

# SISTEMA DE POSICIONAMENTO DINÂMICO BASEADO EM VISÃO COMPUTACIONAL E *LASER*

**Dr. Paulo Henrique Buscariollo**

Faculdade de Tecnologia de Jahu – FATEC

E-mail: [phb.jau@ig.com.br](mailto:phb.jau@ig.com.br)

**Dr. Helio Mitio Morishita**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

E-mail: [hmmorish@usp.br](mailto:hmmorish@usp.br)

**Dr. Antonio Eduardo Assis Amorim**

Faculdade de Tecnologia de Jahu – FATEC

E-mail: [diretoria@fatecjahu.edu.br](mailto:diretoria@fatecjahu.edu.br)

**Ms. Luiz Alberto Sorani**

Faculdade de Tecnologia de Jahu – FATEC

E-mail: [sorani.fatec@yahoo.com.br](mailto:sorani.fatec@yahoo.com.br)

## RESUMO

Este trabalho concentra-se no desenvolvimento de um sistema de visão computacional auxiliado por ponteiros de raio *laser*, que geram marcos visuais artificiais em ambientes não estruturados, possibilitando medir distâncias e ângulos baseado no método da triangulação. Foram testados *lasers* com diferentes comprimentos de onda, em ambiente aéreo e subaquático, com diferentes índices de turbidez, níveis de luminosidade e distâncias. Baseado nos resultados e utilizando o sistema de visão e *laser* como método de sensoriamento, foi projetado e implantado um sistema de posicionamento dinâmico para o plano horizontal, utilizando Filtro de Kalman. A avaliação do sistema de posicionamento dinâmico e do método de sensoriamento foi realizada por meio de simulação numérica e averiguação experimental, utilizando-se um modelo reduzido de embarcação. Os resultados experimentais indicaram a viabilidade da aplicação do método, mostrando-se um método simples, confiável, ativo e independente.

## ABSTRACT

This study concentrates on the development of a computer vision system supported by *laser* pointing devices that generate artificial landmarks in non-structured environments, facilitating distance and angle measurement based on the triangulation method. *Lasers* of different wavelengths were tested in air and underwater environments, where the latter had different indices of turbidity, levels of luminosity, and distances. Based on the results and utilizing the system of vision and *laser* as a sensor method, a dynamic positioning system for the

horizontal plane has been created through the use of Extended Kalman Filter. The evaluation of this dynamic positioning system and of the sensor method was accomplished through numeric simulation and experimental checks using a reduced model of a surface vehicle. The experimental results show that the application of the sensor method is viable and proved to be an independent, active, reliable, and simple method.

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de um sistema de posicionamento dinâmico (SPD) em um veículo tem como objetivo fazer com que o mesmo possa perseguir uma determinada trajetória ou se manter em torno de uma posição em relação a um alvo. Assim, um SPD deve possuir um sistema de sensoriamento, um sistema de controle e um sistema de propulsores (TANNURI; MORISHITA, 2006).

No Brasil, o desenvolvimento desse tipo de tecnologia é importante para aplicação, tanto em embarcações de apoio a plataformas marítimas de extração de petróleo, nas operações de alívio do óleo dos FPSOs (*Floating, Production, Storage and Offloading*), como também em ROVs para missões de inspeção e pequenos reparos nas estruturas submersas das plataformas (HSU *et al.*, 2000).

Devido a carência no desenvolvimento de veículos submersíveis, para aplicação em meios subaquáticos fluviais, desde 1995 um grupo de pesquisadores da Faculdade de Tecnologia de Jahu (FATEC-JAHU), vem trabalhando no desenvolvimento de veículos submersíveis não tripulados de operação remota para aplicações em ambientes fluviais. Atualmente, encontra-se em fase de testes a segunda versão do projeto, denominado (VSNT-Jaú II), cuja missão principal é a captura de imagens em ambientes subaquáticas (SORANI, 2003).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a potencialidade da utilização da visão computacional e *laser* como sensor de distância, considerando-se o comprimento de onda do *laser*, nível de luminosidade, turbidez da água e distância. Baseado nos resultados foi desenvolvido um sistema de controle para o posicionamento dinâmico no plano horizontal. A averiguação experimental do sistema de posicionamento dinâmico com visão computacional e raio *laser* foi efetuada utilizando-se um modelo reduzido de embarcação no laboratório do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## 2 VISÃO COMPUTACIONAL APLICADA EM VEÍCULOS SUBMERSÍVEIS NÃO TRIPULADOS

A visão computacional utilizada como método de sensoriamento, tem grande potencial de aplicação em submersíveis não tripulados. Porém, sua principal restrição está relacionada com o campo de visão, que tem uma distância limitada devido às características da propagação da luz na água (HORGAN; TOAL, 2006).

