

UM BARCO AUTÔNOMO PARA EXPERIMENTOS DIDÁTICOS

Roberto Kawakami H. Galvão – kawakami@ele.ita.cta.br

Elder M. Hemerly – hemerly@ele.ita.cta.br

Takashi Yoneyama – takashi@ele.ita.cta.br

Cairo L. Nascimento Jr. – cairo@ele.ita.cta.br

André R. Parolo – parolo@h8.ita.cta.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Eletrônica

CTA - ITA - Div. Eletrônica

12228-900 - São José dos Campos - SP

***Resumo.** Neste trabalho, é descrito o projeto de um barco autônomo para o estudo de subproblemas específicos nas áreas de integração de sistemas, modelagem, navegação e guiamento, em diferentes níveis de complexidade. O barco, dimensionado para suportar 30kg de carga útil, foi construído com tubos de PVC, material de boa resistência mecânica, baixo custo e fácil manutenção. O sistema de propulsão é constituído de duas hélices acionadas por motores de combustão interna utilizados em aeromodelismo. O sistema de controle emprega como sensor de posição angular uma bússola digital e atua através de leme e diferencial de empuxo dos motores. A comunicação com terra (recepção de comandos e envio de dados de telemetria) é efetuada através de um enlace de rádio-frequência. O computador de bordo é um micro IBM-PC compatível, responsável por gerenciar as tarefas de navegação, comunicação e controle. O projeto tem atraído alunos em diversas fases de formação e se coaduna com a crescente preocupação em motivar e envolver o estudante na solução de problemas práticos e multidisciplinares. Em particular, a importância do trabalho em equipe e dos cuidados a serem tomados em projetos de grande porte são tornados claros pela necessidade de se integrar vários sub-sistemas desenvolvidos por alunos diferentes.*

***Palavras-chave:** Barco autônomo, Controle, Navegação, Guiagem, Identificação de sistemas.*

1. INTRODUÇÃO

O projeto de um barco autônomo é resumido neste trabalho e experimentos iniciais em identificação e integração de sistemas são relatados. Por se tratar de um sistema que exhibe características multidisciplinares, possibilita o estudo de subproblemas específicos nas áreas de integração sensorial, identificação, navegação e guiamento, com diferentes níveis de complexidade. Conseqüentemente, viabiliza a participação de alunos em diversas fases de formação, o que se coaduna com a crescente preocupação em se motivar os alunos e envolvê-los na solução de problemas práticos.

Adicionalmente, há potenciais aplicações de relevo para um barco autônomo, dentre as quais podemos citar:

- ◆ Levantamento de pontos de assoreamento e bancos de areia em zonas portuárias e regiões de navegação fluvial/lacustre. Note-se que tais formações podem mudar de posição, exigindo a atualização freqüente de cartas de navegação.
- ◆ Localização de cardumes em áreas pesqueiras.
- ◆ Obtenção de amostras de água para análise da dinâmica de ecossistemas e monitoramento da qualidade de recursos hídricos.
- ◆ Transporte de correio, medicamentos e pequenas cargas até povoados de difícil acesso.
- ◆ Localização de naufrágios.
- ◆ Levantamento hidro-topográfico de rios para o projeto de pequenas centrais hidrelétricas.

Este trabalho está organizado conforme relatado a seguir. Na seção 2 são apresentados detalhes sobre o projeto do barco. Na seção 3 apresenta-se um experimento inicial sobre a identificação da dinâmica de velocidade do motor a explosão utilizado na motorização do barco. Na seção 4 são descritos ensaios realizados em um lago nas proximidades da Divisão de Engenharia Eletrônica do ITA, objetivando a integração do sistema e empregando-se uma bússola digital de baixo custo como sensor de orientação. Algumas atividades em andamento são resumidas na seção 5.

2. PROJETO DO BARCO

2.1 Estrutura

O barco foi construído com tubos de PVC, material com boa resistência mecânica, baixo custo e fácil manutenção. A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam, respectivamente, as dimensões e a massa dos principais componentes do sistema.

