

NE
seg.
Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia Mecânica

The seal of the Escola Politécnica da USP is a large, circular emblem. It features a central profile of a classical figure, likely Minerva, facing right. The figure wears a helmet with a plume and a breastplate. The background of the seal is filled with horizontal lines. The entire seal is surrounded by a decorative border of acanthus leaves and scrolls.

ISSN 1517-3534

BT/PME/0716

**Controle Robusto Multivariável para
um Veículo Submersível Autônomo**

**Juan Carlos Cutipa Luque
Decio Crisol Donha**

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia Mecânica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Mecânica

Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros

Vice-Diretor: Prof. Dr. José Roberto Cardoso

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni

Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Amilton Sinatora

Conselho Editorial:

Prof. Dr. Décio Crisol Donha

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

Prof. Dr. Celso Pupô Pesce

Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese

Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho

Coordenador Técnico:

Prof. Dr. Décio Crisol Donha

Suplente: Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

Esta é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia Mecânica, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade

A partir de janeiro de 2007, o Boletim Técnico do Departamento de Engenharia Mecânica estará disponível no sítio abaixo, que já se encontra ativo:
<http://www.pontocomm.com.br/pme/05pesq/index.htm>

Informamos ainda que a versão impressa a partir de maio de 2007 só será enviada a pedido dos interessados.

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia Mecânica

ISSN 1517-3534
BT/PME/0716

**Controle Robusto Multivariável para
um Veículo Submersível Autônomo**

Juan Carlos Cutipa Luque
Decio Crisol Donha



Escola Politécnica - EPBC



31200054192

São Paulo - 2007

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado profissional por Juan Carlos Cutipa Luque, "Controle Robusto Multivariável para um Veículo Submersível Autônomo", sob a orientação do Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta, defendida em 02/03/007, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica/USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

1634713

Cutipa Luque, Juan Carlos

Controle robusto multivariável para um veículo submersível autônomo / Juan Carlos Cutipa Luque, Decio Crisol Donha. -- São Paulo : EPUSP, 2007.

13 p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica ; BT/PME/0716)

1. Submersíveis não tripulados 2. Sistemas de controle 3. Controle ótimo I. Donha, Decio Crisol II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III. Título IV. Série
ISSN 1517-3534

Controle Robusto Multivariável para um Veículo Submersível Autônomo[∅]

Multivariable Robust Control for an Autonomous Underwater Vehicle

Juan Carlos Cutipa Luque

jccluque@ieee.org

Decio Crisol Donha

decdonha@usp.br

Departamento de Engenharia Mecânica - EPUSP.
Av. Prof. Mello Moraes 2231, CEP 05508-900 - São Paulo, SP - Brasil

Resumo. Este trabalho trata do controle dos movimentos de um Veículo Submersível Autônomo (VSA). Veículos submersíveis são difíceis de controlar devido à alta não linearidade de seus modelos, ao forte acoplamento de movimentos, ao desconhecimento de certas dinâmicas, às incertezas do próprio modelo, perturbações e devido ao ruído de sensores. A dificuldade de controle pode ser exacerbada quando o veículo é sub-atuado. Para realização deste trabalho foi escolhido um VSA do tipo torpedo, considerando-se seis graus de liberdade (GL). A técnica da sensibilidade mista $\mathcal{H}_\infty$ foi usada, obtendo controladores centralizados capazes de superar o problema do forte acoplamento de movimentos. Nesta abordagem, formatam-se algumas funções de malha fechada ligadas a sensibilidade do sistema buscando garantir estabilidade e desempenho robustos. Os controladores desenvolvidos foram testados em simulações numéricas, produzindo uma grande quantidade de resultados. A análise destes resultados revela o poder e a flexibilidade das técnicas implementadas.

Palavras-chaves: Controle Robusto Multivariável, Veículos Submersíveis Autônomos, Sensibilidade Mista $\mathcal{H}_\infty$

Abstract. This paper focuses the motion control of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV). Underwater vehicles are difficult to control due to high non-linearities of its model, coupling between dynamics, unknown dynamics, model uncertainties, disturbances and sensor noises. Difficulty is greater, when the system is subactuated. In this work, a torpedo-like AUV was chosen, considering six degree of freedom (DOF). A $\mathcal{H}_\infty$ mixed sensitivity approach was used in the syntheses stage, leading to a centralized controller able to deal with all difficulties appointed above. This control approach is based on the shapping of well known closed-loop sensitivity functions, seeking to achieve stability and performance robustness. The controller developed where tested in a number of numerical simulations. Analyses of results reveals the power and flexibility of the implemented techniques.

Keywords: Multivariable Robust Control, Autônomos Underwater Vehicles, $\mathcal{H}_\infty$ Mixed Sensitivity

1. Introdução

Atividades submarinas para a exploração de recursos marinhos, pesquisas biológicas e aspectos relativos à segurança nacional dos países têm levado ao estudo e ao desenvolvimento de diversos tipos de veículos submersíveis de pequeno porte. O potencial tecnológico e econômico dos veículos submersíveis autônomos é apreciável, principalmente, em atividades como busca e prospecção de petróleo e gás natural em águas profundas, coleta de dados para pesquisas relacionadas ao meio-ambiente e à biologia marinha, inspeção de grandes estruturas flutuantes ou subaquáticas além da atuação em missões militares. Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para o controle destes veículos. Aplicações na indústria usam técnicas de controle clássico pela sintonia fácil dos parâmetros do controlador. Outras alternativas utilizam controladores de movimento de forma desacoplada (MCEWEN, 2002; SILVESTRE; PASCOAL, 2005). Porém, no ambiente marinho real, estão presentes distúrbios em forma de ondas e correntezas. Estes distúrbios, além dos ruídos dos sensores de navegação e incertezas do modelo, deterioram a estabilidade e o desempenho do sistema. Portanto, é necessário projetar um Controlador Robusto que garanta especificações de estabilidade

[∅] Artigo extraído da dissertação: "Controle Robusto Multivariável para um Veículo Submersível Autônomo", de Juan C. C. Luque, apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo sob a orientação do Prof. Dr. Decio Crisol Donha.

e desempenho, mesmo em condições muito adversas.

No que se refere à aplicação de Controle Robusto em veículos submersíveis podem-se destacar trabalhos como os de Silvestre e Pascoal (2005) e Whitcomb (2000). Nestes trabalhos, a dinâmica do submersível é dividida em subsistemas de ordem reduzida. Um projeto de controle que envolve a dinâmica completa do modelo demandaria naturalmente maior esforço.

(LOGAN, 1993) contribuiu significativamente na aplicação de Controle Robusto para VSAs ao fazer a comparação entre duas técnicas muito bem conhecidas, o Controle $\mathcal{H}_\infty$ e o Controle por *Modos Deslizantes* (*Sliding Mode*), concluindo que ambas técnicas demandam muito esforço em sistemas multivariáveis, com forte acoplamento, porém os modos deslizantes seriam mais simples de se projetar para sistemas escalares. Entre os trabalhos de Controle Robusto que seguem a linha de modos deslizantes encontram-se Healey e Lienard (1993), Song, An e Smith (2002) e Souza (2003).

O objetivo deste trabalho é projetar um Controlador Robusto Multivariável centralizado para controlar os seis graus de liberdade de um veículo submersível autônomo, garantindo especificações de estabilidade e desempenho robustos, apesar de distúrbios de correntezas, ruídos nos sensores e as incertezas de modelagem. A metodologia a usar é a técnica de sensibilidade mista $\mathcal{H}_\infty$.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: inicialmente apresentam-se as principais características do veículo, desde as suas dimensões até a representação do modelo dinâmico do veículo. Em seguida, é exposta a metodologia de Controle Robusto. Após as simulações feitas, mostram-se os resultados mais relevantes que levam à conclusão do trabalho.

2. Características e Modelo Dinâmico do VSA

Nesta seção descreve-se o modelo matemático do VSA. Primeiramente, descrevem-se as características principais do veículo. O VSA tem a forma de charuto, com um comprimento total de 5,99 metros, um diâmetro de 0,624 metros e um deslocamento submerso de 14000N. É movimentado pela ação de um propulsor e dois lemes para manobras de *guinada* e *submersão*. A variação do ângulo do leme vertical (δ_r) permite a realização de manobras de *guinada* e a variação do ângulo do leme horizontal (δ_s) permite a realização de manobras de *submersão*.

O modelo não linear do veículo submersível está bem exposto em Donha e Luque (2006), com seis equações da hidrodinâmica do submersível e seis equações de transformação de coordenadas. A figura 1 mostra os dois referenciais usados nesta modelagem, o referencial fixo e o referencial móvel, define a nomenclatura e os símbolos utilizados. A figura 2 mostra a movimentação dos lemes. Todos os valores numéricos dos coeficientes hidrodinâmicos do modelo não linear estão em Canhetti (1998).

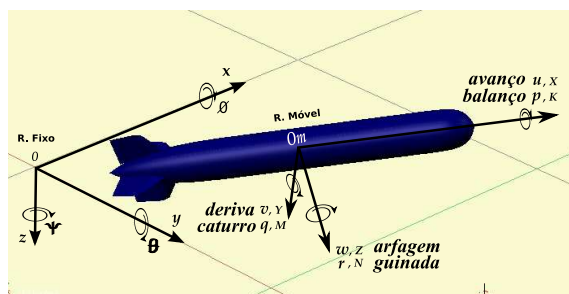


Figura 1. Sistema de Coordenadas

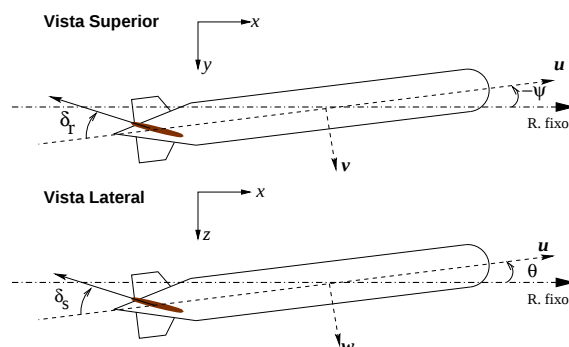


Figura 2. Movimento dos lemes

O modelo não linear do VSA foi linearizado usando a expansão em *Séries de Taylor*. O ponto de linearização escolhido foi na velocidade de cruzeiro do submersível ($u=2\text{m/s}$), o que levou a expressar o modelo linear para o veículo submersível autônomo:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), x(t_0) = x_o \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{1}$$

Onde A é a matriz de estados de dimensão (8×8) , B é a matriz de controle de dimensão (8×2) , C é a matriz do observador de dimensão (4×8) e a matriz D , de dimensão (4×4) ¹. $x(t)$ é o vetor de estados, $u(t)$ é o vetor de entradas, $y(t)$ é o vetor de observações, e $x(t_0)$ é a condição inicial do sistema. A seguir descrevem-se cada um destes elementos.

