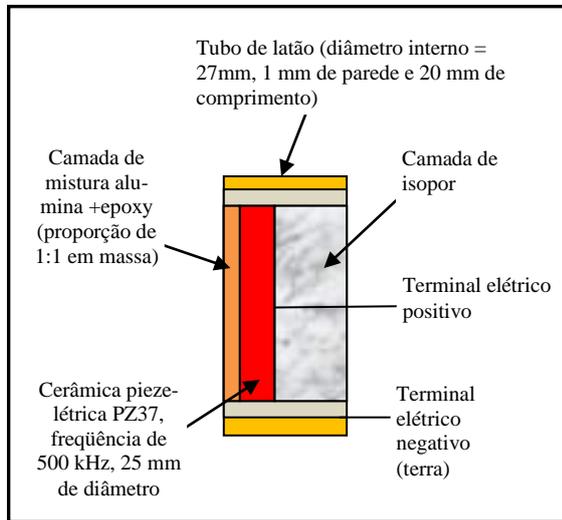


Figura 6. Esquema de montagem do transdutor de ultra-som.

espessura e isolado lateralmente e na sua parte inferior com isopor. Na parte que fica exposta para o ambiente é adicionado uma camada de mistura de alumina e epóxi na proporção 1:1. Todo o conjunto é finalmente inserido numa carcaça de plástico (PVC) cuja dimensão pode ser verificada na figura 7.

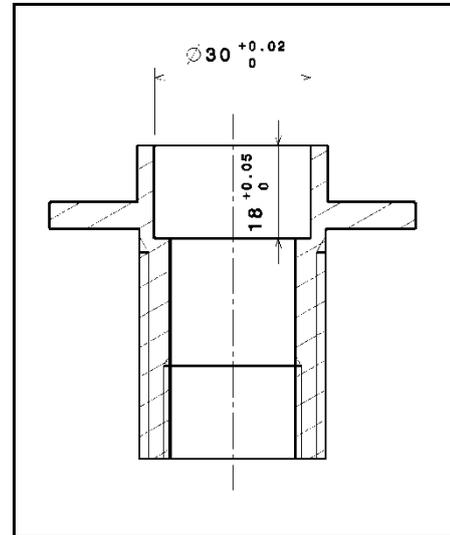


Figura 7. Carcaça de plástico externa do transdutor.

### D. Sistema Eletrônico de Controle e Aquisição de Dados

O sistema eletrônico de controle e aquisição de dados é formado por vários subsistemas, a saber: eletrônica de acionamento dos motores de passo que realizam os movimentos de rotação do transdutor; comando elétrico do motor de posicionamento vertical; eletrônica microprocessada do sistema de comando do ultra-som com circuito pulsador e amplificador; sistema de aquisição de dados. Todo o sistema é configurado e controlado por dois programas que rodam em um notebook, o programa de controle da varredura e do ultra-som e o programa de processamento de sinais. O computador se comunica com o sistema de aquisição de dados através de uma interface USB. A comunicação com a Eletrô-

nica de ultra-som é realizada através de interface serial RS232C. A figura 8 apresenta um diagrama esquemático do sistema com as interconexões de seus elementos.

O sistema de comando do ultra-som é baseado no microprocessador Rabbit 2000 da Zworld Inc. O firmware do processador foi programado em linguagem C e em Assembly. Uma placa de desenvolvimento foi desenvolvida para interligar o kit BL1800, que incluem o processador e alguns periféricos, formando um sistema microprocessado que permite decodificação maior de I/Os do microprocessador e interfacimento com o sistema de acionamento de motores de passo. A figura 9 contém o diagrama esquemático da placa de desenvolvimento com o microprocessador Rabbit 2000.