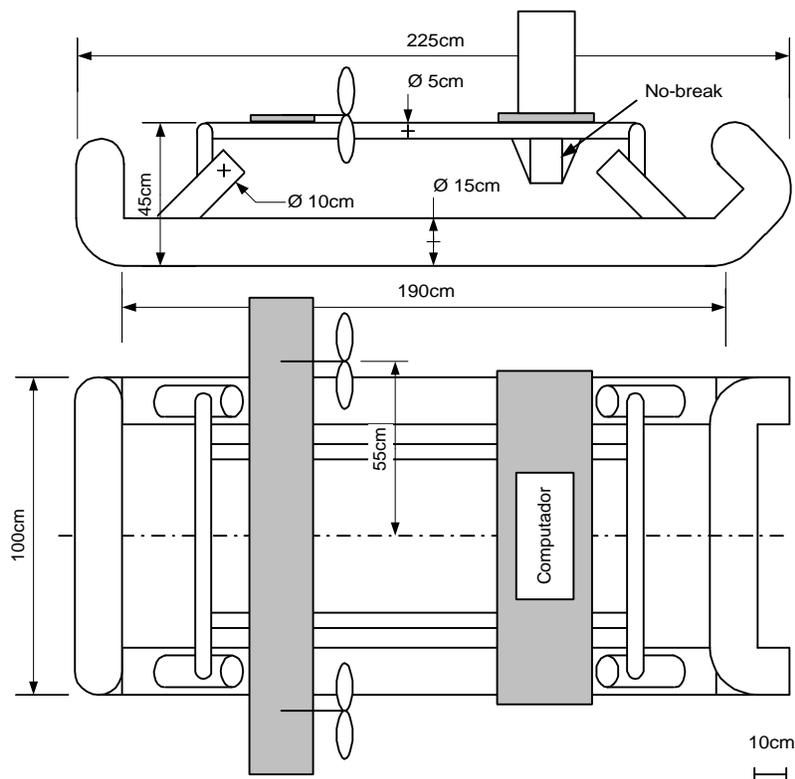


Figura 1. Dimensões físicas do barco (em cinza, bases usadas para fixação de equipamentos).

Tabela 1. Massa dos componentes do barco

Componente	Massa (kg)
Estrutura de PVC	19
Sistema de propulsão (incluindo base)	4
Eletrônica embarcada (incluindo base)	20
Total	43

Os flutuadores podem prover um deslocamento de até 68kg, o que proporciona uma margem de segurança de 37% na configuração atual. Experimentalmente, verificou-se que tal margem confere adequado amortecimento aos modos de rolamento e arfagem do barco.

2.2 Propulsão

O sistema de propulsão é constituído por duas unidades do O.S. MAX 46FX, que é um motor a explosão de dois tempos tipicamente utilizado para aplicações em aeromodelismo (Figura 2). Suas especificações são resumidas na Tabela 2.

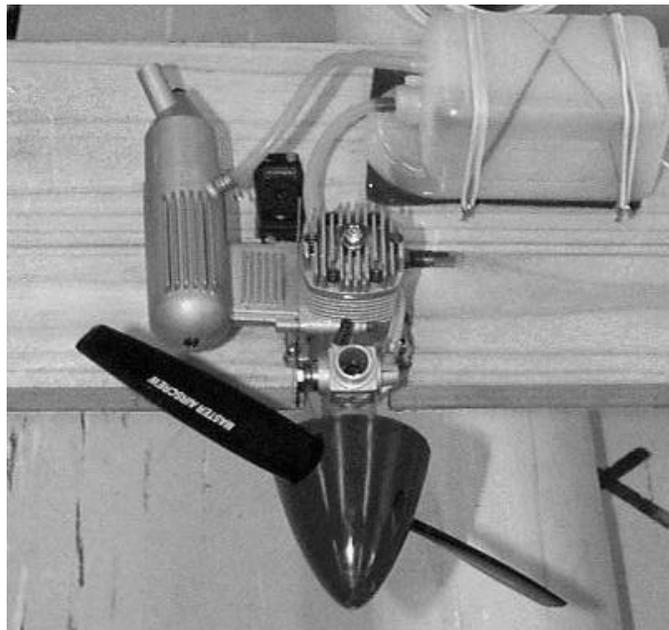


Figura 2. Motor Utilizado.

Tabela 2. Especificações do motor O.S. MAX 46FX.