Para um sistema de visão computacional composto de apenas uma câmera, ser capaz de medir os deslocamentos em relação a um objeto ou alvo, o robô deve estar inserido em um ambiente estruturado, ou seja, as dimensões e características dos objetos devem ser conhecidas, pelo contrário não é possível medir os deslocamentos do robô.

Os movimentos de aproximação e recuo são calculados através da distância entre os *pixels* das bordas de um objeto ou marco visual. É importante salientar que o veículo deve estar posicionado perpendicularmente ao objeto.

Uma vez obtidas as coordenadas dos *pixels* que compõem as bordas do objeto, é possível determinar a distância através da relação:

$$D_a = D_i \left( \frac{Lp_i}{Lp} \right) \quad (1)$$

onde:

$D_a$  é a distância calculada;

$D_i$  é a distância inicial informada;

$Lp_i$  é a largura inicial em *pixels* do objeto;

$Lp$  é a largura do objeto em *pixels* calculada durante o processamento.

Convém destacar que a única informação necessária para o processamento da distância através da eq. (1) é a distância inicial.

O deslocamento lateral pode ser calculado através da variação da coordenada do *pixel*, que representa o centróide do objeto, matematicamente representado por:

$$V_d = (P_i - P_a) \left( \frac{L}{Lp_i} \right) \quad (2)$$

onde:

$V_d$  é a variação do deslocamento lateral;

$P_i$  é a coordenada do *pixel* do centróide no início do processo;

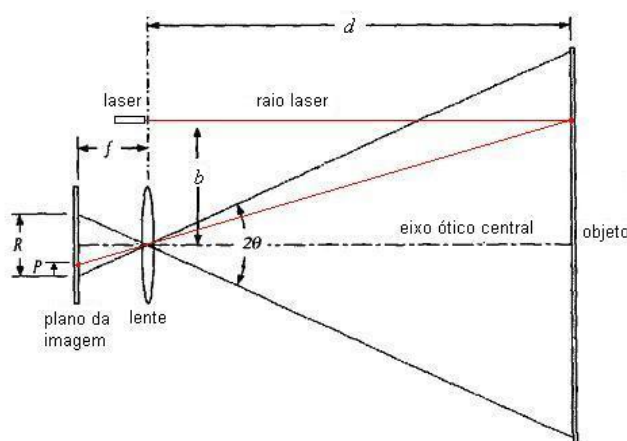
$P_a$  é a coordenada do *pixel* do centróide calculada após a movimentação;

$L_o$  é a largura do objeto ou marco visual.

Portanto, a distância  $D_a$  e  $v_d$  permite definir as coordenadas X e Y no eixo cartesiano.

A restrição do método reside no fato de que o sistema não é sensível aos movimentos de rotação e informações em 3D por possuir apenas uma câmera (CACCIA, 2003). Portanto a aplicação deste método fica limitado para uso como sensor de posição. Para suprir esta limitação do sistema, Caccia (2004), Karras, Panagou e Kyriakopoulos (2006) propõem a utilização da visão combinando o uso de ponteiros de raio *laser* para que a incidência dos seus raios no alvo crie marcos visuais reconhecíveis pelo sistema, utilizando-se o método da triangulação.

O método para o cálculo da distância por triangulação a *laser* baseia-se no princípio da semelhança de triângulos (CHEN, 2001). Um ponteiro de *laser* emite um raio e, ao incidir em um obstáculo, forma um ponto que é utilizado para o cálculo da distância.



**Figura 1- Esquema do sistema de detecção de distância através da triangulação**

A Figura 1 mostra o esquema proposto para o método da triangulação, ilustrando o campo de visão da câmera, representado pelo ângulo  $\theta$ . Onde  $f$  é a distância focal;  $b$  é a distância entre o eixo central do *laser* e o eixo central da câmera;  $R$  é a resolução da câmera;  $P$  é a coordenada que representa o centro do ponto do *laser* refletido;  $d$  é a distância entre a câmera e o objeto alvo.

Segundo Chen (2001), a distância focal  $f$  é uma informação que normalmente não é dada ou não é precisa para câmeras comuns adquiridas no mercado. Se este for o caso, podem se efetuar ensaios de calibração para obter a distância focal.