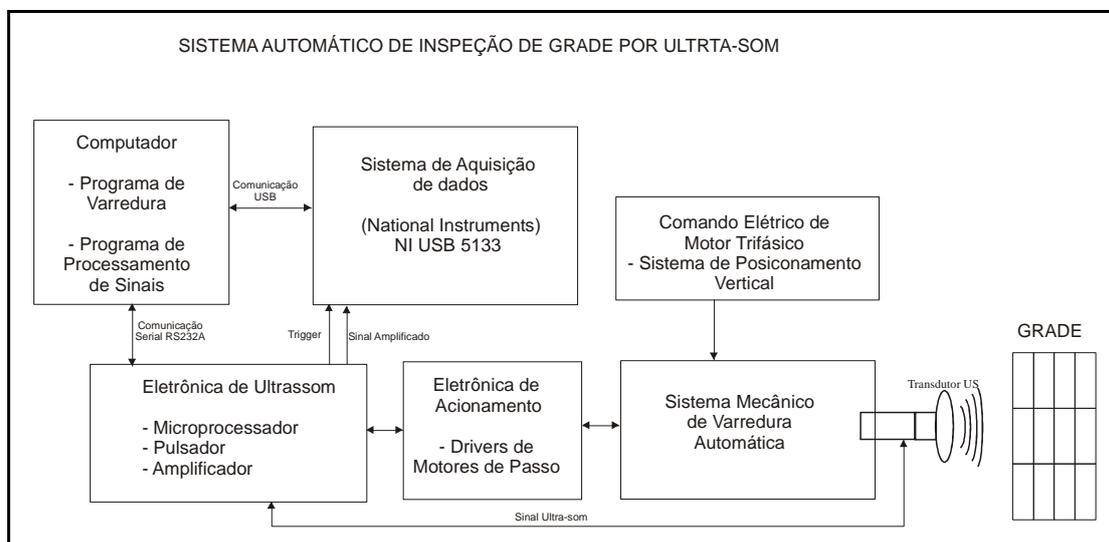


Figura 8. Diagrama esquemático do sistema eletrônico de controle e aquisição de dados.

O conjunto eletrônico conta ainda com um circuito pulsador de Potência, que excita o transdutor de ultra-som através de pulsos de alta tensão elétrica. Um circuito receptor e amplificador permite que o sinal de eco proveniente do transdutor de ultra-som seja amplificado em até 40 dBs. O Microprocessador mediante interação do firmware com o Notebo-

ok envia comandos de acionamento para os motores de passos do sistema de varredura, conforme ajustes estabelecidos no programa de varredura. A figura 10 apresenta o diagrama de blocos da eletrônica de ultra-som e da eletrônica de acionamento associado ao sistema microprocessado.

