

ESTUDO DA DINÂMICA E CONTROLE DE UM SUBMERSÍVEL NÃO TRIPULADO PARA USO NO AMBIENTE FLUVIAL

Sorani*, L.A. e Amorim, A. E. A.
Faculdade de Tecnologia de Jahu, CEETEPS, UNESP. Brasil
*sorani@netisite.com.br

Morishita, H. M.
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, EPUSP. Brasil

RESUMO

A aplicação de submersíveis não tripulados é crescente por todo o mundo, notadamente em ambientes marítimos. No entanto, há a carência deste tipo de recurso para tarefas mais simples e em águas rasas como no ambiente fluvial, especialmente no Brasil. A finalidade deste equipamento no ambiente fluvial é auxiliar atividades subaquáticas de análise e vistoria em obras de barramento de rios, pilares de pontes, estruturas acostáveis de terminais de transbordo de cargas, cabos submersos, obras vivas de embarcações dentre outras. Neste trabalho foram estudados procedimentos para implantação de um sistema de controle para um submersível não tripulado projetado para uso no meio fluvial, tomando-se como exemplo o Veículo Submersível Não Tripulado—Jaú I (VSNT-Jaú I). O modelo matemático desenvolvido requer entre outros parâmetros, coeficientes de amortecimento e de massa adicional, que são difíceis de serem obtidos analiticamente. Desta foram optou-se por estimá-los através de ensaios de movimento oscilatório amortecido, utilizando-se um modelo reduzido do submersível em tanque de provas. O sistema de controle utilizado é baseado na teoria clássica de controle tipo PD, sendo que para seu projeto admitiu-se a independência dos movimentos em cada um dos graus de liberdade (avanço, deriva, quinada e caturro). Isto significa que foram desenvolvidos quatro controladores, e posteriormente reunidos para a simulação completa. O desempenho do controlador foi avaliado através de simulações dinâmicas impondo-se o acompanhamento de uma trajetória tridimensional definida ao longo do tempo, e pode ser considerado satisfatório uma vez que houve aderência à trajetória de referência. No entanto, conforme era de se esperar, o sistema de controle não elimina erro de posição quando há variação contínua da referência, mormente quando a velocidade da mudança da referência é aumentada. Desta forma o desempenho do controlador é melhorado para variações lentas da referência.

INTRODUÇÃO

Na Faculdade de Tecnologia de Jahu (FATEC-JH), em 1996, foi construído um veículo submersível não tripulado operado remotamente via cabo, para ser utilizado no ambiente fluvial conforme é descrito em [1]. Esta versão é dotada de dois propulsores, um dispositivo de lastro móvel, e de um sistema de captação de imagens, que lhe permite a execução de tarefas de inspeção visual subaquáticas. No desenvolvimento deste submersível, foram utilizados materiais de baixo custo e disponíveis no mercado brasileiro.

A estrutura do veículo, conforme é mostrado na Fig. 1, divide-se em três partes principais: o corpo básico, a torreta e a bolina. O corpo básico tem formato cilíndrico com extremidades de formato parabolóide, com 1,315m de comprimento total e 0,406m de diâmetro, onde se abrigam os sistemas elétricos, eletrônicos, mecânicos e pneumáticos. Na proa deste corpo, situa-se a câmera de vídeo responsável pela captura de imagens e, na popa, as saídas dos eixos do sistema propulsor, uma vez que os motores também estão abrigados neste compartimento.

Sobre o corpo básico situa-se a torreta. Na torreta abriga-se o refletor, cuja função é a geração de luz artificial para auxiliar o registro de imagens. Nela, há também uma estrutura que possibilita o içamento e transporte do submersível, uma vez que o mesmo tem uma massa total de 164,14Kg.

A terceira parte, a bolina, que se localiza na parte inferior do corpo principal, é formada por dois semi-elipsóides com uma das bases menor que a outra e em seu interior abrigam-se os sistemas de lastro fixo e móvel. Ensaios, tanto em ambiente controlado como em ambientes reais, mostraram a viabilidade da linha de concepção do projeto. Contudo foram observados alguns problemas, como a instabilidade do controle de movimentos verticais, na manobrabilidade do veículo, principalmente em função dos limitados recursos técnicos, de contar com apenas dois propulsores e, da complexidade do comportamento dinâmico do veículo, indicando um estudo mais aprofundado da questão controle. Para melhorar o projeto do sistema de controle é necessário o conhecimento da dinâmica do veículo, que envolve um estudo mais detalhado das forças hidrodinâmicas que atuam sobre ele.