Por semelhança de triângulos, a distância é calculada por:

$$d = \frac{bR}{(2P - R) \tan \theta} \quad (3)$$

onde:

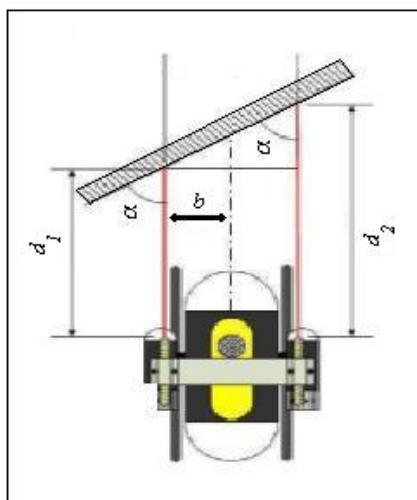
$$\tan \theta = \frac{R}{2f}$$

Para o cálculo da distância, o método da triangulação utiliza a coordenada de apenas um *pixel*. No entanto, na prática, quando o raio de *laser* incide sobre o obstáculo, este é refletido e captado pelo sensor CCD (Charge Coupled Device) da câmera e normalmente, são iluminados vários *pixels* ao mesmo tempo. Dessa forma, é necessário utilizar um algoritmo para detectar a coordenada que representa o centróide do ponto do *laser*.

Existem alguns métodos aplicados para essa finalidade, tais como: prova de curva quadrática, interpolação quadrática de duas dimensões e centro de iluminação (CHEN, 2001). Sendo este último o utilizado neste trabalho.

Quando o arranjo do sistema de visão possui dois *lasers* paralelos à câmera, é possível prover o sistema da capacidade de medir, além da distância, o ângulo do veículo em relação a um objeto (KONDO; URA, 2004).

A Figura 2 mostra a ilustração de um veículo submersível apreado em relação a um plano e à projeção dos *lasers*.



**Figura 2- Esquema para cálculo do ângulo de ataque da câmera em relação à parede**  
As distâncias  $d_1$  e  $d_2$  são obtidas pela eq. (3) e o cálculo da inclinação é dado por:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_1 - d_2}{2b}\right) \quad (4)$$

onde:

$d_1$  é a distância do primeiro *laser* até a parede;  
 $d_2$  é a distância do segundo *laser* até a parede;  
 $b$  é a distância entre o eixo central da câmera e o raio do *laser* 1 ou 2;  
 $\alpha$  é o ângulo do veículo em relação à parede.

Quando utilizamos o método da triangulação imerso em um ambiente subaquático, são necessárias adequações para que o sistema consiga medir a distância de forma correta.

Para o cálculo da distância através do método da triangulação devem ser levados em consideração alguns fatores que podem distorcer o ponto de *laser* na imagem e, por consequência, influenciar no resultado do sistema, portanto é necessário ajustar os parâmetros para a captação através de um método de calibração, minimizando-se as distorções e, por consequência, minimizando-se o erro (CHEN, 2001; CACCIA, 2003, 2004).

### 2.3 Controlador

Admitindo que a posição do veículo possa ser obtida a partir do sistema de visão computacional, há que se desenvolver a lei de controle para manter o veículo estacionado em uma determinada posição e aproamento ou ainda perseguir uma determinada trajetória.

Para tanto, foi utilizada a abordagem da variável de estado para a determinação da lei de controle, uma vez que ela é mais conveniente para sistemas multivariáveis, como é o caso. Como, possivelmente, haverá ruídos de medida e também perturbação na dinâmica que não foi modelada, será efetuada uma estimação do estado através do Filtro de Kalman Estendido (MORISHITA *et al.*, 2008).

## 3 EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste trabalho foram realizados alguns ensaios preliminares com o intuito de verificar a viabilidade da aplicação de um sistema de aquisição e processamento de imagens, de maneira que o sistema possa extrair informações das imagens captadas, com o objetivo de controlar o posicionamento do veículo.

De início, verificou-se experimentalmente, no ar, a eficácia de uma única câmera para determinar as coordenadas lineares, simulando o movimento de deriva de um veículo, em relação a um objeto. Posteriormente, foi adotado o uso de *lasers* para auxiliar o sistema de aquisição e processamento de imagens, na tarefa de medir a distância e ângulo do plano da câmera, em relação a um objeto, utilizando o método da triangulação. Os experimentos foram

realizados no meio aéreo e no meio subaquático onde foram analisadas as influências dos efeitos da turbidez, iluminação e distância.

### 3.1 Experimentos com uma câmera em laboratório e no meio aéreo

Este experimento teve como objetivo testar a precisão do método, medindo a variação do deslocamento lateral de uma placa em relação à câmera utilizando a eq.(2); na qual se utilizou uma placa com uma faixa de aproximadamente 15 mm de largura em seu centro, como um marco visual artificial. Ocorreram sistematicamente deslocamentos de 100 mm, em um intervalo entre 300 mm a esquerda e 300 mm a direita. Variou-se também a distância da câmera em relação à placa, para testar o efeito desta variação. Os resultados deste experimento estão expostos na Tabela 1.

