

ROBÔ MÓVEL PARA LIMPEZA DE TUBULAÇÕES PARA TRANSPORTE DE FERTILIZANTES

Vinicius Leite de Garcia¹; Everson Brum Siqueira²; Emanuel da Silva Diaz Estrada³; Paulo Lilles Drews Junior⁴; Rodrigo Zelir Azzolin⁵; Vinícius Menezes de Oliveira⁶; Silvia Silva da Costa Botelho⁷; Nelson Lopes Duarte Filho⁸

Resumo

O setor de fertilizantes é um segmento estratégico no país. As indústrias de fertilizantes sofrem com perda de produtividade nos momentos da parada para limpeza e manutenção, principalmente em tubulações para transporte de fertilizantes do tipo NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio). As atividades de limpeza se fazem necessárias para manter o processo de produção, uma vez que o material acumulado chega a obstruir a passagem do produto pelos tubos. Os materiais transportados, que em parte se acumulam nas tubulações, são particulados de adubo em fase de granulação. As paradas, além de necessitarem de períodos de resfriamento, envolvem a limpeza manual em ambiente inóspito. O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade de construção de uma estrutura robótica móvel para limpeza de tubulações em plantas industriais de fertilizantes. Como resultados são apresentados estudos com vistas a projetar e simular o comportamento do robô para executar tal tarefa.

Palavras-chave: Robô móvel; fertilizantes; limpeza; indústria.

Abstract

The fertilizer sector is a strategic segment in the country. The fertilizer industries suffer from loss of productivity at the time of the cleaning and maintenance shutdown, especially in NPK (Nitrogen, Phosphorus and Potassium) transport pipelines. The cleaning activities are necessary to maintain the production process, since the accumulated material makes it impossible to pass the product through the tubes. The transported materials, which in part accumulate in the pipes, are particulate fertilizers in the granulation phase. In addition to the need for cooling times, these stops involve manual cleaning in an inhospitable environment. The objective of this work is to study the feasibility of constructing a mobile robotic structure for pipe cleaning in industrial fertilizer plants. As results are presented studies to design and simulate the behavior of the robot to perform such task.

Keywords: Service robot; fertilizers; pipe cleaning; industry.

¹ Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: vinicius.degarcia@hotmail.com.

² Mestre em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: eversonbrumm@furg.br.

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: emanuelestrada@gmail.com.

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: paulodrews@furg.br.

⁵ Professor do Programa de Pós-Graduação em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: rodrigoazzolin@gmail.com.

⁶ Professor do Programa de Pós-Graduação em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: vinicius@furg.br.

⁷ Professora do Programa de Pós-Graduação em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: silviacb@furg.br.

⁸ Professor do Programa de Pós-Graduação em Computação-PPGCOMP pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: nelson.duarte filho@gmail.com.

Introdução

O setor de fertilizantes é um segmento estratégico no país, visto que a produtividade deste ramo tem impacto direto na produção de alimentos. Segundo Alexandratos et al. (2012), haverá nove bilhões de pessoas no mundo, no ano 2050.

Segundo Taglialegna, Paes Leme e Sousa (2007), a produção de fertilizantes realiza-se em três etapas distintas. Na primeira, ocorre a produção das matérias primas básicas e intermediárias. Após, fabricam-se os fertilizantes básicos nitrogenados, fosfatados e potássicos. Por fim, na etapa de misturas, as empresas compram matérias primas e fertilizantes básicos e elaboram as formas NPK nas dosagens adequadas aos diferentes tipos de solo. Ao longo desse processo de produção ocorrem deposição e adensamento de pó nas tubulações industriais.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade de construção de uma estrutura robótica móvel para limpeza de tubulações em indústrias de fertilizantes. Propõe-se um modelo conceitual de um sistema robotizado capaz de se locomover e realizar as tarefas de limpeza. O modelo conceitual de um sistema robotizado foi validado em simulação, em cenário semelhante às tubulações reais.

O contexto a ser tratado envolve ambiente estruturado, semi-estático e conhecido. Entretanto, o robô deverá ter autonomia nas tarefas de percepção e atuação. Além disso, seu projeto deve considerar a característica inóspita do meio, sendo enxuto do ponto de vista estrutural, com mecanismos de locomoção e atuação que convivam com a agressividade do ambiente.

A vantagem no uso de robôs para essa aplicação é substituir a mão de obra humana nessa tarefa insalubre e perigosa. Afora isso, os tempos de parada do processo de produção serão reduzidos, proporcionando uma maior produtividade da empresa.

Na próxima seção apresentam-se os trabalhos relacionados a limpeza e a inspeção de tubulações em geral. A Seção 3 aborda a metodologia adotada, destacando os métodos de projeto. Na Seção 4, apresentam-se os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento e análise dos estudos realizados. Por fim, na Seção 5, apresentam-se as considerações finais.

