

Desenvolvimento de um robô submarino híbrido HROV LUMA1000 e testes experimentais

Liu Hsu*, Ramon Costa*, Marcel Mendes*, Fernando Lizarralde*,
Edison Alfaro*, Eduardo V.L. Nunes*, José C. Geromel**,
Igor Novais*, Thiago M. de Abreu*, Carolina C. S. de Oliveira*,
Pedro de Oliveira*

* Programa de Engenharia Elétrica - COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

** Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade
Estadual de Campinas .

Abstract:

This paper addresses the design of the HROV (Hybrid ROV) LUMA1000, highlighting its main constructive aspects, and its automatic control system. PID control is conventionally used and is implemented to experimentally test the integrity and functionality of LUMA1000 system. We also present a simulation study of the more advanced controller Multivariable Super Twisting Control (MSTA) which is proposed to handle severe modeling uncertainties and non-structured norm-bounded exogenous disturbances which are to be faced by the HROV. Moreover, an important uncertainty caused by actuator failure is considered in the MSTA design. Its effectiveness is evaluated through numerical simulations showing its fault-tolerant control capability and finite-time convergence under the action of exogenous disturbances modeling uncertainties.

Resumo:

Este artigo aborda o projeto do HROV (*Hybrid ROV*) LUMA1000, destacando seus principais aspectos construtivos e seu sistema de controle automático. O controle PID é convencionalmente utilizado e implementado para testar experimentalmente a integridade e funcionalidade do sistema LUMA1000. Também apresentamos um estudo de simulação do controlador mais avançado, o Multivariable Super Twisting Control (MSTA), que é proposto para lidar com incertezas de modelagem severas e perturbações exógenas não estruturadas limitadas por normas, as quais o HROV enfrentará. Além disso, uma importante incerteza causada por falha de atuador é considerada no projeto do MSTA. Sua eficácia é avaliada por meio de simulações numéricas, demonstrando sua capacidade de controle tolerante a falhas e convergência em tempo finito sob a ação de perturbações exógenas e incertezas.

Keywords: ROV; HROV; Control Systems; Multivariable Super-Twisting Control.

Palavras-chaves: ROV; HROV; Sistemas de Controle, Controle Super-Twisting Multivariável.

1. INTRODUÇÃO

Veículos operados remotamente (ROVs) revolucionaram a indústria submarina quando foram introduzidos na década de 1960. A partir de 1980, tornaram-se dominantes com o avanço da exploração de petróleo em água profundas (Petillot et al., 2019; Shukla and K., 2016). Na indústria de petróleo, eles são utilizados principalmente para operações de intervenção, inspeção e manutenção em plataformas e dutos submarinos. Os ROVs são também importantes na área estratégica, na pesquisa científica e na aquacultura (Føre et al., 2018).

Tipicamente, os ROVs operam conectados a uma embarcação de superfície por meio de um cabo umbilical. Através desse cabo, o ROV recebe a energia necessária para sua operação e se comunica com o operador, envi-

* Este trabalho contou com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES)–Código de Financiamento 001, CNPq, FAPERJ e INSAC

ando sinais de vídeo e recebendo comandos. No entanto, a operação desses veículos é uma tarefa bastante desafiadora (Ohrem et al., 2023), especialmente quando maior precisão de navegação é desejada, devido à complexidade do comportamento dinâmico do ROV, sendo um exemplo de sistema incerto por excelência. Em geral, os graus de liberdade (DOFs) são altamente acoplados, o que dificulta ao operador a coordenação do comando dos seis DOFs do veículo.

Outra classe de veículos submarinos são os ROVs híbridos (HROV), que representam uma nova geração de veículos subaquáticos operados remotamente, integrando uma fonte de energia embarcada. Diferentemente dos ROVs convencionais cuja energia é fornecida pela superfície através de um umbilical, a ligação entre o HROV e a embarcação é limitada a uma fibra óptica ou outro cabo de menor porte, utilizado apenas para comunicação (Raugel et al., 2019).

O desenvolvimento de sistemas de controle para veículos submarinos é bastante desafiador, especialmente quando se exige maior acurácia no controle do veículo em condições adversas, como fortes correntes marítimas, visibilidade reduzida, tensões no cabo umbilical e incertezas nos parâmetros do veículo e do ambiente. Na literatura, diversas abordagens têm sido propostas para lidar com esses desafios. Aqui daremos especial atenção aos métodos robustos por modos deslizantes que vem sendo utilizado há bastante tempo em robótica submarina (Yoerger and Slotine, 1985; Cunha et al., 1995). Recentemente, Xia et al. (2022) utilizou o controle “por modo deslizante moderno” denominado controle super-twisting para um sistema de recuperação de AUV’s visando reduzir o efeito de *chattering* e ainda obter convergência em tempo finito. Em Manzanilla et al. (2021) propôs-se um controle de modo deslizante integral com o algoritmo super-twisting. O interesse pelos métodos baseados em modos deslizantes de ordem superior tem ficado evidente em artigos recentes sobre robótica submarina, e particularmente em aplicações à aquicultura. Esta nova tendência tem sido validada experimentalmente em Borlaug et al. (2020) e Ohrem et al. (2023).