Cilindrada	7,45cm ³
Diâmetro do Pistão	22,0mm
Curso do Pistão	19,6mm
Velocidade	2000-17000 rpm (209-1780 rad/s)
Potência	1,62HP @ 16000rpm
Peso	375g
Combustível	Metanol (74%) Nitrometano (10%) Lubrificante (16%)

A cada um dos motores foi conectado um servoposicionador FUTABA S3003 (usualmente utilizado em aerodelismo), que controla a abertura da válvula de entrada de ar. Quanto maior a abertura, maior a potência desenvolvida e, conseqüentemente, maior o empuxo fornecido pela hélice. Os servoposicionadores recebem comandos do computador de bordo, que são modulados em PWM por um circuito específico.

Considerando-se que os motores apresentam uma certa velocidade mínima e que não se pode variar o sentido do empuxo, faz-se necessária a utilização de controle tipo diferencial, similar ao utilizado em robôs móveis.

2.3 Integração de Sistemas

Por questões de custo e simplicidade de operação, foi adotado como computador de bordo um micro IBM-PC 486DX4-100, que gerencia as atividades de comunicação, coleta de dados e controle. Sua alimentação é provida por um *no-break*, que confere ao sistema uma autonomia de 30 minutos.

Uma bússola digital tipo *Vector 2X*, da Precision Navigation, Inc., é utilizada para a determinação da orientação do barco (θ). Um sensor inercial tipo MOTIONPAK, da Systron Donner (que fornece velocidade angular ω e acelerações lineares a_x, a_y) e um modem de RF (para recebimento de comandos e transmissão de dados de telemetria), também estão sendo embarcados e encontram-se em fase final de integração com os demais sistemas.

O esquema de interfaceamento dos diferentes sub-sistemas com o computador de bordo encontra-se nas Figuras 3 e 4.

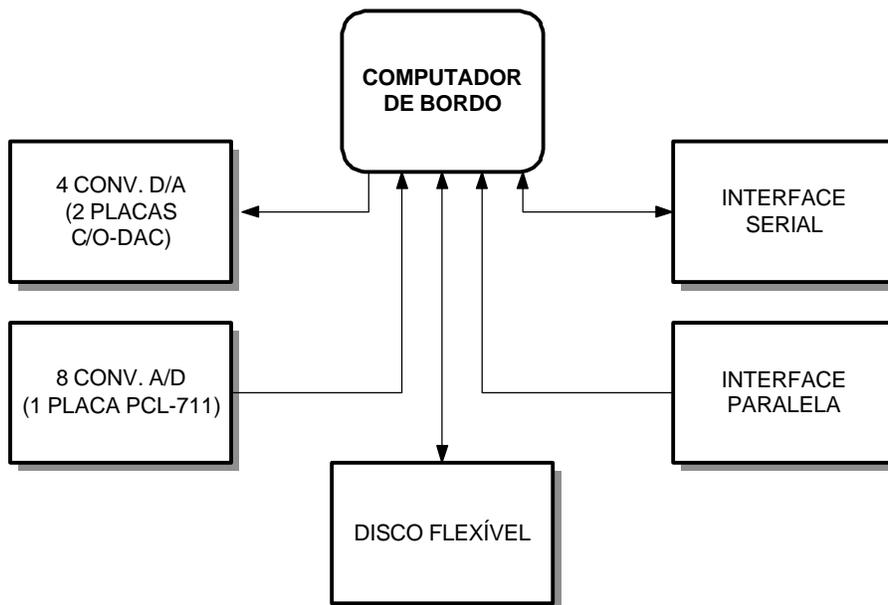


Figura 3. Dispositivos de I/O utilizados pelo computador de bordo.

