

Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional

Navegação Autônoma para um Robô de Monitoramento de Linhas Subterrâneas de Distribuição de Energia

Emanuel da Silva Diaz Estrada

Rio Grande, 6 de Janeiro de 2010.

Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional

Navegação Autônoma para um Robô de Monitoramento de Linhas Subterrâneas de Distribuição de Energia

Emanuel da Silva Diaz Estrada

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Programa de Pós-
Graduação em Modelagem Computacional,
como requisito parcial à obtenção do título
de Mestre em Modelagem Computacional.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Silvia Silva da Costa Botelho

Co-orientador(a): Prof. Dr. Vinícius Menezes de Oliveira

Rio Grande, 6 de Janeiro de 2010.

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Estrada, Emanuel da Silva Diaz

Navegação Autônoma para um Robô de Monitoramento de Linhas Subterrâneas de Distribuição de Energia / Emanuel da Silva Diaz Estrada. - Rio Grande: PPGMC da FURG,2009

76 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande, BR-RS, 2009. Orientador: Silvia Silva da Costa Botelho; Co-orientador: Vinícius Menezes de Oliveira.

1. Navegação Autônoma. 2. Visão Computacional. 3. Redes Neurais Artificiais. 4. Controle proporcional, integral e derivativo. I. Botelho, Silvia S. C.. II. Oliveira, Vinícius M.. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

Reitor: Prof. Dr. João Carlos Brahm Cousin

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação: Prof. Dr. Luiz Eduardo Maia Nery

Coordenador do PPGMC: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Este trabalho foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional e aprovado em sua forma final pelo orientador.

Prof^a. Dr^a. Silvia Silva da Costa Botelho

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Silvia Silva da Costa Botelho

Centro de Ciências Computacionais – FURG (Orientadora)

Prof. Dr. Vinícius Menezes de Oliveira (Co-orientador)

Centro de Ciências Computacionais – FURG

Prof. Dr. Dante Augusto Couto Barone

Instituto de Informática – UFRGS

Dedico este trabalho a minha família, professores, amigos e demais pessoas que de alguma forma contribuíram para eu alcançar este objetivo.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe Cléia e meu irmão Rafael por sempre ajudarem nos momentos em que se precisa da família e por acreditarem nos meus objetivos.

Tenho grande gratidão aos professores do Centro de Ciência computacionais da FURG, em especial a minha orientadora Silvia e meu co-orientador Vinícius por pela oportunidade de desenvolver este trabalho e pelos conhecimentos ensinados para a carreira e a vida.

Gostaria, também, de expressar minha gratidão aos colegas e ex-colegas, acima de tudo amigos, em especial a Gisele, Luan e Ulisses pela ajuda e apoio ao longo desta etapa.

Por último, agradeço a minha namorada Caroline pela paciência e apoio ao longo deste período de trabalho.

Conteúdo

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas	vii
Resumo	ix
Abstract	x
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização	4
2 Trabalhos Correlatos	5
2.1 Plataformas para inspeção e monitoramento	5
2.2 Navegação de robôs móveis baseada na percepção visual do ambiente	8
3 Plataforma TATUBOT	13
3.1 Ambiente de inspeção	13
3.2 Plataforma Robótica TATUBOT	15
3.2.1 Estrutura Mecânica	15
3.2.2 Hardware Embarcado	18
3.2.3 Software TATUBOT	21

4	Propostas de navegação para plataforma TATUBOT	24
4.1	Visão Computacional	25
4.1.1	Fontes de imagens	25
4.1.2	Extração de características visuais do ambiente	26
4.2	Propostas de navegação	32
4.2.1	Modelo Cinemático	32
4.2.2	Navegação autônoma utilizando redes neurais artificiais	35
4.2.3	Navegação autônoma utilizando um controle PID	38
5	Experimentos e Resultados	41
5.1	Simulador	41
5.2	Extração de informação do ambiente	42
5.3	Proposta utilizando redes neurais artificiais	45
5.4	Proposta utilizando controle PID	47
5.5	Comparativo entre redes neurais artificiais e o modelo analítico	49
6	Conclusão	54
6.1	Trabalhos Futuros	55
	Bibliografia	57

