

PROJETO DE UM ROBÔ MÓVEL DE ADESÃO MAGNÉTICA PARA INSPECIONAR TANQUES ESFÉRICOS DE GLP

RODRIGO VALÉRIO ESPINOZA* ANDRÉ SCHNEIDER DE OLIVEIRA* LUCIA VALÉRIA RAMOS DE ARRUDA* FLÁVIO NEVES JUNIOR*

**Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil*

Email: rodrigovespinoza@gmail.com andreoliveira@utfpr.edu.br lvrarruda@utfpr.edu.br
neves@utfpr.edu.br

Abstract— This paper presents a climbing robot based in wheel locomotion and magnetic adherence, a distinct mechanical topology applicable to a wide range of industrial tasks. Its mechanical design particularity stands on four unaligned magnetic wheels disposed in two parallel sets, which provides a great advantage when passing over obstacles. The robot goal is to perform internal/external inspection in liquefied petroleum gas (LPG) storage spheres and other metallic surfaces. In these cases, a few severe operation features like adherence and force balance impose necessary restrictions to the robot. To satisfy these conditions, an active gravitational compensation model is developed. Traction controllers are applied to reach a smooth and precise handling in metallic surfaces work. Experimental tests are carried out verifying the mechanical topology accordance and performance characteristics.

Keywords— Climbing robot, magnetic adhesion, gravitational active compensation, Intelligent control in robotics.

Resumo— Este artigo apresenta um robô escalador baseado em locomoção por roda e aderência magnética, uma topologia mecânica diferenciada e aplicável à uma ampla gama de tarefas industriais. A particularidade deste projeto reside sobre suas quatro rodas magnéticas não alinhadas dispostas em dois conjuntos paralelos, o que proporciona uma grande vantagem ao passar por obstáculos. O objetivo do robô é realizar a inspeção interna e externa em esferas de armazenamento de gás liquefeito de petróleo e outras superfícies metálicas. Nestes casos, algumas características severas de operação, como aderência e equilíbrio de forças impõem algumas restrições de operação ao robô. Para satisfazer essas condições, é desenvolvido um modelo de compensação gravitacional ativa. Controladores de tração são aplicados para a movimentação suave e precisa em superfícies de trabalho metálicas, testes experimentais são realizados e a conformidade da topologia mecânica e características de desempenho são verificadas.

Palavras-chave— Robô escalador, Adesão magnética, Compensação ativa da gravidade, Controle inteligente em robótica.

1 Introdução

Com o decorrer dos anos, esferas de armazenamento de Gás Liquefeito do Petróleo (GLP), como a exibida na Figura (1), sofrem com o desgaste de sua estrutura metálica. Inspeções de defeitos são periodicamente realizadas com o intuito de prevenir acidentes que podem ocasionar danos ambientais, humanos e perdas financeiras.



Figura 1: Esfera de armazenamento de GLP.

A inspeção em tanques de derivados de petróleo é complexa devido à grande área de inspeção e altura da estrutura (aproximadamente 18m). A inspeção da superfície externa do tanque é realizada por um operador que desce a esfera e ao mesmo tempo escaneia as superfícies com sensores (geralmente ultrassônicos). A superfície interna, por ser côncava e impossibilitar instalação de estruturas de apoio, oferece dificuldade maior para a tarefa de inspeção. Neste caso, o método utilizado baseia-se no gradual preenchimento do tanque com água para que o operador navegue com um bote. Como um todo, a inspeção manual caracteriza-se por ser uma atividade insalubre, de custo elevado e que demanda longo período de execução. A inspeção automatizada é uma alternativa para otimizar o processo de inspeção de tanques, sendo que os robôs escaladores (RE) são a principal tecnologia que cumpre os requisitos da tarefa; precisão e repetibilidade.

Inspeção robótica autônoma consiste em uma tarefa na qual um robô navega de modo autônomo por toda a superfície que se deseja inspecionar. Durante o processo é realizada a detecção de inconsistências na estrutura por meio da análise dos

dados adquiridos do sistema de inspeção.

