ARQUITETURA DE NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

EMANUEL ESTRADA[#1], LUAN SILVEIRA[#2], ULISSES CORRÊA[*3],
VINICIUS DE OLIVEIRA[#4], SILVIA BOTELHO[#5]

RESUMO:

Este trabalho apresenta a arquitetura desenvolvida para um sistema de navegação de robôs, reais e simulados, designados para inspecionar ambientes de distribuição de energia, constituídos por cabos em dutos subterrâneos. A plataforma baseada nesta arquitetura permite o desenvolvimento e validação do sistema de navegação em um ambiente simulado e, subsequentemente, em um ambiente real. Neste sentido, a plataforma inclui aspectos relacionados com simulação de sensores, visão computacional e planejamento aplicado a este tipo de ambiente. A plataforma computacional integra transformada de Hough e Redes Neurais para detectar obstáculos e inferir a melhor ação a ser tomada no ambiente.

Palavras-chave: Navegação de Robôs Móveis, Redes Neurais Artificiais, Transformada de Hough.

ABSTRACT:

ARCHITECTURE FOR AUTONOMOUS NAVIGATION OF INSPECTION ROBOTS ON ENERGY UNDERGROUND DISTRIBUTION CABLES

This work presents an architecture developed to navigation system in real and simulated robots designed to inspect underground pipes with energy distribution cables. The platform based on this architecture permits to develop and validate the navigation system in a simulation environment and, subsequently, to test and validate in the real environment. In this sense, the platform includes aspects related with sensors simulation, computational vision and planning applied in this kind of environment. The computation platform integrates Hough Transform and Artificial Neural Networks to detect obstacles and infer the best action in the environment.

Keywords: Mobile Robot Navigation, Artificial Neural Network, Hough Transform.

#Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal do Rio Grande- FURG
Rio Grande - RS – Brasil
1- emanuelestrada@gmail.com 2 - luansilveira.dp@gmail.com 4- vinicius@ieee.org 5 - silviacb@furg.br

*Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS
Porto Alegre - RS - Brasil
3 - ubcorrea@inf.ufrgs.br

I. INTRODUÇÃO:

Os principais problemas em navegação robótica estão relacionados com os ambientes desconhecidos e imprevisíveis. Em robôs móveis autônomos, um sistema de navegação deve inferir ações no sentido de alcançar os objetivos determinados ao robô e simultaneamente transpor adversidades. O nível de dificuldade desta tarefa está diretamente relacionado com as restrições do ambiente.

O TATUBOT (Mello et al.,2008) é uma plataforma robótica designada para inspecionar cabos de distribuição de energia no interior de dutos. Ele é equipado com sensores e atuadores que o possibilitam sua locomoção no interior de dutos, bem como a inspeção dos cabos de distribuição situados neste ambiente. Neste cenário, o objetivo deste trabalho é apresentar um sistema de navegação autônomo para o robô TATUBOT o qual garanta seu deslocamento dentro do duto e sobre os cabos, mantendo a inspeção independente das conformações em que estes cabos encontram-se.

Neste artigo é apresentada a arquitetura usada no TATUBOT que o permite navegar no ambiente apresentado. Tal arquitetura integra a captura de imagens, reais ou simuladas, as quais são utilizadas para planejar o movimento do robô. Imagens simuladas são selecionadas em uma etapa inicial do projeto, com o objetivo de definir requisitos mínimos de navegação, e imagens reais serão utilizadas em uma etapa posterior, já com o objetivo de validar o sistema de navegação. Cada imagem capturada passará por um processo de extração de bordas e aplicação da transformada de Hough, para diferenciação entre os cabos e o duto e para a geração de retas que servirão de guias ao movimento do robô. O planejamento foi feito através de redes neurais artificiais e a partir deste obteve-se resultados satisfatórios considerando as limitações da navegação.

O artigo foi estruturado tendo na próxima seção trabalhos relacionados com sistemas de navegação robóticos e navegação baseada em visão. A seção III apresenta a arquitetura usada no sistema de navegação TATUBOT e seus módulos. Experimentos e resultados obtidos com a arquitetura são descritos na seção IV. Finalmente, na V são feitas considerações finais e propostos trabalhos futuros.

