

# **Robô de Inspeção Tubular**

## *Protótipo PIC – Pipeline Inspection Crawler*

### **Alexandre Costa**

*Graduando em Engenharia Mecatrônica*  
*UNIFACS Universidade Salvador*  
[alexandremlcosta@hotmail.com](mailto:alexandremlcosta@hotmail.com)

### **Jahir Resende**

*Graduando em Engenharia Mecatrônica*  
*UNIFACS Universidade Salvador*  
[jaimecalost@yahoo.com.br](mailto:jaimecalost@yahoo.com.br)

### **Matheus Cedro**

*Graduando em Engenharia Mecatrônica*  
*UNIFACS Universidade Salvador*  
[matheus.cedro@gmail.com](mailto:matheus.cedro@gmail.com)

### **Victory Fernandes**

*Professor Orientador, Departamento de Engenharia UNIFACS Universidade Salvador*  
*Coordenador de P&D da TKS Software*  
*Engenheiro Eletricista*  
[victoryfernandes@yahoo.com.br](mailto:victoryfernandes@yahoo.com.br)

### **Resumo**

A aplicação de dispositivos de inspeção tubular é muito utilizada para solução de problemas encontrados em diversos ramos da indústria. É preciso garantir através de manutenções preditivas, preventivas e corretivas a qualidade dos serviços e resultados obtidos nas linhas e malhas de distribuição. Para tanto são utilizados aparatos capazes de se deslocar ao longo da tubulação, levando consigo sensores de natureza variada a depender do tipo da inspeção, que realizam a aquisição de dados e permitem a análise remota e detalhada do problema por parte de especialista. Tais dispositivos conhecidos na literatura como PIC – *Pipeline Inspection Crawler* reduzem consideravelmente os custos de manutenção da tubulação e levam o especialista a locais antes inacessíveis, principalmente quando se tratando de tubulações subterrâneas. Este artigo aborda aspectos da construção mecânica, eletrônica e computacional de protótipo funcional semi-autônomo de robô PIC com controle computadorizado para inspeção visual de dutos, capaz de se deslocar horizontal e verticalmente. Este sistema é dotado de recursos de anotação visual e textual de fotos com a finalidade de manter registros históricos de inspeção em banco de dados e geração de relatórios. Tal projeto abre precedente para a criação de uma linha de desenvolvimento de produtos e serviços de robótica com tecnologia nacional aplicados à solução de problemas do parque industrial.

**Palavras-chave:** *PIC; PIG; Inspeção; Tubulação; Robô.*

## **Pipeline Inspection Robot** *PIC Prototype – Pipeline Inspection Crawler*

### **Abstract**

*Pipeline inspection tools are widely applied on solving industry common problems. It is mandatory to keep the pipeline quality of service through predictive, preventive and corrective maintenance programs. In order to get the best results, specially designed devices are needed. Capable of going inside the pipes these devices can carry a wide variety of sensors, depending on the kind of inspection being done, capturing and sending data information to a remote specialist for further analysis. Known on the literature as PIC – Pipeline Inspection Crawlers, these robots can considerably reduce pipeline maintenance costs by taking the specialist knowledge to places once inaccessible, especially when referring to underground pipes. This article covers mechanical, electronic and computational aspects related to the construction of a semi-autonomous PIC robot prototype for visual inspection of pipelines, capable of moving horizontally and vertically through the lines, supporting visual and textual annotation of photographs, database log and report printing software.*

**Key-words:** *PIC; PIG; Inspection; Pipeline; Robot.*

## 1.Introdução

### Contextualização do problema

Tubulações, como qualquer outra estrutura mecânica, estão sujeitas a danos de naturezas diversas. Tubulações podem sofrer com processo de entupimento progressivo causado por acúmulo de resíduos, além disso, ciclos térmicos, impactos mecânicos, vibrações, corrosão dentre outros fatores podem causar problemas que venham a curto ou longo prazo prejudicar a operação da malha como um todo (Eiki, 2005). Os impactos causados por problemas desta natureza são de vital relevância principalmente quando consideradas questões ambientais e econômicas.

Por questões óbvias relacionadas às características construtivas que dificultam o acesso à parte interna dos dutos, o processo de inspeção se torna bastante desafiador e requer o uso de aparatos especializados. Estes aparatos devem prover a especialistas informações necessárias para uma análise sob aspectos qualitativos e quantitativos, num processo conhecido como ILI – *In-Line Inspection*.