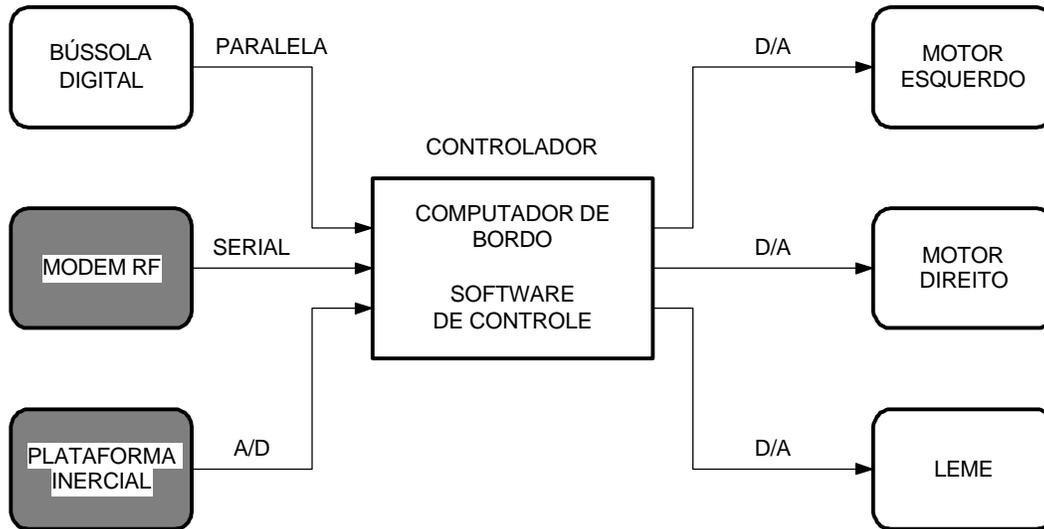


Figura 4. Sensores e Atuadores do Sistema
(os blocos hachurados se encontram em fase de implementação).

A Figura 5 apresenta uma foto do barco sendo preparado para um experimento. Note-se na figura o sistema de leme, constituído por dois freios hidrodinâmicos que podem ser abaixados nas laterais do barco de modo a facilitar a realização de curvas. O leme é acionado por um motor DC controlado por um circuito que recebe comandos do computador de bordo.



Figura 5. Preparação para um experimento.

A integração de sensores, atuadores e *software* de controle resulta em uma malha de controle multivariável esquematizada na Figura 6. Os comandos podem ser pré-programados, de modo a fazer com que o barco siga uma trajetória especificada, ou então transmitidos por um operador em terra através do enlace de RF.

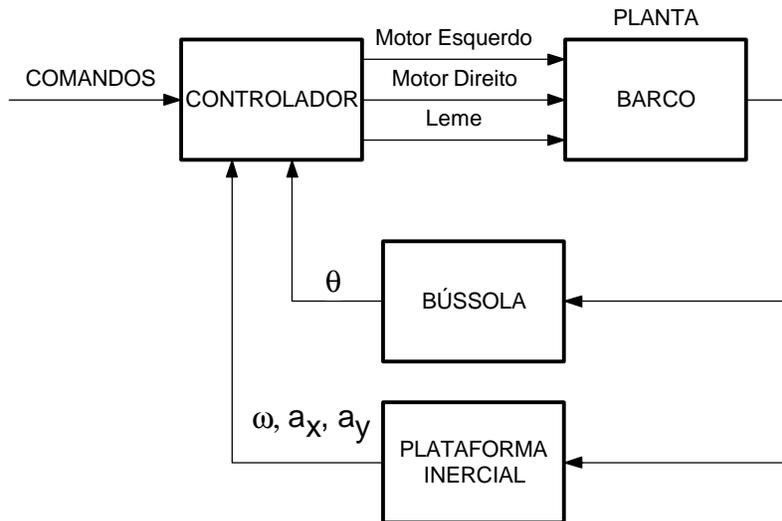


Figura 6. Malha de Controle do Barco.

3. UM EXPERIMENTO EM IDENTIFICAÇÃO

Como exemplo de experimento com o sistema acima apresentado, é descrito nesta seção um método para identificação da dinâmica de velocidade do motor a explosão. Este estudo é relevante, devido à complexidade de se modelar tal dinâmica via equações de balanço. Para maiores detalhes sobre a relevância da identificação em aplicações submarinas com veículos rápidos, vide Healey *et al.* (1995).

Devido à elevada velocidade de rotação do motor e ao fato da ponta da hélice possuir pequena largura, a utilização de sensor de velocidade baseado em fotodiodos, na configuração mais intuitiva (interrupção do feixe pela hélice), não se mostrou adequada. Assim, para a medida de velocidade do motor utilizou-se uma configuração reflexiva, com o par emissor-receptor apontado para o cone na extremidade do eixo, cuja metade foi pintada de branco e o restante de preto. Vide a Figura 7 para detalhes.