MODELAGEM MATEMÁTICA

Para desenvolver o modelo matemático de submersíveis é usual utilizar dois referenciais, conforme é mostrado na Fig. 1.

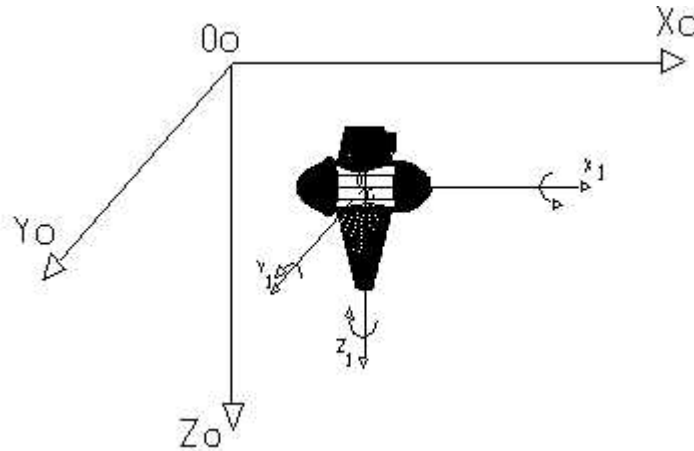


Fig. 1 – Sistema de Coordenadas Fixa e Móvel

O primeiro sistema de coordenadas, $OX_1Y_1Z_1$, é solidário ao veículo e o segundo, $O_0X_0Y_0Z_0$, é fixado na Terra, o qual é admitido como referencial inercial. O plano X_0Y_0 é paralelo à superfície da água. A modelagem matemática utiliza os dois referenciais, sendo que os movimentos do veículo são descritos em relação ao referencial móvel e as posições são calculadas para o referencial inercial. Esta abordagem é utilizada uma vez que os esforços hidrodinâmicos são determinados com menor dificuldade quando referidos ao próprio veículo. Para passar do sistema de referência móvel para o fixo são utilizados os ângulos de Euler.

Neste trabalho, em função das características do VSNT-Jaú I, foram admitidas as seguintes hipóteses para a modelagem matemática do submersível:

o corpo é rígido; os pesos e suas distribuições no interior do veículo são constantes; o centro de gravidade está no plano de simetria longitudinal do modelo; dois eixos principais de inércia estão contidos nesse plano de simetria; o eixo OX_1 coincide com o eixo longitudinal do modelo, e o modelo é simétrico apenas entre boreste e bombordo.

A Equação de Movimento

O movimento de avanço do submersível VSNT-Jaú I é obtido através de dois propulsores instalados lado a lado na popa do aparelho, e alternando as suas intensidades relativas pode-se atuar na guinada do veículo.

A movimentação vertical é realizada utilizando-se um sistema de lastro móvel localizado na bolina que consiste de um tanque flexível de ar que, quando inflado expulsa a água ali existente. Neste trabalho é estudado o controle do veículo nos movimentos de avanço, deriva, guinada e caturro. Para estudar o controle são desprezados os movimentos de jogo e de arfagem, mesmo porque o veículo VSNT-Jaú I foi projetado para minimizar estes movimentos. Admitindo ainda que o veículo possui movimentos lentos e desconsiderando as forças ambientais, a equação dinâmica do submersível VSNT-Jaú I em relação ao referencial móvel é de acordo com [7] dada por:

$$\begin{aligned}
 \dot{u}(m - X_{\dot{u}}) + m(x_G r^2 - vr) &= -Y_{\dot{v}}vr + F_{FX} + F_{TX} \\
 \dot{v}(m - Y_{\dot{v}}) + m(ur + x_G \dot{r}) &= X_{\dot{u}}ur + F_{FY} + F_{TY} \\
 \dot{w}(m - Z_{\dot{w}}) &= F_{FZ} + g(W - B) + F_{TZ} \\
 \dot{r}(I_Z - N_{\dot{r}}) + mx_G(\dot{v} + ru) &= -(X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv + F_{FN} + F_{TN}
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde: \vec{F}_F é força de amortecimento viscoso na direção respectiva; \vec{F}_T é força de propulsão na direção respectiva; g é a aceleração da gravidade; W é força peso; B é força empuxo; $-X_{\dot{u}}, -Y_{\dot{v}}, -Z_{\dot{w}}, -N_{\dot{r}}$ são termos de massa hidrodinâmica; I_z é o momento de inércia referido ao eixo OZ ; m é a massa do veículo; u, v, w e $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$

são, respectivamente, as projeções de velocidade e aceleração linear do veículo nos eixos OX_1, OY_1 e OZ_1 e são coordenadas do centro de gravidade.