Como identificar de forma preventiva corrosões e fissuras? Uma vez o problema estabelecido na malha, como identificar de forma precisa o ponto exato da falha? Em sistemas de pequeno porte e de baixo custo por metro linear por vezes justifica-se a troca indiscriminada de toda uma seção sem uma avaliação mais aprofundada do problema, mas o que dizer de malhas de alto custo por metro linear, ou malhas subterrâneas?

Nestes casos utilizam-se mecanismos capazes de se deslocar ao longo da tubulação, levando consigo sensores de natureza variada, a depender do tipo de inspeção que realizam, a aquisição de dados e permite a análise remota e detalhada do problema por parte de especialista.

Estes dispositivos podem ser comumente encontrados na literatura com as seguintes nomenclaturas:

- **PIG** – *Pipeline Inspection Gauge*: Nomenclatura normalmente utilizada para designar dispositivos propulsionados pela pressão do produto na própria malha ou de força externa de outra natureza.
- **PIC** – *Pipeline Inspection Crawler*: Nomenclatura normalmente utilizada para designar dispositivo de natureza semelhante ao citado anteriormente, porém que se utiliza de propulsão própria para se deslocar pela malha.

O desenvolvimento de dispositivos desta natureza engloba aspectos de construção mecânica, eletrônica e computacional. Tais conhecimentos estão sendo aplicados de forma combinada na criação de um protótipo funcional semi-autônomo de robô PIC, tema do presente artigo. O robô dispõe de controle computadorizado para inspeção visual de dutos, capaz de se deslocar horizontal e verticalmente na malha, além de ser dotado de recursos de

anotação visual e textual de fotos. Estes registros geram um histórico de inspeção em banco de dados e possibilitam a geração de relatórios de inspeção.

Atualmente as soluções disponíveis para aplicações de inspeção tubular dependem, em sua grande maioria, de equipamentos importados e de alto custo, o que, muitas vezes inviabiliza a contratação e exploração deste serviço a nível regional. A escassa disponibilidade de estudos teóricos e desenvolvimento prático de soluções de inspeção tubular com tecnologia 100% nacional, juntamente com a proposta de criação de um protótipo funcional de baixo custo, foram dois desafios que motivaram esta pesquisa, ainda em andamento, e a conseqüente inscrição deste projeto no *I Prêmio BahiaGás de Inovação*.

## **2.tk-PIC Robô de Inspeção Tubular**

O projeto proposto prevê a criação de um protótipo funcional semi-autônomo de robô PIC que, fazendo uso de umbilical para alimentação e dados, deverá dispor dos seguintes recursos:

- Controle computadorizado através do uso da porta de comunicação paralela.
- Inspeção visual em tempo real de dutos através de câmera de vídeo, com sistema de iluminação próprio, integrada ao computador.
- Capaz de se deslocar horizontal e verticalmente numa tubulação de PVC de 10cm de diâmetro utilizando propulsão própria fornecida por motor de corrente contínua de 12V e sistema de tração por rodas com pressão positiva.
- Ser dotado de recursos de anotação visual e textual de fotos, registros histórico de inspeção em banco de dados e geração de relatórios de inspeção.
- Ter baixo custo de desenvolvimento, operação e manutenção.
- Ser funcional, portátil e ter autonomia mínima de 4 horas fornecida por baterias, no caso de indisponibilidade de fonte de alimentação bi-volt externa.

Tais características impõem inúmeros desafios ao processo de desenvolvimento do produto final, pois englobam aspectos de construção de diversas áreas do conhecimento que devem trabalhar de forma integrada. A divisão macro de tais áreas será utilizada de forma a estruturar a apresentação deste artigo, são elas: Mecânica, Eletrônica e Computação/Software.

### **2.1.Mecânica**

Algumas das principais restrições mecânicas impostas ao projeto dizem respeito a:

- **O robô deve ser capaz de se deslocar horizontal e verticalmente numa tubulação de PVC de 10 cm de diâmetro utilizando propulsão própria fornecida por motor e sistema de tração por rodas com pressão positiva.**

A dimensão da tubulação é de fundamental importância para definir limites para especificações de operação e estrutura mecânica do projeto. O fato de a tubulação ter sido especificada em 10 cm de diâmetro limita imediatamente duas das três dimensões volumétricas do espaço tridimensional, que não poderão exceder tal valor sob pena do robô não ser capaz de entrar no duto.