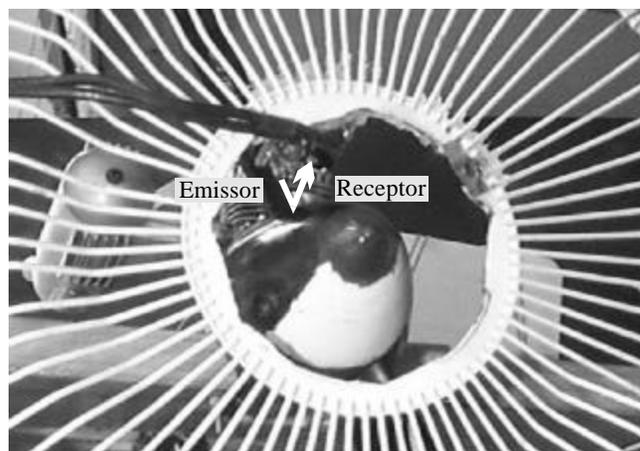


Figura 7. Detalhe sobre montagem do sensor de velocidade.

Uma vez obtida uma realização da velocidade, diversas estruturas de modelos foram ajustadas aos dados, via método dos mínimos quadrados recursivo, Hemerly (1996). Para uma realização típica, a melhor estrutura, avaliada como um compromisso entre habilidade preditiva e parcimônia, foi aquela relativa ao modelo de Hammerstein

$$y(t+I) = a_1 y(t) + a_2 y(t-I) + b_1 u^2(t) + b_2 u^2(t-I) + b_3 u(t) + b_4 u(t-I) + g + w(t+I) \quad (1)$$

cujo vetor de parâmetros associado é

$$Q = [a_1 \ a_2 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ g]^T \quad (2)$$

Para o modelo (1), a Figura 8 mostra a velocidade medida e predita, com base na qual se conclui que o desempenho preditivo é satisfatório.

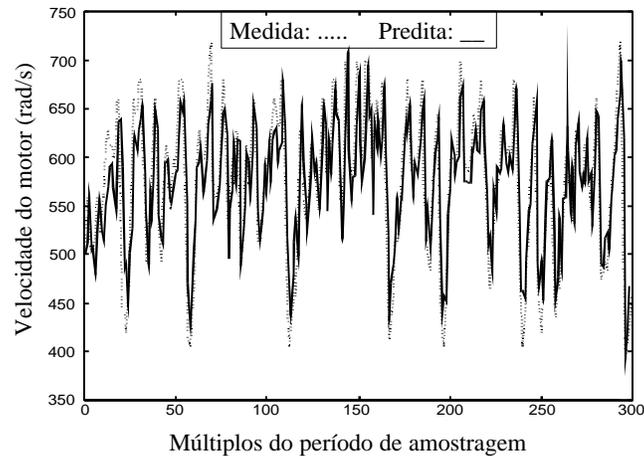


Figura 8. Velocidades medida e predita, via método dos mínimos quadrados recursivo e modelo (1).

Convém notar que a velocidade medida na Figura 8 assume valores relativamente pequenos, quando comparada com o intervalo de velocidades mostrado na Tabela 1. Isto se deve ao fato de que o motor possui uma válvula de admissão de combustível, cuja regulagem afeta a velocidade máxima.

A evolução das estimativas dos dois primeiros componentes do vetor de parâmetros (2) é mostrada na Figura 9.

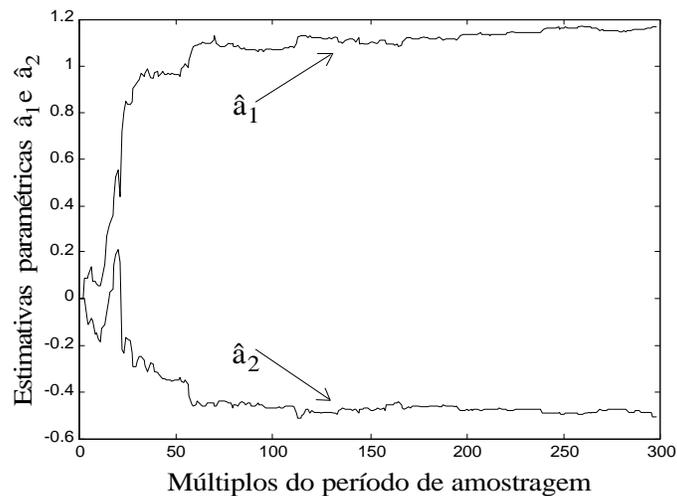


Figura 9. Evolução das estimativas dos dois primeiros componentes do vetor de parâmetros (2).