**Tabela 1 - Resultados obtidos através das medições das variações dos deslocamentos laterais**

Dist. (mm) \ Desl. (mm)	-300	-200	-100	0	100	200	300
	Média das medidas e $\pm$ desvio padrão						
1300	-297 $\pm$ 1	-198 $\pm$ 1	-100 $\pm$ 1	3 $\pm$ 1	99 $\pm$ 1	195 $\pm$ 1	294 $\pm$ 1
1650	-298 $\pm$ 1	-197 $\pm$ 1	-97 $\pm$ 1	1 $\pm$ 2	102 $\pm$ 2	199 $\pm$ 2	296 $\pm$ 2
2000	-303 $\pm$ 2	-205 $\pm$ 2	-103 $\pm$ 2	0 $\pm$ 2	99 $\pm$ 2	200 $\pm$ 2	303 $\pm$ 2

Analisando a Tabela 1 pode se concluir que o sistema é capaz de medir as variações do deslocamento lateral, com um erro médio abaixo de 1%. Em relação à variação da distância, quando esta aumenta, ocorre também um leve aumento do desvio padrão, que pode ser explicado pela variação da largura da faixa em *pixel*. Quanto mais longe, a faixa ocupa um menor número de *pixels*, aumentando a variação da coordenada do centro da faixa. Portanto, as características do marco visual escolhido, como sua largura, comprimento ou cor podem influenciar nos resultados.

### 3.2 Experimentos com uma câmera e lasers

Para testar o uso de *lasers* em conjunto com uma câmera, aplicado a visão computacional, foram efetuados vários ensaios de modo sistematizado procurando verificar os efeitos da luminosidade, do comprimento de onda do raio *laser*, da reflexão, da absorção do material e do índice de turbidez. O objetivo principal destes ensaios foi verificar o desempenho do sistema na determinação da distância entre a câmera e um alvo. Os experimentos foram realizados em laboratório na Fatec-Jahu e em campo no Rio Jacaré-Pepira que pertence a bacia hidrográfica do Rio Tietê, localizado no interior do estado de São Paulo.

Para a realização dos testes foram utilizados os seguintes componentes e equipamentos:

- dois ponteiros de *lasers* vermelhos 650nm de 3 mW;
- um ponteiro de *laser* verde 532 nm de 30 mW;
- um ponteiro de *laser* azul 473 nm de 5 mW;
- uma câmera filmadora Sony, SteadyShot CCD-TR848;
- conjunto de duas lâmpadas do tipo halógenas dicrônicas, com potência de 50 W.

### 3.2.1 Experimentos no meio aéreo

Os experimentos foram realizados no laboratório na Fatec-Jahu e utilizando-se a iluminação do próprio laboratório (330 lumens). O objetivo foi verificar a precisão do sistema para medir distância comparando-se os resultados com *lasers* de diferentes comprimentos de onda.

As distâncias variavam de 705 mm a 4000 mm e os resultados estão mostrados através da Tabela 2.

**Tabela 2 - Resultados obtidos, através das medições dos experimentos em laboratório no ar**

Ref.(mm)	705	854	1001	1150	1317	2000	4000
<i>Laser</i>							
	Média das medidas e $\pm$ desvio padrão						
Vermelho	703 $\pm$ 1	856 $\pm$ 1	1002 $\pm$ 1	1149 $\pm$ 4	1315 $\pm$ 1	199 $\pm$ 2	4004 $\pm$ 2
Verde	701 $\pm$ 1	849 $\pm$ 1	997 $\pm$ 3	1141 $\pm$ 5	1317 $\pm$ 3	2011 $\pm$ 2	4011 $\pm$ 2
Azul	706 $\pm$ 1	856 $\pm$ 1	1003 $\pm$ 3	1154 $\pm$ 1	1320 $\pm$ 4	2009 $\pm$ 4	3996 $\pm$ 4

Os valores dessa tabela indicam que foi possível medir a distância em todas as condições e a média das distâncias medidas, comparada com a medida de referência, apresentou um erro médio de 1%. Neste experimento a variação de cores dos diferentes ponteiros não influenciou nos resultados.

Com o objetivo de verificar a precisão do método para medir a variação do ângulo de aproamento, foi realizado outro experimento, também no meio aéreo. Neste caso, houve uma variação da distância entre a câmera e a placa e o ângulo de referência. A Tabela 3 apresenta os resultados desse experimento.