1 Desenvolvimento

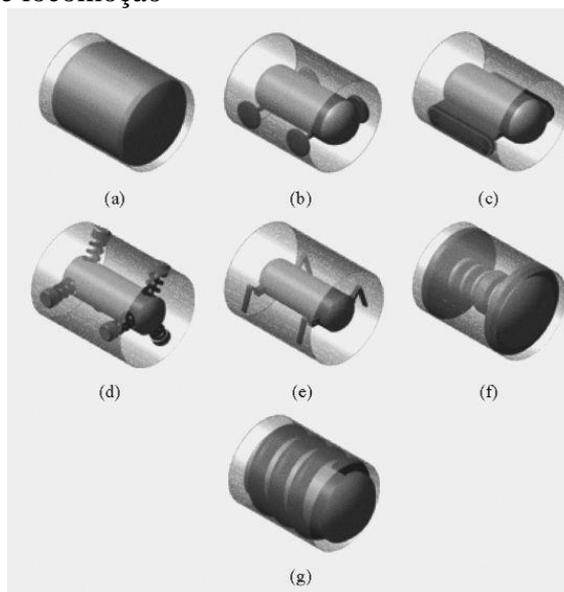
1.1 Trabalhos relacionados

Na literatura são encontrados diversos equipamentos automáticos que se deslocam na parte interna de tubulações. Entretanto, a maioria dos trabalhos encontrados referem-se a

somente a limpeza e inspeção das paredes em locais de nível baixo e moderado de insalubridade, sendo que o caso aqui analisado envolve ambiente bastante corrosivo e com altas temperaturas. Assim, a seguir serão referenciados trabalhos que poderiam, através de modificações, serem utilizados para limpeza de dutos nas empresas de fertilizantes.

Os equipamentos robóticos utilizados para inspeção de tubulações podem ser classificados de acordo com o método de locomoção adotado no interior da tubulação, segundo Roh and Choi (2005), conforme pode ser visualizado na Fig. 1.

Figura 1 - Diferentes tipos de locomoção



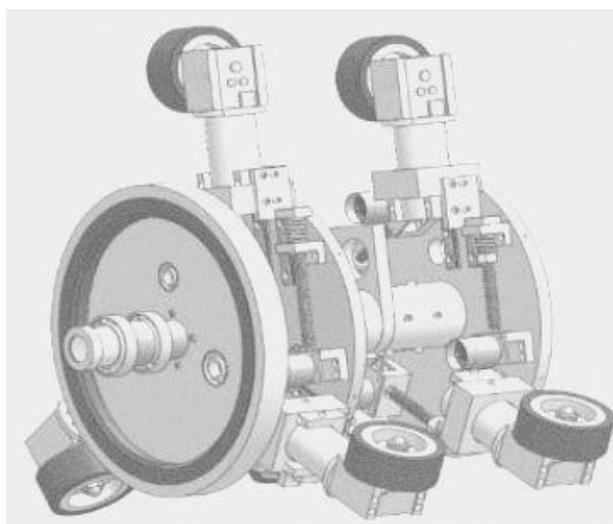
Fonte: Os autores.

As peculiaridades de cada método permitem aplicação em dutos de diferentes materiais com diferentes diâmetros. A Fig. 1(a) representa um robô do tipo PIG. Esses tipos de robôs são utilizados para inspecionar tubulações em que o próprio fluido serve de força motriz para deslocamento do robô. Normalmente, esse tipo de robô é utilizado em oleodutos. A Fig. 1(b) representa um robô com rodas motrizes. As principais características desse tipo é a facilidade de construção e seu baixo custo. A Fig. 1(c) representa um robô que utiliza o método de esteira para locomoção. A vantagem desse tipo de locomoção se deve a maior área de contato da esteira com a tubulação. Sendo assim, o robô consegue avançar sobre os obstáculos com maior facilidade. Na Fig. 1(d) representa um robô que pressiona as paredes da tubulação, adotando mecanismos de adaptação a variação de diâmetro interno da mesma. A Fig. 1(e) representa um robô com acessórios análogos a pernas. Esse tipo de locomoção permite o deslocamento em variadas condições de operação. Entretanto, são de difícil construção e controle. A Fig. 1(f) representa um robô que tem como característica a analogia com a locomoção das larvas e a Fig.

1(g) um robô do tipo parafuso que executa o movimento helicoidal na medida em que o mesmo avança nas tubulações.

Um dos trabalhos encontrados para limpeza de dutos em empresas de fertilizantes apresenta o robô NPK (Tran et al., 2014). Esse robô, conforme pode ser visualizado na Fig. 2, utiliza rodas para locomoção, forçando as mesmas em direção a superfície interna. Assim, o robô é capaz de adaptar-se a variações de diâmetro da tubulação (320-440mm). O robô NPK é composto por três hastes distanciadas em 120 graus, o que permite a centralização da ferramenta de limpeza acoplada a parte frontal do robô.