As velocidades lineares, do referencial móvel para o referencial fixo, são calculadas através da relação:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\text{sen} \psi \cos \theta + \cos \psi \text{sen} \theta \text{sen} \phi & \text{sen} \psi \text{sen} \phi + \cos \psi \cos \phi \text{sen} \theta \\ \text{sen} \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \text{sen} \phi \text{sen} \theta \text{sen} \psi & -\cos \psi \text{sen} \phi + \text{sen} \theta \text{sen} \psi \cos \phi \\ -\text{sen} \theta & \cos \theta \text{sen} \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Já as velocidades angulares são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen} \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\text{sen} \phi \\ 0 & \text{sen} \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$

sendo: ϕ o ângulo de jogo, rotação em torno do eixo X_1 ; θ o ângulo de arfagem, rotação em torno do eixo Y_1 ; ψ o ângulo de rumo, rotação em torno do eixo Z_1 ; $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ as velocidades lineares do modelo no sistema de referência fixo nas respectivas direções X, Y, Z .

Considerando a inexistência dos movimentos de jogo e arfagem ($\dot{\phi} = \dot{\theta} = p = q = 0$), para calcular as velocidades em relação ao referencial fixo, pode-se utilizar as Eq. 2 e 3 da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \text{sen} \psi \\ \dot{y} &= u \text{sen} \psi + v \cos \psi \\ \dot{z} &= w \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (4)$$

Foi admitido neste trabalho que a força de amortecimento é composta por uma parcela linear e quadrática, isto é,

$$F_F = b_1 v + b_2 v |v| \quad (5)$$

onde b_1 e b_2 são coeficientes de amortecimento

No modelo considerado os parâmetros que apresentam uma certa dificuldade para serem obtidas teoricamente são as derivadas hidrodinâmicas e os coeficientes da equação de amortecimento. Neste trabalho estes parâmetros foram obtidos experimentalmente, como apresentado em [7], através de um ensaio conhecido como decaimento livre com um modelo em escala reduzida. Este ensaio foi realizado para cada um dos graus de liberdade de interesse do veículo (avanço, deriva, caturro e guinada). Para obter os valores dos parâmetros desejados a partir dos resultados experimentais admitiu-se inicialmente que o amortecimento é somente linear e, posteriormente, somente quadrático [2] para estabelecer os valores máximos dos coeficientes. A partir disso, os valores finais dos parâmetros foram obtidas através de combinação heurística dos valores dos coeficientes. Vale ressaltar aqui que os valores para os parâmetros não são únicos, podendo ter outros conjuntos que também satisfaçam numericamente o resultado experimental. Verifica-se ainda, que não existe uma prescrição exata para o ajuste dos parâmetros da teoria, exceto o fato de que os valores obtidos das análises puramente linear e quadrática, devem ser tomados como limites máximos para tal ajuste.

Na Tab. 1 são apresentados os dados principais do submersível VSNT-Jaú I bem como os valores de massa hidrodinâmica e dos coeficientes de amortecimento, tanto para o modelo como para a escala real.

Tab. 1 Dados principais do VSNT-Jaú I

DADOS		Modelo em Escala Reduzida 1:2,5	Fator de Escala N=2,5	Modelo em Escala Real 1:1	Uni Dade
1	MASSA TOTAL E MOMENTO DE INÉRCIA Massa total Mom. de Inércia em relação ao eixo Z	10,505 0,109	N^3 N^5	164,14 10,64	Kg kg.m ²
2	MASSAS ADICIONAIS Sentido longitudinal m11 Sentido transversal m22 Sentido vertical m33 Sentido rotacional (rumo) m66	8,03 22,90 6,80 0,061	N^3 N^3 N^3 N^5	125.47 106.25 357.81 5.96	kg kg kg kg.m ²
3	AMORTECIMENTOS VISCOSOS (lineares) Sentido longitudinal X Sentido transversal Y Sentido vertical Z Sentido rotacional (rumo) R (Quadráticos) Sentido longitudinal X Sentido transversal Y Sentido vertical Z Sentido rotacional (rumo) R	C 4,01 7,90 2,02 0,128 d 26,54 149,87 17,06 0,852	$N^{2.5}$ $N^{2.5}$ $N^{2.5}$ $N^{2.5}$ $N^{4.5}$ N^2 N^2 N^2 N^5	c 39,63 78,07 19,96 7,906 d 165,87 936,69 106,25 83,20	kg/s kg/s kg/s kg.m ² /s kg/m kg/m kg/m kg.m ²