II. TRABALHOS CORRELATOS:

A manutenção de linhas subterrâneas de distribuição de energia apresenta uma série de desafios. Dentre as várias formas de distribuição, cabos de alimentação com diferentes conformações estão confinados no interior de dutos subterrâneo. Em geral, essas instalações apresentam dificuldades de acesso, altos níveis de eletromagnetismo e presença de umidade, os quais restringem a tarefa de manutenção. Além disso, as técnicas convencionais de manutenção empregadas pecam por *i.* realizarem uma troca preventiva antecipada de cabos em condições de operação e *ii.* trocarem cabos quando ocorrerem falhas, assim gerando desabastecimento (Reder; Flaten, 2000),(Birkner, 2004). Em contrapartida tem-se as técnicas de manutenção preditiva que possibilitam determinar a condição dos cabos em serviço e prever quando realmente devem ser substituídos. Esta técnica mostra-se mais econômica do que manutenções rotineiras ou preventivas baseada no tempo de uso, devido as trocas serem realizadas somente quando realmente necessárias.

Atualmente, sistemas robóticos móveis estão sendo desenvolvidos para ajudar na manutenção preditiva de cabos de energia subterrâneos. Em (Jiang et al., 2005), é apresentado um robô autônomo móvel o qual inspeciona linhas de distribuição subterrâneas. Já no sistema que pode ser visto em (Cho et al., 2006), desenvolvido pelo *Korea Electric Power Research Institute*, o robô inspeciona o isolamento das linhas de distribuição. Entretanto, ambos são diferentes do TATUBOT visto que este navega, de forma autônoma, diretamente sobre as linhas, baseado em visão local. Há robôs desenvolvidos para inspecionar dutos de água e gás, onde o objetivo é identificar falhas nos dutos. Neste caso, o robô navega sem obstáculos e necessita de um mecanismo para detectar conexões e bifurcações (Ahrary et al., 2005). Com estas mesmas restrições, alguns robôs utilizam *SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping*) na inspeção visual (Krys; Najjaran, 2007).

Supondo-se que o robô móvel precisa navegar evitando obstáculos, um modelo para planejamento de trajetória é usar a estrutura de cabos como guia de trajetória, resultando em um robô que se orientará por meio de retas. Estes tipos robôs caracterizam-se por navegar utilizando informação visual obtida a partir de marcas artificiais, como linhas ou marcas inseridas no ambiente para guiar o robô. A informação obtida é processada por algoritmos de visão computacional. Em (Frew et

al., 2004), é descrito o uso de transformada de Hough em um sistema de visão para aeroplanos para identificar sua orientação e posição, relativos à sua câmera, e um controle PID para manter o alinhamento do avião com uma estrada. A transformada de Hough é também usada em (Choi;Jung, 2006) para monitorar a diferença de inclinação entre o robô e a orientação do cano, sendo que a saída determina se o robô deve mover-se ou rotacionar em uma velocidade constante. Na navegação de veículos terrestres, a transformada de Hough é normalmente utilizada para extrair os limites entre a estrada e o acostamento ou/e a linhas da estrada (Shihavuddin et al., 2008),(Zhang et al., 2004), (Li et al., 2004), (McDonald et al., 2001).

III. ARQUITETURA PROPOSTA:

Para um completo entendimento das necessidades de navegação da plataforma TATUBOT faz-se necessária uma descrição dos aspectos de software e hardware envolvidos. Outro ponto importante, que deve também ser descrito, é o ambiente de inspeção e a forma como o robô TATUBOT atua no mesmo. Somente desta forma pode-se definir quais elementos e quais restrições devem ser levadas em conta no desenvolvimento da arquitetura de navegação.