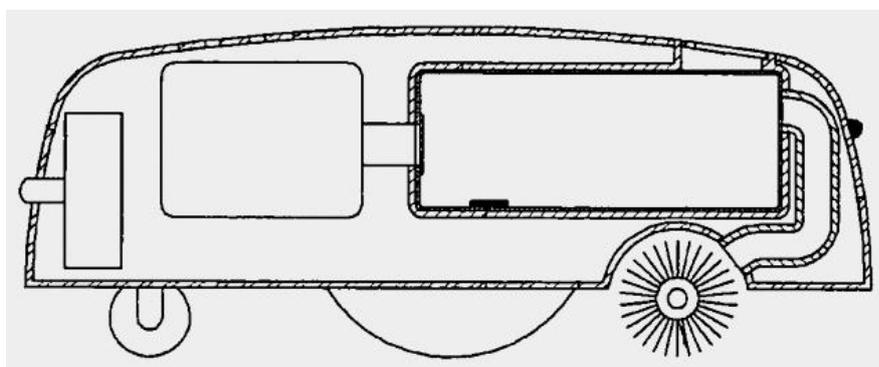
Figura 2 - Robô NPK proposto para limpar os dutos de transporte de NPK.



Fonte: Os autores.

Um robô móvel com capacidade de aspirar o pó e armazená-lo, para posteriormente descarregamento em um dock é proposto em (Lee et al., 2009). Além disso, esse dock, tem a capacidade de carregar a bateria do sistema. Esse robô possui um dispositivo de controle remoto permitindo ser conduzido a distância. O design do mesmo pode observado na Fig.3.

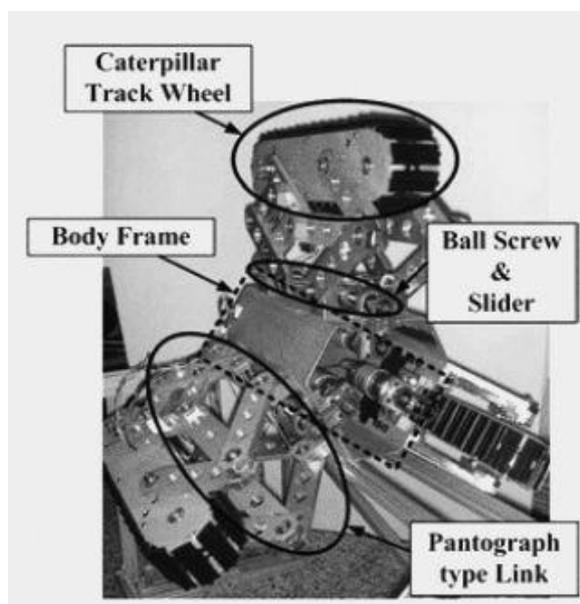
Figura 3 - Robô para aspirar e armazenar o pó.



Fonte: Os autores.

Um robô do tipo esteira é proposto por Kim et al. (2009). Foi inicialmente desenvolvido para inspecionar tubulações de água do mar. Esse robô, conforme pode ser visualizado na Fig. 4, foi projetado para percorrer longas distâncias. Uma sua característica é a capacidade de adaptação a tubos de 600 a 800 mm. Uma escala maior permitiria a adaptação para uso em empresas de fertilizantes. Para isso, talvez baste apenas o uso de equipamentos de limpeza acoplados ao centro do robô. No entanto, um dos possíveis problemas a enfrentar seria a corrosão que ocorreria no robô. Como referido acima, o ambiente interno nas tubulações da indústria de fertilizantes é bastante inóspito, podendo ser agressivo ao material do robô, que em sua maioria são construídos em alumínio.

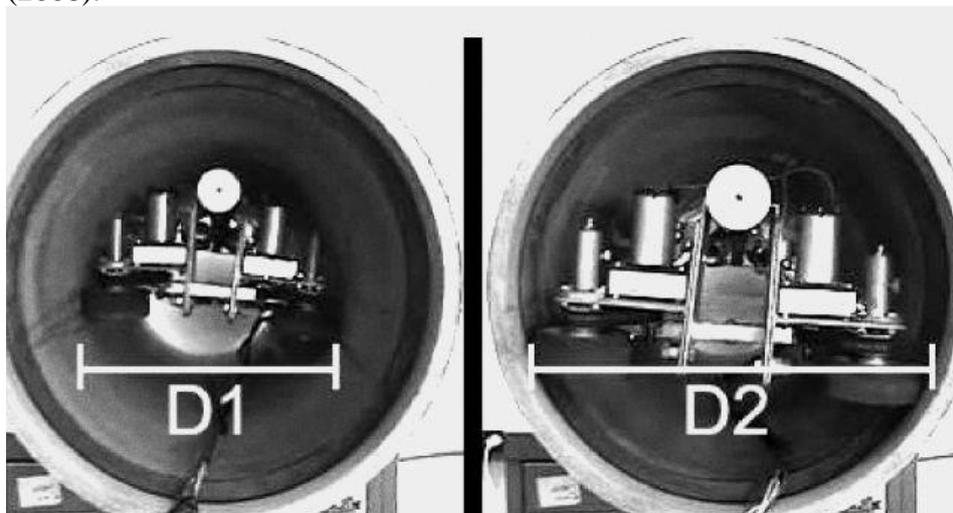
Figura 4 - Solução automatizada proposta por Kim et al (2009).