CONTROLE

Neste trabalho, por ser uma investigação preliminar, o controle do VSNT-Jaú I foi estudado utilizando-se a teoria clássica com a lei do tipo Proporcional+Integral+Derivativo (PID) ou suas variantes (P, PI ou PD) que se destacam pela simplicidade de implementação e robustez. Caso haja verificação de problemas após a implementação, deverão ser estudadas outras formas de controle tais como controle deslizante, adaptativo, nebuloso ou redes neurais conforme sugerem [3,4].

É de se ressaltar que o sistema de controle é multivariável, mas sub-atuado na medida em que só há atuadores nas direções de avanço, caturo e quinada sendo impossível atuar diretamente na direção de deriva do veículo. A rigor deve-se projetar um sistema de controle multivariável para o VSNT-Jaú I pois, conforme mostram as Eq. 1 há acoplamento entre os movimentos. No entanto, neste trabalho, por simplicidade é admitido, que os movimentos sejam desacoplados e os controladores projetados independentemente. Esta abordagem de acordo com [5] é relativamente comum na área de engenharia naval e oceânica.

O Controle do VSNT - Jaú I

O sistema de controle de movimentação vertical, utilizando sistema de lastro variável foi por [1] considerado muito instável, fato que provocou a primeira adaptação no referido submersível, instalando-se propulsores para o controle de movimento vertical.

De acordo com [6], o primeiro passo para o projeto de um sistema de controle é a obtenção do modelo matemático do sistema que, pela teoria de controle envolvida, deve ser linear. No caso deste trabalho, este

modelo pode ser obtido para cada direção considerando-se as Eq. 1. Considerando-se, por exemplo, unicamente a direção de avanço e apenas o termo linear de amortecimento a função de transferência entre o deslocamento na direção X e a força propulsora é dada por:

$$\frac{x(s)}{F_{TX}(s)} = \frac{1}{[(m - X_{ii})s^2 + c_x s]}$$

(6)

onde: $x(s)$ é a transformada de Laplace de x

$F_{TX}(s)$ é a transformada de Laplace de F_{TX}

Sabe-se que, há um certo atraso entre o sinal de controle e a atuação real dos propulsores [8]. Para levar esse efeito em consideração introduziu-se entre o controlador e o atuador um atraso de primeira ordem, dado por:

$$\frac{F_{TX}(s)}{F_{TX'}(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (7)$$

onde $F_{TX'}(s)$ é a saída do controlador.

Admitiu-se neste trabalho que esta constante de tempo seja da ordem de 0,5 s.

A função de transferência do veículo para uma dada direção é de um sistema do tipo 1, isto é, apresenta um pólo na origem do plano s . Para aplicar o controle clássico neste tipo de sistema há que se observar que dentre as possíveis variações do controlador PID, o controlador PD é mais adequado, pois insere um amortecimento no sistema favorecendo sua estabilidade. Obviamente tenderá a apresentar um erro em regime permanente mas a utilização do termo integral para eliminar o erro exige cuidados adicionais pois ele insere mais um pólo na origem piorando a estabilidade do sistema em malha fechada.

A Fig. 2, mostra a estrutura de controle numa única direção, considerando a função de transferência do sistema e o atraso do propulsor.

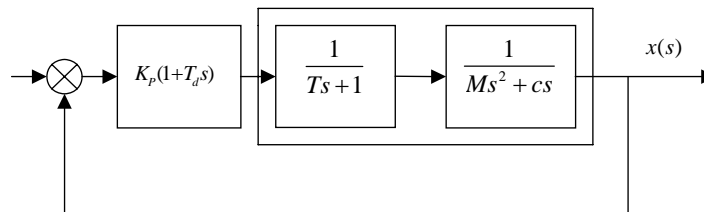


Fig. 2 – Estrutura de controle para uma única direção

Pode-se mostrar que para as demais direções o modelo matemático tem a mesma estrutura da direção de avanço e foi considerado o mesmo tipo de controlador.