Neste trabalho, apresentamos o veículo submarino LUMA (Light Underwater Mobile Asset), do GSCAR¹. Historicamente, a primeira versão do LUMA foi projetada para inspecionar barragens e túneis de adução de usinas hidrelétricas. Posteriormente, dentro do escopo de um projeto MCT-CNPq PROANTAR Proc-557113/2009-1, uma nova versão foi desenvolvida para auxiliar no censo da vida marinha na Baía do Almirantado, onde está localizada a Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz. Durante esse projeto, foram realizadas três missões entre 2007 e 2010. Recentemente, com o auxílio financeiro do INSAC (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Sistemas Autônomos Cooperativos) o veículo foi atualizado, aumentando sua profundidade máxima de operação para 1000 metros e incorporando características de HROV, sendo então renomeado para LUMA1000. Suas aplicações abrangem a monitoração ambiental por meio de sensores, amostradores robóticos e câmeras HD, além de inspeção e intervenção em equipamentos submarinos, dutos, inspeção de túneis de adução em usinas hidrelétricas, inspeção de barragens, entre outras (Frangipani et al., 2019).

Este artigo discute os desafios encontrados no desenvolvimento do LUMA1000. A integridade e as funcionalidades do ROV projetado e construído como protótipo foram verificadas implementando-se um controlador convencional do tipo PD (Proporcional Derivativo) para controle automático de profundidade e de rumo. Sabe-se entretanto que os controladores por modos deslizantes oferecem um desempenho superior (Yoerger and Slotine, 1985; Cunha et al., 1995). Assim uma avaliação por simulação é apresentada utilizando o controlador MSTA (*Multivariable Super Twisting Algorithm*), recentemente desenvolvido em (Geromel and Jr, 2023), baseado em modos deslizantes de ordem superior. Os resultados promissores sugerem uma futura implementação do STA no HROV LUMA1000.

¹ Grupo de Sistemas de Controle, Automação e Robótica (GSCAR) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE)

2. DESCRIÇÃO DO HROV LUMA1000

O projeto seguiu as seguintes diretrizes:

- Corpo do veículo tipo *open-frame*, em que a estrutura é exposta, facilitando o acesso a componentes.
- Facilidade de manutenção.
- Facilidade de reconfiguração de equipamentos.
- Carregamento e monitoramento das baterias sem abertura dos vasos de pressão no interior do qual estão montados.
- Minimização do peso do veículo no ar para permitir a facilidade de lançamento e resgate do veículo.
- Integração dos sensores, atuadores e outros dispositivos operacionais via ROS².
- Comunicação e transmissão de banda larga (vídeo) por fibra óptica (em vez de um umbilical pesado).

2.1 Visão Geral do Veículo

As principais especificações do veículo são:

Tabela 1. Especificações do veículo.

Massa m_0	113,00	kg
Média da inércia I_{xx}	11,85	kg.m ²
Média da inércia I_{yy}	14,16	kg.m ²
Média da inércia I_{zz}	14,79	kg.m ²
Dimensões (CxLxA)	(1x1x0.5)	m
Autonomia de bateria	75	min
Profundidade máxima	1000	m
Velocidade máxima	2	m/s

A massa e os momentos de inércia do veículo foram levantados experimentalmente no Laboratório de Tecnologia Oceânica da COPPE. Sua estrutura base *open-frame* é construída em polipropileno, enquanto os flutuadores são feitos de *Synctatic Foam*. A Figura 1 apresenta o HROV LUMA1000. O veículo é equipado com dois vasos de pressão para acomodar as partes eletrônicas e duas baterias de íon de lítio de 48 V e 20 A h, uma em cada vaso. Os vasos foram testados em câmara hiperbárica e suportaram pressões de até 150 bar. Além disso, os sistemas de abertura e fechamento foram projetados para facilitar a manutenção.