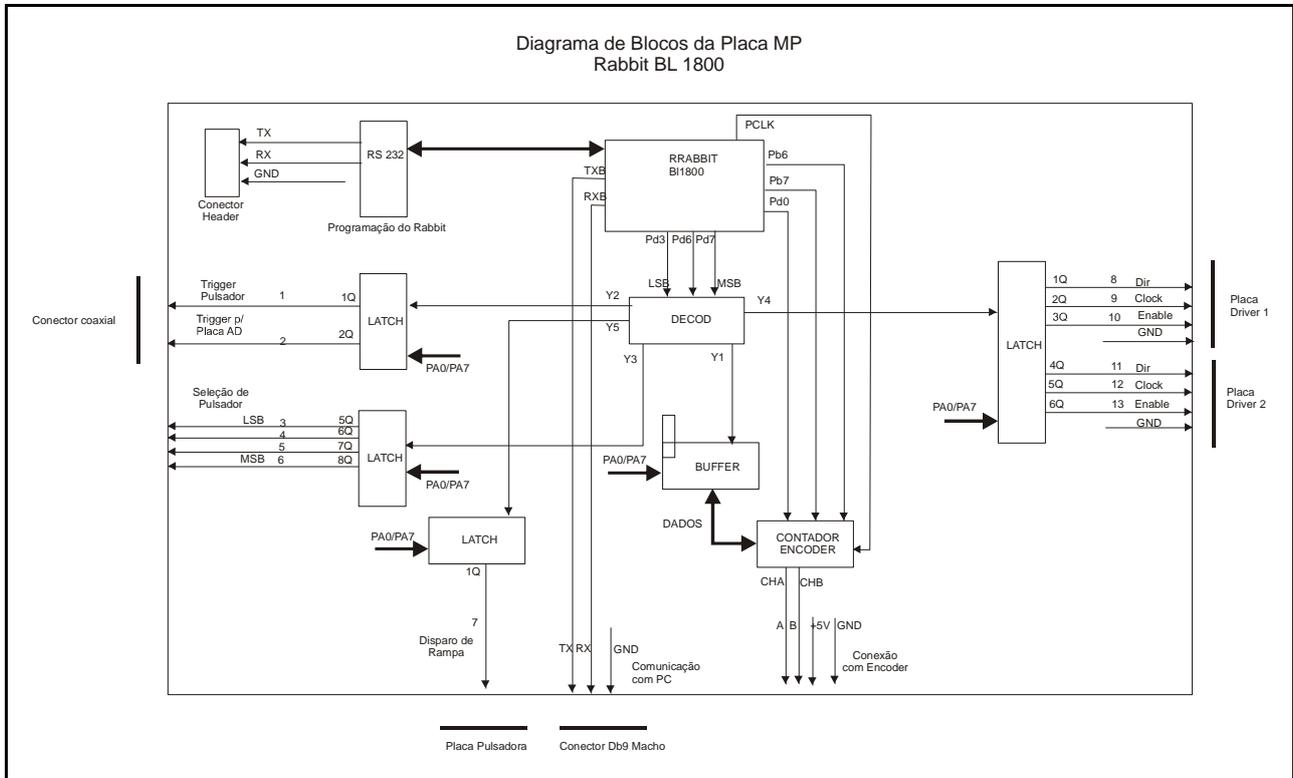


Figura 9. Diagrama esquemático da placa de desenvolvimento com o microprocessador Rabbit 2000.

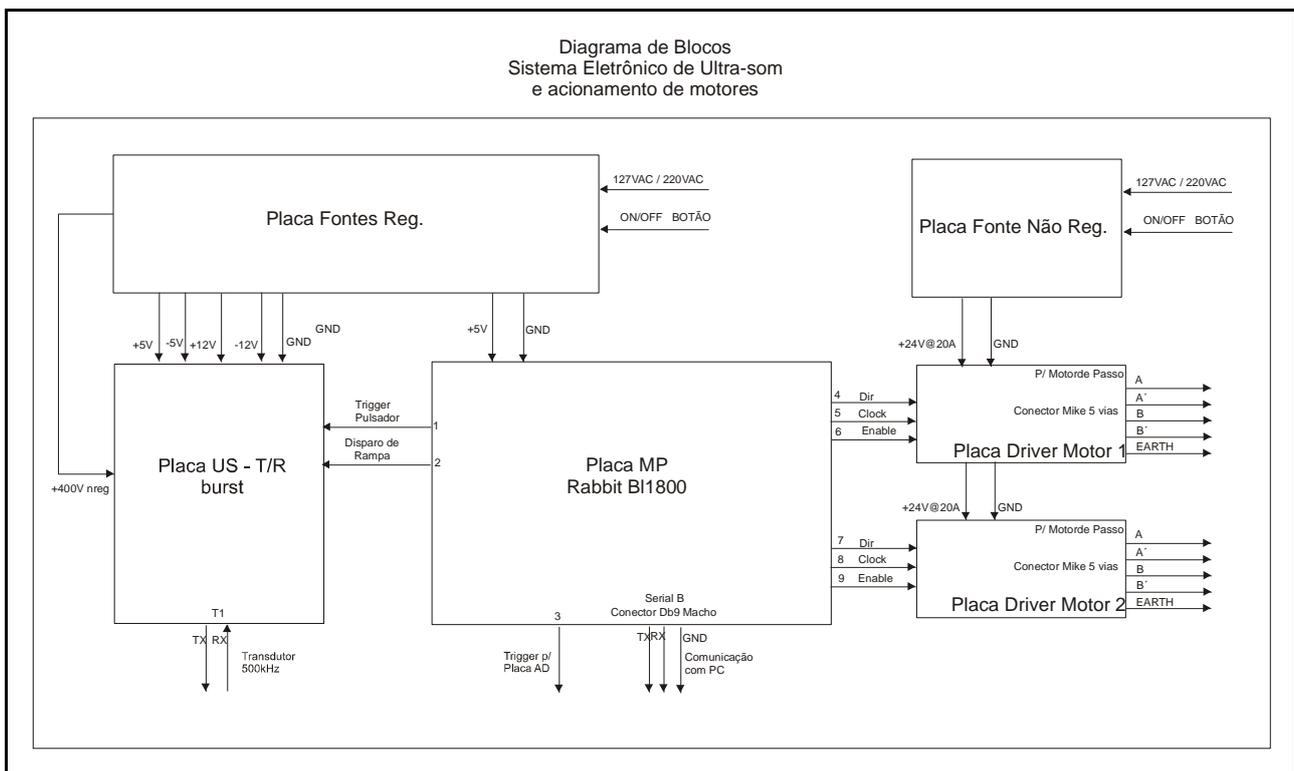


Figura 10. Diagrama de blocos da eletrônica de ultra-som e da eletrônica de acionamento associado ao sistema microprocessado.