Projeto do controlador O objetivo é desenvolver um sistema de controle para traquear uma dada trajetória, isto é, que o veículo persiga uma determinada trajetória definida ao longo do tempo. Será admitido que o movimento horizontal e o movimento vertical sejam desacoplados.

Para estimar os valores dos parâmetros destes controladores é efetuado um estudo individualizado para cada direção do movimento, ignorando-se os demais. O desempenho do controlador é então avaliado através de simulação dinâmica considerando-se o modelo completo do sistema. Para auxiliar a escolha dos melhores parâmetros é adotado um índice de erro baseado no erro de posição.

Projeto do controlador para o plano horizontal Na Fig. 3 é mostrado esquematicamente que o objetivo do veículo é perseguir a trajetória J , de tal modo que as coordenadas lineares do centro de gravidade do veículo coincidam com os pontos da trajetória e que o rumo seja tangente a ela.

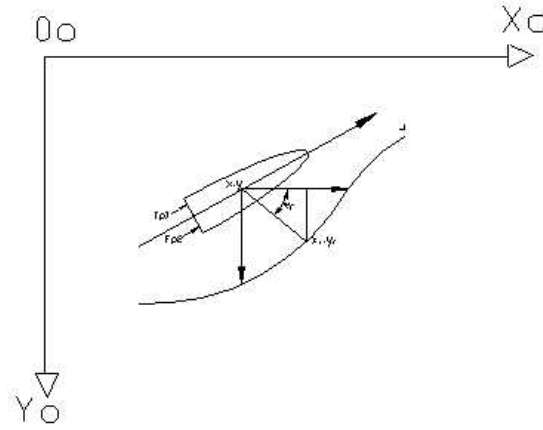


Fig. 3 - Representação das coordenadas da trajetória prevista com as coordenadas do veículo.

Nesta abordagem, se o centro de gravidade do veículo não coincidir com a trajetória, o controlador calculará as forças necessárias nas direções OX e OY em função dos erros nestas direções, respectivamente.

A lei de controle é baseada no erro de posição do centro de gravidade do veículo em relação à posição de referência no instante t

Sejam no instante t os respectivos erros nas direções OX_0 e OY_0 :

$$e_x = x_r - x$$

$$e_y = y_r - y$$

(8)

onde: x_r e y_r são as posições de referência e são definidas ao longo do tempo.

Para o controlador PD, as forças nestas direções são dadas por:

$$F_{TX} = K_{pX} (e_x + T_{dX} \frac{de_x}{dt})$$

(9)

$$F_{TY} = K_{pY} (e_y + T_{dY} \frac{de_y}{dt})$$

(10)

$$F_{TN} = K_{pN} (e_\psi + T_{d\psi} \frac{de_\psi}{dt})$$

(11)

onde: K_p é o ganho do controlador e T_d é a constante de tempo e,

A projeção destas forças no sistema de coordenadas móveis fixadas no veículo no sentido de avanço é dada por:

$$F_{PX} = F_{TX} \cos \psi + F_{TY} \sin \psi$$

(12)

Para o rumo será admitido que a sua referência será dada por:

$$\psi_r = \arctg \frac{y_r - y}{x_r - x}$$

(13)

O momento requerido é dado então por:

$$F_{TN} = K_{pN} (e_\psi + T_{d\psi} \frac{de_\psi}{dt})$$

(14)

Para o plano vertical a lei de controle é dada por:

$$F_{TZ} = K_{pZ}(e_z + T_{dZ} \frac{de_z}{dt}) \quad (15)$$

sendo, $e_z = z_r - z$ o erro na posição do centro de gravidade do veículo em relação à posição de referência no instante t na direção $0Z_0$.

onde: z_r é a posição de referência definida ao longo do tempo, isto é: $z_r = z_r(t)$

Alocação de Empuxo

Até então foram determinadas as forças requeridas nas direções de avanço e caturro e, do momento de guinada. Estes esforços devem ser realizados pelos dois propulsores a ré e os verticais instalados no submersível. O empuxo dos propulsores é dado por:

$$\begin{aligned} F_{P1} &= (F_{PX} + F_{TN}/h)/2 \\ F_{P2} &= (F_{PX} - F_{TN}/h)/2 \end{aligned} \quad (16)$$

onde F_{P1} e F_{P2} são respectivamente as forças dos propulsores 1 e 2 instalados a ré e, h é a distância entre o centro do propulsor e o eixo de rotação.