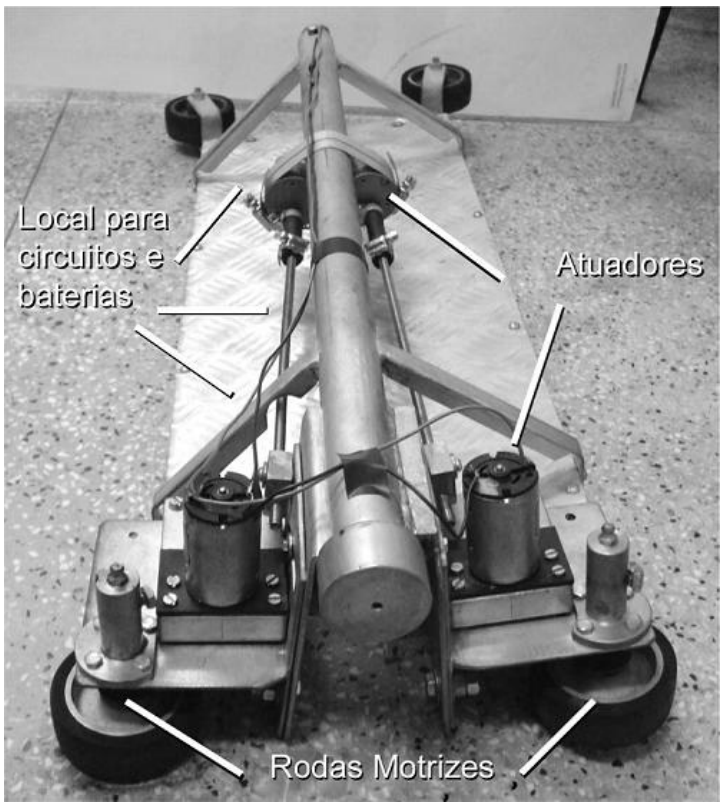

FIGURA 1: TATUBOT: Estrutura Mecânica

O robô TATUBOT foi desenvolvido para inspecionar cabos de distribuição de energia em dutos. Para tal, ele é equipado com uma câmera e sensores para inspeção das características dos cabos. A estrutura mecânica do robô é exibida na Figura 1.

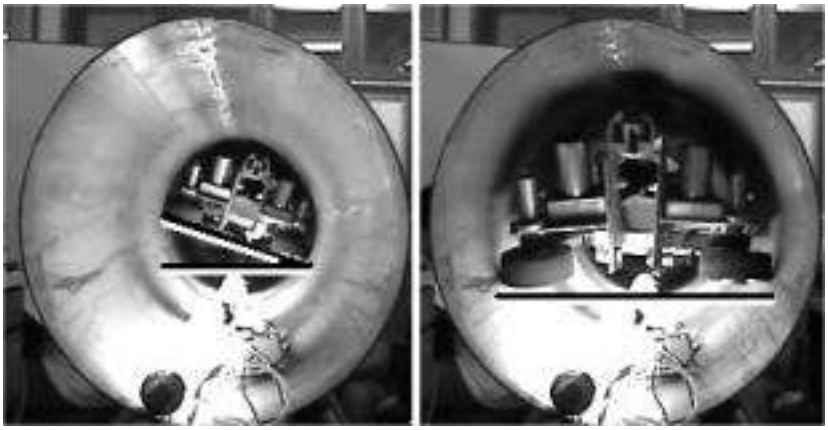

FIGURA 2: TATUBOT: Simulação do ambiente real de inspeção.

O deslocamento do robô se dá sobre uma corda que cruza o centro do duto, conforme descrição na Figura 2. Desta forma, é possível navegar em uma posição paralela aos cabos, fazendo as leituras sensoriais necessárias à inspeção. De acordo com a estrutura mecânica do TATUBOT, para aplicar rotações, tanto no sentido horário como no anti-horário, é necessário que as rodas motrizes do robô sejam rotacionadas em sentidos opostos. No caso de deslocamentos sem rotações as rodas motrizes devem estar paralelas a base. Além disso, para manter-se somente este tipo de movimento, as rodas motrizes devem ser acionadas sempre com o mesmo módulo de velocidade angular, porém em sentidos opostos.