O RE é uma sistema robótico móvel multi-tarefa aplicável a ambientes complexos. Sua capacidade de executar um vasta gama de tarefas resulta uma grande diversidade de topologias mecânicas (por exemplo, em Chu et al. (2010) e Caprari et al. (2012)). Esta combinação dos sistemas de locomoção e adesão é de grande interesse, seu resultado gera características específicas e determina o modo como a robô interage com o ambiente de trabalho.

Uma abordagem clássica para REs combina a adesão magnética com a locomoção por rodas, como em Fischer et al. (2011).

A característica inerente dos componentes magnéticos, tipicamente imãs permanentes, garante aderência em tempo integral sem a necessidade de uma fonte de energia. Apesar deste tipo de robô ser limitado a trabalhar exclusivamente em superfícies magnéticas, ele pode ser aplicado a diversas atividades como inspeção e manutenção em plantas energéticas, tanques de GLP e óleo, oleodutos e cascos de navios.

Este artigo apresenta um RE projetado para inspecionar superfícies de tanques esféricos que armazenam GLP. O trabalho está organizado da seguinte maneira. Seção (2) apresenta o conceito e características do robô. Seção (3) aborda a análise do controlador de tração. Seções (4) e (5) discutem, respectivamente os resultados experimentais e conclusão.

2 Conceito do robô

2.1 Requisitos

De acordo com Chu et al. (2010), o projeto de um RE deve levar em consideração três aspectos principais:

- *Peso*: Quanto mais pesado for o robô, maior é seu consumo energético.
- *Mobilidade*: Em algumas situações, o robô deve ser capaz de se mover por caminhos complexos e fazer manobras críticas para realizar a tarefa.
- *Aderência*: A capacidade de escalar está diretamente relacionada com o sistema de adesão e sua flexibilidade de suportar fatores externos como a variação do efeito gravitacional.

2.2 Projeto do Robô

A estrutura mecânica do robô é exibida na Figura 2, ela basicamente consiste de dois conjuntos paralelos de rodas fixas (não direcionáveis). Cada conjunto é ligado por uma correia, logo, apesar de ter quatro rodas, dois motores controlam o movimento; só existem dois graus de liberdade associados aos atuadores. Visando o requisito de aderên-

cia e mobilidade, os conjuntos são desalinhados, de modo que ao ultrapassar pequenos obstáculos apenas uma das rodas seja interferida por vez.

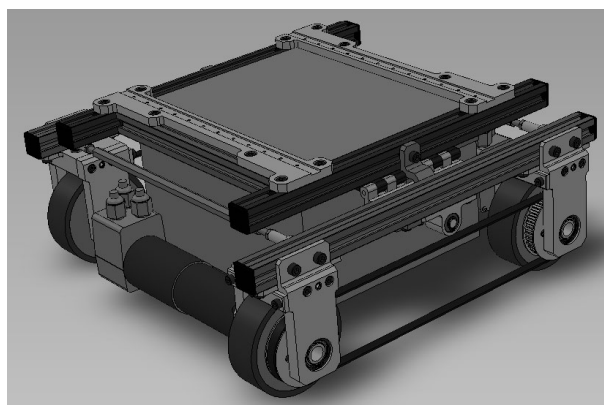


Figura 2: Estrutura mecânica do robô.

Cada roda consiste de um conjunto de dois imãs de neodímio anelares axialmente polarizados (Fig. (3)), posicionados entre dois discos de aço e presos por parafusos de baixa permeabilidade magnética, o conjunto é coberto por uma borracha de poliuretano de alta dureza.

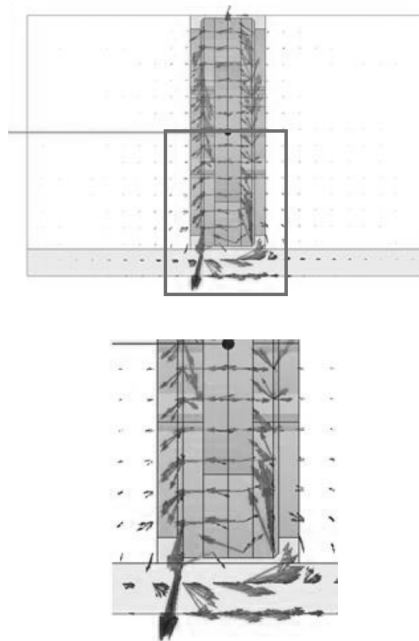


Figura 3: Análise do campo magnético da roda em contato com superfície de ferro.