**Tabela 3 - Resultados obtidos através das medições das variações angulares**

Graus	-10	-20	-30	-45	10	20	30	45
Dist.								
	Média das medições $\pm$ desvio padrão							
1300 mm	-9 $\pm$ 1	-20 $\pm$ 1	-28 $\pm$ 1	-46 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1	20 $\pm$ 1	29 $\pm$ 1	43 $\pm$ 2
1650 mm	-13 $\pm$ 2	-18 $\pm$ 2	-33 $\pm$ 1	-47 $\pm$ 2	9 $\pm$ 1	18 $\pm$ 2	29 $\pm$ 1	46 $\pm$ 1
2000 mm	-8 $\pm$ 3	-19 $\pm$ 3	-29 $\pm$ 2	-50 $\pm$ 2	12 $\pm$ 3	22 $\pm$ 2	33 $\pm$ 2	51 $\pm$ 3

Analisando os resultados da Tabela 3, pode se observar que o sistema é capaz de medir o ângulo de aprumo. Porém, apresenta um erro médio aproximado de 5% entre o ângulo medido e o de referência. Observa-se também que a variação do desvio padrão tende a crescer conforme se aumenta a distância, e este fato pode gerar uma maior ou menor incidência de ruídos, gerados pelo sensor de acordo com a variação da distância.

### 3.2.2 Experimentos no Rio Jacaré-Pepira

Foram realizados experimentos no Rio Jacaré-Pepira para testar o sistema composto por câmera e *lasers* dentro do contexto de operação do VSNT-Jaú II, ou seja, com nível de turbidez típico da bacia do Rio Tietê, para analisar a influência do nível de turbidez, condições de iluminação e distância limite para aquisição de imagens.

Os experimentos foram divididos em duas fases: a primeira realizada no período vespertino, com iluminação natural do Sol média de 15.000 lumens e a segunda durante a noite, com iluminação ambiente média de 2 lumens.

Durante o dia e como os experimentos foram realizados em baixa profundidade, aproximadamente 600 mm, na primeira fase, os efeitos da iluminação natural da luz solar e alto índice de turbidez da água que chegou a 22,5 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez ) dificultaram a captação das imagens e não foi possível detectar o ponto do *laser* na imagem e por conseqüência também não foi possível calcular a distância entre a câmera e a placa de projeção.

Durante o período noturno, a intensidade da energia luminosa do ambiente era de 2 lumens. Uma amostra de água colhida no momento do experimento e analisada posteriormente em laboratório, apresentou um índice de turbidez de 15,32 UNT.

Como exemplo, é mostrada, a Figura 3, uma imagem submersa captada durante a noite, a uma distância de referência de 1001 mm no Rio Jacaré Pepira.

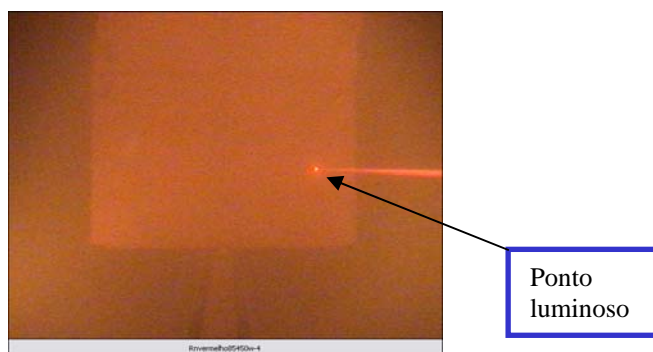


Figura 3 - Imagem do *laser* vermelho e projeção do ponto na placa

A Tabela 4 apresenta os resultados dos processamentos dos pontos dos *lasers* e verifica-se novamente que para o *laser* azul não foi possível detectar o ponto de projeção. O *laser* vermelho apresentou o melhor resultado, sendo possível detectar e medir a distância até 1150 mm, com um desvio padrão máximo de 4 mm.

**Tabela 4 - Resultados dos experimentos em rio com apenas iluminação do *laser***

Ref. (mm) <i>Laser</i>	705	854	1001	1150	1317
	Média das medidas $\pm$ desvio padrão				
Vermelho	707 $\pm$ 1	850 $\pm$ 1	996 $\pm$ 3	1142 $\pm$ 4	-
Verde	708 $\pm$ 1	-	-	-	-
Azul	-	-	-	-	-

Embora o *laser* verde tenha seu comprimento de onda dentro de uma faixa que poderia apresentar um menor coeficiente de absorção comparado com o *laser* vermelho (WALTZ A., 1992), os resultados dos experimentos nestas condições indicaram que o *laser* vermelho apresentou melhor resultado.