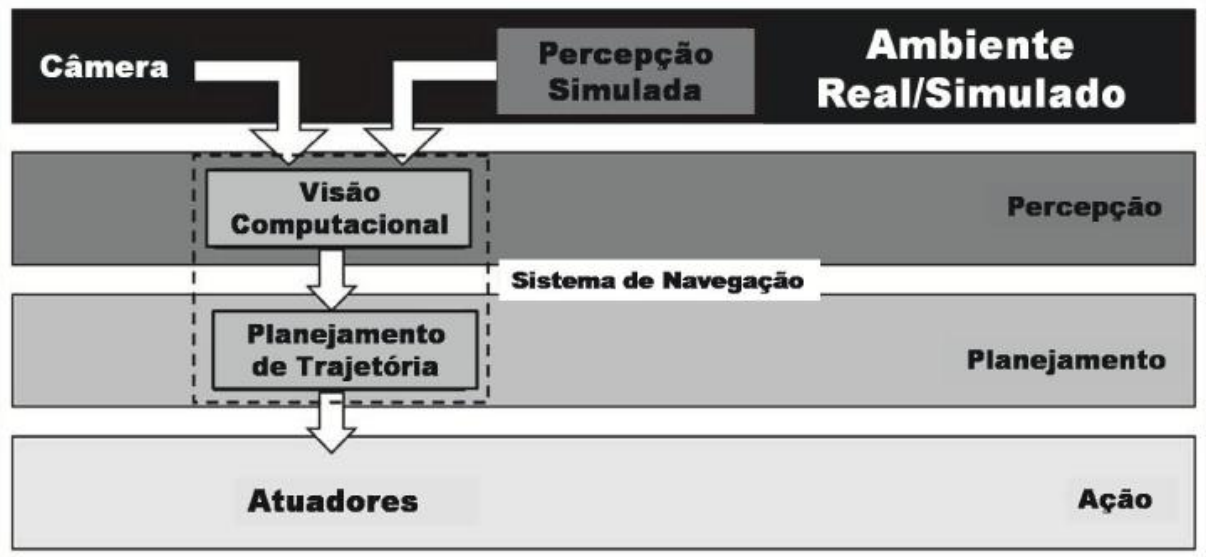

FIGURA 3: Arquitetura do sistema de navegação do TATUBOT

A Figura 3 descreve a arquitetura de navegação do TATUBOT. Esta pode ser utilizada com imagens de um ambiente real, capturadas pela câmera do robô, ou com imagens simuladas, obtidas através de uma placa de captura de vídeo. Neste último caso, as imagens são geradas por simulador o qual reproduz o cenário de inspeção. O simulador foi desenvolvido integrando as bibliotecas ODE (*Open Dynamics Engine*) e OpenGL(*Open Graphics Library*). A plataforma computacional que encapsula esta arquitetura permite desenvolver, testar e analisar diferentes estratégias de controle e navegação em ambos cenários (real e simulado).

Nas próximas subseções serão descritos cada um dos módulos da arquitetura.

A. Módulo de Percepção Simulado:

Este módulo é responsável pela simulação da percepção do robô. Nele é possível retratar o ambiente de inspeção, criando diferentes tamanhos de dutos e conformações dos cabos em seu interior, desta forma possibilitando a validação completa do módulo de planejamento de trajetória. A implementação deste módulo foi feita em linguagem C/C++, utilizando as bibliotecas ODE e OpenGL. De fato, o módulo corresponde ao simulador desenvolvido para o TATUBOT, com sua câmera e atuadores. No que se refere à navegação, é utilizada uma câmera como sensor simulado, trabalhando com visão local. A saída do módulo são imagens capturadas pela câmera simulada as quais são enviadas para o Módulo de Visão Computacional.

B. Módulo de Visão Computacional:

As imagens capturadas, sejam elas originadas a partir da câmera real ou simulada são utilizadas por este modulo para determinar a orientação dos cabos no interior do duto. A implementação deste módulo foi feita em linguagem C/C++ com o auxílio da biblioteca OpenCV\footnote{OpenCV é uma biblioteca para visão computacional originalmente desenvolvida pela Intel.}, para processamento das imagens. A captura foi implementada de forma a ter-se três fontes de imagens: (i) uma câmera profissional AVT GUPPY F-033C conectada ao barramento firewire; (ii) uma webcam LG-LIC 200 conectada à porta USB e (iii) uma placa de captura de vídeo PixelView PV-M4900 FM. Independente da fonte de imagens, o módulo funciona para diferentes cores de cabos e duto, dependendo dos valores retornados pela aplicação

da função gradiente. O gradiente é garantido pela aplicação do algoritmo de Canny, o qual identifica bordas em imagens. O algoritmo de Canny aplica o operador Gaussiano na primeira derivada o qual pode suavizar ruídos e localizar Bordas (Bueno, 2009). Com as bordas diferenciando os cabos e o duto, pode-se utilizar a transformada de Hough para a identificação de retas sobre essas bordas (Song et al., 2002).

A transformada de Hough, amplamente utilizada para identificação de retas, baseia-se em operações que procuram um conjunto de retas o qual melhor se ajusta as coordenadas de pontos da imagem com as bordas identificadas. Assim, o dado original é transformado em um novo espaço. Este espaço é definido considerando os parâmetros de possíveis linhas. Para iniciar o processo, todos os pares de pontos no conjunto original podem ser uma linha. Finalmente, depois de analisar as possíveis combinações, a linha reta mais recorrente é identificada. Para fazer isso é necessário unir os parâmetros dos segmentos identificados.

C. Módulo de Planejamento de Trajetória

O Módulo de Planejamento de Trajetória é responsável por inferir as ações do robô a partir da informação visual fornecida pelo Módulo de Visão Computacional, ou seja, ele recebe a orientação dos cabos no duto e determina qual reação o robô deve ter frente as diferentes configurações de cabos.

Na implementação do Módulo de Planejamento de Trajetória utilizou-se Redes Neurais Artificiais. Neste caso, as entradas correspondem aos padrões de configurações dos cabos e o sistema deve inferir a rotação a ser aplicada às rodas motrizes. A estratégia de controle adotada é baseada em exemplos de navegação. Com isto, evita-se a definição de um conjunto de regras fixas e permite-se ter uma generalização das reações frente a diferentes situações encontradas no ambiente.