4. EXPERIMENTOS EM CONTROLE DE ORIENTAÇÃO

Nesta seção, são apresentados resultados de ensaios preliminares realizados no lago próximo à Divisão de Engenharia Eletrônica do ITA (Figura 10). Nesses experimentos, procurou-se observar a eficácia dos atuadores (motores com empuxo diferencial e leme) e do sistema de medida de orientação.



Figura 10. Instantâneo de uma trajetória para teste de integração de sensores, atuadores e *software* de navegação e guiagem.

4.1 Controle via diferencial de empuxo

Na Figura 11 é mostrada a orientação do barco, medida via bússola digital (período de amostragem de 0,2s), durante a execução de uma volta completa. Em particular, nota-se a descontinuidade em torno do ângulo de 180 graus, que deve ser adequadamente tratada pelo *software* de controle. Ressalta-se, também, um trecho no qual é aplicado máximo controle diferencial, que permite estimar a velocidade angular máxima como sendo de 15 graus/s.

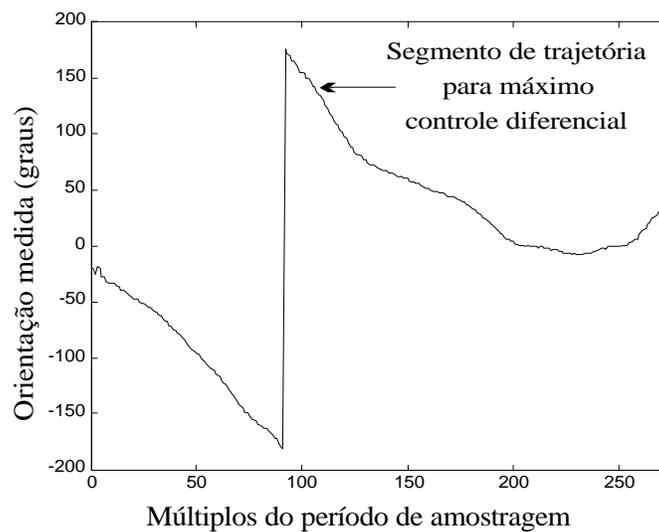


Figura 11. Orientação obtida via bússola digital para o ensaio com diferencial de empuxo, ressaltando-se a descontinuidade na medida e a máxima velocidade de curvatura.

4.2 Controle via leme

A Figura 12 apresenta a orientação do barco durante um ensaio para verificação da eficácia do leme (o período de amostragem foi ajustado para 0,3s). Neste experimento, não foi exercido controle sobre os motores, que foram colocados em meia potência. Inicialmente, quando o leme estava levantado, o barco apresentou uma tendência de curva para a esquerda (ângulo negativo), devido a uma diferença na regulagem dos motores. Contudo, iniciada a fase de aquisição de dados, o leme foi baixado e forçou uma curva no sentido contrário, como se vê no gráfico. Nessa curva o barco atingiu uma velocidade máxima de 10 graus/s.

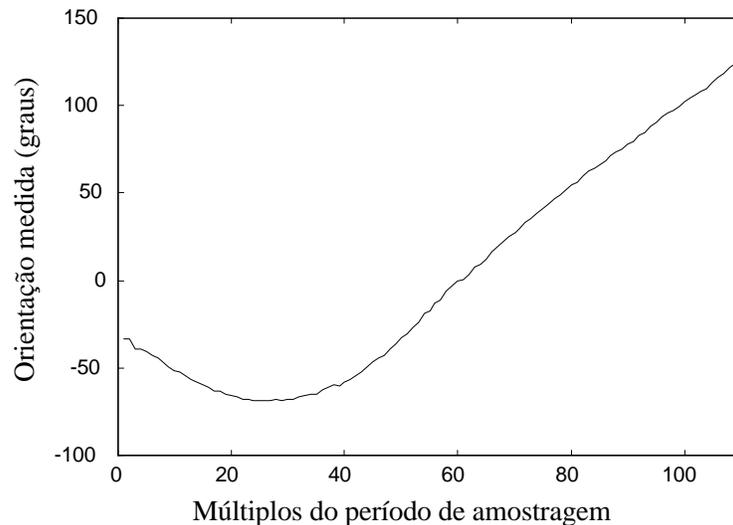


Figura 12. Orientação obtida via bússola digital para o ensaio com leme.