A Figura 4 exibe uma das rodas já com a polia, sua força magnética é de aproximadamente 440N. Mais detalhes sobre a construção mecânica do robô podem ser encontrados em Rovani (2013).

2.3 Modelo Cinemático

A análise cinemática do robô é realizada assumindo um sistema de referência global represen-



Figura 4: Roda magnética com polia.

tado pelo sistema (X_G, Y_G, Z_G) como mostra a Figura 5.

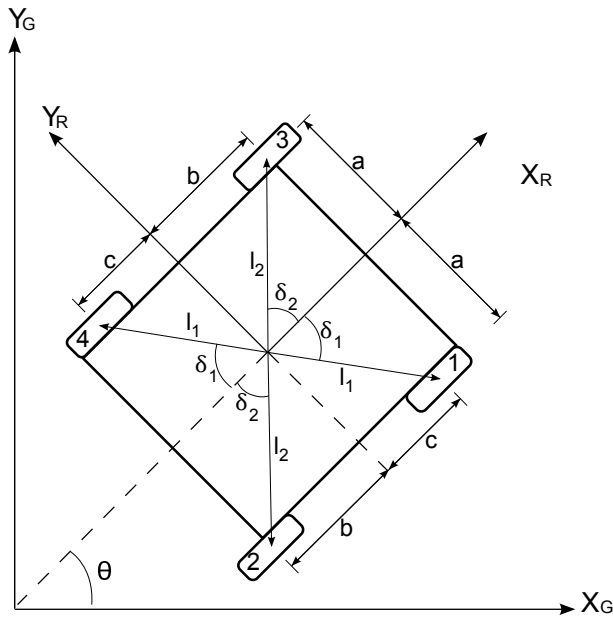


Figura 5: Sistemas de referência e numeração das rodas do robô.

O sistema de referência do robô é representado por (X_R, Y_R, Z_R) , posicionado no centro do chassi e rotacionado de θ do sistema global. A pose do robô é representada no sistema global como

$$\xi_G = [x \quad y \quad \theta]'. \quad (1)$$

O modelo cinemático do robô pode ser obtido por meio da união das restrições cinemáticas (de rolagem e de deslocamento lateral) de suas rodas. Para tanto é necessário descrever as rodas em relação ao sistema do robô. A Tabela (1) reúne os três parâmetros que descrevem as rodas, eles utilizam algumas medidas do robô exibidas na Fig.(5). Estes parâmetros são expressos em termos de coordenadas polares, sendo l a distância da roda à origem $O(X_R, Y_R, Z_R)$, α o ângulo de rotação em Z_R e β o ângulo do plano da roda em relação ao chassi do robô.

Roda	l	α	β
1	l_1	$-\delta_1$	$\pi/2 + \delta_1$
2	l_2	$-\pi + \delta_2$	$3\pi/2 - \delta_2$
3	l_2	δ_2	$\pi/2 - \delta_2$
4	l_1	$\pi - \delta_1$	$-\pi/2 + \delta_1$

Tabela 1: Parâmetros das rodas

A restrição de rolagem garante que toda rotação da roda implica em deslocamento do robô (não há derrapagem), ou seja,

$$[D_a \ D_b \ D_c]R(\theta)\dot{\xi}_G - r\dot{\varphi} = 0, \quad (2)$$

onde, r é o raio efetivo da roda, $\dot{\varphi}$ é a matriz 4×1 de velocidades angulares das rodas $[\dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dot{\varphi}_3 \ \dot{\varphi}_4]^T$ ($\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2$ e $\dot{\varphi}_3 = \dot{\varphi}_4$) e

$$\begin{bmatrix} D_a \\ D_b \\ D_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\alpha + \beta) \\ -\text{cos}(\alpha + \beta) \\ -l\text{cos}(\beta) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