Para o plano vertical o empuxo dos propulsores é dado por:

$$F_{PZ} = F_{TZ} \quad (17)$$

Na Fig. 4 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de controle integrando-se o controlador, o alocador de empuxo ao VSNT-Jaú I.

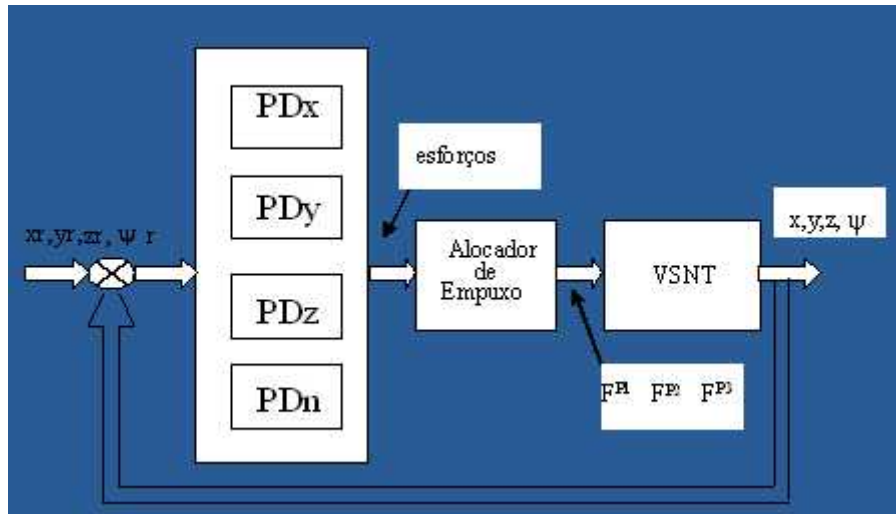


Fig. 4– Diagrama de blocos global do sistema de controle

Seleção dos Parâmetros de Controle

Para determinar os valores dos parâmetros dos controladores PD, que constituem-se em oito no total, ou seja,

K_p e T_d para cada uma dos quatro movimentos possíveis, admitiu-se inicialmente que tais movimentos sejam considerados completamente independentes e o seu modelo matemático linear. A função de transferência em malha aberta deste sistema para uma direção genérica é dada por:

$$\frac{x(s)}{e(s)} = \frac{K_p(1+T_d s)}{(Ts+1)} \frac{1}{s(M_G s + c)} \quad (18)$$

Onde $e(s)$ é a Transformada de Laplace do erro.

A função de transferência entre a saída e a referência para uma direção genérica é dada por:

$$\frac{x(s)}{x_r(s)} = \frac{K_p(1+T_d s)}{TM_G s^3 + (Tc + M_G)s^2 + (c + K_p T_d)s + K_p} \quad (19)$$

Os parâmetros do controlador foram selecionados através do método iterativo procurando observar a resposta do sistema considerando-se uma entrada degrau no sinal de referência. Para orientar a busca variou-se T_d dentro de uma determinada faixa e o ganho foi selecionado baseando-se no gráfico de lugar das raízes. Para cada par de parâmetros do sistema foi efetuada simulação dinâmica e procurou-se selecionar ganhos que apresentassem melhor tempo de resposta e sem sobresinal. Uma vez obtido os parâmetros do controlador para cada uma das direções verificou-se o desempenho de todo o sistema de controle através de simulação dinâmica considerando o modelo matemático completo e impondo uma determinada trajetória para o veículo. Para refinar o projeto de controle bem como avaliar a influência dos parâmetros definiu-se um índice de erro como:

$$I = \int_0^t (e_x^2 + e_y^2 + e_z^2 + e_\psi^2) d\tau \quad (20)$$

Os parâmetros do controlador foram selecionados de modo a minimizar este índice de erro. Para isto foram geradas algumas trajetórias ao longo do tempo com velocidade compatível com o sistema propulsor do VSNT-Jaú I, sendo que no caso foi adotado 0,1 m/s.

Cabe ressaltar que numa análise visual os parâmetros que minimizam o índice de erro não mostram necessariamente o melhor desempenho em termos de oscilações na perseguição da trajetória. Após séries de testes, buscando resultados adequados com o menor índice de erros possível, e com o melhor desempenho geral, adotou-se os valores mostrados na Tab. 2 para as constantes do controlador.