Os circuitos elétricos e eletrônicos projetados foram produzidos resultando em diversas placas de circuitos impressos. As placas foram agrupadas e instaladas em duas caixas metálicas onde ficam protegidas do ambiente. Uma caixa contém toda a eletrônica de acionamento de potência e a

segunda caixa contém a eletrônica de comando. As conexões externas foram implementadas conforme os esquemas das figuras 9 e 10. As figuras 11 e 12 mostram, respectivamente, fotos destas caixas.

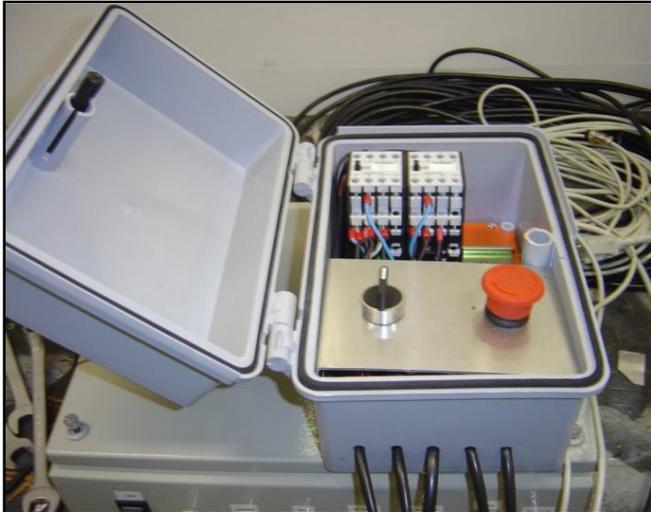


Figura 11. Caixa com eletrônica de acionamento de potência.



Figura 12. Caixa com eletrônica de comando.

### E. Programa de Formação de Imagem

O programa de formação de imagem realiza três funções, a primeira função reúne os dados adquiridos durante a varredura da grade, a segunda função corresponde ao processamento dos dados realizando diversas operações e, finalmente, na última função são formados diversos tipos de imagens dos dados processados.

Na primeira função do programa, que reúne os arquivos de dados da varredura da grade, um arquivo é formado com a digitalização do sinal de resposta (eco) a cada pulso de ultra-som gerado. Para evitar uma quantidade excessiva de dados, estes são adquiridos a partir de um offset em relação à grade. Conhecendo-se a posição relativa da grade em relação ao transdutor, pode-se ajustar o programa de controle do sistema para que a aquisição ocorra a partir de um offset temporal a partir do envio do pulso, o que corresponde no domínio espacial a adquirir dados somente na vizinhança da grade (2 m). Este requisito é essencial devido ao fato da

grade encontrar-se a uma distância entre 12 a 30 metros do transdutor, conforme a direção. A figura 13 apresenta um diagrama da distribuição temporal e espacial dos dados capturados.

Cada sinal, representado por quadrados sequenciais no diagrama da figura 13, corresponde a um arquivo formado com os dados obtidos com a sonda dirigida para uma dada direção. Girando a sonda em torno do eixo y realiza-se a varredura em direções contidas no plano apresentado no diagrama, o que corresponde a “varrer” uma linha na grade. Para obter-se uma nova linha na grade, deve-se agora girar a sonda em torno do eixo x e repetir o passo anterior. Este procedimento é repetido até que se complete a varredura da área da grade que se desejar. A figura 14 apresenta um desenho esquemático do resultado final.