A segunda restrição imposta é a de deslizamento lateral, que estabelece que a roda não pode se deslocar no plano ortogonal ao seu, isto é,

$$[C_a \ C_b \ C_c]R(\theta)\dot{\xi}_G = 0, \quad (4)$$

onde,

$$\begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{cos}(\alpha + \beta) \\ \text{sen}(\alpha + \beta) \\ l\text{sen}(\beta) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

A união das restrições de rolagem e deslizamento lateral (Equações 2 e 4) para todas as rodas resultam no arranjo cinemático,

$$\begin{bmatrix} D \\ C \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_G = \begin{bmatrix} J_R \dot{\varphi} \\ Z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

onde D e C são uma matrizes 4×3 contendo os coeficientes das equações de restrição de rolagem e deslocamento lateral, J_R é uma matriz 4×4 cuja diagonal relaciona os raios das rodas e Z uma matriz 4×1 de zeros.

Assim, define-se a cinemática diferencial inversa do robô como,

$$\dot{\varphi} = J^{-1}\dot{\xi}_G, \quad (7)$$

onde,

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} J_R^{-1} D \\ C \end{bmatrix} R(\theta). \quad (8)$$

Da Equação (7) chega-se diretamente à equação da cinemática diferencial direta do robô,

$$\dot{\xi}_G = J\dot{\varphi}. \quad (9)$$

A validação do modelo cinemático é realizada com a aplicação de uma trajetória curva, impondo às juntas um perfil de velocidade trapezoidal. O atuador responsável pelo movimento das rodas 1 e 2 possui velocidade superior ao que aciona as rodas 3 e 4. A Figura 6 exhibe a trajetória, sendo a origem da mesma o ponto $(0,0)$.

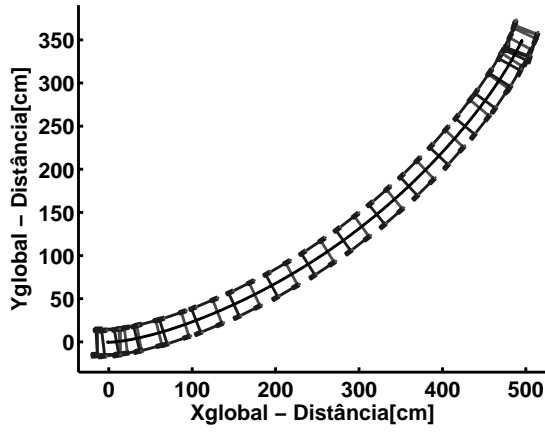


Figura 6: Trajetória simulada.

2.4 Modelo Dinâmico

O deslocamento no espaço tridimensional adiciona complexidade ao sistema, pois neste caso o robô deve ser capaz de se mover em planos perpendiculares ao plano da terra. Em sistemas robóticos móveis, o efeito da força gravitacional normalmente é negligenciado, pois os sistemas navegam apenas no plano perpendicular à gravidade. Entretanto, a inspeção de tanques requer movimento em todas as orientações, logo a força gravitacional não pode ser negligenciada porque sua influência prejudica a navegação.

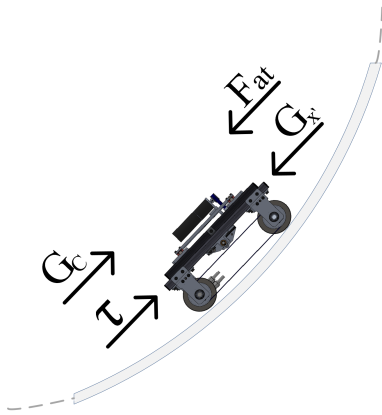


Figura 7: Forças atuantes no deslocamento na superfície interna do tanque.

Em robôs móveis os atuadores das rodas são responsáveis por gerar o torque do sistema de locomoção e devem ser capazes de mover o robô contra a força de atrito (F_{at}) e a componente superficial da força gravitacional ($G_{X'}$), como apresentado na Figura (7).