¹Os valores numéricos estão no anexo.

vetor de estados:

$$x = \begin{bmatrix} u & - & \text{m/s} & - & \text{veloc. de } \textit{avanço} \\ v & - & \text{m/s} & - & \text{veloc. de } \textit{deriva} \\ w & - & \text{m/s} & - & \text{veloc. de } \textit{arfagem} \\ p & - & \text{rad/s} & - & \text{veloc. de } \textit{balanço} \\ q & - & \text{rad/s} & - & \text{veloc. de } \textit{caturro} \\ r & - & \text{rad/s} & - & \text{veloc. de } \textit{guinada} \\ \phi & - & \text{rad} & - & \text{ângulo de } \textit{balanço} \\ \theta & - & \text{rad} & - & \text{ângulo de } \textit{caturro} \end{bmatrix} \quad (2)$$

vetor de entradas:

$$u = \begin{bmatrix} \delta_r & - & \text{rad} & - & \text{leme horizontal} \\ \delta_s & - & \text{rad} & - & \text{leme vertical} \end{bmatrix} \quad (3)$$

vetor de observações:

$$y = \begin{bmatrix} \phi & - & \text{rad} & - & \text{ângulo de } \textit{balanço} \\ \theta & - & \text{rad} & - & \text{ângulo de } \textit{caturro} \\ \dot{\psi} & - & \text{rad/s} & - & \text{veloc. de } \textit{guinada} \\ \dot{z} & - & \text{m/s} & - & \text{veloc. de } \textit{submersão} \end{bmatrix} \quad (4)$$

A figura 3 mostra o sistema Linear Invariante no Tempo (LIT) acoplado resultante, onde as entradas são os lemes, vertical e horizontal, respectivamente. As variáveis observadas são: *balanço*, *caturro*, velocidade de *guinada* e velocidade de *submersão*. Um controlador PID simples foi projetado para garantir a velocidade de *avanço* constante ($u=2\text{m/s}$) em regime permanente.



Figura 3. Modelo linear do VSA.

Para facilitar o projeto do controlador, as entradas do controlador são normalizadas considerando a saturação física dos atuadores: 30° para o leme vertical (δ_r) e 25° para o leme horizontal (δ_s). De acordo com Logan (1993), também devem ser normalizadas considerando o máximo erro de acompanhamento do sinal de referência: 10° para os ângulos de *balanço* (ϕ) e *caturro* (θ), $10^\circ/\text{s}$ para a velocidade de *guinada* ($\dot{\psi}$), e 1m/s para a velocidade de *submersão* ($\dot{z}$). Assume-se também que o máximo valor esperado do erro para as velocidade de *avanço* (u), *deriva* (v) e *arfagem* (w) é de 1m/s , o erro máximo para as velocidades angulares de *balanço* (p), *caturro* (q) e *guinada* (r) é de $10^\circ/\text{s}$. Em seguida, obtém-se as matrizes para o modelo linear normalizado:

$$A = S_x \cdot A \cdot S_x^{-1} \quad B = S_x \cdot B \cdot S_u^{-1} \quad C = S_y \cdot C \cdot S_x^{-1} \quad D = S_y \cdot D \cdot S_u^{-1} \quad (5)$$

Após a normalização, o modelo em espaço de estados, usado no projeto do controlador, é expressado como segue (DONHA, 2003):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t), x(t_o) = x_o \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t) \end{aligned} \quad (6)$$

onde $x(\cdot)$ é o vetor de estados, $x(t_o)$ é o vetor da condição inicial do sistema, t é o tempo; $u(\cdot)$ é o vetor de entrada, $w(\cdot)$ é o vetor de distúrbio, $z(\cdot)$ é o vetor de controle e $y(\cdot)$ é o vetor de estados observados.

3. Síntese do Controlador

A estratégia usual em sistemas de controle moderno para caracterizar os objetivos de desempenho é medir certas matrizes de transferência em malha fechada usando diversas normas de matrizes (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 1996). Essas normas estabelecem uma medida da magnitude dos sinais de saída que

podem-se obter a partir dos sinais de entrada, que é uma medida do ganho em sistemas. A norma $\mathcal{H}_\infty$ é uma norma muito conveniente para medir a matriz de transferência em malha fechada, e é definida por:

$$\|N_{zw}\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \bar{\sigma}(N_{zw}(j\omega)) \quad (7)$$

onde $\bar{\sigma}(N_{zw}(j\omega))$ é o supremo do valor singular máximo de N_{zw} em todo o domínio ω .

Existem muitas maneiras de formular o problema de controle e consequentemente a seleção de funções de ponderação relacionadas com as especificações de desempenho (DONHA; KATEBI, 2004). Um das estratégias mais usadas é a Sensibilidade Mista, que consiste na limitação de certas funções de ponderação, tal como: a sensibilidade do sistema $S(s) = (I + GK(s))^{-1}$, a sensibilidade do controlador $C(s) = KS(s)$ ou a sensibilidade complementar do sistema $T(s) = I - S(s)$.

A figura 4 ilustra a representação padrão de dois portos, configuração usada na síntese do controlador, onde G é a planta nominal do veículo, K é o controlador, W_* são as funções de ponderação, $\tilde{r}$ é o vetor de referência, $\tilde{d}_i$ é o vetor de distúrbios de entrada, $\tilde{d}$ é o vetor de distúrbios de saída, e $\tilde{n}$ é o vetor de ruídos do sensor. N_{zw} é a matriz de transferência de malha fechada com o controlador entre w e z , onde $w = [\tilde{r} \ \tilde{d}_i \ \tilde{d} \ \tilde{n}]^T$ é o vetor de entradas exógenas do sistema, e $z = [\tilde{e} \ \tilde{u} \ \tilde{y}]^T$ é o vetor de saídas do sistema.

O primeiro passo para a síntese do controlador $\mathcal{H}_\infty$ consiste em minimizar o índice de desempenho: neste caso formulado como segue:

$$\|N_{zw}\| = \left\| \begin{bmatrix} W_S S \\ W_C C \\ W_T T \end{bmatrix} \right\|_\infty < \gamma \quad (8)$$

onde γ é um numero real associado ao problema de controle ótimo.

A ponderação W_S feita sobre $S(s)$ determinará o bom acompanhamento do sinal de referência e a atenuação dos distúrbios, a ponderação W_C feita sobre $C(s)$ limitará a ação do controle em alta frequência, a ponderação W_T sobre T limitará a banda passante do sistema em malha fechada e impõe um decaimento (*roll off*) adequado a $T(s)$.

Assumindo que as matrizes envolvidas satisfazem as condições de detectabilidade e estabilizabilidade (ZHOU; DOYLE; GLOVER, 1995), existe um controlador ótimo $K(s)$ que satisfaz:

$$\|N_{zw}\|_\infty \leq \gamma, \quad (9)$$

dado por Skogestad e Postlethwaite (1996):

$$K_c(s) = \left[\begin{array}{c|c} A_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ \hline F_\infty & 0 \end{array} \right] \quad (10)$$

onde:

$$F_\infty = -B_2^T X_\infty, \quad L_\infty = -Y_\infty C_2^T, \quad Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}, \quad (11)$$

$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2, \quad (12)$$

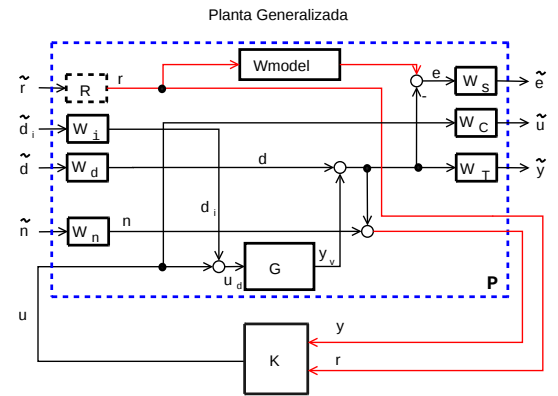
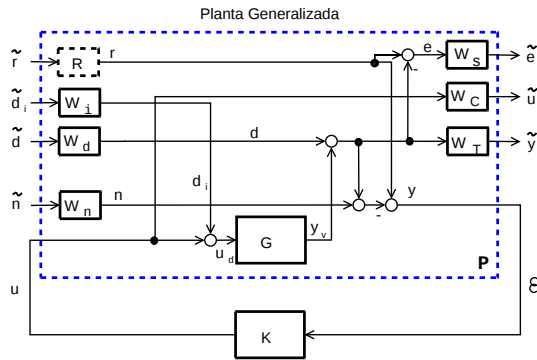
X_∞ e Y_∞ são soluções das equações algébricas de Ricatti, respectivamente ao problema de controle e ao problema de estimação.

O segundo passo do controle $\mathcal{H}_\infty$ consiste na busca de parâmetros das diversas funções de ponderação (ZHOU; DOYLE; GLOVER, 1995; SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 1996).

3.1 Controlador de dois graus de liberdade (2-GL)

É comum observar em sistemas multivariáveis com grande número de graus de liberdade, que as especificações de desempenho como rejeição de distúrbios e bom *tracking* não sejam atingidas simultaneamente com total sucesso (DONHA; LUQUE, 2006). Portanto, outras estruturas devem ser investigadas para minimizar ou eliminar estes problemas, principalmente no caso de sistema sub-atuados, como é o caso em este estudo.