Lista de Figuras

1.1	Galeria de distribuição subterrânea da CEEE.	2
2.1	Configuração básica do robô com braços em forma de arco.	6
2.2	Robô multi-bases para inspeção de linhas aéreas com navegação bio-inspirada.	7
2.3	Robô autônomo para inspeção de linhas subterrâneas.	7
2.4	(a)Configuração do sistema; (b) Imagem capturada pela câmera do robô; (c) Identificação de retas.	9
2.5	(a) Imagem original; (b)Imagem em tons de cinza; (c)Imagem filtrada; (d) área de navegação após segmentação.	10
2.6	(a) Imagem do simulador; (b)Extração de bordas; (c)Identificação de retas.	12
3.1	Corte em um cabo utilizado na distribuição subterrânea de energia.	14
3.2	Duto e cabos de uma distribuição subterrânea de energia.	14
3.3	Ambiente proposto para a plataforma TATUBOT.	14
3.4	Arquitetura geral da plataforma TATUBOT.	15
3.5	Posição em que o robô deve realizar a inspeção.	16
3.6	Estrutura mecânica.	17
3.7	Variação de diâmetro.	17
3.8	Rotação da base das rodas motrizes.	17
3.9	Movimento helicoidal da estrutura robótica.	18
3.10	Arquitetura do sistema de hardware embarcado.	19
3.11	Velocidade ângulo de ataque em relação ao tempo.	22
3.12	Interface remota de inspeção.	23
4.1	Arquitetura de navegação.	25

4.2	(a) Captura da câmera simulada (b) Captura da câmera real.	26
4.3	Em vermelho, reta mediana obtida a partir de retas coincidentes com as extremidades dos cabos.	27
4.4	(a) Imagem original (b) Imagem com bordas extraídas após aplicação do algoritmo de Canny.	28
4.5	Pontos colineares no plano e retas senoidais no espaço de Hough	29
4.6	(a) Imagem com bordas detectadas (b) Imagem com retas identificadas. . .	30
4.7	(a) Retas identificadas; (b) Retas selecionadas.	30
4.8	Reta mediana obtida a partir das duas retas coincidentes com as bordas do cabos.	31
4.9	Ângulo entre mediana e vetor vertical.	31
4.10	Sistemas de coordenadas.	33
4.11	Ângulo de ataque da roda motriz.	33
4.12	Corda, em tracejado, cruzando o centro do duto e alinhada com a base do robô.	34
4.13	(a) translação com rotação horária; (b) translação com rotação anti-horária; (c) somente translação.	36
4.14	Arquitetura Neural	37
4.15	Diagrama de bloco para o controle do sistema de navegação.	39
4.16	Fluxograma representando o algoritmo de controle.	40
5.1	Visão externa do simulador TATUBOT.	41
5.2	Cabos retos.	42
5.3	Cabos com disposição helicoidal.	42
5.4	Cabos com oscilação na sua disposição.	43
5.5	Iluminação uniforme:(a) Muitas retas encontradas; (b) Retas de interesse encontradas.	44
5.6	Iluminação forte:(a) Muitas retas encontradas; (b) Retas de interesse encontradas.	44
5.7	Iluminação variável:(a) Muitas retas encontradas; (b) Retas de interesse encontradas.	45

5.8	(a) imagem com bordas destacadas; (b) retas selecionadas.	45
5.9	Em azul, reta calculada a partir da média das coordenadas do pontos das retas em vermelho.	46
5.10	RNA - Cabos em disposição reta:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.	47
5.11	RNA - Cabos em disposição helicoidal:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.	48
5.12	RNA - Cabos em disposição helicoidal variável:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.	49
5.13	Robô deslocando-se a partir da origem. (a) 1,1 metros; (b) 1,65 metros; (c) 4,7 metros; (d) 5,8 metros; (e) 7,3 metros, (f) 9,1 metros,	50
5.14	Controle PID - Cabos em disposição reta:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.	51
5.15	Controle PID - Cabos em disposição helicoidal:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.	52
5.16	Controle PID - Cabos em disposição helicoidal variável:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.	53

Lista de Tabelas

3.1	<i>Sensores acoplados ao robô TATUBOT.</i>	21
4.1	<i>Exemplos de entrada e saída utilizados no treinamento da RNA.</i>	36
5.1	<i>Configurações do parâmetros da TH.</i>	43

Lista de Abreviaturas

AUV *Autonomous Underwater Vehicle* - Veículos Subaquático Autônomos

CAN (*Controller Area Network*)