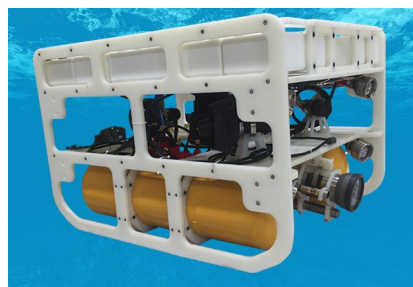


Figura 1. HROV LUMA1000. Visualizam-se os vasos de pressão (em amarelo), as luminárias, a câmera HD (entre os vasos), os propulsores e os flutuadores (em branco, na parte superior).

2.2 Propulsores

A Figura 2 mostra a localização dos propulsores no veículo, em que os propulsores P1, P2, P3 e P4, com empuxos

² Robot Operating System, <http://www.ros.org>

máximos de 17 kgf (avante) e 10 kgf (ré), permitem controlar o movimento no plano horizontal e o rumo (ψ). Já o propulsor P5, com 22,7 kgf (avante) e 14,5 kgf (ré), permite o controle da profundidade (Z_0).

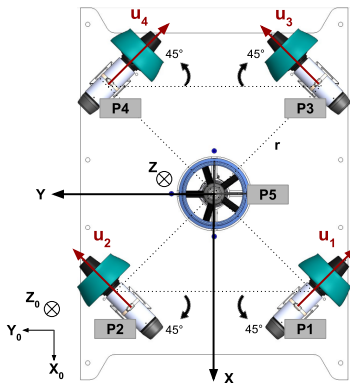


Figura 2. Configuração dos propulsores para o LUMA1000. $X_0Y_0Z_0$ e XYZ são o sistema de coordenadas inercial e o sistema de coordenadas fixo no corpo do veículo, respectivamente.

2.3 Sistema de Processamento e de Comunicação

O veículo está equipado com um PC/104 em cada vaso de pressão, que se comunicam através do barramento RS485. No vaso 1, está localizado o Sistema de Vídeo, responsável pela iluminação e gerenciamento dos sinais de vídeo. Nele também é conectado o cabo de par trançado RS485 ou fibra óptica (1000 metros), enviando os sinais à superfície para a Interface Gráfica. Já o vaso 2 abriga o Sistema de Controle e Navegação, responsável pela leitura dos sensores, controladores e atuadores. A Figura 3 apresenta o sistema de comunicação embarcado.

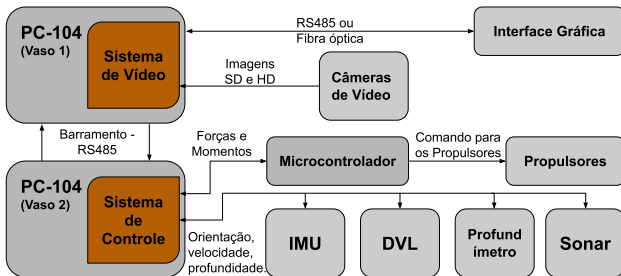


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de comunicação do HROV LUMA1000.

2.4 Sistema de Vídeo

O sistema de vídeo é composto por cinco câmeras de vídeo:

- Uma câmera de vídeo P&B de alta resolução, fornece uma visão panorâmica ampla para navegação;
- Uma câmera colorida de alta resolução, com movimentos de pan e tilt, permite uma inspeção detalhada da área sendo examinada em condições de alta visibilidade (baixo nível de partículas em suspensão);
- Uma câmera de alta resolução e alta sensibilidade (câmera SIT) para inspeção em condições de baixa luminosidade e média visibilidade, e
- Duas câmeras de vídeo auxiliares P&B de baixa resolução para monitoramento dos equipamentos e auxílio em manobras de precisão.

2.5 Sensores

O veículo está equipado com 4 sensores, sendo:

- Unidade de medição inercial (IMU), modelo Spatial desenvolvido pela Advanced Navigation. Embarcado no vaso 2, mede aceleração nos 3 eixos do sistema de coordenadas localizado no ROV, XYZ.
- Profundímetro, modelo Velki HPX, com alcance de até 200 bar. Posicionado no vaso 2, mede a profundidade do veículo considerando a relação aproximada de 1 bar = 10 metros.
- Sensor de Velocidade Doppler (DVL), modelo Nav-Quest 600 Micro. Centralizado na parte posterior do veículo, mede as velocidades nos 3 eixos do sistema de coordenadas localizado no ROV, XYZ.
- Sonar do tipo Mechanical Scanned Imaging Sonar (MSIS) da Tritech, que permite estimar a distância de um objeto por meio de pulsos sonoros.

3. SISTEMA DE CONTROLE

A Figura 4 apresenta os Sistemas de Coordenadas.