A compensação ativa da força gravitacional (CAFG) usa as informações de aceleração e orientação do corpo rígido, adquiridos do sistema de navegação inercial (composto por acelerômetros e giroscópios), para determinar a influência gravitacional real na direção de giro dos atuadores. Os

torques dos atuadores (τ) compensam a influência gravitacional adicionando no controlador de trajetória uma porção de torque proporcional à influência gravitacional superficial, como,

$$\bar{\tau}_{(t+1)} = \check{\tau}_{(t)} + K_p(q)\check{e}_v + K_d(q)\check{e}_a, \quad (10)$$

Onde, $\check{\tau}$ é o torque com compensação gravitacional, K_p é o ganho proporcional, \check{e}_v é o erro de velocidade no espaço dos atuadores, K_d é o ganho derivativo e \check{e}_a é o erro de aceleração no espaço dos atuadores.

O torque com a CAFG é determinado de acordo com a correlação entre as medições de aceleração obtidas pelo acelerômetro de 3 graus de liberdade (por meio da lei de movimento de Newton) e pela orientação espacial do corpo rígido obtida pelo giroscópio,

$$\check{\tau} = \bar{M}(\phi)\check{\nu} + \bar{V}_m(\phi, \dot{\phi})\check{\nu} + \bar{F}_{fric}(\check{\nu}) + \bar{G}(\phi), \quad (11)$$

onde, $\bar{M}(\phi)$ é a matriz de componentes reais de inércia, $\bar{V}_m(\phi, \dot{\phi})$ é a matriz com as componentes reais centrípeta e Coriolis, $\bar{F}_{fric}(\check{\nu})$ é a componente real de fricção superficial, $\bar{G}(\phi)$ são as componentes reais da fusão dos sensores acelerômetro/giroscópio, ϕ é a orientação espacial do corpo rígido obtida pelo giroscópio, $\dot{\phi}$ é a velocidade angular mensurada do corpo rígido, $\check{\nu}$ é a aceleração medida pelos encoders das rodas e $\check{\nu}$ é a velocidade medida dos atuadores. Uma discussão mais aprofundada da análise dinâmica é apresentado em de Oliveira et al. (2012).

3 Controlador de tração

O ajuste dos controladores dos atuadores do robô não é trivial, pois suas rodas, em contato com superfície metálica, apresentam uma força de adesão magnética. A força magnética apresenta restrições à força de atrito e perturba o movimento do robô, principalmente quando o robô provém do repouso ou tem grandes variações de velocidade. Assim, o controlador de tração (posição/velocidade tendo em vista a força magnética) é ajustado para o ambiente com superfícies metálicas.

A inspeção impõe que o movimento do robô seja suave e preciso, pois o acoplamento do sensor de ultrassom com a superfície é realizado através de água, por meio de uma luva de contenção. Perturbações no movimento podem promover o desacoplamento da luva de contenção e prejudicar a inspeção.

Um controlador de tração é aplicado para controlar o movimento dos atuadores de acordo com estas restrições. O requisito de movimentação suave delimita que erros de velocidade são mais danosos que erros de posição. Nesse contexto, o controlador de velocidade foi ajustado para uma resposta rápida e o controlador de posição para uma

resposta suave. Ambos os controladores respeitam os limites físicos dos atuadores.

A Figura (8) mostra o experimento realizado para ajustar o controlador de tração em uma superfície metálica (seção do tanque).



Figura 8: Ajuste do controlador de tração na superfície metálica.

Na Figura (9) é possível observar que a resposta do controlador de posição apresenta pequenos erros aceitáveis e resposta suave, evitando picos de corrente indesejáveis.

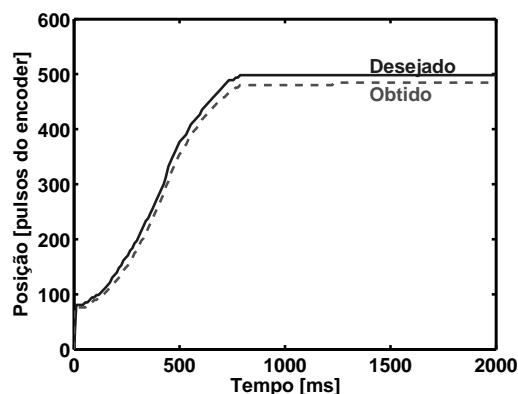


Figura 9: Resposta do controlador de posição.