Os resultados deste ensaio sugerem que o sistema pode ser usado para o estudo de problemas de acomodação de falhas de atuador (Patton *et al.*, 1989). Nesse caso, o leme poderia ser usado para compensar a perda de potência em um dos propulsores, à semelhança do procedimento utilizado em aviões bimotores.

5. ATIVIDADES EM ANDAMENTO

As seguintes atividades encontram-se em andamento, objetivando a efetiva integração de sensores e atuadores, além do desenvolvimento de algoritmos para navegação e guiagem.

- Integração de um modem de RF e de um sensor inercial ao sistema.
- Estudos para utilização de sensor GPS tipo diferencial para a correção da estimativa de posição obtida por integração das acelerações lineares fornecidas pelo sensor inercial (Abbott and Powell, 1999).
- Obtenção de um modelo matemático a partir dos parâmetros físicos do sistema. Atividade envolvendo:
 - cálculo aproximado do momento de inércia, a partir da geometria do barco;
 - realização de ensaios para determinar a relação velocidade-empuxo das hélices;
 - determinação do coeficiente de arrasto hidrodinâmico para guinada.
- Desenvolvimento de estratégias de controle baseadas em inteligência artificial (Nascimento Jr. e Yoneyama, 2000; Vaneck, 1997).

6. CONCLUSÕES

Foi descrito o projeto de um barco voltado para a realização de experimentos didáticos, sendo dados detalhes sobre a integração dos sub-sistemas embarcados. Experimentos preliminares em identificação e controle foram relatados, de modo a ilustrar os potenciais usos do sistema.

A característica multidisciplinar do projeto permite o estabelecimento de atividades envolvendo alunos em diferentes momentos de sua formação. Este trabalho tem sido realizado com a colaboração de quatro alunos de iniciação científica (entre eles um dos co-autores do presente artigo), que no momento cursam o 3^o e 4^o anos do curso de Engenharia Eletrônica. Além disso os ensaios têm despertado grande interesse no corpo discente, tanto de graduação quanto de pós-graduação, e sua realização tem se revelado uma valiosa oportunidade para a exposição de conceitos e metodologias na área de controle e integração de sistemas.

Além das atividades mencionadas na seção 5, pretende-se futuramente investigar o problema de atracação automática, usando visão computacional e telêmetros a ultrassom, e incorporar um sonar de profundidade para validar o uso do barco como plataforma de sensores aplicável em situações de interesse prático, conforme mencionado na seção 1. Também tenciona-se dotar o sistema de um mecanismo para coleta de amostras de água, de maneira a estudar o seu potencial uso no monitoramento da qualidade de recursos hídricos.

Agradecimentos

Ao Prof. Fernando Walter, pelo apoio no desenvolvimento do sistema de navegação por GPS; ao Prof. Fernando Toshinori Sakane, pelo incentivo dado ao projeto e suporte logístico da Divisão de Engenharia Eletrônica; ao Prof. Eduardo Hisasi Yagy, por toda a ajuda prestada ao longo da montagem e testes do barco; ao Eng. Fernando Ariño Grau (EMBRAER), co-responsável pela concepção original do trabalho; aos alunos Bruno Stemposki, Gustavo Erivan Bezerra Lima e Ricardo Paixão dos Santos, pelo empenho e dedicação ao projeto.

REFERÊNCIAS

- Abbott, E. and Powell, D. (1999). Land-vehicle navigation using GPS, *Proc. IEEE*, 87(1): 145-162.
- Healey, A. J.; Rock, S. M.; Cody, S.; Miles, D. and Brown, J. P. (1995). Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles, *IEEE J. of Oceanic Eng.*, 20(4): 354-361.
- Hemerly, E. M. (1996). *Controle por computador de sistemas dinâmicos*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo.
- Nascimento Jr., C. L. e Yoneyama, T. (2000). *Inteligência artificial em automação e controle*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo.
- Patton, R.; Frank, P. and Clark, R. (ed.) (1989). *Fault diagnosis in dynamic systems - Theory and applications*. Prentice-Hall, Cambridge, UK.
- Vaneck, T. W. (1997). Fuzzy guidance controller for an autonomous boat, *IEEE Control Systems Magazine*, 17(2): 43-51.