A figura 5 mostra uma estrutura alternativa, onde K é um controlador de dois graus de liberdade (2-GL) com a seguinte estrutura $K = [K_y \ K_y]^T$. A vantagem em usar um controlador 2-GL, também usado por Lundström, Skogestad e Doyle (1999), é melhorar o *tracking* e as especificações da resposta temporal do



sistema. O prefiltro K_r é destinado à atingir as especificações no regime temporal, enquanto K_y garante a estabilidade do sistema. E eventualmente, pode-se forçar o atendimento de especificações em frequência através de W_{model} , ajustando-o a um sistema de segunda ordem. Após estas modificações, o procedimento da síntese do controlador 2-GL segue os mesmos passos da síntese do controlador de um grau de liberdade antes descrito.

Especificações de projeto

As especificações do projeto são sumarizadas nos seguintes itens:

- E1** Estabilidade em malha fechada
E2 $\bar{\sigma}(S) < 1$ para $\omega < 0,7rad/s$
E3 $\bar{\sigma}(T) < 1$ para $\omega > 2rad/s$
E4 $\bar{\sigma}(C) < 1$ para $\omega > 7rad/s$
E5 resposta temporal ao degrau

Tabela 1. Resposta do sistema, assumindo um tempo de acomodação $T = 4\tau$

Sinal controlado	Ultrapassagem percentual	Tempo de assentamento	$1/\tau$
<i>balanço</i>	20%	20s	0,2
<i>caturro</i>	10%	20s	0,2
<i>veloc. de guinada</i>	10%	20s	0,2
<i>veloc. de submersão</i>	10%	80s	0,05

3.2 Guiagem do VSA

O sistema de guiagem é encarregado de guiar o veículo até um alvo ou acompanhar uma trajetória desejada, utilizando para este propósito a leitura das variáveis (x , y e z) e transformações cinemáticas, gerando o sinal de comando para as variáveis a serem controladas. O Controlador Robusto aciona as superfícies de controle (lemes), a partir dos sinais observados no sistema. A velocidade de *avanço* deve permanecer constante (2 m/s) em todo o trajeto.

De acordo com a figura 6, duas variáveis são necessárias para conseguir movimentar o veículo no espaço 3D submarino: a velocidade de *guinada* e a velocidade de *submersão*.

No movimento planar, a missão do veículo é acompanhar uma determinada trajetória, construída a partir de alvos desejados representados pelo par $[x_d(k), y_d(k)]$, onde $k = 1, 2, \dots, N$ definem a linha de visão ou LOS (*Line of Sight*) para a guinada (HEALEY; LIENARD, 1993). Pode-se usar essa mesma estratégia, neste caso particular, para obter o sinal de mando da velocidade de *guinada*, como segue:

$$\dot{\psi}_d(t) = \frac{d}{dt} \{\psi_d(t)\} \quad (13)$$

onde,

$$\psi_d(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y_d(k) - y(t)}{x_d(k) - x(t)} \right). \quad (14)$$

Através da velocidade de *guinada* ($\dot{\psi}_d$) e da velocidade de *submersão* $\dot{z}$ é possível manobrar o VSA no espaço tridimensional submarino.

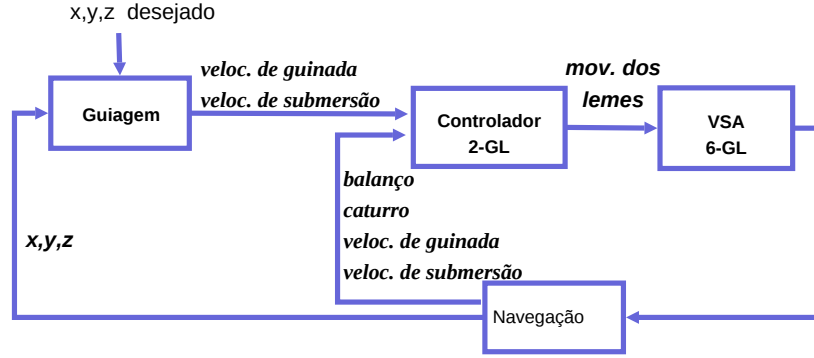


Figura 6. Guiagem e Controle para o VSA.

4. Resultados

Primeiramente, procede-se à validação do modelo linear para viabilizar a utilização da metodologia $\mathcal{H}_\infty$ no desenvolvimento do Controlador Robusto. Em seguida, são desenvolvidos dois controladores centralizados capazes de controlar o sistema dinâmico não linear do VSA. Faz-se a análise nos domínios de frequência e tempo. A partir do controlador 2-GL implementada-se a guiagem do veículo.

4.1 Análise do Modelo Linear do VSA

O modelo linear foi desenvolvido por linearização ao redor da velocidade de *avanço* ($u = 2$ m/s). O modelo linear é expresso pelas matrizes A, B, C e D, de onde pode-se avaliar as características dinâmicas do veículo submersível como: o acoplamento entre suas dinâmicas, resposta em frequência, oscilações e instabilidade.

Tabela 2. Pólos do Sistema Linear Invariante no Tempo

Descrição	Pólos	Frequência (rad/s)
arfagem/caturro (oscilação)	$-0,429 \pm 0,311i$	0,53
caturro	-0,141	0,141
balanço (oscilação)	$0,0306 \pm 0,918i$	0,918
deriva/balanço (oscilação)	$-0,119 \pm 0,322i$	0,343
velocidade de avanço	-0,324	0,324

Os pólos do sistema não controlado de dimensão 8 são dados na tabela 2, observa-se que o modelo linear desenvolvido para o VSA é instável.

Na figura 7 são ilustradas as magnitudes dos autovetores relativamente ao acoplamento dinâmico do sistema. Pode-se observar o forte acoplamento entre os movimentos de *arfagem/caturro* (figura 7(a)), *deriva/balanço* (figura 7(b)). O acoplamento *deriva/balanço* é frequente em veículos marítimos através das variáveis (ϕ e ψ), por isso sistemas mais complexos usam técnicas de estabilização de *balanço* (*roll stabilization*) para contrapor este efeito, (FOSSEN, 1994).

A possível causa de instabilidade do movimento de *balanço* é associada ao momento de *Munk*. O momento de *Munk* tende a desestabilizar o veículo, colocando-o na direção perpendicular em relação ao fluxo, a razão é a localização assimétrica dos pontos de estagnação (TRIANTAFYLLOU; HOVER, 2003).

A figura 8 mostra o gráfico dos valores singulares do sistema em malha aberta, onde percebe-se a característica de uma função estritamente própria com frequência de cruzamento de 1 rad/s.

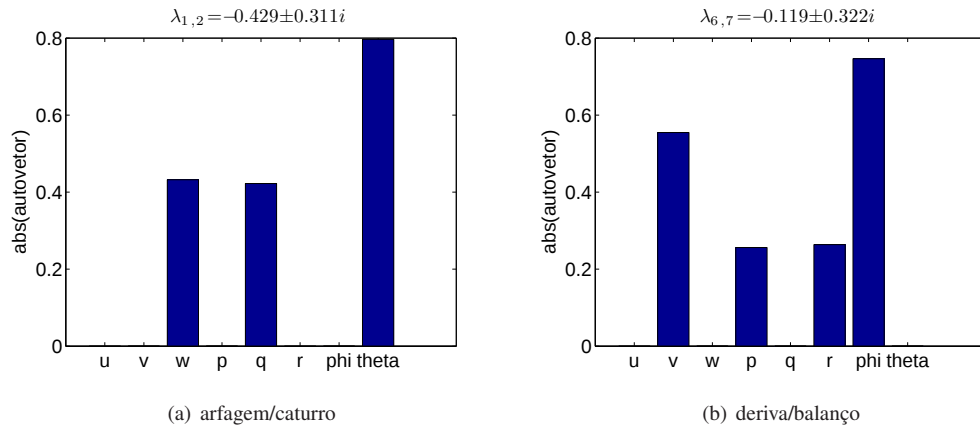


Figura 7. Magnitude dos autovetores associados a seus autovalores correspondentes λ_*

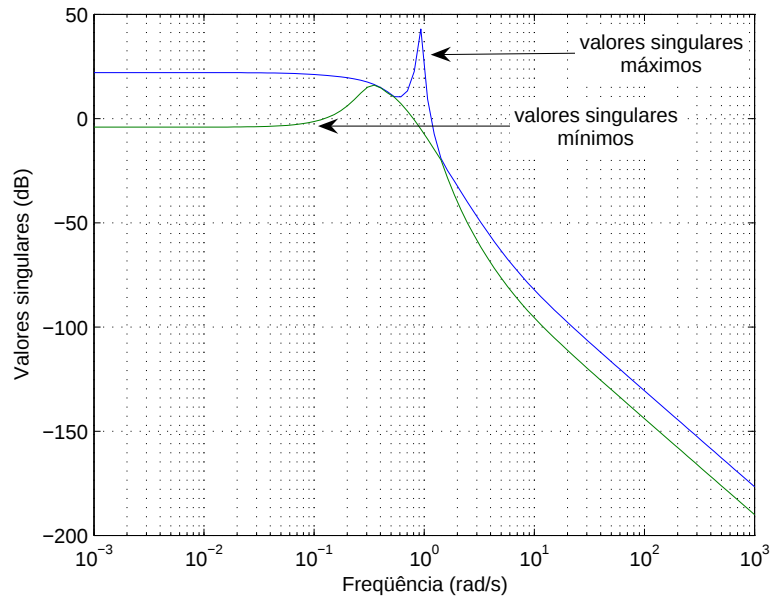


Figura 8. Valores Singulares de $G(s)$ em malha aberta.

4.2 Sistema Controlado

A abordagem do projeto do controlador foi exposta na seção anterior. As quatro variáveis acopladas (ϕ , θ , $\dot{\psi}$ e $\dot{z}$) a serem controladas centralizadamente são avaliadas tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. Com as funções de ponderação, descritas no anexo, foi atingido um gamma subótimo de 1.5, o que indica um grau de robustez adequado, considerando-se a complexidade do problema.

A figura 9 mostra a sensibilidade S do sistema controlado. **E2** para o *balanço* e o *caturo* não foi garantida. **E2** para as velocidades de *guinada* e *submersão* foi garantida. A figura 10 mostra a sensibilidade complementar do sistema T . Neste caso, **E3** foi garantida para todos os sinais controlados. Também é importante observar que os sinais relativos às velocidades de *guinada* e *submersão* estão abaixo de -150dB , $\forall \omega$, indicando a possível causa de porquê o sistema ser subatuado. A figura 11 mostra a sensibilidade do controlador C do sistema controlado, o frequência de cruzamento (Amplitude=0dB) para os lemes é de 6, 5rad/s e 3, 98rad/s, respectivamente, o que garante **E4**.