Os comandos manuais e automáticos são enviados no sistema de coordenadas do corpo (XYZ), enquanto as saídas correspondem à posição e rumo do ROV no sistema inercial ($X_0Y_0Z_0$). Para alinhar esses sistemas, o erro de posição é transformado para as coordenadas do corpo. No caso do LUMA1000, onde os eixos Z e Z_0 estão praticamente alinhados ($\theta \approx 0$, $\phi \approx 0$), essa transformação é feita por uma matriz de rotação no eixo Z .

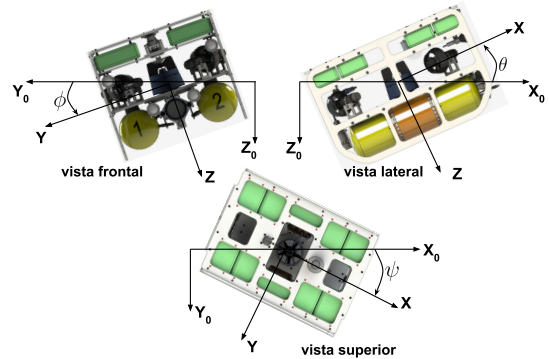


Figura 4. Sistema de Coordenadas do veículo em que $X_0Y_0Z_0$ e XYZ são o sistema de coordenadas inercial e o sistema de coordenadas fixo no corpo do veículo, respectivamente. As variáveis ϕ , θ e ψ correspondem aos ângulos de Euler, balanço, caturro e rumo, respectivamente.

3.1 Modelo Dinâmico Simplificado

Considere o seguinte sistema MIMO descrito por

$$\dot{\sigma} = B u + f(t), \quad (1)$$

em que $\sigma \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estado, $u \in \mathbb{R}^m$ é a entrada do sistema, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ é a matriz de entrada e $f(t) : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ é um distúrbio.

No caso da LUMA1000, este modelo pode ser utilizado com $\sigma = [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_z]^T \in \mathbb{R}^4$, em que v_x , v_y e v_z são as velocidades relacionadas no corpo do veículo e ω_z

é a velocidade angular relacionada ao eixo Z. As forças de Coriolis, de arrasto, do cabo (Hsu et al., 1999), e das perturbações exógenas ou devido a incertezas, podem ser concentradas no termo de perturbação $f(t)$. Assim, um modelo simplificado do ROV pode ser expresso pela equação (1) com

$$B = M^{-1} L \quad (2)$$

em que $M = \text{diag}(m_0, m_0, m_0, I_{zz})$, sendo m_0 a massa, I_{zz} o momento de inércia no eixo Z, e L a matriz de acoplamento geométrico baseada na configuração dos propulsores apresentada na Figura 2, dada por

$$L = \begin{bmatrix} \varphi_1 & \varphi_1 & \varphi_1 & \varphi_1 & 0 \\ \varphi_1 & -\varphi_1 & -\varphi_1 & \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \varphi_2 & -\varphi_2 & \varphi_2 & -\varphi_2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

em que $\varphi_1 = \sqrt{2}/2$ e $\varphi_2 = 0.35[m]$.

Desta forma, as forças e momentos aplicados ao veículo são dados por

$$[F_x \ F_y \ F_z \ M_z]^T = L u \quad (4)$$

em que F_x, F_y e $F_z \in \mathbb{R}$ são as forças associadas aos eixos XYZ, $M_z \in \mathbb{R}$ é o momento aplicado ao eixo Z, ambos no sistema de coordenadas do veículo, e $u_i \in \mathbb{R}$ a força individual do i -ésimo propulsor $i = 1, \dots, 5$.

O Sistema de Controle implementado no LUMA1000 utiliza medições de rumo (ψ) e profundidade (z), fornecidas respectivamente pela unidade inercial (IMU) e profundímetro, e calcula as forças e o momento nos DOFs desejados, enviando esse sinal para o módulo de Desacoplamento e Compensadores. Este, por sua vez, transmite os comandos aos propulsores, que executam o movimento desejado. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos desse sistema de controle implementado.

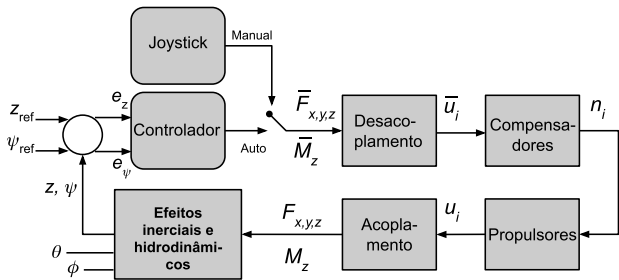


Figura 5. Diagrama de blocos do sistema de controle; e é o erro de posição no DOF.