Isso implica dizer que a especificação dos motores para propulsão do robô bem como todos os demais componentes mecânicos envolvidos, tais como, caixas de redução para aumento de força tração, estabilizadores laterais de deslocamento, rodas, sistema de pressão para aumento do contato roda-tubo, chassi e carenagem, devem necessariamente ser dimensionados tendo em vista tal restrição.

Tendo em vista tais restrições optou-se pelo uso de um conjunto integrado de motor Bosch 12V CC mais caixa de redução, utilizado pela indústria automobilística nas aplicações de vidro elétrico. Tal conjunto conta com estrutura integrada robusta e de alto torque, e pode ser adquirido em lojas especializadas ao custo unitário de R\$80,00.

Tal conjunto constitui peça de maior dimensão do robô e já dispõe de furos para fixação de parafusos, sendo assim, foi utilizado de forma a constituir o chassi do robô, ao qual foram fixadas todas as demais estruturas mecânicas do mesmo tais como, câmeras, estabilizadores laterais de deslocamento, rodas, sistema de pressão para aumento do contato roda-tubo e carenagem.

Ao eixo do motor foi fixada roda de 6 cm de diâmetro usinada em nylon à qual foi adicionado pneu de borracha (O-Ring de vedação) para maior tração no piso. O uso de nylon se justifica pela facilidade de usinagem e densidade reduzida, proporcionando menor peso ao conjunto.



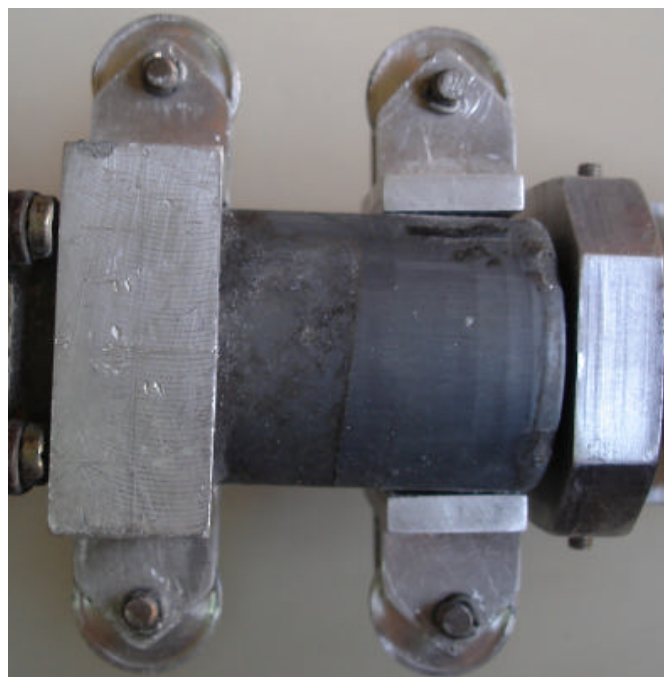
**Figura 01:** Roda de 6 cm de diâmetro usinada em nylon e fixada diretamente no eixo do motor

A roda do robô tem contato com o tubo somente em um ponto, sendo assim, fez-se necessária a criação de um dispositivo estabilizador com pressão positiva implementado com mola para aumento do contato roda-tubo.



**Figura 02:** Dispositivo estabilizador com pressão positiva implementado com mola para aumento do contato roda-tubo.

Para garantir movimentação estável do robô foram adicionados estabilizadores laterais que facilitam o deslocamento ao longo do tubo. Tantos os estabilizadores laterais, quanto as demais estruturas metálicas do projeto foram usinadas em alumínio de forma a garantir menor peso possível ao conjunto, além é claro da facilidade de sua usinagem.



**Figura 03:** Estabilizadores laterais.

A carenagem do robô foi modelada em fibra de vidro, material leve, extremamente resistente e de fácil modelagem. A carenagem protege os componentes internos do robô contra danos e foi concebida em forma de concha permitindo fácil abertura para manutenção dos componentes internos.