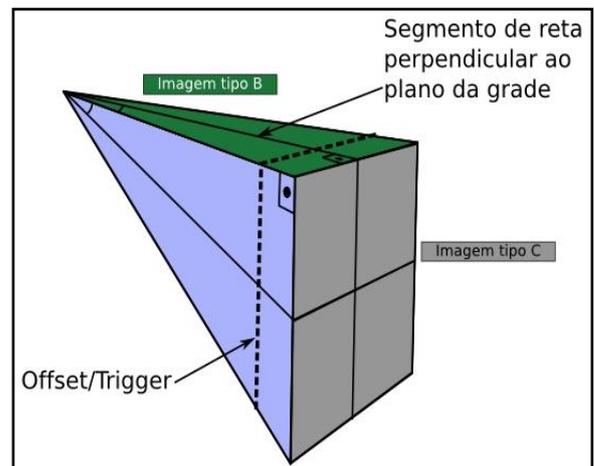
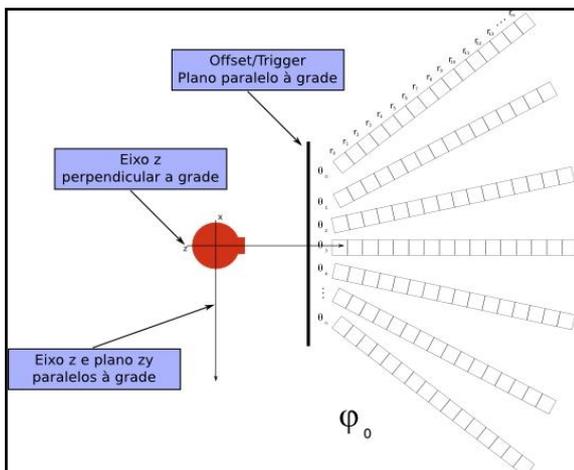


Figura 13. Esquema da varredura em um plano.

A segunda função do programa de formação de imagem é a de processamento de dados, onde são realizadas diversas operações com o objetivo, por exemplo, de melhorar a relação sinal/ruído e aumento do contraste. As figuras 15 e 16 apresentam exemplos de um tipo de operação que pode ser realizada. A figura 15 mostra um gráfico com os dados do

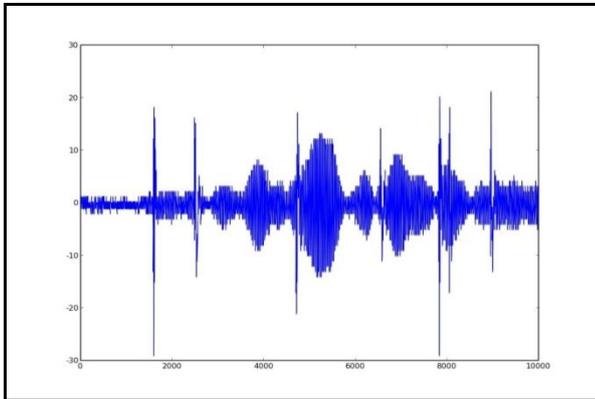


Figura 15. Sinal não processado.

Figura 14. Esquema final da varredura.

sinal de eco sem processamento algum e a figura 16 traz um gráfico com os dados processados através de transformada de Hilbert. A transformada de Hilbert atua nos dados como um filtro passa-baixa e possibilita a extração da envoltória do sinal.

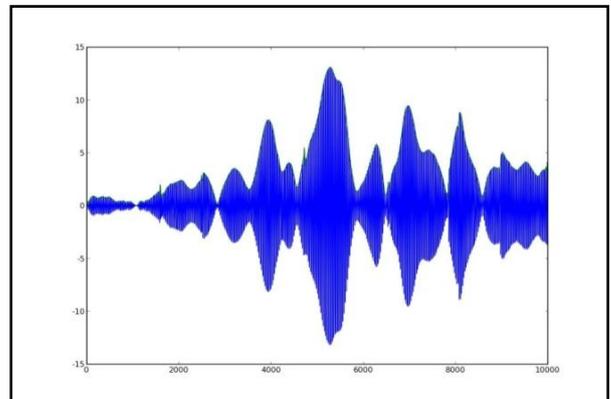


Figura 16. Sinal processado através da transformada de Hilbert.

A última função do programa é a de formação de imagem. A figura 17 apresenta uma janela do programa de formação de imagem. Na parte direita da janela ficam os botões de seleção de configuração de parâmetros e variáveis que afetam a formação da imagem. Na parte superior à esquerda fica a imagem do tipo B, que corresponde a uma imagem formada com os dados de um plano perpendicular à grade, vide plano em verde na figura 14. Na parte inferior esquerda

fica a imagem do tipo C, correspondendo a uma imagem de vista frontal à grade, que pode apresentar objetos colocados à frente da grade. Um gráfico com os dados do sinal de um único eco pode ser observado no meio do lado esquerdo, ele corresponde aos dados de uma única linha perpendicular à grade. Este gráfico auxilia na seleção dos valores dos parâmetros que especificam como a imagem é formada.