Fonte: Os autores.

Um outro sistema robótico que poderia eventualmente ser usado, se adaptado, é o proposto por Mello Jr et al. (2008). Esse robô, conforme pode ser visualizado na Fig. 5, possui rodas pressionadas por um sistema de molas contra a parede da tubulação. O protótipo foi construído originalmente para inspecionar cabos de energia elétrica no interior de eletrodutos com 300 mm de diâmetro. A utilização desse tipo de robô implicaria sua fabricação em material resistente a corrosão e dotá-lo de um sistema que permitisse acoplar escovas de limpeza e um duto aspirador de pó.

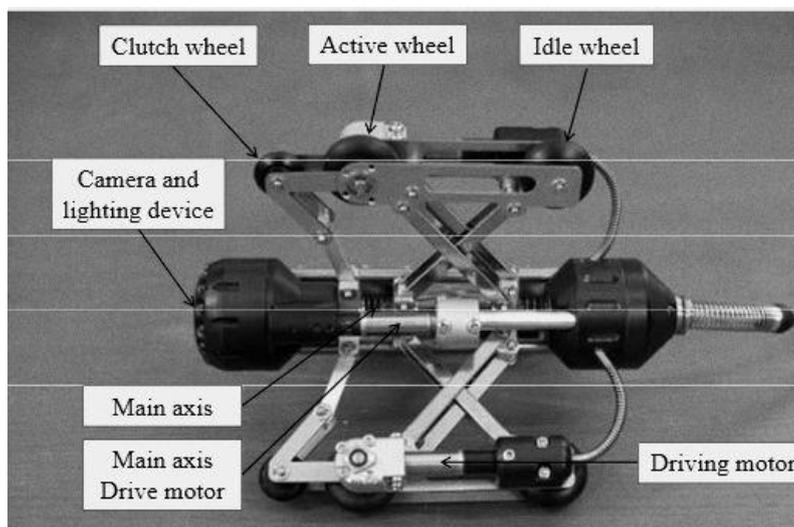
Figura 5 - Robô proposto para inspecionar os cabos elétricos dentro da tubulação proposto por Mello Jr et al. (2008).



Fonte: Os autores.

Um outro design interessante para a problemática em questão é proposto em Kwon et al. (2010). O robô, apresentado na Fig. 6, consegue deslocar-se em curvas de 90 graus e conexões em T. Foi desenvolvido para inspecionar tubulações que podem variar de 90 a 110 mm. A utilização desse robô nas tubulações de NPK implicaria o seu aumento de tamanho e a sua reconstrução em material resistente ao ambiente corrosivo.

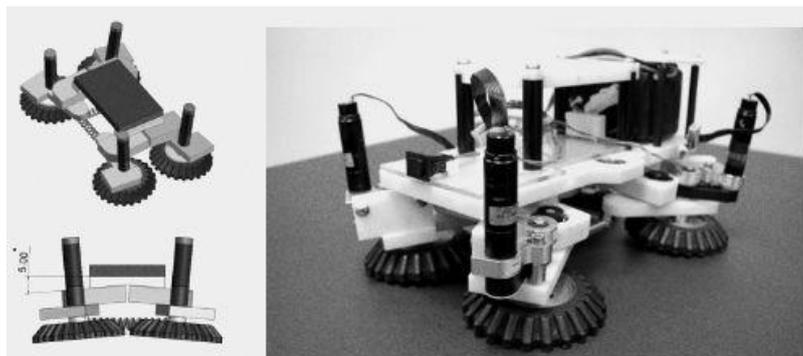
Figura 6 - Robô proposto por Kwon et al. (2010).



Fonte: Os autores.

Já o Kantaro é um robô utilizado para inspecionar esgotos no Japão (Nassiraei, Kawamura, Ahrary, Mikuriya, & Ishii, 2007). Esse robô, conforme pode ser visualizado na Fig. 7, é capaz de inspecionar dutos de 200 à 300 mm.

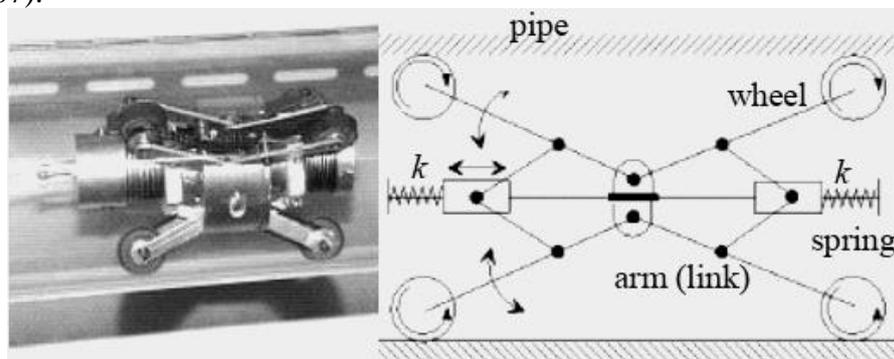
Figura 7 - Robô Kantaro.