**Figura 04:** Carenagem em forma de concha para melhor manutenção interna.

- **O fato de o robô depender de umbilical para alimentação e dados implica dizer que o robô deve ter força tração suficiente para se deslocar arrastando consigo o umbilical.**

No desenvolvimento do projeto é preciso estar sempre vigilante quanto à preocupação em reduzir ao máximo a relação carga/torque do robô. Um caminho para isso é usar materiais de baixa densidade e escolher motores com maior potencia, dentro das limitações. Este dimensionamento deve levar em consideração o tamanho da caixa de redução e a aderência do sistema ao tubo. Além disso, deve-se levar em consideração que no projeto proposto o robô depende de umbilical para alimentação e dados, e deve ser capaz de se deslocar arrastando consigo o umbilical por toda a extensão do tubo a ser inspecionado.

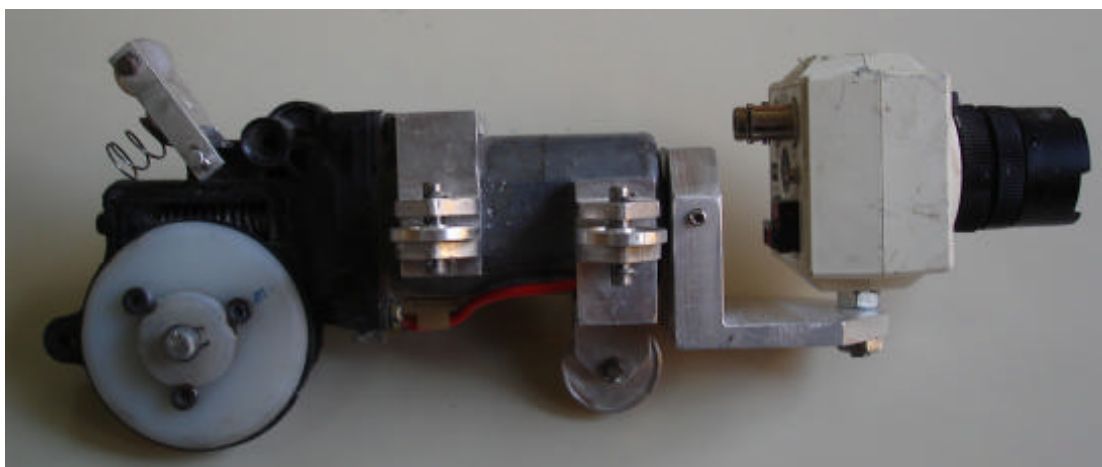
O fato de arrastar o umbilical impõe restrição relevante ao projeto, uma vez que à medida que o robô adentra o tubo arrasta consigo um comprimento de cabo cada vez maior, a carga arrastada é conseqüentemente maior, e como a força tração do robô é uma constante, chegasse invariavelmente a um limite teórico de distância máxima de deslocamento no interior do tubo.

Deve-se neste caso propor soluções que reduzam ao máximo os impactos causados pelo cabo umbilical, seja utilizando cabos mais finos e leves, seja propondo artifícios que reduzam o contato do umbilical com a superfície do tubo, reduzindo assim o atrito.

- **O robô deve transportar câmera e sistema de iluminação para permitir inspeção visual por parte do operador.**

A câmera de vídeo foi colocada na parte frontal do robô fixada ao chassi do mesmo (motor) através de estrutura de alumínio. Já o sistema de iluminação é fixado à carenagem e colocada no mesmo plano da lente da câmera.

O uso de estabilizadores laterais que facilitam o deslocamento ao longo do tubo e do sistema de pressão positiva para aumento do contato roda-tubo tem como objetivo, além da maior aderência no interior da tubulação, reduzir eventuais trepidações durante a movimentação do robô que possam impactar no processo de inspeção visual.



**Figura 05:** Corpo feito por materiais leves e resistentes evitando o gasto desnecessário da potência do motor.

- **Ter baixo custo de desenvolvimento, operação e manutenção**

Todo o projeto foi concebido com o objetivo de ter um baixo custo de desenvolvimento, operação e manutenção. Sob este ponto de vista foram especificados os materiais adotados na construção mecânica tais como: alumínio (estrutura mecânica), nylon (rodas) e fibra de vidro (carenagem).

No conjunto motor foi aplicada uma solução comum do mercado automobilístico e todo o seu projeto foi pensado de forma a reduzir a complexidade de manutenção como é o caso por exemplo da carenagem em forma de concha que permite fácil acesso aos componentes internos.