A resposta no domínio do tempo pode ser avaliada utilizando o sinal degrau unitário. A figura 12 mostra esses resultados, observa-se que a estabilidade está bem garantida. De fato, no sistema sub-atuado o acoplamento de certas dinâmicas ainda está fortemente presente (*balanço*/velocidade de *guinada* e *caturo*/velocidade de *submersão*). Porém, esses acoplamentos adquirem pouca importância em veículos não tripulados, sempre que a estabilidade e o desempenho estejam garantidos. Estas respostas mostram que a especificação **E1** é totalmente garantida, porém, o desempenho do sistema foi comprometido, portanto **E5** não poderá ser garantido.

O controlador 2-GL é projetado com o objetivo de garantir a robustez do sistema tanto em estabilidade quanto em desempenho, através do préfiltro R e com as especificações dadas em **E5** foram obtidas respostas mais rápidas e suaves em comparação com o controlador de um grau de liberdade. A figura 13 mostra o bom acompanhamento do sinal degrau 0,5 em todos os sinais controlados no sistema. Assim, o controlador 2-GL garante todas as especificações (**E1**, **E2**, **E3**, **E4** e **E5**) do projeto do controlador para o sistema subatuado.

A guiagem do VSA é muito boa e os resultados mostram bom acompanhamento dos sinais desejados. As figuras 14(a) e 14(b) mostram o acompanhamento de uma trajetória circular e o movimento dos lemes do VSA, respectivamente. As figuras 14(c) e 14(d) mostram o acompanhamento de uma trajetória zig-zag e o movimento dos lemes, respectivamente. Podem-se gerar inúmeros resultados relativos ao acompanhamento de trajetórias, gerando-se até trajetórias espaciais como a figura (figura 14(f)), onde fica evidente o bom desempenho do controlador.

5. Conclusão

Neste trabalho dois controladores centralizados foram projetados a partir do modelo do veículo submersível em 6-GL. Ambos foram projetados para controlar a dinâmica do sistema em seus seis graus de liberdade. O primeiro controlador (estrutura de 1-GL) mostrou ser muito conservador em relação ao segundo, com uma deficiência no *tracking*, mas em compensação é bem estável. O segundo Controlador garantiu, além da estabilidade, o bom desempenho do sistema. Conseqüentemente, a guiagem é feita a partir do segundo controlador (estrutura de 2-GL), as respostas indicam o bom acompanhamento de trajetórias. A estabilidade e desempenho robustos foram analisadas a partir dos gráficos de sensibilidade do sistema controlado, até que fossem encontrados parâmetros que satisfizessem as especificações. Em seguida comprovou-se a resposta do sistema no domínio do tempo, os gráficos também avaliam a estabilidade e desempenho robustos. As dinâmicas de balanço e guinada são fortemente acopladas, e ao não contar com atuadores independentes para esses movimentos o VSA é sub-atuado. O projeto do Controlador $\mathcal{H}_\infty$ demandou muito esforço na busca de parâmetros das funções de ponderação para um sistema sub-atuado e provavelmente é maior dificuldade a ser enfrentada por projetistas que utilizem esta técnica.

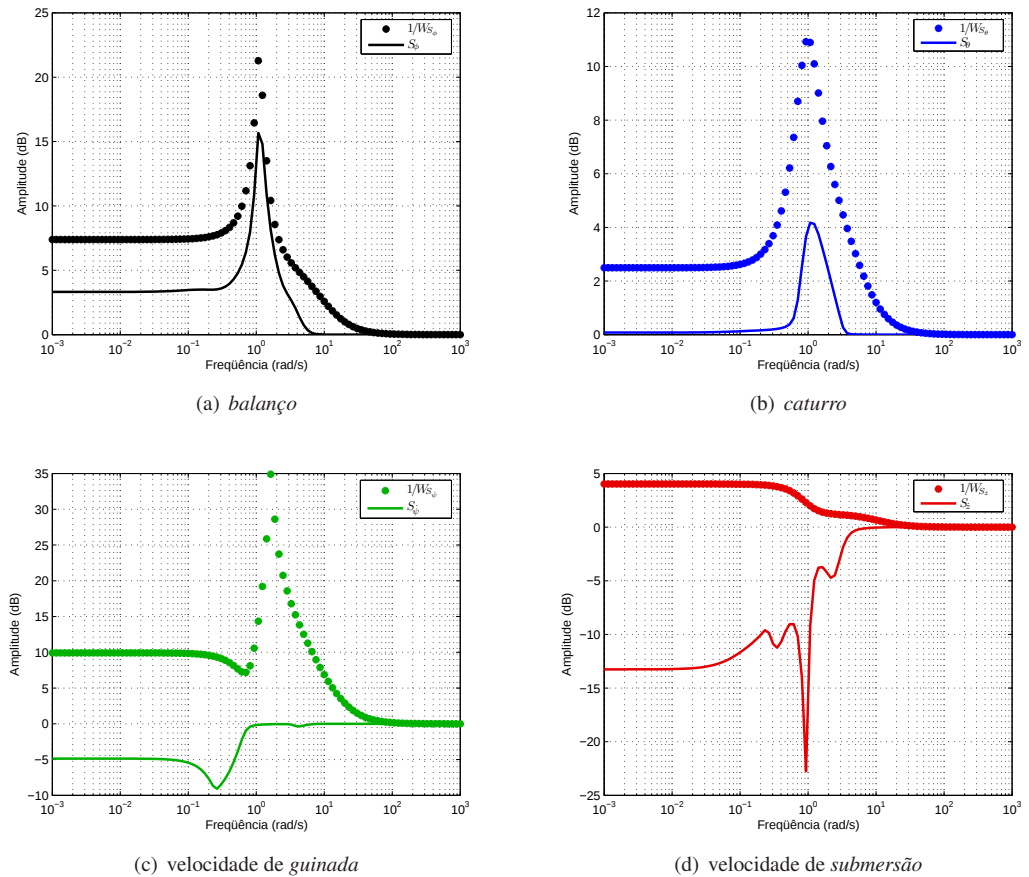
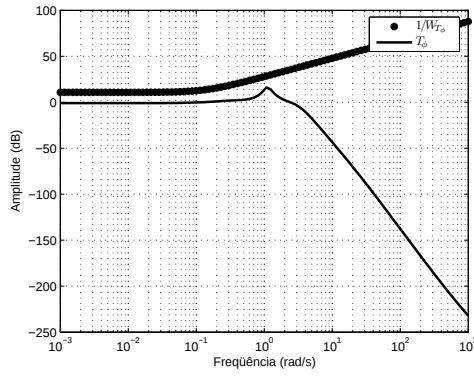
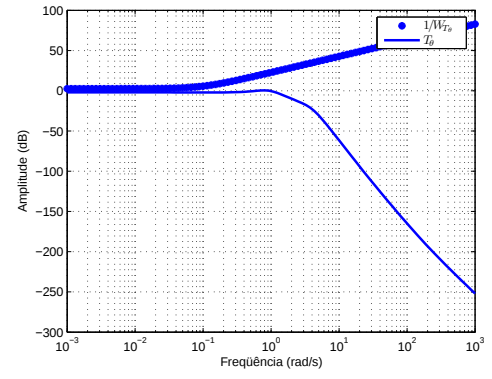


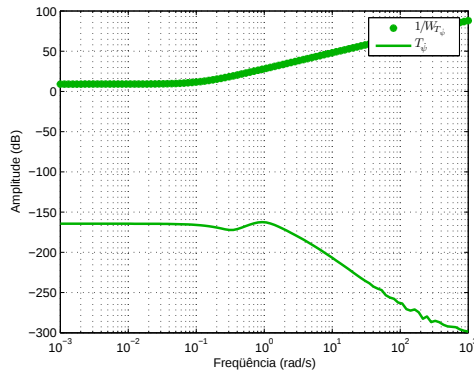
Figura 9. Função de sensibilidade (S) e sua ponderação ($1/W_s$)



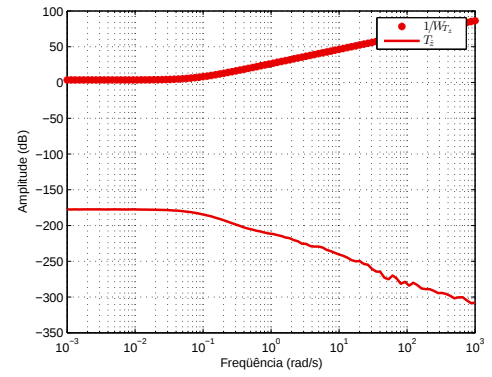
(a) balanço



(b) caturo

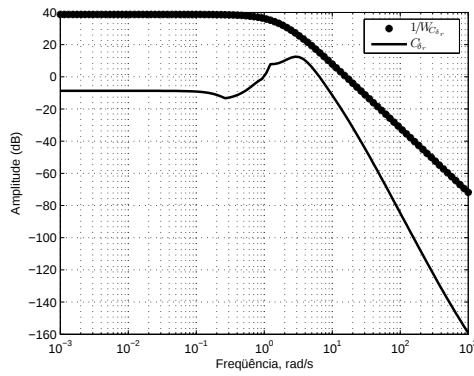


(c) velocidade de guinada

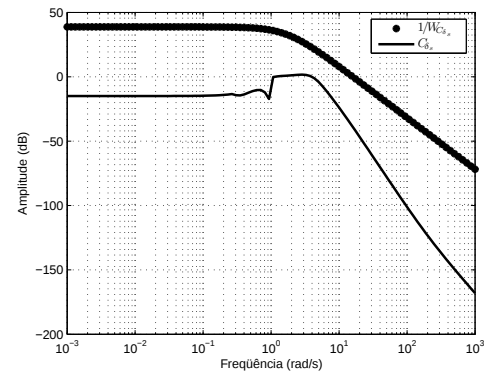


(d) velocidade de submersão

Figura 10. Função de sensibilidade (S) e sua ponderação ($1/W_s$)



(a) leme vertical



(b) leme horizontal

Figura 11. Função de sensibilidade do controlador (C) e inversa da função de ponderação ($1/W_C$)