O conjunto de treinamento é formado por exemplos de navegação. Estes por sua vez são compostos por quatro pontos que descrevem duas retas, coincidentes com as bordas mais externas dos cabos de energia. Faz parte, ainda, do conjunto de treinamento a resposta esperada, que corresponde a respectiva ação de controle adotada pelo humano durante uma inspeção teleoperada. Em outras palavras, a ação pode ser um deslocamento sem rotação ou um deslocamento com rotação em

um dos dois sentidos possíveis. Está última ação tem o propósito específico de deixar a base do robô paralela aos cabos de energia propiciando, assim, as melhores condições para a operação dos sensores.

IV. EXPERIMENTOS E RESULTADOS:

São apresentados nesta seção um conjunto de testes e resultados da plataforma desenvolvida. Mais especificamente, imagens simuladas da câmera embarcada no robô e resultados dos módulos de Visão Computacional e Planejamento de Trajetória.

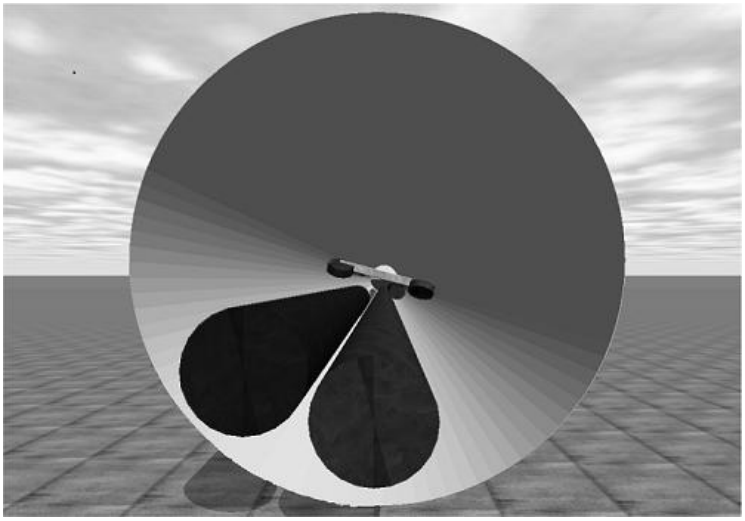

FIGURA 4: TATUBOT em um cenário simulado visto do exterior do duto.

As imagens simuladas da câmera acoplada ao robô reproduzem a visão robótica necessária para desenvolver o sistema de navegação autônoma para robôs de inspeção de linhas de distribuição subterrâneas.

A Figura 4 apresenta uma vista exterior de um duto, bem como a representação do agente robótico no simulador desenvolvido. Já a Figura 5 apresenta o interior do duto, destacando a variação dos ângulos de ataque das rodas motrizes. Complementando, uma imagem capturada pela câmera embarcada simulada do robô pode ser vista na Figura 6.

Para validar o Módulo de Visão Computacional vários testes foram realizados com imagens fornecidas a partir da câmera simulada. As imagens são baseadas em cenários que poderiam ser encontrados em uma inspeção real. Este módulo retornou resultados satisfatórios e pôde identificar linhas coincidentes às bordas dos

cabos elétricos.

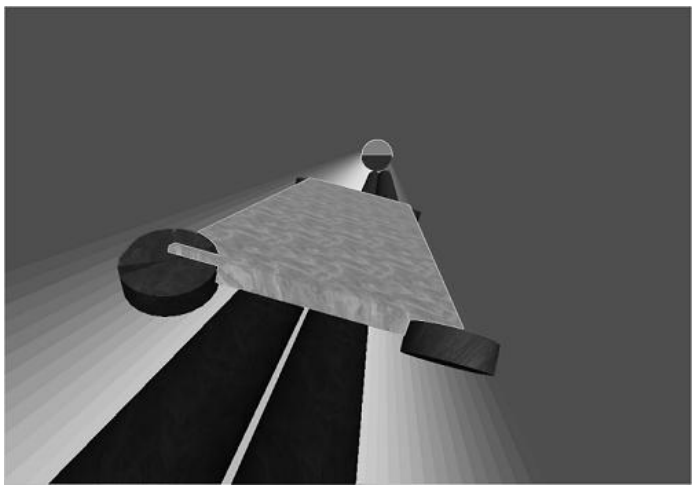

FIGURA 5: TATUBOT em um cenário simulado visto do interior do duto.

Na Figura 7 são exibidas as bordas dos cabos (em branco) detectadas pelo algoritmo de Canny e as retas coincidentes com elas (em vermelho), encontradas através da transformada de Hough. Ainda, é possível ver nas imagens os valores das coordenadas relativas aos pontos que formam as retas.