- **Ser funcional e portátil**

Antes de tudo, o conjunto do projeto proposto deveria ser funcional, e, por se tratar de um protótipo para demonstração, deveria ser portátil. O objetivo disto é possibilitar o fácil deslocamento e apresentação para eventuais clientes, investidores ou em feiras e eventos, desta forma todo o conjunto foi concebido de forma a caber em uma maleta de fácil transporte.



Figura 06: Maleta para transporte do robô

## 2.2.Eletrônica

O desenvolvimento dos circuitos eletrônicos aplicados no projeto foi feito inicialmente em protoboard para testes de bancada. Com bases nos resultados obtidos o circuito foi então construído em placa padrão para uso e teste embarcado no robô. Com base nos resultados dos testes embarcados será então feita versão definitiva das placas envolvidas. Atualmente o projeto se encontra com o circuito implementado em placa padrão, cujas imagens são apresentadas a seguir.

Algumas das principais restrições mecânicas impostas ao projeto dizem respeito a:

- **O robô deve ser capaz de se deslocar para frente e para trás numa tubulação utilizando propulsão própria fornecida por motor de corrente contínua de 12V.**

Após a especificação dos motores fez necessário o desenvolvimento de circuito eletrônico capaz de inverter a polaridade da alimentação dos terminais do motor de forma a fazê-lo girar para frente e para trás com suporte a correntes de até 7A.

A restrição do valor da corrente se dá pelo fato de que no momento da inversão do sentido ou quando o motor opera submetido a muita carga ocorrem picos e/ou o aumento do consumo de corrente do mesmo, que conforme medições pode chegar a até 6A. Importante lembrar que isto também refletiu na escolha dos condutores utilizados na alimentação dos motores.

Foram utilizados 2 relés *Metaltex* de 12V CC para 127V CA com suporte de até 10A de corrente na construção de circuito conhecido como “ponte de relés”.

Os sinais binários enviados pelo computador através da porta paralela referentes ao acionamento do robô são amplificados por um circuito integrado (CI) ULN2003 e então utilizados para fazer o controle da ponte de relés e o conseqüente controle da movimentação.

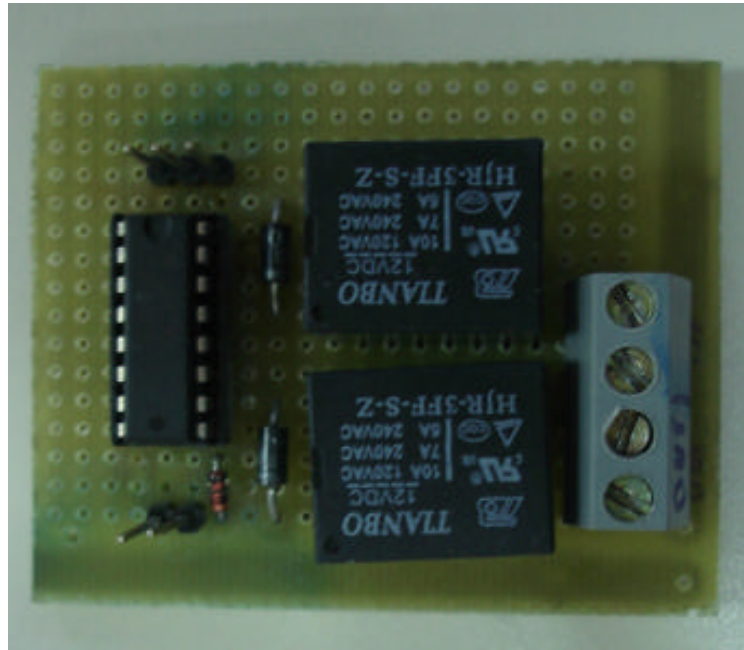


Figura 07: Circuito inversor de polaridade para alteração do sentido do robô.

- **O robô depende de umbilical para alimentação e envio/recepção de dados.**

Esta na verdade não foi uma restrição, mas sim uma simplificação que tinha como objetivo simplificar consideravelmente a complexidade eletrônica do projeto que desta forma pôde contar apenas com circuitos simples para acionamento e controle do conjunto.