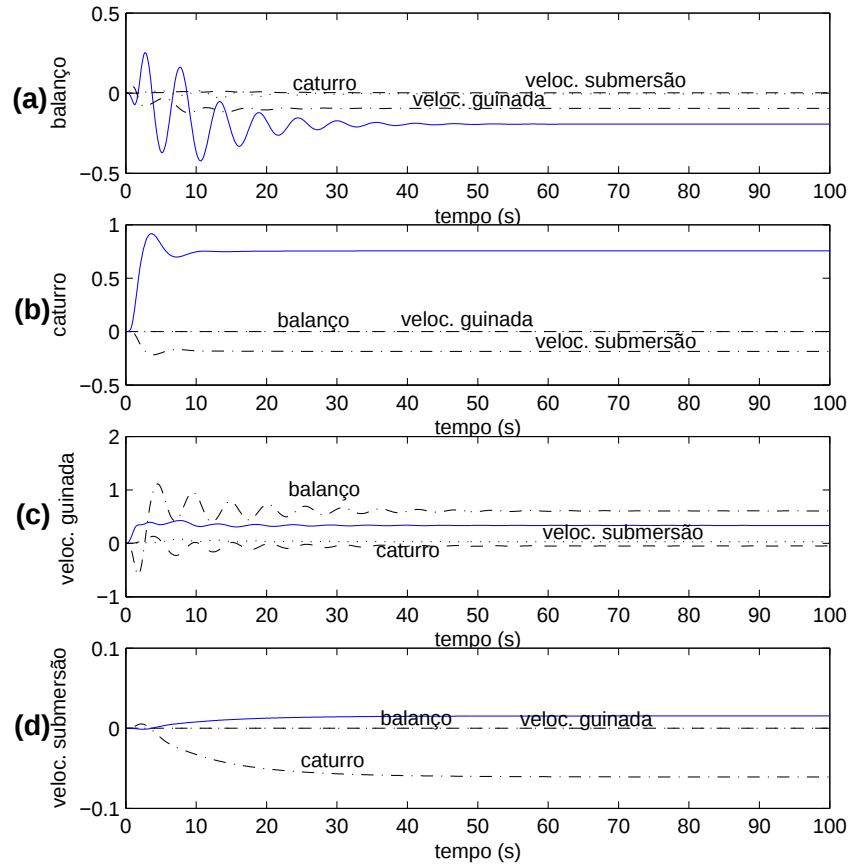


Figura 12. Resposta degrau unitária do modelo não linear controlado - Controlador 1-GL.

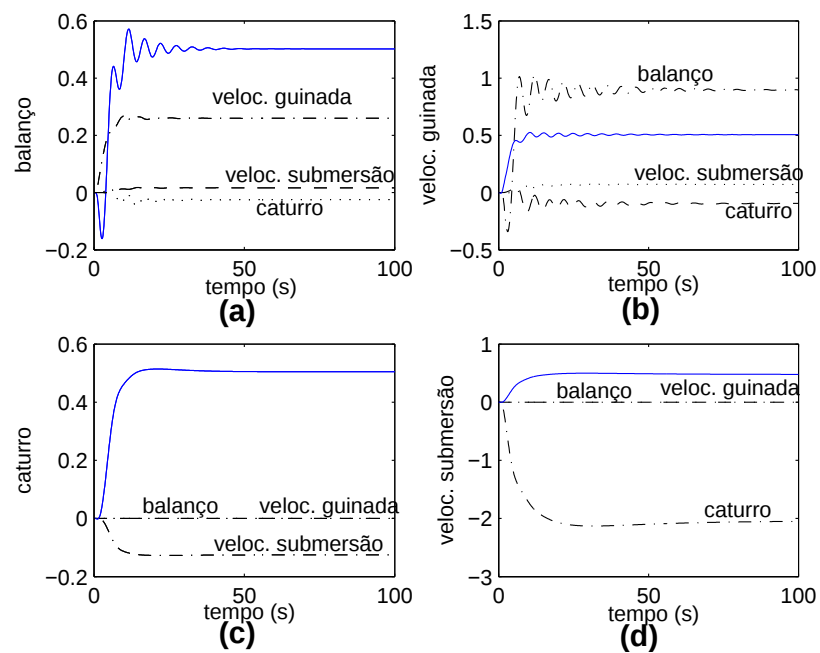
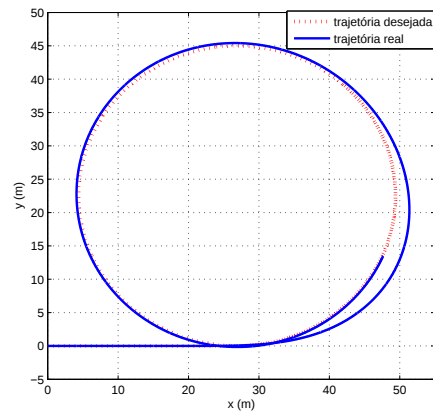
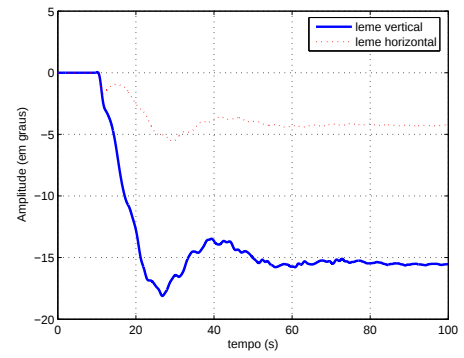


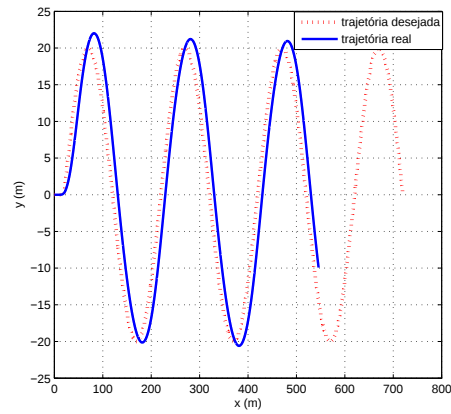
Figura 13. Resposta ao degrau 0,5 do modelo não linear controlado - Controlador 2-GL.



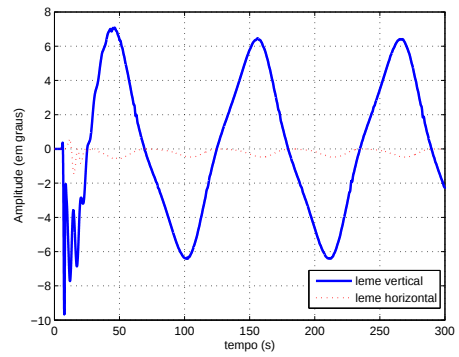
(a) acompanhamento trajetória circular



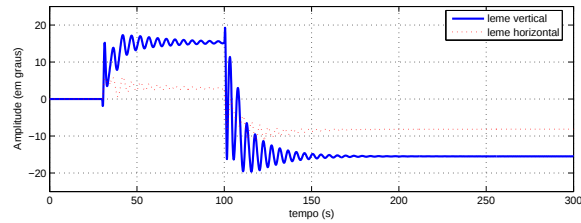
(b) movimento dos lemes



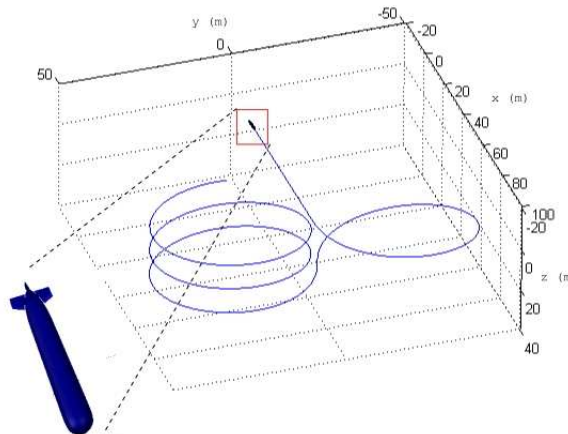
(c) acompanhamento trajetória zigzag



(d) movimento dos lemes



(e) movimento dos lemes



(f) Posição do veículo

Figura 14. Acompanhamento de trajetórias desejadas realizadas pelo veículo submersível autônomo

Referências

- CANHETTI, A. C. *Modelo Livre de Submarinos*. 147 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola Politécnica/USP, São Paulo, 1998.
- DONHA, D. C. *Projeto de Sistemas de Controle Robustos Multivariáveis*. São Paulo, Brasil: Poli-USP, 2003.
- DONHA, D. C.; KATEBI, R. M. Automatic cost weight selection in mixed sensitivity controller synthesis. In: CAMS'04. *Proceedings of the IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*. Ancona, Italy: Dipartimento di Ingegneria Informatica, e dell'Automazione, Università Politecnica delle Marche, 2004. p. 279–284.
- DONHA, D. C.; LUQUE, J. C. C. Six dof robust control. In: *Proceedings of the International Control Conference*. Glasgow, Scotland: University of Strathclyde, 2006.
- FOSSSEN, T. I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. West Sussex PO19 1UD, England: John Wiley & Sons, 1994.
- HEALEY, A. J.; LIENARD, D. Multivariable sliding model control for unmanned underwater vehicles. *IEEE journal of Oceanic Engineering*, v. 18, n°3, p. 327–339, 1993.
- LOGAN, C. L. *Robust controller design and evaluation for a small underwater vehicle*. 365 p. Dissertação (Master's Thesis) — Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 1993.
- LUNDSTRÖM, P.; SKOGESTAD, S.; DOYLE, J. Two-degree-of-freedom controller design for an ill-conditioned distillation process using μ -synthesis. *Control, Communications and Signal Processing*, 2004. *First International Symposium on*, v. 7, n. 1, p. 12–21, 1999.
- MCEWEN, R. *Modeling and Control of a Variable-Length AUV*. Moss Landing, CA 95039-9644, 2002.
- SILVESTRE, C.; PASCOAL, A. Depth control of the infant auv using gain-scheduled reduced-order output feedback. In: CAMS. *Proc. of 16th IFAC World Congress*. Prague, Czech Republic, 2005.
- SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. *Multivariable Feedback Control*. West Sussex PO19 1UD, England: John Wiley & Sons, 1996.
- SONG, F.; AN, E.; SMITH, S. M. Design robust nonlinear controllers for autonomous underwater vehicles with comparison of simulated and at-sea test data. *Journal of Vibration and Control*, v. 8(2), p. 189–217, 2002.
- SOUZA, E. C. *Modelagem e Controle de Veículos Submarinos Não Tripulados*. 150 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola Politécnica/USP, São Paulo, 2003.
- TRIANTAFYLLOU, M. S.; HOVER, F. S. *Maneuvering and Control of Marine Vehicles*. Cambridge, Massachusetts, USA: The M.I.T. PRESS, 2003.
- WHITCOMB, L. L. Underwater robotics: Out of the research. laboratory and into the field. *International conference in Robotics and Automation, IEEE*, Preprint of an invited paper to appear in the Special Session on Industrial Robotics, p. 1–6, 2000.
- ZHOU, K.; DOYLE, J. C.; GLOVER, K. *Robust and Optimal Control*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1995.