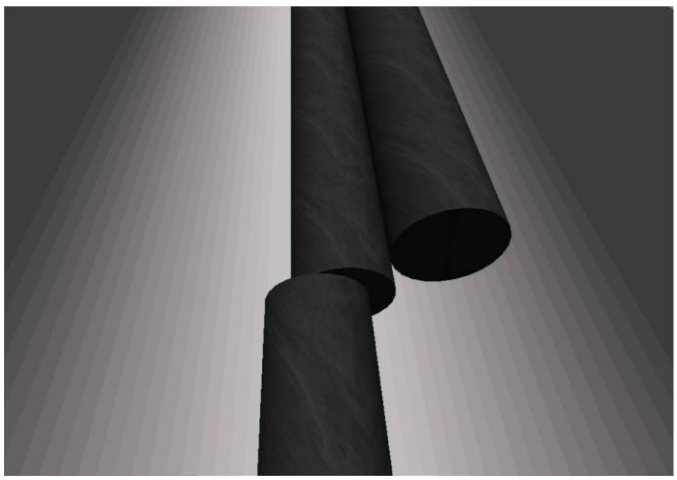

Figura 6: Câmera simulada do robô.

O Módulo de Visão Computacional foi validado em diferentes condições de luminosidade e variação de características do ambiente. Nos testes, o módulo de visão mostrou-se robusto para ambientes mal iluminados. Foi criado um caso onde se alterou a textura do material da parede do duto. Este ensaio reproduz condições encontradas no ambiente real, onde as paredes não possuem uma cor uniforme, devido a diversas condições ambientais. Isto causou o aparecimento de ruídos na

imagem. Tais ruídos foram detectados como bordas pelo algoritmo de Canny. Porém, devido aos ajustes na transformada de Hough, que permitem determinar o mínimo comprimento de reta, foi possível a eliminação do ruído e, assim, a identificação da orientação das retas, como mostra a Figura 8.

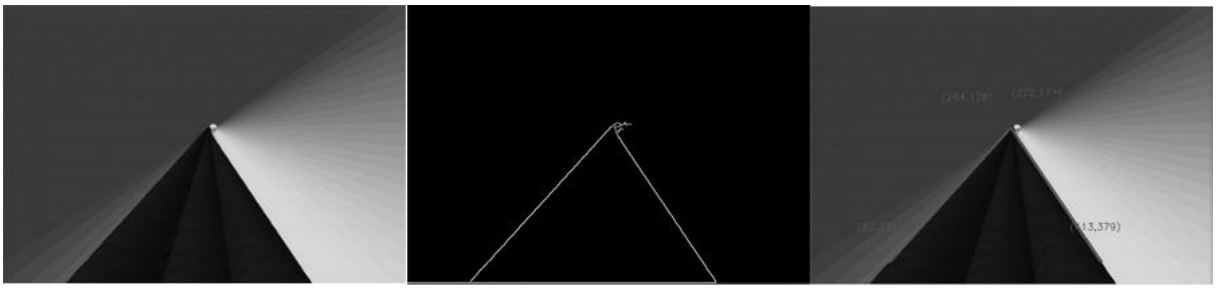

FIGURA 7: Bordas e retas encontradas.

Para o planejamento de trajetória foram usadas redes neurais artificiais. Tal técnica foi empregada de forma a modelar a estratégia de controle a partir de exemplos de navegação.

O aprendizado foi avaliado levando-se em conta a posição dos cabos e a ação tomada durante uma navegação controlada por um operador humano. Diferentes posições de cabos foram simuladas. A partir de imagens sintéticas, este operador humano usava um *joystick* para controlar o robô. O operador teve acesso somente às imagens sintéticas dos cabos, as mesmas usadas pelo módulo de visão, assim como o sistema de navegação teria. As ações foram armazenadas em um arquivo de treinamento.

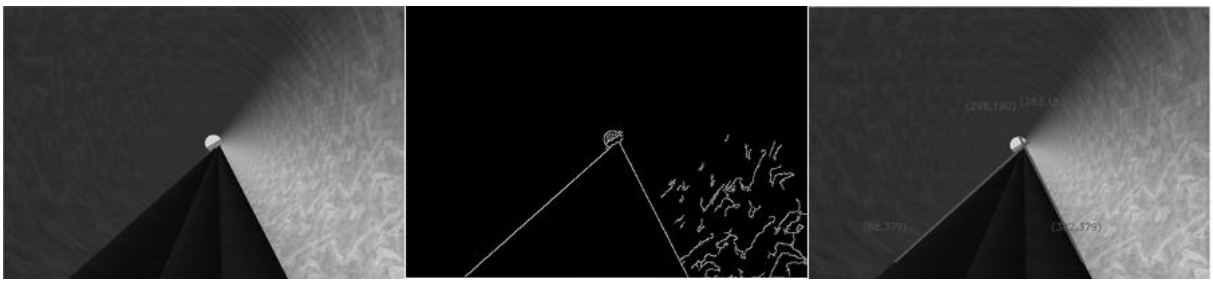

FIGURA 8: Remoção do ruído pelo ajuste de parâmetros da transformada de Hough.