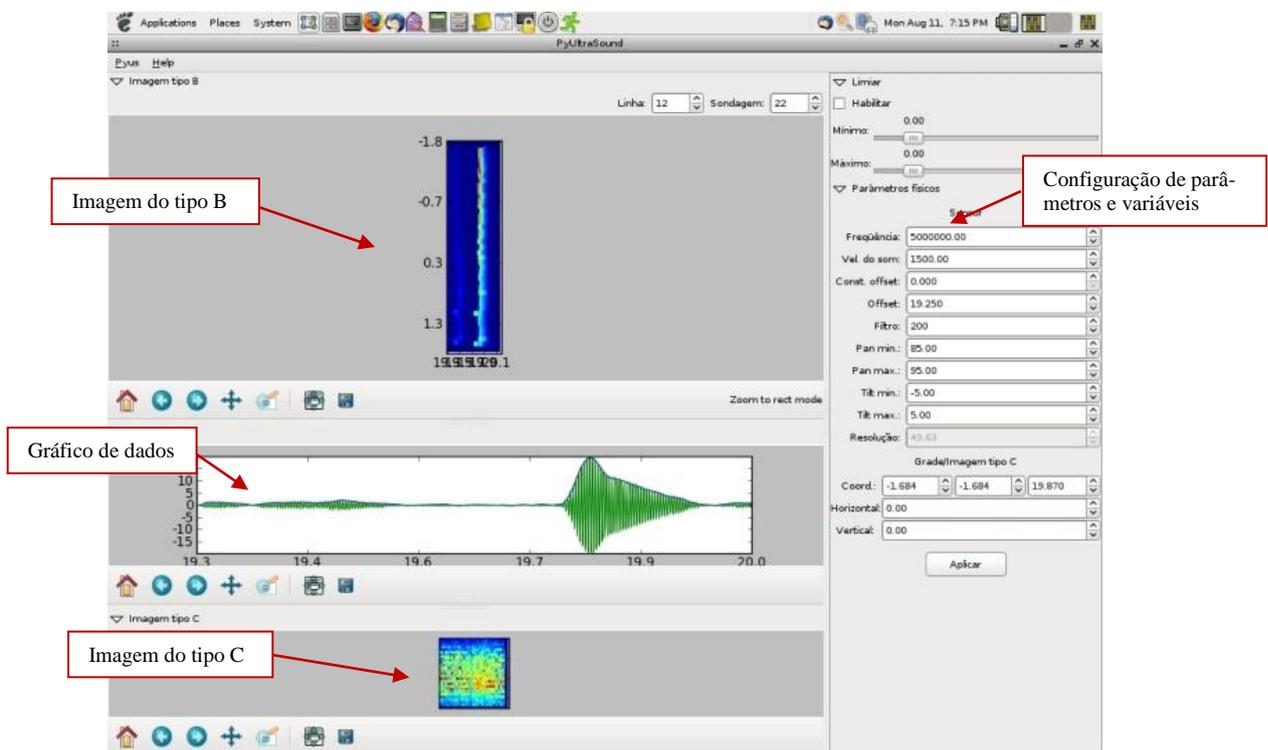


Figura 17. Janela do programa de formação de imagem.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram construídos dois sistemas de varredura, o primeiro com comprimento de seis metros (6m) para a realização dos ensaios na Represa de Jupia, e outro mais curto para ser utilizado em ensaios controlados em laboratório. A foto na figura 18 mostra a montagem do sistema menor num tanque

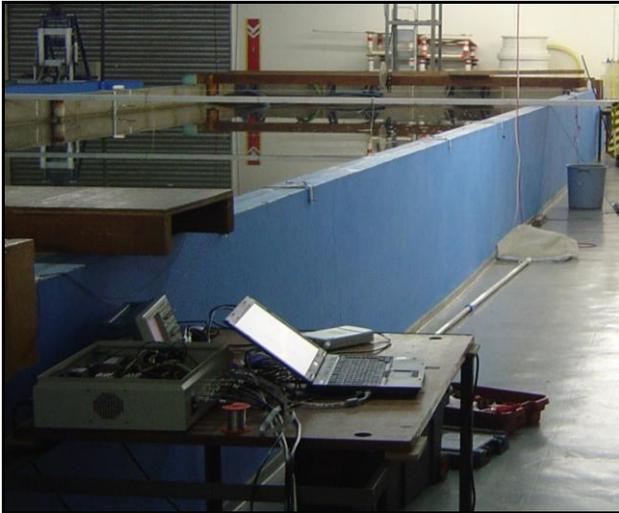


Figura 18. Foto do sistema montado em tanque na USP.