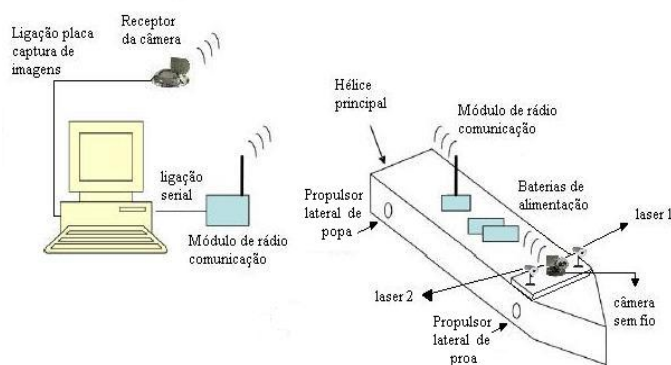
Observa-se que o *laser* azul, foi que sofreu maior atenuação, não sendo possível o cálculo da distância. O *laser* vermelho teve menor absorção da energia luminosa, e portanto apresentou o melhor resultado comparado com o verde e o azul. Este resultado é interessante para o projeto em termos de custo, pois os ponteiros de *lasers* vermelhos são os mais baratos do mercado.

### 3.3 Experimentos com o Sistema de Posicionamento Dinâmico

A proposta inicial para o desenvolvimento do SPD baseado em visão computacional e *laser* tinha como objeto a aplicação no VSNT – Jaú II. Porém, por motivos de força maior, o submersível não foi concluído a tempo. Portanto, para testes e validação do sistema de posicionamento dinâmico com o método de sensoriamento baseado em visão e *laser* foi utilizado um modelo de navio para uso no tanque de provas do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

#### 3.3.1 Descrição do aparato experimental

A disposição dos equipamentos utilizados pode ser visualizada no esquema da Figura 4.



**Figura 4 - Esquema de ligação entre o console e o modelo e a disposição dos componentes embarcados**

Observa-se, através da Figura 4, os seguintes equipamentos:

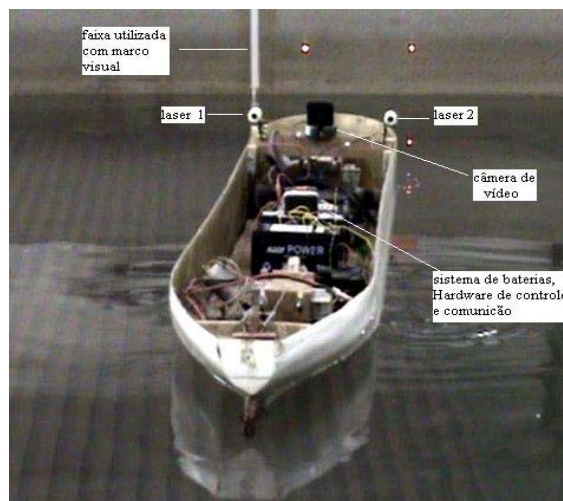
- console de controle composto por um computador com uma placa de vídeo captura. Ligado a esta placa, um receptor de rádio frequência, que recebe os sinais da câmera de vídeo sem fio embarcada. O envio dos sinais de controle é realizado através dos módulos de rádio comunicação.
- embarcado no modelo pode-se visualizar também o sistema de baterias utilizado para alimentação, motores e sistema formado entre câmera e *laser*. Ao lado da câmera sem fio, foram instalados dois ponteiros de *lasers*.
- O modelo é um navio dotado de um hélice principal além de dois propulsores laterais, sendo um de proa e o outro de popa.

A Tabela 5 apresenta as principais dimensões e propriedades do modelo, que foram consideradas neste trabalho.

**Tabela 5 Dimensões e propriedades do modelo de unidade flutuante lastreado**

Massa (Kg)	30,5
Comprimento (mm)	1780
Boca (mm)	290
Calado (mm)	80

Um programa de visão computacional foi elaborado, utilizando a linguagem de programação *Visual Basic*, que apresenta um bom desempenho para o processamento de imagens em tempo real. O programa é responsável pelo processamento das imagens captadas, extraindo as informações necessárias para o sistema de posicionamento dinâmico. Essas informações são obtidas através de marcos visuais formados pelos raios dos *lasers* embarcados e por um marco visual arbitrário fixado no início de cada ensaio.



**Figura 5 - Foto do modelo durante ensaio**

A Figura 5 mostra uma foto captada durante um dos ensaios, na qual podem ser observados os ponteiros *laser*, a câmera embarcada, os dois pontos de *laser* projetados na parede do tanque e a faixa de marcação do tanque que foi utilizada como marco visual.