Este umbilical é composto por:

- 1 par de fios de alimentação do motor
- 1 par de fios de alimentação das câmeras e do sistema de iluminação
- 1 cabo coaxial de video

- **O robô deve transportar câmera e sistema de iluminação para permitir inspeção visual por parte do operador.**

Infelizmente devido à existência, citada anteriormente, de picos de corrente no condutor de alimentação do motor, não foi possível que a câmera compartilhasse tal cabo. Por este motivo o umbilical foi onerado em mais um par de fios de alimentação utilizado para alimentação 12V CC da câmera filmadora de consumo de 200mA.

O sistema de iluminação foi projetado utilizando-se 4 foto diodos de luz branca de alta luminosidade (LEDs), associados em paralelo, em série com 1 resistor de 30 ohms e alimentados por uma tensão de 5V CC, o que resultou numa corrente de operação de 40mA.

A fonte de alimentação utilizada para o sistema de iluminação é a mesma utilizada na câmera, sendo necessário o uso de um circuito regulador de tensão baseado no componente 7805, responsável por reduzir a tensão de 12V para 5V. Este é o único circuito embarcado no robô atualmente.

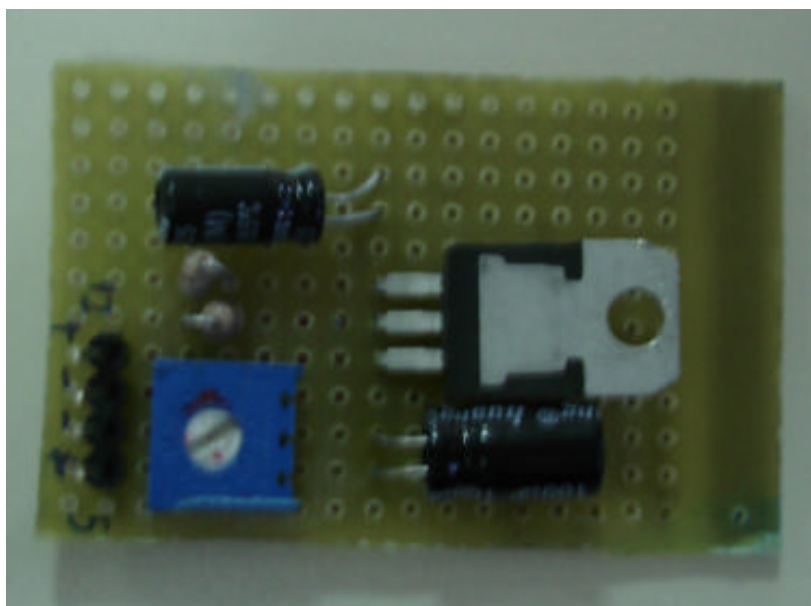


Figura 08: Circuito regulador de tensão para ativar a iluminação frontal do robô.

### 2.3. Computação/Software

#### O sistema de software

Para controle do robô foi implementado software aplicativo para plataforma Windows 32bits utilizando a ferramenta de programação *Delphi6* da *Borland* em conjunto com banco de dados *Interbase 6.01 Freeware Opensource* de mesmo fabricante.

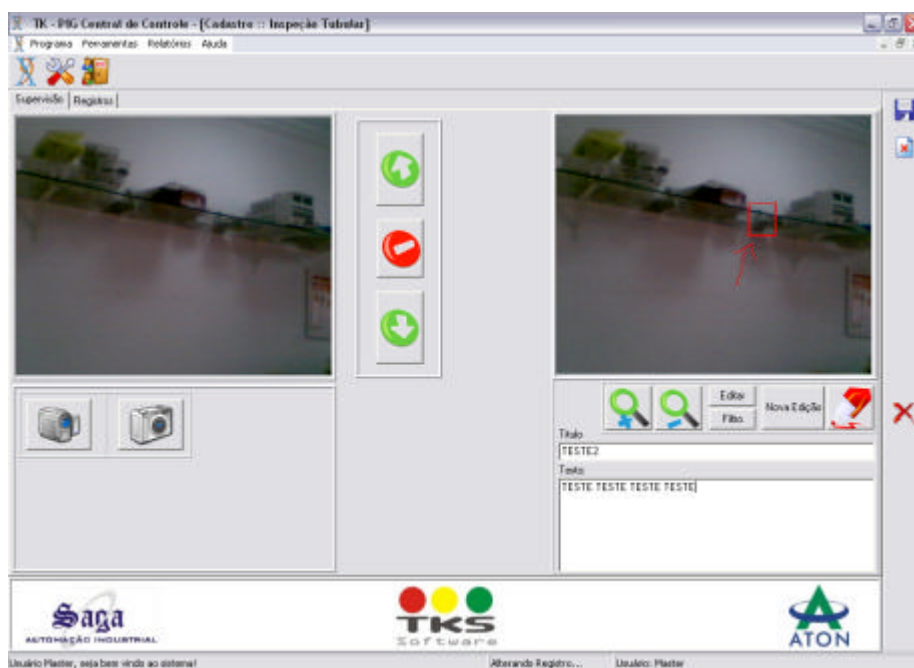


Figura 09: Tela principal do aplicativo desenvolvido.