Tabela 2 - Constantes do controlador PD

Resultados da simulação com os parâmetros definidos na Tab. 2 estão mostrados nas Fig. 5. A Fig. 5a representa o comportamento do submersível diante da trajetória proposta. Observa-se de uma maneira geral, que o desempenho do controlador é satisfatório porque o VSNT-Jaú I acompanha a trajetória de referência. Na Fig. 5b é mostrado o movimento vertical, onde se observa durante a descida um erro entre a trajetória de referência e a trajetória real. Observa-se também que o erro de posição é nulo quando a cota fica constante. Estas ocorrências eram esperadas uma vez que o sistema é do tipo 1. Na Fig. 5c onde é demonstrado o comportamento do submersível no plano horizontal, nota-se uma boa aderência, exceto quando há mudança de direção. Os gráficos das Fig. 5d e 5e mostram a evolução da trajetória de referência e a real ao longo do tempo respectivamente para X e Y, demonstrando um bom comportamento apesar de um certo erro, principalmente quando há variação de referência ao longo do tempo. O erro relativo para X é de 2,5% (para X=25m) e para Y o erro relativo é de 10% (para Y=3m). A Fig. 5f apresenta o comportamento do submersível relativo ao movimento de guinada, cujo ângulo de referência é dado pela Eq. 13. Pela figura observa-se que os movimentos previstos na trajetória de referência foram perseguidos satisfatoriamente. O empuxo requerido para cada um dos propulsores é mostrado pela Fig. 5g. Nota-se que o empuxo médio é da ordem de 3,5N e nos pontos de guinada ocorre uma variação intensa, chegando a valores máximos da ordem de 6N, estando tais valores dentro dos parâmetros esperados.

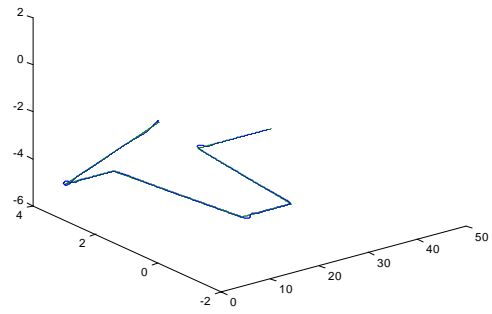
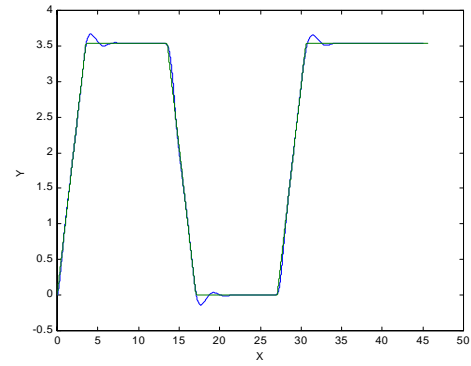
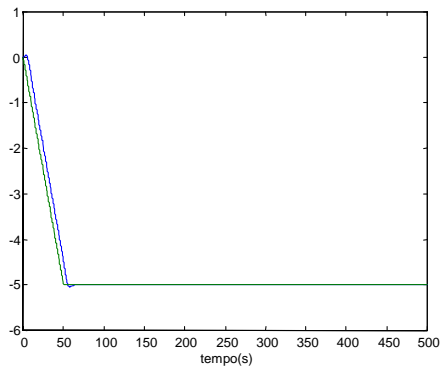


Fig. 5a Comportamento geral diante da trajetória proposta



verde: referência; azul: real

Fig. 5b Movimento Vertical

Fig.5c Movimento Horizontal

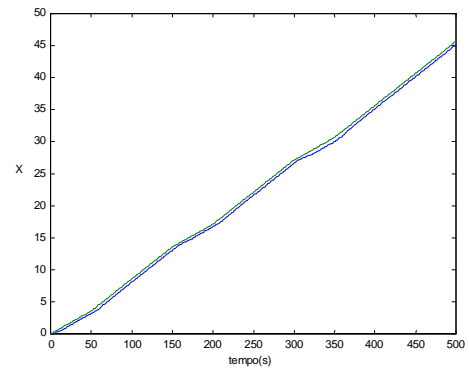
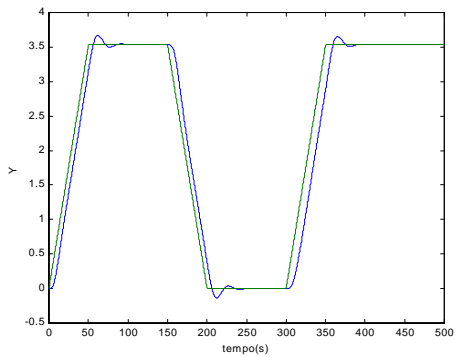