Fonte: Os autores.

Uma plataforma móvel é proposta para inspecionar dutos de diâmetros de 140 a 200 mm (Tatar, Mandru, & Ardelean, 2007). É um robô, conforme visualizado na figura 8, do tipo duas rodas adaptativo com características interessantes. Esse modelo foi proposto para deslocar-se em curvas de 90 graus e em curvas no formato de T. Uma das ideias é a utilização do mesmo protótipo para torná-lo modular para transportar o equipamento necessário.

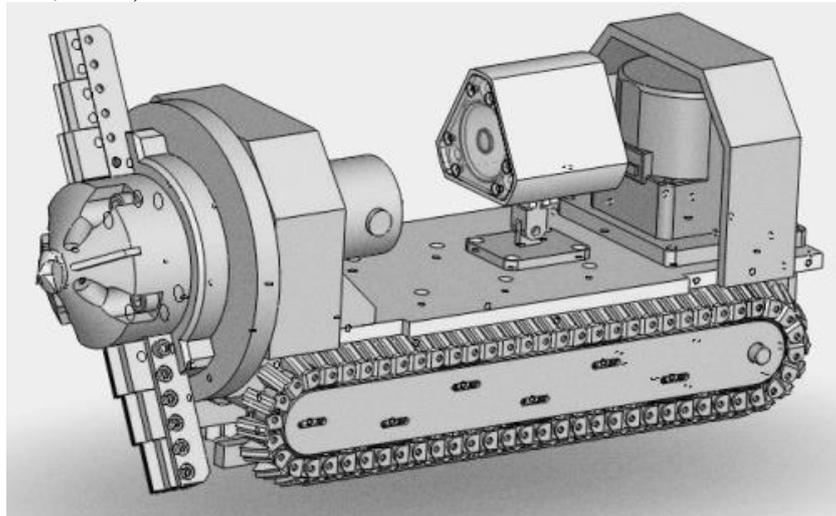
Figura 8 - Mini robô proposto para realizar tarefas de inspeção nas tubulações (Tatar, Mandru, & Ardelean, 2007).



Fonte: Os autores.

Um robô móvel do tipo lagarta é proposto para limpar as tubulações de esgoto no Vietnã (Truong-Thinh, Ngoc-Phuong, & Phuoc-Tho, 2011). Esse equipamento, figura 9, é utilizado para inspecionar tubulações com diâmetros menores que 800 mm. Ele possui acesso remoto que consegue ultrapassar obstáculos de até 100 mm.

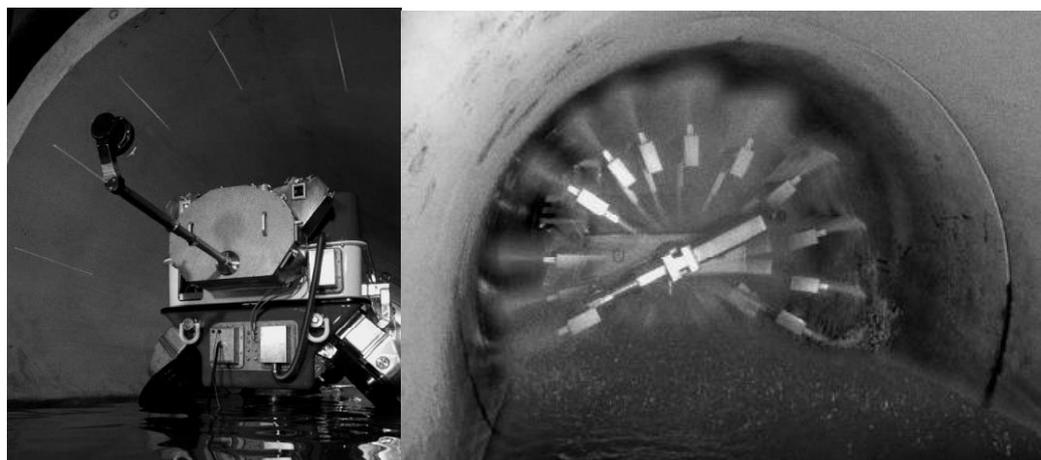
Figura 9 - Um estudo do robô de limpeza e inspeção de tubulações (Truong-Thinh, Ngoc-Phuong, & Phuoc-Tho, 2011).



Fonte: Os autores.

Um outro sistema robótico do tipo rodas, figura 10, é utilizado para inspecionar e limpar a superfície interna de dutos de concreto (Saenz, Elkmann, Stuerze, Kutzner, & Althoff, 2010). A tubulação em testes práticos pode alcançar 2300 mm de diâmetro. A ferramenta de limpeza é composta por diversos jatos de água em torno de toda a extensão do duto. A forma de limpeza mostra-se muito interessante, porém a ideia é trocar os jatos de água por sistemas pneumáticos de ar comprimido.