O controlador de velocidade apresenta erros iniciais devido à perturbação da força magnética e da força de atrito. Entretanto, no momento que o movimento inicia (ou seja, exista velocidade) a resposta começa a convergir para o desejado minimizando a oscilação, como visto na Figura (10).

4 Resultados Experimentais

O robô foi projetado para trabalhar em estruturas esféricas, contudo os ensaios iniciais foram realizados em uma estrutura cilíndrica, Figura (11), pois a mesma garante que aspectos de funcionalidade e performance do robô sejam analisados.

No primeiro teste, validou-se o conceito do robô e o projeto das rodas, pois RE consegue se

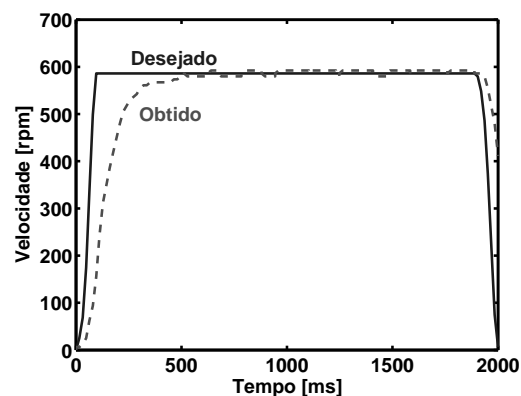


Figura 10: Resposta do controlador de velocidade.

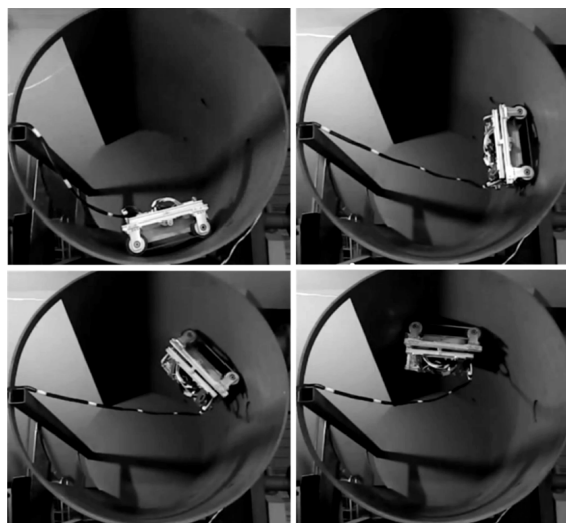


Figura 11: Estrutura de testes cilíndrica.

movimentar por toda estrutura e passar por pequenos obstáculos (deformações na superfície da estrutura) que perturbam a força de adesão magnética das rodas.

O seguinte teste verificou a capacidade do RE de carregar carga extra, um teste de versatilidade, pois quanto maior a carga extra admissível, maior a capacidade do robô de carregar equipamentos extras. A Figura (12) exhibe o robô durante o teste. Verificou-se que ele pode carregar uma carga de 12kg (mesmo que seu peso) respeitando as condições cinemáticas de não derrapagem.

A Figura (13) exhibe o perfil de velocidade das rodas para a trajetória de subida e descida do robô na superfície interna do cilindro.

A trajetória delimitada exige que a velocidade angular do robô assemelhe-se ao perfil de velocidade das rodas. A Figura (14) exhibe os dados adquiridos pelo giroscópio e, como esperado, é verificada a similaridade. As pequenas variações ocorrem devido imperfeições da superfície de teste.

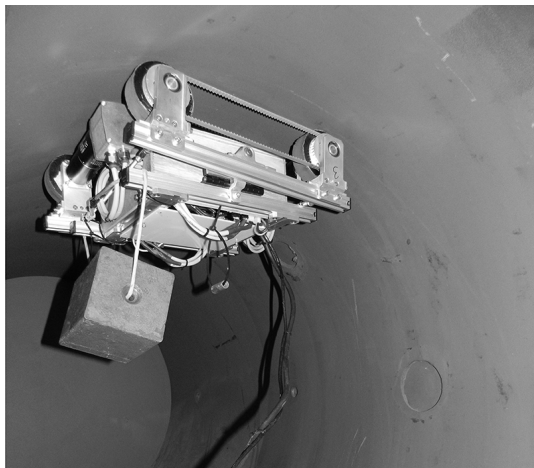


Figura 12: Ensaio de carga realizado na superfície interna do cilindro.