Fig. 5d Movimento na direção OX

Fig. 5e Movimento na direção OY

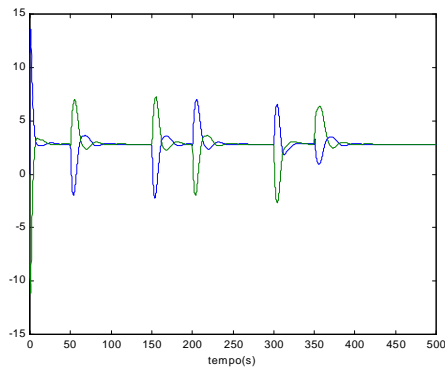


Fig. 5f Movimento de guinada

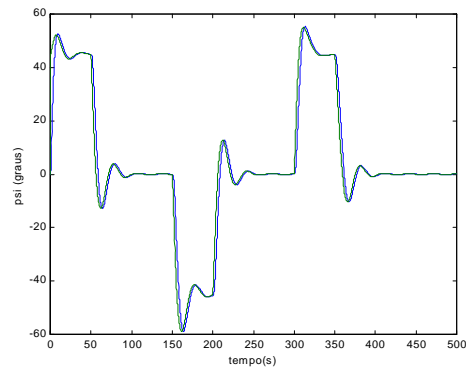


Fig. 5g Empuxo dos propulsores

Outras trajetórias também foram submetidas ao controlador que igualmente demonstrou bom desempenho.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudados procedimentos para implantação de um sistema de controle para um submersível não tripulado tomando-se como exemplo o VSNT–Jaú I, cujo equipamento foi projetado para uso no meio fluvial. O modelo matemático desenvolvido requer entre outros parâmetros, coeficientes de amortecimento e de massa adicional, que são difíceis de serem obtidos analiticamente. Desta foram optou-se por estimá-los através de ensaios de decaimento utilizando-se um modelo reduzido do submersível. O sistema de controle utilizado é baseado na teoria clássica de controlador tipo PID. O desempenho do controlador foi avaliado através de simulações dinâmicas impondo-se o acompanhamento de uma trajetória tridimensional definida ao longo do tempo.

O desempenho global do controlador pode ser considerado satisfatório uma vez que houve aderência à trajetória de referência. No entanto, conforme era de se esperar, o sistema de controle não elimina erro de posição quando há variação contínua da referência, mormente quando a velocidade da mudança da referência é aumentada. Desta forma o desempenho do controlador é melhorado para variações lentas da referência. Como indicação para trabalhos futuros, estudos complementares poderão ser realizados levando-se em conta, como por exemplo: a inclusão da corrente, a influência do umbilical na dinâmica do submersível, a aplicação de outras leis de controle para averiguar se há, eventualmente, ganhos de desempenho, bem como o sistema de propulsão que merece um estudo detalhado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMORIM, A.E.A. et al., Relatório anual do Projeto VSNT–Jaú I. Jaú: Fatec-Jahu-CEETEPS.1997.
2. ARANHA, J.A.P. et al., Full Scale Decay Test of the Tanker: field data and theoretical analysis. Ocean Engineering, n.26, p.125-145, 1999.
3. FAIRBROTHER, H.N.R.; STACEY, B.A. Aspects of Remotely Operated Vehicle Control – A Review. Society for Underwater Technology, v. 19, n. 1, spring 1993.
4. FOSSEN, T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Imprenta Chichester. New York: Wiley, c1994. 480p.
5. HSU L. et al, Design of New High Performance vs Position Control of ROVs. Edinburgh, U.K.: Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference. 1991. p. 53-60
6. OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1998. 324p.
7. SORANI L.A. Estudo da Dinâmica e Controle de um Submersível Não Tripulado para Uso no Ambiente Fluvial. 2002. 81p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) EPUSP, São Paulo.
8. YOERGER, D.R.; COOKE, J.G.; SLOTINE, J.E. The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation Into Control System Design. IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 15, n. 3, July 1990.