3.2 Desacoplamento

A matriz de acoplamento calculada em (3) converte os empuxos e torques, gerados por cada propulsor, nas forças e momentos resultantes nos três eixos de coordenadas referenciados ao corpo veículo. A dinâmica de cada grau de liberdade é representada por um sistema multivariável, porém ao utilizar uma matriz de desacoplamento é possível controlar cada DOF separadamente.

O vetor de controle que desacopla os DOFs da LUMA1000 é a pseudo-inversa da matriz de acoplamento descrita pela equação (3).

3.3 Compensadores

Para implementar um controlador linear, é necessário introduzir os seguintes compensadores:

- Compensador para a característica quadrática de velocidade pelo empuxo (Hsu et al., 2000). Dessa forma é utilizado um operador com característica inversa, dado por

$$\bar{n}_i = \begin{cases} \sqrt{|\bar{u}_i|} & , \text{ se } \bar{u}_i \geq 0 \\ -\sqrt{\alpha|\bar{u}_i|} & , \text{ se } \bar{u}_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

em que \bar{u}_i é a força de referência aplicada ao i -ésimo propulsor, enquanto o ganho $\alpha = E_{max}/E_{min}$ é aplicado ao propulsor para compensar a redução do empuxo quando é operado em modo reverso, sendo E_{max} o empuxo máximo e E_{min} o empuxo reverso.

- Compensador para zona morta: Para compensar a não-linearidade, é adicionado um nível mínimo ao módulo do sinal de controle dado por:

$$n_i = \begin{cases} +n_{min} & , \text{ se } 0 \leq \bar{n}_i < +n_{min} \\ -n_{min} & , \text{ se } -n_{min} \leq \bar{n}_i < 0 \\ \bar{n}_i & , \text{ caso contrario} \end{cases} \quad (6)$$

em que n_i é o comando para o i -ésimo propulsor $i = 1, \dots, 5$, devidamente desacoplado e compensado.

3.4 Controle de Posição

Considerando que todos os DOFs do sistema foram desacoplados, os propulsores estejam compensados e não operem saturados, a equação (1) pode ser reescrita como um duplo integrador multiplicado por um ganho

$$\ddot{q} = K[\tau + d] \quad (7)$$

em que K, q, τ e d representam o ganho de alta frequência, uma coordenada generalizada, o sinal de controle compensado e o distúrbio, que inclui incertezas não modeladas (Cunha et al., 1995). Com isso, para um sistema com quatro DOFs, existem quatro equações diferenciais e a dinâmica de uma equação não interfere na outra.

Sabe-se que para sistemas do tipo duplo integrador, um controlador proporcional derivativo (PD) é capaz de regular a posição. Além disso, o ajuste de ganhos e a implementação são relativamente simples, tornando-o uma solução prática para diversas aplicações de um ROV.

3.5 Resultados Experimentais

São apresentados os resultados dos testes experimentais realizados no Laboratório de Tecnologia Oceânica da COPPE. O objetivo é verificar o desempenho do controlador de rumo e profundidade, assim como avaliar o desempenho do LUMA1000 e de todo o sistema desenvolvido.

Os gráficos da Figura 6 apresentam os resultados dos controladores, descrevendo, em sequência, a força F_z (kgf) do controle de profundidade, a profundidade (m), o momento M_z (kgf) do controlador de rumo e o valor do rumo (deg).

Considere o valor das referências para ambos os controladores o valor imediatamente anterior a ativação do controle de rumo e profundidade, dados pelo sistema inercial e profundímetro, respectivamente. Após o início do experimento, o controlador de rumo é ativado. O veículo

submerge manualmente até aproximadamente 3,8 metros, momento em que o controle de profundidade é ativado por volta de $t = 2,2$ minutos. Com ambos os controladores ativados, o veículo mantém a profundidade de 3,8 metros e o rumo de $\psi = 183^\circ$ enquanto continua a navegar manualmente no plano horizontal. Em $t = 5,3$ minutos, o modo automático de rumo é desativado, mantendo apenas o controle de profundidade. Aos 8,2 minutos, o controlador de rumo é reativado com uma nova referência de $\psi = 105^\circ$, e o veículo continua a se mover no plano horizontal até o final do experimento. Note-se que boa regulação é obtida independente das manobras no plano horizontal.