Figura 10 - Robô para inspecionar e limpar dutos com grandes diâmetros de concreto



Fonte: Os autores.

2 Metodologia

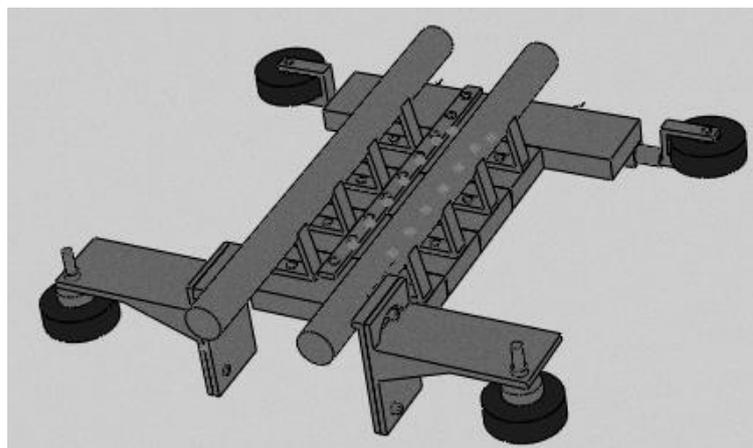
Inicialmente, foi realizado um levantamento das condições do ambiente onde o robô móvel para limpeza de tubulações deverá atuar. As seguintes características foram elencadas:

- Finalidade da aplicação;
- Propriedades físico-químicas do material a ser transportado;
- Condições ambientais de funcionamento do robô;
- Capacidades estruturais e dimensões das tubulações;
- Volume e estado do material a ser removido das tubulações;

Conhecidas essas características deu-se início a escolha e modelagem do robô para realizar a limpeza. O projeto mecânico idealizado foi esboçado, com o suporte de sistemas computacionais, e simulado nesses sistemas o funcionamento do protótipo virtual.

O robô escolhido tem como funcionalidade se deslocar utilizando rodas acionadas individualmente por motores e um sistema de molas que pressionam as rodas contra a parede da tubulação. Essa característica se mostrou bastante vantajosa. O exemplo do modelo é apresentado na Fig. 11. Para que possa manter-se alinhado em qualquer direção radial desejada, no tubo, as rodas da frente do robô são articuladas e possuem motores de propulsão. Assim, de forma controlada, o robô poderá ser mantido em qualquer inclinação em relação ao eixo do tubo. Além do sistema de locomoção, deverá ser fixado no robô o sistema de limpeza, constituído de escovas de aço para retirada das incrustações e duto de sucção para remoção do material retirado para fora do tubo. Para o esboço do protótipo foi utilizado o software SolidWorks na versão de demonstração Ângelo et al. (2002).

Figura 11 - Desenho do protótipo do robô no SolidWorks.



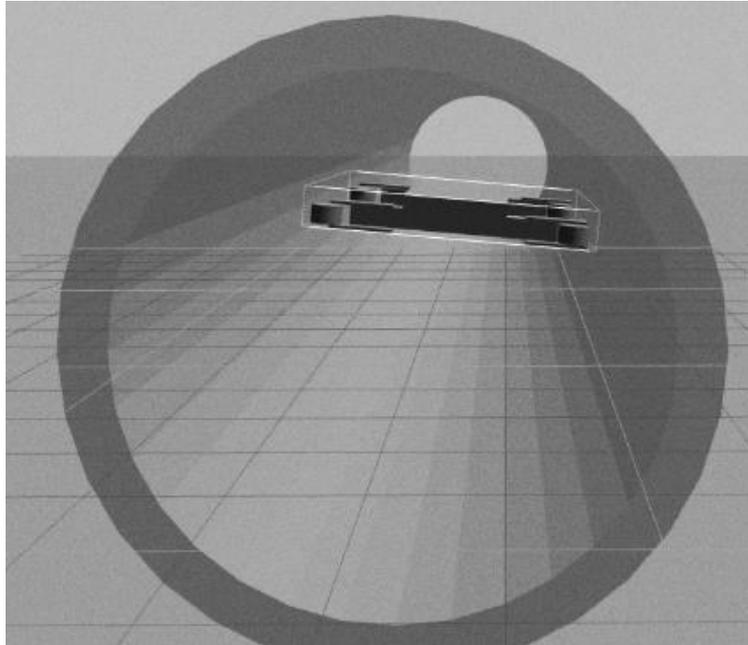
Fonte: Os autores.