Os testes foram realizados em uma rede neural artificial com função de ativação sigmoidal e algoritmo de treinamento de retropropagação. A camada de entrada da rede possui oito neurônios (correspondentes aos quatro pontos que descrevem duas retas) e três neurônios na camada de saída (correspondentes a cada ação).

Calculou-se o erro através do Erro Médio Absoluto:

$$|E| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} | x_i - x'_i |$$

À rede foram apresentados 52 padrões de treinamento e utilizou-se 20 padrões para testá-la. Variou-se o número de neurônios na camada intermediária obtendo-se os seguintes resultados:

- 16 neurônios
  - Erro Médio Absoluto da Rede: 0.052
  - Erros de classificação: 2/20 = 10%
- 24 neurônios
  - Erro Médio Absoluto da Rede: 0.051
  - Erros de classificação: 3/20 = 15%
- 32 neurônios
  - Erro Médio Absoluto da Rede: 0.023
  - Erros de classificação: 0/20 = 0%

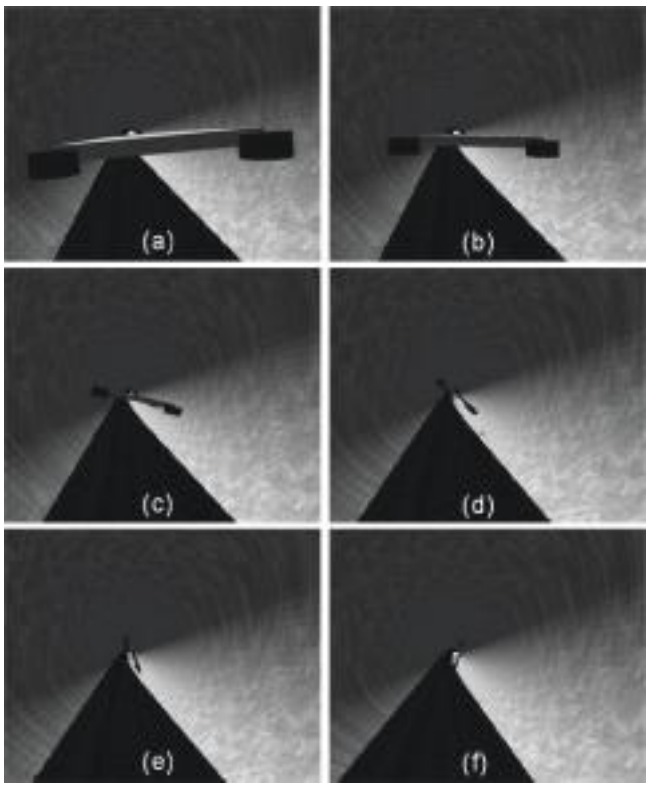

FIGURA 9: Série de imagens ilustrando a navegação autônoma.

Os resultados com as três configurações de camada oculta foram considerados satisfatórios, mesmo no caso em que se utilizou 24 neurônios na camada. Após, criou-se um cenário para testar a navegação autônoma. Utilizou-se um computador executando o simulador e um segundo computador executando o sistema de navegação. O computador responsável pela navegação recebia as imagens através da placa de captura de vídeo. O resultado do sistema de navegação foi enviado através de *sockets* para o computador executando o simulador. A Figura 9 exibe imagens sequenciais em diversos instantes do deslocamento do agente no interior do duto, onde os cabos possuíam um disposição helicoidal. Neste caso, o agente navegou pelo cenário mantendo sempre sua base paralela aos cabos, demonstrando o comportamento desejado.

V. CONCLUSÕES:

Neste trabalho foi apresentada uma arquitetura desenvolvida para o sistema de navegação do robô TATUBOT. Tal robô é uma abordagem original para inspeção de distribuição de energia subterrânea pelo interior do duto, onde o robô deve deslocar-se paralelamente aos cabos, a fim de realizar a inspeção e determinar o real estado de deterioração em que se encontram estes cabos.