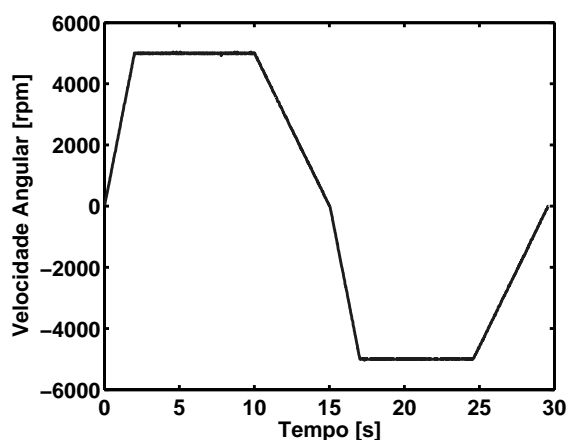


Figura 13: Velocidade angular dos motores - encoders.

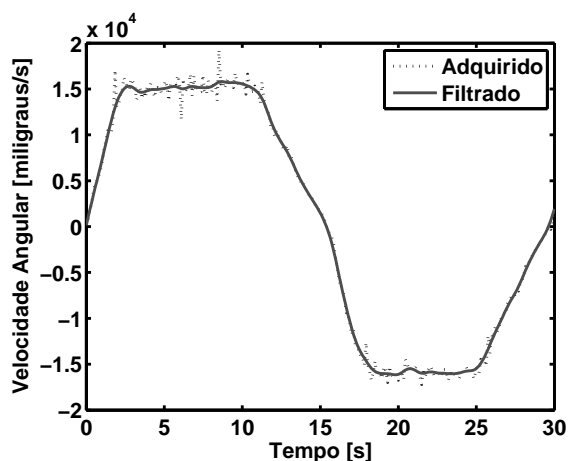


Figura 14: Velocidade angular no espaço operacional do robô - giroscópio.

5 Conclusões

Este artigo apresentou o projeto de um RE desenvolvido para inspecionar tanques de GLP. O objetivo deste trabalho foi desenvolver os modelos

cinemáticos e dinâmicos de modo a otimizar a operação do robô em seu ambiente de trabalho. Ajustes do controlador de tração foram realizados com sucesso, propiciando que o protótipo atendesse os requisitos de trabalho no ambiente de testes. Os resultados dos testes mostraram que a topologia mecânica e o projeto das rodas atingiram seu objetivo em performance com folga. A resposta de velocidade do sistema foi precisa, sem ação danosa da gravidade em seu perfil. Futuros trabalhos irão focar as áreas de arquitetura de controle do robô, comunicação, navegação e inspeção por ultrassom.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

Caprari, G., Breitenmoser, A., Fischer, W., Hürzeler, C., Tâche, F., Siegart, R., Nguyen, O., Moser, R., Schoeneich, P. and Mondada, F. (2012). "Highly compact robots for inspection of power plants", *Journal of Field Robotics* **29**: 47–68.

Chu, B., Jung, K., Han, C. and Hong, D. (2010). "A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **11**: 633–647.

de Oliveira, A. S., de Arruda, L. V. R., Junior, F. N., Espinoza, R. V. and ao Pedro Battistella Nadas, J. (2012). Adhesion force control and active gravitational compensation for autonomous inspection in lpg storage spheres., *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS)*, pp. 232–238.

Fischer, W., Caprari, G., Siegart, R. and Moser, R. (2011). "Locomotion system for a mobile robot on magnetic wheels with both axial and circumferential mobility and with only an 8-mm height for generator inspection with the rotor still installed", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **58**: 5296–5303.

Rovani, A. (2013). Desenvolvimento do protótipo de um robô para inspeção de cordões de solda em superfícies metálicas verticais, *Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Industrial Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba*. p. 117.