6. Anexo

As matrizes do modelo linear usado na síntese do controlador foram as seguintes:

$$A = \begin{bmatrix} -3.2400e-01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.6013e-22 & -6.7326e-02 & -4.7263e-24 & 5.1550e-02 & 1.6749e-22 & -1.0360e+00 & 1.6809e-01 & 0 \\ -1.2998e-22 & 5.4303e-23 & -1.9600e-01 & -4.2968e-21 & 4.3344e-01 & 2.9304e-24 & 0 & 2.3802e-02 \\ -1.7415e-21 & -5.5487e-01 & 9.7143e-25 & -3.6525e-01 & -8.8269e-22 & 1.4726e+00 & -8.5593e-01 & 0 \\ -4.9461e-22 & 2.9887e-23 & -1.3619e-01 & -1.3719e-21 & -8.0270e-01 & -2.2828e-23 & 0 & -1.8542e-01 \\ 4.8759e-22 & 5.9686e-02 & 4.2463e-24 & -5.8513e-02 & -1.3641e-22 & 2.5556e-01 & -1.4785e-01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000e+00 & 0 & -9.1970e-22 & 0 & 6.6403e-22 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000e+00 & -5.4984e-22 & -6.6403e-22 & 0 \end{bmatrix}$$

(15)

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.7355\text{e-}001 & 0 \\ 0 & -1.4594\text{e-}001 \\ 3.8621\text{e-}001 & 0 \\ 0 & -4.4791\text{e-}001 \\ -7.4748\text{e-}002 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000\text{e+}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000\text{e+}000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.4984\text{e-}22 & 1.0000\text{e+}00 & -3.8184\text{e-}22 \\ 9.1970\text{e-}22 & 5.4984\text{e-}22 & 1.0000\text{e+}00 & 0 & 0 & 0 & 1.2575\text{e-}21 & -2.0000\text{e+}00 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$S_u = \frac{180^\circ}{\pi} \begin{bmatrix} 1/30^\circ & 0 \\ 0 & 1/25^\circ \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{180^\circ}{\pi*10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{180^\circ}{\pi*10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{180^\circ}{\pi*10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{180^\circ}{\pi*10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{180^\circ}{\pi*10} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$S_y = \frac{180^\circ}{\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\pi}{180^\circ*10} \end{bmatrix} \quad (21)$$

As funções de ponderação usadas foram:

$$W_i = I_{2 \times 2} \quad W_d = I_{4 \times 4} \quad W_n = I_{4 \times 4} \quad W_{model} = I_{4 \times 4} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} W_{S_\phi} &= \frac{s^3 + 6.91s^2 + 2.76s + 8.3}{s^3 + 14.04s^2 + 19.95s + 19.43} & W_{T_\phi} &= \frac{0.29}{7.12s + 1} \\ W_{S_\theta} &= \frac{s^3 + 4.57s^2 + 3.72s + 3.61}{s^3 + 8.38s^2 + 10.63s + 4.81} & W_{T_\theta} &= \frac{0.74}{10.14s + 1} \\ W_{S_\psi} &= \frac{s^3 + 1.32s^2 + 2.37s + 4.12}{s^3 + 19.98s^2 + 11.75s + 12.91} & W_{T_\psi} &= \frac{0.35}{8.83s + 1} \\ W_{S_z} &= \frac{s^3 + 11.2s^2 + 14.46s + 7.51}{s^3 + 12.9s^2 + 18.81s + 11.93} & W_{T_z} &= \frac{0.67}{13.88s + 1} \end{aligned} \quad (23) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} W_{C_{\delta_r}} &= \frac{s^2 + 3.44s + 2.96}{1\text{e-}8s^2 + 3.20\text{e-}3s + 2.562} \\ W_{C_{\delta_s}} &= \frac{s^2 + 3.44s + 2.96}{1\text{e-}8s^2 + 3.20\text{e-}3s + 2.562} \end{aligned} \quad (25)$$

$$W_S = \begin{bmatrix} W_{S_\phi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{S_\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{S_\psi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{S_z} \end{bmatrix} \quad W_T = \begin{bmatrix} W_{T_\phi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{T_\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{T_\psi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{T_z} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$W_C = \begin{bmatrix} W_{C_{\delta_r}} & 0 \\ 0 & W_{C_{\delta_s}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1.76}{s+0.2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.6}{s+0.2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{9.8}{s+0.2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-10}{s+0.05} \end{bmatrix} \quad (28)$$

BOLETINS TÉCNICOS

TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PME/0001 – Controle Ativo de Ruído em Dutos Usando Algoritmo Genético – JAMES CUNHA WERNER, JOSÉ SOTELO JÚNIOR
- BT/PME/0002 – Metodologia de aplicação de Forças para Análise Dinâmica Estrutural de Motores de Combustão Interna – EDUARDO BUENO NIGRO, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0003 – Calibração de Padrões Metrológicos Utilizando Visão Computacional – FLAVIUS PORTELLA RIBAS MARTINS, FRANCISCO EMÍLIO BACCARO NIGRO
- BT/PME/0004 – Análise Computacional da Intensificação da Transferência de Calor Através de Geradores de Vórtices em Trocadores de Calor Compactos com Duas Fileiras de Tubos – ROGÉRIO RODRIGUES JÚNIOR, JURANDIR ITIZO YANAGIHARA
- BT/PME/0005 – Modificações na Estruturas de Escoamentos Turbulentos em Canais Devido a Adição de Polímeros. Mecanismos da Redução de Atrito – GUILHERMO VILALTA, JAIME P. ORTIZ
- BT/PME/0006 – Estudo Numérico de Jatos Evaporativos – EDVALDO ANGELO, JOSÉ ROBERTO SIMÕES MOREIRA
- BT/PME/0007 – Estudo da Resposta Dinâmica de Pressão de Fluidos Incompressíveis em Tubos Elásticos – FLÁVIO SPINOLA BARBOSA, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0008 – Investigação Experimental da Influência de Geradores de Vórtices em Trocadores de Calor Compactos com duas Fileiras de Tubos em Arranjo Alternado – JUAN JOSÉ GONZÁLEZ BAYÓN, JURANDIR ITIZO YANAGIHARA
- BT/PME/0009 – Estudo Experimental de Jatos Evaporativos – MARCELO MENDES VIEIRA, MARCELO SILVA GUIMARÃES, JOSÉ R. SIMÕES MOREIRA
- BT/PME/0010 – Sistema para o Ensaio de Turbinas de Tesla – RICARDO LUIZ LABOZETO, CARLOS CHING TU, JOSÉ R. SIMÕES MOREIRA
- BT/PME/0011 – Mecanismos de Desgaste de Rodas Ferroviárias – LUIZ HENRIQUE DIAS ALVES, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0012 – Sistema Tetra Combinado de Cogeração. Avaliação Exergética e Termoeconômica – DOMINGO WILSON GARAGATTI ARRIOLA, SILVIO DE OLIVEIRA JÚNIOR
- BT/PME/0101 – Modelo de Comportamento Termodinâmico de uma Bomba Multifásica do Tipo Duplo Parafuso – CELSO YUKIO NAKASHIMA, SILVIO DE OLIVEIRA JR.
- BT/PME/0102 – Contact Simulation Between Truck Tires and the Roadway Concerning the Tread Wear – ARGEMIRO LUIS DE ARAGÃO COSTA, LINILSON R. PADOVESE
- BT/PME/0103 – Subsídios para Utilização da Base de Dados Corporativa na Atividade de Projetos – RENATO VIZIOLI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0104 – Controle de Vibrações de um Braço Rotativo Flexível pelo Movimento de uma Massa sobre o Braço – FREDERICO RICARDO FERREIRA DE OLIVEIRA, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0105 – Modelo de Reator a Plasma para Tratamento de Cinzas de Incineração – RENATO ALFREDO SCHRÖTER, MÍRIAM ROCCHI TAVARES
- BT/PME/0106 – Projeto e Simulação de um Controlador Fuzzy para Condução de uma Composição Ferroviária – MARIA PADILHA GANDARA MENDES, AGENOR T. FLEURY
- BT/PME/0107 – Análise Experimental e Simulação de Vibrações Induzidas por Bombas em Sistemas de Combustível de Aeronaves – WEBER DE BRITO BARBOSA, AGENOR TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0108 – Modelos Numéricos Aplicados à Vulcanização de Pneus – EDUARDO GONÇALVES PINHEIRO, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0201 – Avaliação das Mudanças Ocorridas no Desenvolvimento de Produtos Devidas à Utilização de Modelos Produzidos por Prototipagem Rápida – JOÃO HENRIQUE SILVEIRA ALVES DE OLIVEIRA, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0202 – Biomechanical Modeling and Optimal Control of Human Posture With Algorithms Based on Consistent Approximations Theory – LUCIANO LUPORINI MENEGALDO, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0203 – Filtro Estendido de Kalman Aplicado à Tomografia por Impedância Elétrica – FLÁVIO CELSO TRIGO, RAUL GONZÁLEZ LIMA
- BT/PME/0204 – Simulador Hidrodinâmico para Estudos "In Vitro" do Sistema Cardiovascular - EDIR BRANZONI LEAL, JAYME PINTO ORTIZ, DOMINGOS GUERINO SILVA
- BT/PME/0205 – Uma Metodologia para a Especificação e Seleção de Máquinas para Processos de Manufatura, Através da Análise do Custo Total do Processo – RICARDO CARDIA CARDOSO, PAULO CARLOS KAMINSKI