A arquitetura é composta por três módulos: o Módulo de Percepção Simulado, o Módulo de Visão Computacional e o Módulo de Planejamento de Trajetória. O Módulo de Percepção Simulado consiste, principalmente, de um simulador do ambiente de inspeção bem como do robô TATUBOT. O simulador reproduz o ambiente de inspeção e a dinâmica do robô. As imagens capturadas pela câmera embarcada simulada do robô são enviadas ao Módulo de Visão Computacional. Este módulo pode receber também imagens da câmera embarcada no robô real. Neste módulo, ainda, são aplicadas técnicas, para extrair informações sobre a orientação dos cabos, baseadas no algoritmo Canny e na transformada de Hough. Tais técnicas possibilitaram extrair informações de várias conformações dos cabos e diferentes condições de luminosidade. Com base nestas informações sobre os cabos, o Módulo de Planejamento de Trajetória pode inferir quais as rotações a serem aplicadas nas rodas motrizes do robô TATUBOT. As decisões de controle do robô foram obtidas através do uso de redes neurais artificiais. Os resultados foram considerados satisfatórios, mostrando-se uma boa alternativa para a navegação deste tipo de robô.

Como trabalhos futuros, pretende-se utilizar outras técnicas para a navegação, como o uso de um modelo cinemático e filtro de Kalman, fazendo um comparativo entre tais abordagens. Além do mais, o trabalho será validado em um ambiente real.

VI. REFERÊNCIAS:

Ahrary, A.; Tian, L.; Kamata, S.; Ishikawa, M. **"An autonomous sewer robots navigation based on stereo camera information"**, in Proceedings of IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2005), 2005.

Birkner, P. **"Field experience with a conditional-based maintenance program ok 20-kv xlpe distribution system using ircanalisys"** , IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, 2004, pp. 3 - 8, 2004.

Bueno, M. L. **"Detecção de bordas através do algoritmo de canny",** January 2009, http://www.inf.ufsc.br/~visao/2000/Bordas/index.html.

Cho, B. H.; Byun, S. H.; Park, J. Y.; Kim, J. S. **"Development of automatic inspection robot for live-line insulators"**, in Proceedings of 11th IEEE International Conference on Transmission and Distribution Construction, 2006, pp. 15 - 19.

Choi, C.; Jung, S. **"Pipe inspection robot with an automatic tracking system using a machine vision",** in SICE-ICASE International Joint Conference, october 2006, pp. 1285 - 1290.

Frew, E.; McGee, T.; ZuWhan, K.; Xiao, X.; Jackson, S.; Morimoto, M.; Rathinam, S.; Padial, J.; Sengupta, R. **"Visionbased road-following using a small autonomous aircraft",** in Proceedings of IEEE Aerospace Conference, vol. 5, 2004, pp. 3006 - 3015.

Jiang, B.; Sample, A.; Wistort, R. M. ; Mamishev, A. V. **"Autonomous robotic monitoring of underground cable systems"**, in Proceedings of 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005, pp. 673 - 679.

Krys, D.; Najjaran, H. "**Development of visual simultaneous localization and mapping (vslam) for a pipe inspection robot"**, in Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Jacksonville, FL, USA, 2007, pp. 20 - 23.

Li, Q.; Zheng, N.; Cheng, H. **"Springrobot: A prototype autonomous vehicle and its algorithms for lane detection"**, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 5, no. 4, december 2004.

McDonald, J.; Franz, J.; Shorten**,** R. **"Application of the hough transform to lane detection in motorway driving scenarios",** in Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference, 2001.

Mello, C.; Gonçalves, E. M.; Estrada, E.; Oliveira, G.; Souto, H.; Almeida, R.; Botelho, S.; Santos, T.; Oliveira, V. **"Tatubot - Robotic system for inspection of**

undergrounded cable system” in Proceedings of the 5th Latin American Robotics Symposium (LARS 2008), Salvador, Brazil, 2008.

Reder, W.; Flaten, D. **“Reliability centered maintenance for distribution underground systems"** IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, 2000, pp. 551 - 556, 2000.

Shihavuddin, A.; Ahmed, K.; Munir, M. S.; Ahmed, K. R. **“Road boundary detection by a remote vehicle using radon transform for path map generation of an unknown area"**, IJC- SNS International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 8, august 2008.

Smith, R. **Open Dynamics Engine** V. 0.5 User Guide, 2006.

Song, Z.; Chen, Y. Q.; Ma, L.; Chung, Y. C. **“Some sensing and perception techniques for an omnidirectional ground vehicle with a laser scanner",** IEEE International Symposium on Intelligent Control. Vancouver, Canadá, pp. 690 - 695, october 2002.

Zhang, H. B.; Yuan, K.; Mei, S. Q.; Zhou, Q. R. **“Visual navigation of an automated guided vehicle based on path recognition",** Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai., vol. 6, no. 4, pp. 3877 - 3881, august 2004.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento do projeto.