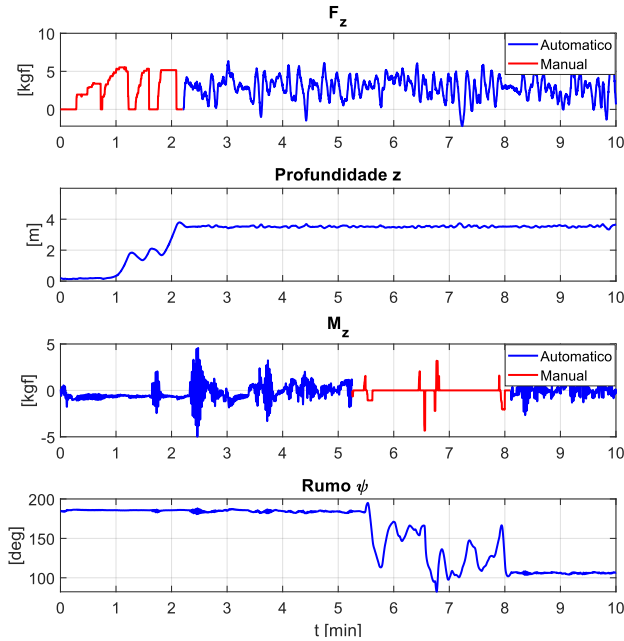


Figura 6. Resultados experimentais para controlador PD para Rumo e Profundidade.

4. CONTROLE AVANÇADO: SUPER-TWISTING MULTIVARIÁVEL ROBUSTO

Considera-se a seguir um método avançado de controle baseado no Algoritmo Super-Twisting em sua versão multivariável (MSTA) restrito ao movimento horizontal. Recentemente, o projeto desse tipo de controlador foi proposto em Geromel et al. (2024) de modo a garantir sua robustez em presença de incertezas convexas na matriz de entrada e a uma classe de perturbações externas.

A principal fonte de incerteza no sistema abordado neste trabalho está relacionada à variação paramétrica da planta (o ROV) decorrente de falhas dos atuadores. Além disso, o sistema também está sujeito à incertezas provenientes de fontes externas como correntezas e forças do umbilical. Dessa forma, uma abordagem de controle robusto se mostra apropriada para lidar com tais desafios.

4.1 Controlador Super-Twisting Multivarável

Considere-se um sistema MIMO incerto descrito por um integrador multivariável sob a ação de perturbações descrito pela equação (1).

As seguinte hipóteses são feitas:

- (A1) A matriz de entrada B tem posto $n \leq m$ e $B \in \mathbb{B} = \text{co}(B_i)_{i \in \mathbb{K}}$ com $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}, \forall i \in \mathbb{K}$.
- (A2) A perturbação $f(t)$ é suave no tempo e satisfaz a desigualdade

$$\|\dot{f}(t)\| \leq \delta, \forall t \geq 0 \quad (8)$$

sendo δ uma constante positiva a ser determinada.

A hipótese (A1) implica que $\text{posto}(B) = n, \forall B \in \mathbb{B}$. Além disso, (A1) implica que B é um elemento genérico de \mathbb{B} , um conjunto compacto gerado pelas combinações convexas das matrizes extremas $\{B_i\}_{i \in \mathbb{K}}$. Isto é, para cada $B \in \mathbb{B}$, existe um vetor constante $\lambda \in \Lambda$ tal que $B = \sum_{i \in \mathbb{K}} \lambda_i B_i$, sendo que Λ denota o conjunto de todos os vetores não negativos cuja a soma de seus componentes é igual a um.

O Controle MIMO Super-Twisting (MSTC) tem a forma:

$$u = K_1 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{\|\sigma\|}} \right) + K_2 \eta \quad (9)$$

$$\dot{\eta} = \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \quad (10)$$

sendo que $\eta \in \mathbb{R}^n$ e $K_1, K_2 \in \mathbb{R}^{m \times n}$ são os ganhos de controle. Deve-se destacar que a nova formulação apresentada em (9)-(10) é equivalente ao MSTC clássico. Além disso, permite uma solução mais conveniente para o problema de controle abordado neste artigo.

Assumindo que a matriz BK_2 seja não-singular e aplicando a transformação de variáveis $z = \eta + (BK_2)^{-1}f$, o sistema em malha fechada pode ser descrito por

$$\dot{\sigma} = BK_1 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{\|\sigma\|}} \right) + BK_2 z \quad (11)$$

$$\dot{z} = \left(\frac{\sigma}{\|\sigma\|} \right) + \left(\frac{w}{\sqrt{\|\sigma\|}} \right) \quad (12)$$

sendo que $w(t) = \sqrt{\|\sigma\|}(BK_2)^{-1}\dot{f}(t)$. Note, que para um dado $\gamma > 0$, se a condição (8) é satisfeita para $\delta = \|(BK_2)^{-1}\|^{-1}\gamma^{-1}$, então $w^T w \leq \|\sigma\|\gamma^{-2}$.