Para a simulação física do protótipo foi utilizado o software Gazebo⁹. Esse foi escolhido pois, além de ser gratuito, fornece ferramentas de fácil construção de protótipos. O desenho do protótipo no Gazebo pode ser visualizado nas Figs. 12 e 13. As figuras mostram como o

⁹ Link para visualização do software: <http://gazebosim.org/>

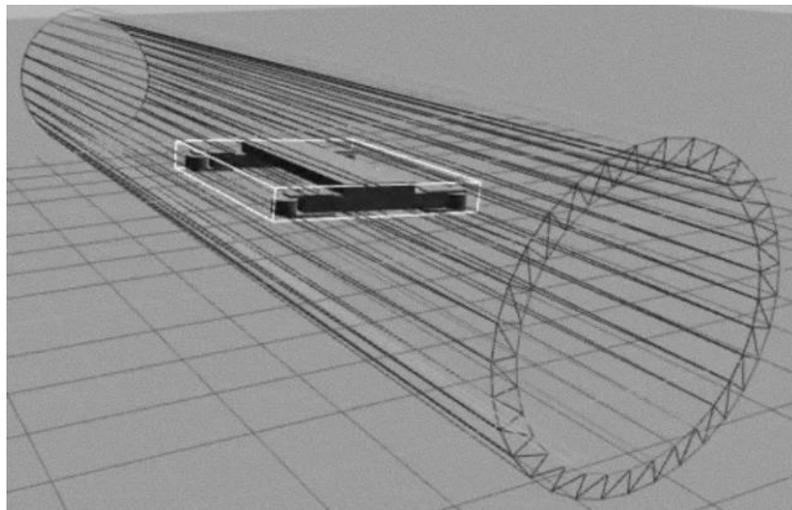
protótipo poderá se locomover ao longo da tubulação. Nas simulações observa-se que as rodas frontais e traseiras são tracionadas contra a parede do duto permitindo o movimento do mesmo no sentido axial e radial.

Figura 12 - Desenho frontal da simulação do robô no Gazebo.



Fonte: Os autores.

Figura 13 - Desenho isométrico da simulação do robô no Gazebo.



Fonte: Os autores.

Para a simulação do deslocamento do robô no interior da tubulação foi projetado um tubo de 1600 mm de diâmetro no SolidWorks e exportado para o Gazebo.

Determinadas as características iniciais dos componentes, os mesmos serão ajustados para as dimensões comerciais e os cálculos então refeitos. Ou seja, serão especificadas e

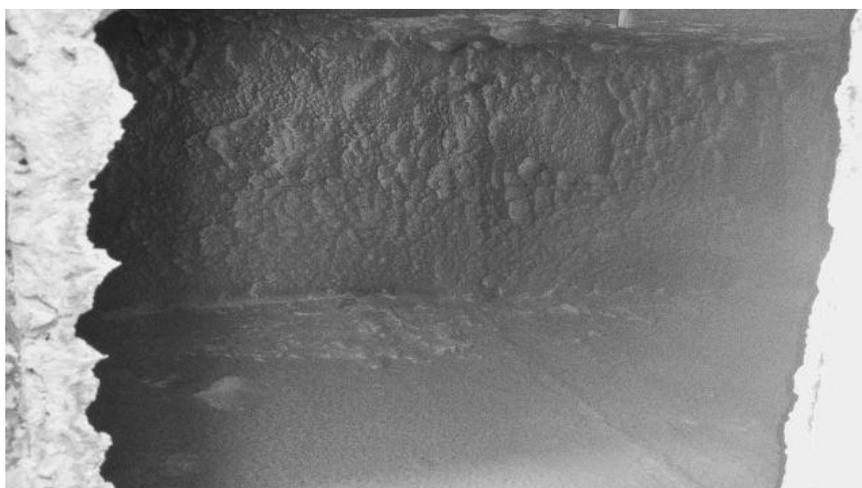
dimensionadas as peças estruturais e os devidos elementos de fixação, assim como escolhidos os dispositivos eletroeletrônicos que irão equipar o robô.

3 Resultados

O projeto do robô móvel para limpeza de tubulações de fertilizantes encontra-se em análise e desenvolvimento. Os resultados obtidos até o momento são: projeto conceitual de uma plataforma robótica para executar limpeza em dutos para transporte de fertilizantes com diâmetro de até 2000 mm. O projeto prevê que o robô será equipado com um conjunto de sensores e atuadores que permitam ao mesmo locomover-se ao longo das seções dos tubos e rotacionar no interior dos mesmos. Para analisar e verificar seu comportamento um protótipo inicial foi renderizado¹⁰.

Na indústria de fertilizantes visitada, na qual se pretende instalar o robô de limpeza, observou-se que o ambiente é insalubre e a espessura das incrustações pode chegar a níveis de 50 a 180 mm de espessura, conforme pode ser visualizado na Fig. 14. Em decorrência disso, o projeto inicial poderá ser reavaliado e sofrer algumas modificações para ter o seu funcionamento pleno durante as paradas para manutenção.

Figura 14 - Tubulação



Fonte: Os autores.

4 Conclusão

A limpeza de tubulações de fertilizantes é ainda um problema para as indústrias desse tipo. Inovações tecnológicas que permitam manter os dutos limpos, com tempos de parada para

¹⁰ Link para visualização do protótipo virtual: <https://youtu.be/6HLhtOPHRV0>

manutenção reduzidos, são altamente desejados. Além de aumentar a produtividade e reduzir os custos da empresa, tais inovações reduzem os riscos a que são submetidos os trabalhadores que atualmente realizam esse tipo de serviço.