### 3.3.2 Ensaios

Primeiramente, os desempenhos do Filtro de Kalman Estendido e do controlador foram avaliados através de simulação numérica em microcomputador. Foram efetuadas várias simulações cujos resultados auxiliaram a determinar o conjunto de ensaios a serem realizados.

A seguir, será apresentado o resultado de um dos ensaios.

O desempenho do controlador e do filtro de Kalman Estendido foram analisados considerando-se os seguintes fatores:

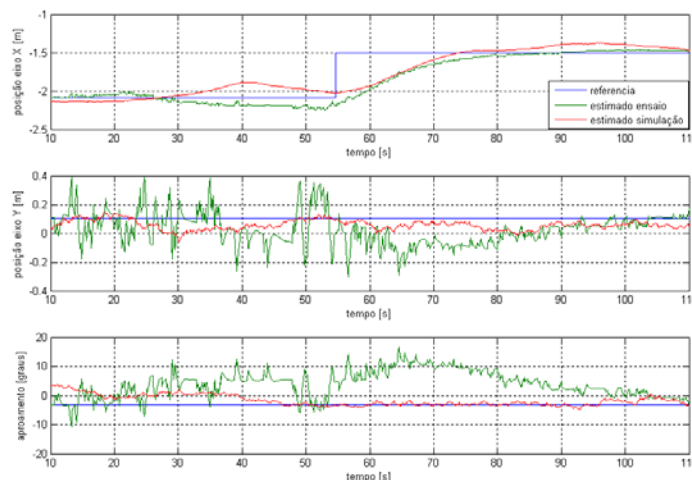
- tempo de acomodação;
- erro em regime permanente;
- nível da variação do ruído;
- comparação entre os sinais estimados pela simulação e estimados durante o ensaio;
- variações do sinal de acordo com a distância e mudança de posicionamento.

Na Tabela 6 estão indicadas as condições iniciais e os valores de referência adotados, objetivando analisar o desempenho do sistema ao se variar somente a referência no eixo  $X$ .

**Tabela 6 - Posição inicial e referência alterada durante o ensaio**

Posição Sinais estimados	Inicial	Referência
$X$ (m)	-2,08	-1,50
$Y$ (m)	0,10	0,10
$\psi$ (graus)	-3,0	-3,0

Os resultados podem ser observados através da Figura 6.



**Figura 6 - Gráficos da posição estimada durante o ensaio e simulação**

Observa-se através da Figura 6 que o sistema persegue a posição desejada, e o tempo para atingi-la durante o ensaio foi de aproximadamente 30s, um pouco maior que o obtido pela simulação, que foi de 25s. A velocidade média atingida no eixo  $X$  foi de aproximadamente 0,017m/s durante o deslocamento.

Estes resultados mostram que o sistema de controle respondeu bem às informações obtidas através do sensor, e o erro em regime permanente foi menor que 1% ao final do ensaio.

### 3.4 Discussão dos resultados dos experimentos

Por meio dos resultados dos experimentos, observa-se que as medições apresentaram uma boa precisão, com desvio padrão máximo de 4 mm e com um erro médio abaixo de 1%. Para medição de ângulos, a precisão foi menor, porém satisfatória, com um erro médio abaixo de 5% e com desvio padrão de 3 graus.

No caso do ambiente subaquático, o índice de turbidez e as condições de iluminação, influenciam de maneira significativa o desempenho do sistema de aquisição de imagens. Porém, quando o seu uso é combinado com os *lasers* como instrumento de medida, o seu desempenho melhora.

Nos experimentos, foram também avaliados *lasers* com diferentes comprimentos de onda. Os resultados apontaram que a faixa do vermelho foi que apresentou melhor eficácia, comparada com a azul e a verde.

A validação do sistema foi realizada, por meio de simulação numérica e averiguação experimental, e os resultados apontam que o método de sensoriamento mostrou-se eficiente, aliado ao uso do Filtro de Kalman, que reduziu os ruídos de medida e estimou a posição e a

velocidade do modelo durante os ensaios. Utilizando os sinais estimados pelo Filtro, o sistema de controle perseguiu a trajetória e manteve o posicionamento do modelo no plano horizontal de maneira satisfatória, apresentando um erro em regime permanente abaixo de 1%.

Comparando-se os resultados dos ensaios, com os resultados da simulação numérica, observa-se que o sinal gerado durante o ensaio, apresentou um nível de ruído maior e também um tempo de resposta mais lento. Porém há de se considerar que durante os ensaios, o sistema está sujeito a variações da iluminação ambiente, perturbações do processo e oscilações do sistema de medida, que não foram inicialmente previstas durante as simulações.