O sistema criado prevê recursos de inspeção visual em tempo real onde é apresentada na tela do computador a visão do robô, além disso é possível tirar fotos e armazená-las juntamente com comentários e observações técnicas a cerca do ponto inspecionado incluindo respectivas marcações visuais feitas pelo operador em pontos considerados relevantes. Todas as informações são então armazenadas em estrutura de banco de dados permitindo a emissão de relatório de cada inspeção realizada.

Juntamente com o relatório impresso da inspeção realizada, conforme figura 08, é fornecida mídia de CD contendo relatório em formato PDF e vídeo completo do processo de inspeção com a visão do robô.



Figura 10: Tela de relatório do aplicativo desenvolvido.

Durante o processo de inspeção o controle da movimentação do robô é feito através das teclas de direção do computador ou do clique do mouse nos botões respectivos. A comunicação do software aplicativo com o robô é realizada através de cabo ligando á porta paralela do computador ao circuito inversor apresentado na

### 3. Conclusão

O desenvolvimento de dispositivos de inspeção tubular tais como o robô PIC tema deste artigo engloba aspectos de construção mecânica, eletrônica e computacional. Tais conhecimentos estão sendo aplicados de forma orientada e combinada na criação de um protótipo funcional semi-autônomo de robô.

Em sua grande maioria, soluções profissionais de tal natureza dependem equipamentos importados e de alto custo, o que, muitas vezes inviabiliza a contratação e exploração deste serviço a nível regional. A escassa disponibilidade de estudos teóricos e desenvolvimento prático de soluções de inspeção tubular com tecnologia local, juntamente com a proposta de criação de um protótipo funcional de baixo custo, foram dois desafios que motivaram esta pesquisa, que até o momento demonstra ser possível desenvolver um protótipo funcional inovador de forma a fomentar o estudo e aprofundamento das tecnologias relacionadas a automação e robótica no estado da Bahia.

Apesar de ainda se encontrar em fase final de construção e integração do conjunto testes preliminares demonstraram que o robô já é capaz de se deslocar de forma apropriada dentro da tubulação conforme proposto. Ao final da montagem e com o atendimento dos requisitos previamente enunciados serão realizados testes conclusivos onde serão analisadas questões relativas à performance de operação e propostas de melhorias do sistema.

#### **4.Referências**

Eiki Martinson. **The Pipe Crawler**. 2003

J. Bruce Nestleroth. **Implementing Current In-Line Inspection Technologies on Crawler Systems**. 2004

Majid. M. Moghaddam, and Alireza. Hadi. **Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC)**. 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. ISARC 2005 - September 11-14, 2005.

J. Bruce NESTLEROTH. **Pipeline In-line Inspection – Challenges to NDT**. Battelle, Columbus, OH, USA. ECNDT 2006.

Jonathan Miller. **ROBOTIC SYSTEMS FOR INSPECTION AND SURVEILLANCE OF CIVIL STRUCTURES**. MSc Thesis The University of Vermont 2004

Changhwan Choi, Seungho Jung, and Seungho Kim. **Feeder Pipe Inspection Robot with an Inch-Worm Mechanism Using Pneumatic Actuators**. International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 4, no. 1, pp. 87-95, February 2006.

**Pipe Inspection Using the Pipe Crawler**. Summary Report. May 1999

M.M. Moghadam, R.A.Tafti and A.R.Hadi. **Design and Manufacturing of a Pipe Inspection Crawler (PIC)**. Tehran International Congress on Manufacturing Engineering. December 12-15, 2005

Majid. M. Moghaddam, Mohammad. R. Arbab Tafti, Design, **Modeling and Prototyping of a Pipe Inspection Robot**. 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. ISARC 2005 - September 11-14, 2005