- BT/PME/0206 – Desenvolvimento de Novos Produtos: Uma Proposta de Metodologia – ANTONIO CARLOS DE OLIVEIRA, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0207 – Simulação Térmica de um Sistema Antigelo de um Aerofólio – GUILHERME ARAÚJO LIMA DA SILVA, OTÁVIO DE MATTOS SILVARES
- BT/PME/0208 – Simulação Numérica do Escoamento ao Redor de um Agrupamento de Quatro Cilindros em Diversas Configurações – RICARDO BECHT FLATSCHART, JULIO ROMANO MENEGHINI, FÁBIO SALTARA
- BT/PME/0209 – Sistemática para Avaliação de Instalações de Ar Condicionado em Edifícios de Escritórios e Similares sob Óptica do Usuário – FÚLVIO VITTORINO, MARCOS DE MATTOS PIMENTA
- BT/PME/0210 – Proposta de Método para Caracterização de Propriedades Termomecânicas de Filmes Finos Utilizando Dispositivos MEMS – MARCELO SILVA GUIMARÃES, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0211 – Modelagem, Simulação e Controle da Glicemia em Pacientes Diabéticos Hospitalizados – JOSE AUGUSTO LOPES, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0212 – Sistema de Monitoramento e Detecção de Transição de Regime de Lubrificação em Mancais de Deslizamento – ELVYS MERCADO CURI, LINILSON R. PADOVESE
- BT/PME/0213 – Controlador de Posição Linear Hidro-Pneumático – SIDNEY NOGUEIRA PEREIRA DE JESUS, LINILSON R. PADOVESE
- BT/PME/0214 – Fadiga de Contato e Mapa de Desgaste de Discos Metálicos Não-Conformes Solicitados por Contato de Rolamento Cíclico – JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS, DENIOL KATSUKI TANAKA
- BT/PME/0215 – Modelo Preditivo da Emissão de NO_x Gerado em Usinas Termoeletricas como Instrumento de Análise de Inserção e Capacidade de Suporte Regional da Qualidade do Ar – JEAN CESARE NEGRI, CLEMENTE GRECO, SILVIO DE OLIVEIRA JUNIOR
- BT/PME/0216 – Concepção, Desenvolvimento e Teste de um Lavador de Gases – RYSZARD MAJEWSKI, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0217 – Modo de Operação de Busca de Aproximamento Ótimo Aplicado a Sistemas de Posicionamento Dinâmico – EDUARDO AOUN TANNURI, CELSO PUPO PESCE, DECIO C. DONHA
- BT/PME/0218 – Um Modelo para Análise da Instabilidade dos Reforçadores no Processo de Fabricação de Tubos Estruturados – MARCELO A. L. ALVES, PAULO C. KAMINSKI
- BT/PME/0219 – Sintonia de Controladores PID por Algoritmos Genéticos – GERSON RISSO, DECIO CRISOL DONHA
- BT/PME/0220 – Relação entre Microestrutura e Resistência à Cavitação de Ligas Fundidas Baseadas no Sistema Fe-Cr-Ni-C – MARCIO GUSTAVO DI VERNIERI CUPPARI
- BT/PME/0301 – Ar Condicionado Automotivo: Caracterização e Avanços Tecnológicos – JOSÉ ALBERTO ÁVILA, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0302 – Influência do Tamanho de Partículas Abrasivas no Coeficiente de Atrito Cinético de Aços com Diferentes Durezas – GIUSEPPE PINTAUDÉ, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0303 – Estudo do Desgaste e Atrito de um Par Metálico sob Deslizamento Lubrificado – MARCIA MARIE MARU, DENIOL KATSUKI TANAKA
- BT/PME/0304 – Sistema de Ar Condicionado com Insuflamento pelo Piso em Ambientes de Escritórios: Avaliação do Conforto Térmico e Condições de Operação – BRENDA CHAVES COELHO LEITE, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0305 – Performance Comparative Study of Brazilian Small Engines of 1.0L Displacement – MARCELO MARCOS POLTRONIERI, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI, OMAR MOORE DE MADUREIRA
- BT/PME/0306 – Basic Design of a Front, Directional and Suspended Traction Shaft of Farm Tractors – ROSALVO BERTULLUCCI FILHO, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI, OMAR MOORE MADUREIRA
- BT/PME/0307 – Development of a Continuous Variable Transmission Project for Vehicles Powered with 1.0 Liter Displacement Engine – WALTER SILVERIO PELLIZZARI JR., RONALDO DE BREYNE SALVAGNI, OMAR MOORE DE MADUREIRA
- BT/PME/0308 – Considerações Gerais sobre a Vibração Torcional em Componentes de Trem de Força de Veículos Comerciais – CELSO APARECIDO JOAO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0309 – Aplicação do Seis Sigma e da Metodologia DMAMC a um Processo de Identificação e Solução de Problemas Durante a Corrida Piloto de um Projeto Automotivo – RICARDO MAAME FANUCCHI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0310 – Qualidade no Processo de Desenvolvimento do Produto na Indústria Automotiva – MÁRIO DOS SANTOS BARROCO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0311 – Escolha de Sistemas de Ar Condicionado – HUGO LAGRECA FILHO, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0312 – Seleção de Centrais Termoeletricas Utilizando Gás Natural e Bagaço de Cana – CAIO DE PAULA LEITE, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0401 – Análise do Escoamento de Fluidos Refrigerantes Alternativos ao HCFC 22 em Tubos Capilares Adiabáticos – FLÁVIO AUGUSTO SANZOVO FIORELLI, OTÁVIO DE MATTOS SILVARES

- BT/PME/0402 – Engenharia do Valor e Custo-Alvo como Metodologia de Trabalho no Processo de Desenvolvimento de Produtos – UGO IBUSUKI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0403 – Avaliação de Impacto Ambiental Produzido por Usinas Termelétricas com Enfoque na Poluição Atmosférica – Estudo de Caso³ - ANTONIO GONÇALVES DO CURRAL, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0404 – Flexibilização em uma Planta de Conceito de Produção Modular: Um Estudo Comparativo entre a GM de Gravataí e GM de São José dos Campos – LANDER OZAKI, MAURO ZILBOVICIUS
- BT/PME/0405 – Rudimentos da Mecânica dos Pneumáticos – WILLIAM MANJUD MALUF FILHO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0406 – Diagnóstico de Falhas Através da Análise de Vibrações pelo Método de Sinais Residuais na Manutenção Preditiva de Indústrias de Papel e Celulose – LUIZ FERNANDO RIBEIRO ROCHA, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0407 – Avaliação da Contaminação em Óleos Lubrificantes de Rolamentos Através da Análise do Óleo e da Assinatura dos Sinais de Vibrações – MARCELLO ATTILIO GRACIA, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0408 – Simulação Aplicada à Otimização de Suspensões Veiculares Voltada à Melhoria de Conforto – DANIEL VILELA, EDILSON HIROSHI TAMAÍ
- BT/PME/0409 – Proposta de um Método de Projeto de Próteses de Membros Superiores com a Utilização da Engenharia e Análise do Valor – GUSTAVO LONGHI DE CARVALHO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0410 – Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia – CARLOS HUMBERTO MORA BEJARANO, SILVIO DE OLIVEIRA JÚNIOR
- BT/PME/0411 – Estratégias de Controle para Sistema de Condicionamento de Ar em Aeronaves de Passageiros – WALLACE HESSLER LEAL TURCIO, ALBERTO HERNANDEZ NETO
- BT/PME/0501 – Análise Comparativa de Fluxo em Fístula Arteriovenosa - KLEIBER LIMA DE BESSA, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0502 – Estudo do Efeito de Suporte de Modelo de Túnel de Vento Tipo Sting – ADSON AGRICO DE PAULA, JULIO ROMANO MENEHINI, JOSÉ AUGUSTO PENTEADO ARANHA
- BT/PME/0503 – Simulação Numérica Bidimensional de Escoamento Transversal ao Redor de um Cilindro Circular, Utilizando o Fractional Step Method – ALISON BONACCORSI, JULIO ROMANO MENEHINI, FÁBIO SALTARA
- BT/PME/0601 – A Otimização do Valor do Produto Aplicada ao Projeto de Componentes Automotivos em Produção – GUIDO MUZIO CÂNDIDO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0602 – Construção Funcional: Uma Abordagem do Desenvolvimento de Componentes Individuais da Carroceria, com Foco no Veículo Completo, Integrando o Produto, o Processo e a Manufatura – JEFFERSON RIGHETTO, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0603 – Aplicação da Metodologia "Design for Six Sigma" (DFSS) em Projetos Automotivos – ALEXANDRE FIORAVANTI, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0604 – Avaliação Experimental de Condições de Conforto Térmico em Automóveis de Passeio Utilizando Manequim – ANDRÉ BUSSE GOMES, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0605 – Tecnologia de Embalagem CKD para Peças Estampadas e Conjuntos de Carroceria de Veículos Automotivos – BRAULIO BARRIOS VEIGA, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0606 – Dimensionamento e Avaliação do Ciclo de Refrigeração de Sistema de Climatização Automotivo – EDUARDO OLIVEIRA DOS SANTOS, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0607 – Avaliação Comparativa de Sistemas Híbridos de Cogeração a Gás Natural e Bagaço de Cana – LEONARDO MONECI ZAMBONI, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0608 – Avaliação Numérica de Ambientes com Insuflamento de Ar Frio pelo Piso – MARCELO PUSTELNIK, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0609 – Avaliação e Validação de Sistemas de Air Bag em Veículos de Passeio – WASHINGTON HENRIQUE FREITAS DA SILVA, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0610 – Proposta de Análise da Contribuição dos Componentes do Conjunto Propulsor de um Veículo em Aceleração no Ruído Externo Gerado (Pass-By Noise – PBN) – Estudo de Caso com Veículo Comercial Leve – JOSÉ LINCOLN LOPES CAVALCANTI, SYLVIO REYNALDO BISTAFÁ
- BT/PME/0611 – Análise Teórica Experimental da Impregnação de Moldes com Mantas por Polímero Tipo Poliéster – LUIZ ALBERTO PAOLIELLO ALVIM, MARCOS DE MATTO S PIMENTA
- BT/PME/0612 – Análise do Coeficiente de Atrito no Ensaio do Anel para o Forjamento a Quente – CARLOS BÖRDER, AMILTO SINATORA
- BT/PME/0613 – Redução de Poluentes Gasosos e de Material Particulado por Meio do Uso de Combustíveis a Base de Óleos Vegetais como Substituto ao Óleo Diesel – CARLOS KAZUAKI YAZAKI, MAURÍCIO ASSUMPÇÃO TRIELLI
- BT/PME/0614 – Efeito da Temperatura do Líquido de Arrefecimento na Produção de Emissões Poluentes de Motor de Ignição por Físca – FERNANDO CORRADINI, MAURÍCIO ASSUMPÇÃO TRIELLI
- BT/PME/0615 – Projeto de Microposicionador para Máquina de Medição de Circularidade – LEONARDO MASSUNARI LIEU, AGENOR DE TOLEDO FLEURY