Alguns ensaios foram realizados na Represa de Jupia utilizando o sistema de varredura com comprimento de seis metros (6m). As fotos nas figuras 1, 2 e 20 mostram a montagem do sistema na Represa. Os ensaios foram realizados em sua maior parte à noite por restrições do operador nacional do sistema. A figura 21 apresenta resultados de um ensaio realizado, na parte inferior (em preto e branco) pode-se observar outra imagem formada através de pós-



Figura 20. Foto do sistema montado na represa de Jupia.

do departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da USP. Inúmeros ensaios foram realizados para ajuste de parâmetros de projeto para acelerar o ciclo de desenvolvimento. A figura 19 apresenta resultados de um ensaio realizado, na parte inferior (em preto e branco) pode-se observar outra imagem processada posteriormente ao ensaio.

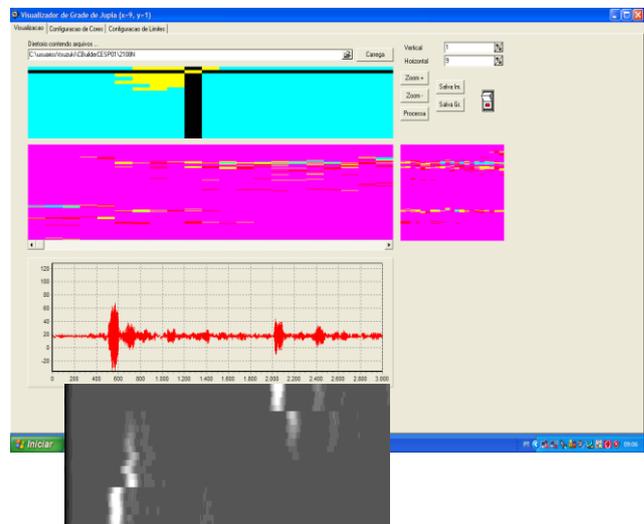


Figura 19. Resultados de ensaio realizado em laboratório.

processamento com novos algoritmos de cálculo. As linhas escuras representam a grade. Ensaios foram realizados para distâncias de 15 a 25 metros entre transdutor e grade e apresentam resultados semelhantes. Os resultados alcançados pelo protótipo do sistema de monitoramento por ultra-som mostraram bons resultados e sua viabilidade na detecção do grau de acúmulo de plantas aquáticas nas grades de proteção de unidades geradoras.

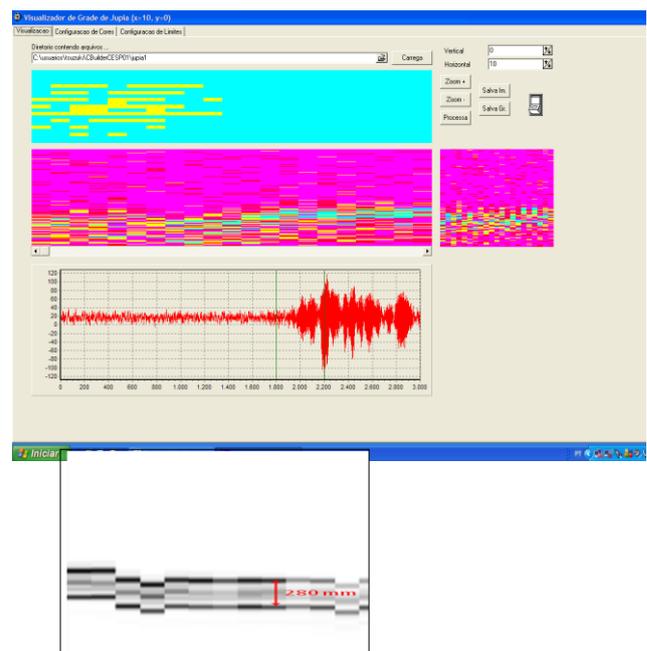


Figura 21. Resultados de ensaio realizado na represa.

#### IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

H. H. Tiba, “Soluções para limpeza das grades de tomada d’água das unidades geradoras UHE Jupia,” CESP, São Paulo, Relatório Técnico. RT/OME/009/06. Fev. 2006