Os ruídos gerados pelo sistema de medição baseado em visão e *lasers* têm suas intensidades variadas de acordo com a distância entre o veículo e o objeto alvo ou parede. Para distâncias maiores, os sinais apresentaram maior oscilação devido às características do sistema de aquisição.

Quanto à medição do ângulo, este sofre uma variação mais significativa para maiores distâncias, contribuindo para as oscilações do sinal.

#### **4 CONCLUSÕES**

Neste trabalho foi mostrada experimentalmente a potencialidade do uso de *laser* e visão computacional aplicados a um sistema de posicionamento dinâmico.

O sistema de controle baseado em espaço de estado, estimado pelo Filtro de Kalman Estendido mostrou-se apropriado para este tipo de aplicação.

Pelos resultados conclui-se que o uso dos ponteiros de *lasers* possibilita o aumento do alcance do sistema de visão.

Os resultados também apontam que a aplicação deste sistema de visão em conjunto com os ponteiros de *lasers* é limitada a pequenas distâncias, devido as características do sistema de captação de imagens, diminuindo a precisão ao se aumentar a distância.

O método de sensoriamento baseado em visão com uma câmera e *lasers* é uma solução simples, ativa e independente. Ou seja, não depende de sinais de outros sensores, mostrando-se viável para aplicações em laboratórios de tanques de provas em estudos do SPD para modelos de navios, podendo ser útil também para aplicação no SPD do VSNT-Jaú II bem como em outros veículos aquáticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUSCARIOLLO, P. H.; (2003) **Análise do comportamento de um sistema de visão para o veículo submersível não tripulado – Jaú II**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, Orientador Prof. Dr. Hélio Mitio Morishita, 2003.

CACCIA, M.;(2003), **Vision-based linear motion estimation for unmanned underwater vehicles**, Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on Volume 1, 14-19 Sept. 2003 Page(s):977 - 982 vol.1

CACCIA, M. (2004), **Vision-based ROV horizontal motion control: experimental results** IFAC Conference on CONTROL APPLICATIONS IN MARINE SYSTEMS, Ancona, Italy - July 7-9, 2004

CHEN, H. (2001), **Identification of influential factors for underwater laser imaging**, OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition Volume 4, 5-8 Nov. 2001 Page(s):2549 - 2556 vol.4.

HORGAN J., TOAL D., (2006) **Vision systems in the control of Autonomous Underwater Vehicles**, submitted to the 7th IFAC MCMC, Lisbon, Portugal, September 2006

HSU, L. *et al.*; (2000) **Dynamic positioning of remotely operated underwater vehicles**, Robotics & Automation Magazine, IEEE, Volume 7, Issue 3, Sept. 2000 Page(s):21– 31.

KARRAS, G.C.; PANAGOU, D.J.; KYRIAKOPOULOS, K.J.;(2006), **Target-referenced Localization of an Underwater Vehicle using a Laser-based Vision System**, OCEANS 2006,Sept. 2006.

KONDO, H. e URA, T. (2004), **Navigation of an AUV for investigation of underwater structures**, Control Engineering Practice (12) 1551:1559

MORISHITA, H. M., *et al.* (2008), **Aplicação de laser e visão computacional no sistema de posicionamento dinâmico**, 22º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, Brasil, outubro 2008.

REMOTELY OPERATED VEHICLE (2007) COMMITTEE OF THE MARINE TECHNOLOGY SOCIETY, USA, <http://www.rov.org/info.cfm>, acesso em 15/08/2007

SORANI, L. A.; (2003) **“Estudo da Dinâmica e Controle de um Submersível não Tripulada para uso no Ambiente Fluvial”** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Usp, São Paulo, Orientador Hélio Mitio Morishita, 2003.

TAKIMOTO, R. Y. (2006), **Computer Vision Techniques applied to the Depth Displacement of an AUV near the Free Surface**, Tese de Doutorado, Department of Systems Design for Ocean-Space Yokohama National University Japan, January 2006.

TANNURI, E. A. e MORISHITA, H. M., (2006), **Experimental and numerical evaluation of a typical dynamic positioning system** Applied Ocean Research, doi:10.1016/j.apor.05.05.2006, Elsevier, 2006.

TRABUCO, J., TAVARES, R., (2000), **Desenvolvimento de um Sistema de Navegação para um Veículo Autônomo Submarino**, Trabalho Final de Curso apresentado ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000.

WALTZ, A. R., (1992), **A Improved Light Source For Underwater Illumination**, Ocean Technology Department, Naval Undersea Center, San Diego, EUA, p. 4-5, 1992