- BT/PME/0616 – A Aplicação da Simulação no Processo de Desenvolvimento de Produtos na Indústria Automobilística – EMERSON FISCHLER, DOUGLAS LAURIA
- BT/PME/0617 – Influência do Acabamento Superficial no Desempenho de Bronzinas – SAMANTHA UEHARA, ROBERTO MARTINS DE SOUZA
- BT/PME/0618 – Estudo para Aplicação da Tecnologia Multi Combustível no Mercado Automobilístico Brasileiro – ALEXSANDER DAVID GASPAROTTO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0619 – Processo de Análise e Direcionamento de Projeto de Powertrain para o Melhor Consumo de Combustível Veicular – JORGE RADOSEVIC RUPCIC, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0620 – Modelagem do Fluxo de Halon-1301 em Sistemas de Extinção de Fogo das Unidades Auxiliares de Potência Instaladas em Aeronaves – JOSÉ LUIS FRANCO FERNANDEZ, JAYME PINTO ORTIZ
- BT/PME/0621 – Sistemas Controlados de Propulsão de Veículos Automotores – CLAYTON VINICIUS FERRAZ, DECIO CRISOL DONHA
- BT/PME/0622 – Diagnóstico Automático de Defeitos em Rolamentos Baseado em Lógica Fuzzy – RODRIGO YOSHIKI FUJIMOTO, LINILSON RODRIGUES PADOVESE
- BT/PME/0623 – Gerenciamento do Valor em Veículos Automotivos – ROBERTO VACCARI FILHO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0624 – Projeto de Controladores Múltiplos Modelos para Manutenção da Relação Ar/Combustível em Motores de Combustão Interna Movidos a Gás Natural – FERNANDO SOUSA E FREITAS JUNIOR, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0625 – Modelagem Teórico-Experimental de um Rotor Flexível Contínuo – JAMES SANCHES ALVES, AGENOR DE TOLEDO FLEURY
- BT/PME/0626 – Application of Engineering and Value Analysis in a Process of New Parts Supplier's Definition of an Automotive Sector Company – EDUARDO DE OLIVEIRA MERCURI, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0627 – Estudos em Sistemas de Direção Veicular – MARCELO ARRONILAS FERNANDES, ROBERTO SPINOLA BARBOSA
- BT/PME/0628 – Estudo de Estabilidade no Escoamento ao Redor de um Cilindro – JOSÉ IGNACIO HERNÁNDEZ LÓPEZ, JULIO ROMANO MENEGHINI
- BT/PME/0629 – Development of an Environment for 3D Visualization of Riser Dynamics – JOÃO LUIZ BERNARDES JUNIOR, CLÓVIS DE ARRUDA MARTINS
- BT/PME/0630 – Otimização da Alocação de Empuxo em Sistemas de Posicionamento Dinâmico – EMILIO CELSO DE SOUZA, DECIO CRISOL DONHA
- BT/PME/0631 – Validação Experimental de uma Metodologia de Cálculo da Vida à Fadiga para Mancais Hidrodinâmicos – KARL FREDERICH ARNOLD, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0632 – TRIZ – Teoria para a Resolução de Problemas Inventivos Aplicada ao Planejamento de Processos na Indústria Automotiva – EDUARDO DEMARQUE, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0633 – Recomendações da Montadora para Projetistas de Fornecedores de Autopeças – REINALDO DE AQUINO AZEVEDO, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0634 – Efeito das Vibrações Torcionais do Volante de Motores na Determinação do Sistema de Embreagem Veicular – EDSON LUCIANO DUQUE, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI
- BT/PME/0635 – O Brasil e a Regulamentação Automotiva no Mundo Globalizado – CID CECCHINI DE PAIVA, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0636 – Uma Análise Comparativa entre as Estratégias de Produção sob Encomenda e de Produção para Estoque na Indústria Automobilística Brasileira – MARCO ANTÔNIO MATHONY WEINSTOCK, ROBERTO GILIOLI ROTONDARO
- BT/PME/0637 – A Engenharia do Uso e o Processo de Desenvolvimento de Veículos – ARARIPE JOSÉ DE FARIA, LAERTE IDAL SZNELWAR
- BT/PME/0638 – Estudo da Viabilidade de Painéis Externos Automotivos em Termoplásticos – MAGNO AUGUSTO PATARO REDIVO, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PME/0639 – Estudo da Aplicação de Metodologia e Gestão para Desenvolvimento do Produto na Indústria Automobilística – ALEXANDRE LOPES FERREIRA, NILTON NUNES DE TOLEDO
- BT/PME/0640 – Fatores Críticos de Sucesso para Implantação e Manutenção do Trabalho Padronizado – MAURÍCIO PIMENTEL DE LIMA, ROBERTO GILIOLI ROTONDARO
- BT/PME/0641 – Projeto Integrado de Veículos – A Inclusão do Projeto para Reciclagem – RAFAEL VIAPIANA PADILHA, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI
- BT/PME/0642 – Estudo de Viabilidade de Sistema de Direção para as Rodas Traseiras de Automóveis de Baixo Custo – GEANCARLO GUEDES RETTORI, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI
- BT/PME/0643 – Um Modelo de Gestão para Garantir a Qualidade do Acabamento de Carroceria em Chapa na Linha de Produção – ANA CRISTINA AVELINO, RONALDO DE BREYNE SALVAGNI

- BT/PME/0644 – Diretrizes para Otimização do Modelamento Geométrico de Peças de Carroceria – MAURÍCIO GONÇALVES RUTKAUSKAS, EDUARDO TOLEDO SANTOS
- BT/PME/0645 – Cálculo e Avaliação dos Parâmetros da Rigidez Auxiliar à Rolagem de uma Suspensão Dianteira Mecânica – JOÃO FELIPE SUSIN RODRIGUES, ISRAEL BRUNSTEIN
- BT/PME/0646 – A Monitoração Eletrônica de Veículos e seu Impacto nos Custos Operacionais de Frotas – NELSON TADASHI KAYANO, NICOLAU DIONISIO FARES GUALDA
- BT/PME/0701 – Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente – OSSIMAR MARANHÃO, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0702 – Estudo de Caso de Ruído "Knock Noise" em Mecanismos de Caixa de Direção Hidráulica Tipo Pinhão – Cremalheira – JOSÉ MAURO XAVIER DA CRUZ, MARCELO AUGUSTO LEAL ALVES
- BT/PME/0703 – Desenvolvimento de um Equipamento para Ensaio de Fadiga de Contato Esfera sobre Plano e sua Aplicação na Caracterização de Ferros Fundidos com Matrizes de Elevada Dureza – JULIO CESAR KLEIN DAS NEVES, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0704 – Análise da Maturidade em Gerenciamento de Projetos e seu Impacto nos Projetos de Desenvolvimento de Novos Produtos: Um Estudo de Caso do Setor Automotivo – MICHEL MUSULIN SOELTL, MARLY MONTEIRO DE CARVALHO
- BT/PME/0705 – Avaliação Experimental da Influência do Revestimento de Assentos Automotivos no Conforto Térmico – JOSÉ CARLOS LIMA, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0706 – Avaliação Comparativa de Condições de Conforto Térmico em Automóveis com Ar Condicionado Utilizando Manequim – ROGÉRIO REDER GIMENEZ, ARLINDO TRIBESS
- BT/PME/0707 – As Fases do Processo de Lançamento de Novos Modelos Auxiliares pela Tecnologia da Informação – HENRIQUE DOS SANTOS ANDRADE, FERNANDO JOSÉ BARBIN LAURINDO
- BT/PME/0708 - Influência dos Parâmetros de Corte do Fresamento HSM nas Características Topográficas do Aço AISI H13 Endurecido - DANIEL HIOKI, AMILTON SINATORA
- BT/PME/0709 - Análise de Sistemas para o Resfriamento de Leite em Fazendas Leiteiras com o uso do Biogás Gerado em Projetos MDL - GIANCARLO OBANDO DIAZ, FLÁVIO AUGUSTO SANZOVO FIORELLI
- BT/PME/0710 – Modelagem da Transição Laminar-Turbulenta: Acoplamento de Função de Transporte de Intermitência a um Modelo de Turbulência de Duas Equações - LUIZ TOBALDINI NETO, MARCOS DE MATTOS PIMENTA
- BT/PME/0711 - Introdução do Veículo Híbrido no Brasil: Evolução Tecnológica Aliada à Qualidade de Vida - JULIANA DE FREITAS QUEIROZ, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0712 - Engenharia do Valor Associada ao DFMEA no Desenvolvimento do Produto - ALESSANDRO SANTANA, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0713 - Gestão de Projetos de Desenvolvimento de Autopeças - VALDIR PINTO DE SOUZA, MARCELO MASSARANI
- BT/PME/0714 - Importância do Uso de Mock-Ups e de Técnicas de Prototipagem e Ferramental Rápido no Processo de Desenvolvimento de Produto na Indústria Automotiva - LEONARDO MACARRÃO JUNIOR, PAULO CARLOS KAMINSKI
- BT/PME/0715 - Critérios na Seleção de Plásticos de Engenharia para Aplicações em Veículos Populares no Brasil - Augusto MARCELINO LOPES DORNELES FILHO, MARCOS DE MATTOS PIMENTA