Um problema que foi resolvido apenas recentemente (Geromel et al., 2024) é o de projetar ganhos matriciais K_1 e K_2 , de maneira ótima de forma a assegurar a estabilidade robusta global em tempo-finito para o sistema em malha fechada.

Nesse sentido, introduzimos a nova variável de saída controlada $\xi = C_K R(\sigma)x$, com $R(\sigma)x = [\sigma/\|\sigma\| \ \eta]$ e $C_K = C + DK \in \mathbb{R}^{q \times 2n}$. Reescrevendo $\xi = CR(\sigma)x + Du$, fica claro que escolhendo as matrizes de peso $C \in \mathbb{R}^{q \times 2n}$ e $D \in \mathbb{R}^{q \times m}$, de forma ortogonal, os custos relativo ao comportamento transitório do estado e do esforço de controle aparecem aditivamente no custo final. Dessa forma, escolhendo um valor maior para $C^T C$ podemos restringir o transitório da velocidade. Por outro lado, para reduzir o esforço de controle um valor maior para $D^T D$ deve ser escolhido.

O objetivo é resolver o problema de controle ótimo:

$$\inf_K \sup_{\|w\|^2 \leq \|\sigma\|\gamma^{-2}} \int_0^\infty \xi^T W(\sigma)\xi dt \quad (13)$$

com $W(\sigma) = I_q/\sqrt{\|\sigma\|}$ sendo uma função positiva definida de dimensão apropriada que é bem definida para todo $\sigma \neq 0$.

Uma família de LMI's, parametrizadas por um parâmetro $\gamma \geq 0$ permite computar os ganhos matriciais ótimos, bem como o limitante $\delta \geq 0$ (8), que é calculado a partir de γ (Geromel et al., 2024).

4.2 Aplicação ao controle de velocidade do ROV

O principal objetivo é projetar um MSTA robusto para o LUMA1000, que é super atuado.

Considere $\sigma = [v_x \ v_y \ \omega_z]^T \in \mathbb{R}^3$ em que v_x e v_y são as velocidades relacionadas ao corpo do veículo, e ω_z a velocidade angular relacionada ao eixo Z. O veículo possui quatro propulsores responsáveis pelo deslocamento do corpo através da variável de controle $u \in \mathbb{R}^4$. Desconsiderando as forças de Coriolis, arrasto e de amarração conforme em (Hsu et al., 1999), o modelo simplificado do veículo é expresso por (1) com

$$B(g) = M^{-1}T \Pi(g) \quad (14)$$

em que $M = \text{diag}(m_0, m_0, I_{zz})$. A massa e o momento de inércia são $m_0 = 113$ kg e $I_{zz} = 14,79$ kg.m² e

$$T = \begin{bmatrix} \varphi_1 & \varphi_1 & \varphi_1 & \varphi_1 \\ \varphi_1 & -\varphi_1 & -\varphi_1 & \varphi_1 \\ \varphi_2 & -\varphi_2 & \varphi_2 & -\varphi_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

em que $\varphi_1 = \sqrt{2}/2$ e $\varphi_2 = 0.35$ [m]. A matriz $\Pi(g) = \text{diag}(g_1, 1, g_3, 1)$ define os ganhos do atuador (propulsores). Como $|g_i| \leq 1$, assume-se que $g_1, g_3 \in [0.5 \ 1]$ são ganhos incertos do primeiro e terceiro canais de controle, enquanto os outros operam normalmente. É imediato determinar $N = 4$ matrizes extremas $B_i \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ de modo que $B(g) \in \mathbb{B} = \text{co}(B_i)_{i \in \mathbb{N}}$ para todos os pares viáveis (g_1, g_3) .

Considera-se as condições iniciais $\sigma(0) = 1/10 [1 \ 1 \ \pi/4]^T$ e $\eta(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$, e adotam-se as matrizes de custo $C = [I_6 \ 0]^T \in \mathbb{R}^{10 \times 6}$ e $D = [0 \ I_4]^T \in \mathbb{R}^{10 \times 4}$. O distúrbio $f(t) = [0.2 \cos(0.1t) \ 0 \ 0]^T \in \mathbb{R}^3$ tal que $\|\dot{f}(t)\| = 0.02$.

Definindo $\gamma = 1.01$, a solução ótima fornece os ganhos de controle robustos:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -39.91 & -20.47 & 13.31 \\ -24.89 & 46.08 & -13.91 \\ -39.91 & 20.47 & 13.31 \\ -24.89 & -46.08 & -13.91 \end{bmatrix} \quad K_2 = \begin{bmatrix} -2.08 & -1.47 & 0.93 \\ -1.44 & 3.32 & -1.41 \\ -2.08 & 1.47 & 0.93 \\ -1.44 & -3.32 & -1.41 \end{bmatrix}$$

O limitante da perturbação encontrado foi $\delta = 0.0271$ (8). A Figura 7 mostra a evolução temporal do sistema em malha fechada para cada modelo definido por $B = B_i, i \in \mathbb{K}$. O controle projetado é claramente eficaz em termos de robustez e convergência em tempo finito.