Neste trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico de soluções existentes. Entretanto, concluiu-se que poucas são as soluções disponíveis especificamente para o problema.

Desta forma, foram levantados um conjunto de requisitos para atender as características necessárias para a solução. Com base nestes requisitos foi proposto um modelo conceitual e funcional de robô. Este modelo foi simulado em um ambiente estruturado, similar ao real. Os resultados obtidos são promissores, validando o modelo e habilitando o projeto para a fase de construção de protótipo.

Como trabalhos futuros pretende-se construir o protótipo e testá-lo em ambiente controlado em laboratório. Com a finalidade de dimensionar os componentes do protótipo serão avaliadas questões relativas às propriedades físico-químicas do material a ser transportado, as condições ambientais, a capacidade estrutural e as dimensões das tubulações e o volume e estado do material a ser removido das tubulações. Por fim, o protótipo será construído com base em parâmetros comerciais e normas técnicas.

Os robôs móveis para limpeza de tubulações, de uma forma geral, são dispositivos que visam solucionar diferentes problemas dessa natureza, sendo um grande avanço tecnológico para o ramo industrial. No caso em questão, é possível aumentar a produtividade da indústria e reduzir o tempo de exposição dos trabalhadores a ambientes insalubres, diminuindo os riscos e danos à saúde dos mesmos.

O robô proposto como solução do problema, ainda não atendeu todas os quesitos levantados durante os estudos, necessitando de adaptações estruturais na empresa e no equipamento desenvolvido. Em trabalhos posteriores, o sistema robótico deverá sofrer reavaliações que visam satisfazer e atender as empresas de fertilizantes. Outras soluções podem ser idealizadas, como por exemplo, a utilização de transdutores ultrassônicos para reduzir o acúmulo de incrustações nas regiões mais críticas, ou seja, locais de alta concentração do NPK.

Referências

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. et al. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision** (Tech. Rep.). ESA Working paper FAO, Rome, 2002. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-ap106e.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

ÂNGELO, H.; CARROLO, J.; BEIRA, R. **Introdução ao Solid Works**. Instituto Superior Técnico: isboa: IST, 2002. Disponível em: <http://www.dem.ist.utl.pt/~m_desI/download/sebentasw_V2.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2019.

KIM, D.-W.; PARK, C.-H.; KIM, H.-K.; KIM, S.-B. **For19.ce adjustment of an active pipe inspection robot**. In Iccas-sice, p; 3792-3797, 2009.

KWON, Y.-S.; LEE, B.; WHANG, I.-C.; YI, B.-J. **A pipeline inspection robot with a linkage type mechanical clutch**. Intelligent robots and systems (iros), The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, p. 2850-2855, 2010. Disponível em: <<https://sci-hub.tw/10.1109/IROS.2010.5652391>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

LEE, Y. B.; YANG, S. S.; OH, Y. T.; KIM, J. H. **Robot cleaner system having robot cleaner and docking station**. United States Patent, 2007. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/fc/0a/51/71c550fd381e05/US7861366.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

MELLO JR, C.; GONÇALVES, E. M.; ESTRADA, E.; OLIVEIRA, G.; SOUTO JR, H.; ALMEIDA, R.; OLIVEIRA, V. (2008). **Tatubot–robotic system for inspection of undergrounded cable system**. IEEE Latin American Robotic Symposium 2008, p. 170–175, 2008.

NASSIRAEI, A. A.; KAWAMURA, Y.; AHRARY, A.; MIKURIYA, Y.; ISHII, K. **Concept and design of a fully autonomous swer pipe inspection mobile robot “kantaro”**. Robotics and automation IEEE International Conference, p. 136–143, 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4209082>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

ROH, S.-G.; CHOI, H. R. **Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines**. IEEE Transactions on Robotics, v. 21, n. 1, p 1-17, 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1391010>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

SAENZ, J.; ELKMANN, N.; STUERZE, T.; KUTZNER, S.; ALTHOFF, H. **Robotic systems for cleaning and inspection of large concrete pipes**. Applied robotics for the power industry (carpi), 2010 1st international conference on, p. 1–7, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5624448>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

TATAR, O.; MANDRU, D.; ARDELEAN, I. Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks. **Mechanika**, v. 68, n. 1, p. 60-64, 2007. Disponível em: <<http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue4/Version-7/J1304076472.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

TRAN, N. C. T.; NGUYEN, X. T.; NGUYEN, T. T.; NGUYEN, D. A. **Study on control of cleaning robot for fertilizer pipeline**, 2014.

TRUONG-THINH, N.; NGOC-PHUONG, N.; PHUOC-THO, T. (2011). **A study of pipe-cleaning and inspection robot**. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, p 2593-2598, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6181695>>. Acesso em: 14 mar. 2019.