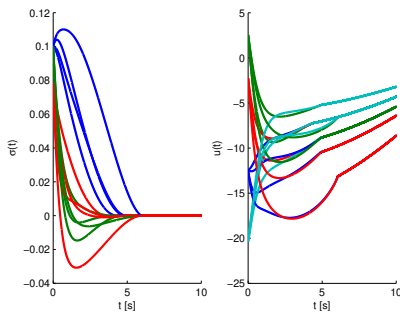


Figura 7. Evolução temporal do LUMA1000 sobre atuado sob ação de controle robusta, com a matriz de entrada correspondente a cada matriz extrema do domínio de incerteza \mathbb{B} .

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo apresentou o desenvolvimento do veículo submarino LUMA1000, incluindo suas características construtivas, além do projeto do sistema de controle implementado. Os testes experimentais validaram o protótipo até o estágio atual. Foi proposto um projeto de controle avançado MSTA para lidar com incertezas e perturbações, com resultados promissores de simulação.

O LUMA1000 oferece uma plataforma experimental para testar controle avançado, como o MSTA, controle de posição utilizando DVL e IMU, além de possibilitar o desenvolvimento e teste de algoritmos de localização e mapeamento (SLAM), com a possibilidade de incorporar recursos de Inteligência Artificial.

REFERÊNCIAS

- Borlaug, I.L.G., Pettersen, K.Y., and Gravdahl, J.T. (2020). Tracking control of an articulated intervention autonomous underwater vehicle in 6dof using generalized super-twisting: Theory and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.
- Cunha, J.P.V.S., Costa, R.R., and Hsu, L. (1995). Design of a new high performance VS position control of ROVs. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 20(1), 42–55.
- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., Sunde, L.M., et al. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *biosystems engineering*, 173, 176–193.
- Frangipani, V., Hsu, L., Costa, R., Lizarralde, F., and Mendes, M. (2019). Localização submarina via filtro ukf usando um simples modem acústico. *Revista SBA*.
- Geromel, J.C. and Jr, C.E.C. (2023). Trajectory tracking control with convergence time assessment. *International Journal of Control*, 96(8), 2394–2402.
- Geromel, J.C., Nunes, E.V.L., and Hsu, L. (2024). Lmi-based robust multivariable super-twisting algorithm design. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Doi: 10.1109/TAC.2024.3358235.
- Hsu, L., Costa, R.R., Lizarralde, F., and Da Cunha, J. (2000). Avaliação experimental da modelagem e simulação da dinâmica de um veículo submarino de operação remota. *Revista Controle e Automação*, 11(2), 82–93.
- Hsu, L., Costa, R., Lizarralde, F., and da Cunha, J. (1999). Passive arm based dynamic positioning system for remotely operated underwater vehicles. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1.
- Manzanilla, A., Ibarra, E., Salazar, S., Ángel E. Zamora, Lozano, R., and Muñoz, F. (2021). Super-twisting integral sliding mode control for trajectory tracking of an unmanned underwater vehicle. *Ocean Engineering*.
- Ohrem, S.J., Evjemo, L.D., Haugløyken, B.O.A., Amundsen, H.B., and Kelasidi, E. (2023). Adaptive speed control of rovs with experimental results from an aquaculture net pen inspection operation. In *31st Mediterranean Conf. on Control and Automation*. IEEE.
- Petillot, Y.R., Antonelli, G., Casalino, G., and Ferreira, F. (2019). Underwater robots: From remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 26(2), 94–101.
- Raugel, E., Opderbecke, J., Fabri, M.C., Brignone, L., and Rigaud, V. (2019). Operational and scientific capabilities of ariane, ifremer's hybrid rovs. In *OCEANS 2019 - Marseille*, 1–7.
- Shukla, A. and K., H. (2016). Application of robotics in offshore oil and gas industry. a review II. *Robotics and Autonomous Systems*.
- Xia, G., Zhang, Y., Zhang, W., Zhang, K., and Yang, H. (2022). Robust adaptive super-twisting sliding mode formation controller for homing of multi-underactuated auv recovery system with uncertainties. *ISA Transactions*, 130, 136–151.
- Yoerger, D.N. and Slotine, J.J.E. (1985). Robust trajectory control of underwater vehicles. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 10(4), 462–470.