CCD *Charge-Coupled Device*, Dispositivo de Carga Acoplado

CEEE Companhia Estadual de Energia Elétrica

FPS *Frames per Second*, Quadros por Segundo

FURG Universidade Federal do Rio Grande

MA Módulo de Acionamento

MP Módulo Principal

MspS *Megasamples Per Second*, Milhões de Amostras por Segundo

ODE *Open Dynamics Engine*

OpenGL Open Graphics Library

OpenCV Open Source Computer Vision Library

PID Proporcional, Integral e Derivativo

PPGMC Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional

PWM *Pulse Width Modulation*, Modulação por Largura de Pulso

RNA Redes Neurais Artificiais

TH Transformada de Hough

Resumo

Neste trabalho é proposta uma arquitetura para navegação autônoma da plataforma TATUBOT, objetivando o monitoramento de de cabos de energia em linhas de distribuição subterrânea. Tal arquitetura é composta de dois principais módulos: i. a extração de características do ambiente; ii a estratégia de navegação. O módulo de extração de características é baseado no uso do algoritmo detector de borda Canny e na transformada de Hough, para identificação de retas a partir de imagens do ambiente de monitoramento. A retas identificadas correspondem à conformação dos cabos no interior do duto. Estas informações servirão para auxiliar o sistema de navegação. Para a implementação do sistema de navegação foram propostos dois métodos: navegação através de redes neurais artificiais e modelagem cinemática com um controle PID. A arquitetura de navegação pode ser usada em um cenário real ou simulado, sendo validada e testada em ambiente simulado.

Palavras-chave: navegação autônoma, visão computacional, redes neurais artificiais, controle proporcional integral e derivativo

Abstract

This work proposes an architecture for TATUBOT platform autonomous navigation system, aiming at monitoring of power cables in underground distribution lines. This architecture is composed of two modules: i. feature extraction from environment; ii navigation approach. The module of feature extraction is based on the use of the edge detector by Canny algorithm and Hough transform for identification of lines from images of environment to monitoring. The lines identified correspond to the conformation of the cables in the duct. This information will serve to help the navigation system. For the implementation of the navigation system were proposed two methods: navigation based on artificial neural network and navigation based on PID control. The architecture of navigation can be used in real or simulated scenarios, and it was validated and tested in a simulated environment.

Keywords: autonomous navigation, computer vision, artificial neural networks, proportional-integral-derivative control

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Sistemas robóticos para inspeção são utilizados em diversas tarefas de risco. Dentre a grande diversidade de tarefas de inspeção, tem-se como importante aplicação a inspeção de linhas de energia elétrica. Atualmente, a tarefas envolvendo inspeção, além do risco de acidentes envolvendo técnicos, podem ter custos altos para realização de procedimentos e exigirem um longo intervalo de tempo para serem executados, o que justificaria o desenvolvimento de sistemas para automação dessas tarefas [de Oliveira, 2008].

O uso de robôs autônomos para monitoramento de infra-estruturas distribuídas, atualmente, é uma alternativa concreta com uma grande variedade de aplicações, tanto do ponto de vista científicas, quanto industriais [Jiang et al., 2005]. Soluções autônomas, ou seja, dispositivos que realizam algum serviço sem a necessidade de operação, podem ser utilizadas para melhorar a eficiência da inspeção e reduzir o tempo e a mão-de-obra envolvida no processo de monitoramento [Nassiraei et al., 2007].

Avaliações contínuas e/ou periódicas de linhas de transmissão e distribuição de energia são práticas comuns para aumentar a confiabilidade de sistemas e aumentar qualidade aos serviços prestados. De outra forma, pode-se dizer que o monitoramento é um item fundamental para assegurar um bom desempenho na produção de produtos e prestação de serviços.

Atualmente, vem sendo cada vez mais comum o emprego da distribuição de energia elétrica através de linhas subterrâneas [Silva et al., 2001]. Ao contrário do sistema padrão,

distribuição por malha aérea, a malha elétrica subterrânea é composta por uma rede de dutos subterrâneos com cabos isolados em seu interior. Porém, com o passar do tempo, devido ao envelhecimento, condições do ambiente e sobrecargas da rede, as linhas subterrâneas, principalmente o isolamento dos cabos, começam a degradar-se.

Como exemplo, pode-se citar as linhas da CEEE¹ (Companhia Estadual de Energia Elétrica), as quais configuram-se por galerias no subsolo onde cabos são passados pelo interior de dutos podendo alcançar alguns quilômetros de extensão, conforme a figura 1.1². Tais configurações criam um ambiente inacessível e confinado, tornando difícil o acesso de um técnico humano para averiguação do estado das linhas de distribuição.



Figura 1.1: Galeria de distribuição subterrânea da CEEE.

O projeto TATUBOT [Mello et al., 2008] é uma plataforma robótica projetada para monitorar cabos de distribuição subterrânea de energia elétrica em dutos. Ele é equipado com uma rede de sensores e atuadores que o tornam apto a atuar no interior de dutos de energia elétrica. O projeto consiste no desenvolvimento de um sistema robótico autônomo que visa otimizar o procedimento de manutenção de cabos, buscando conhecer a real situação de cada cabo, por meio de sensores (térmico, acústico, dielétrico e visual) que coletam dados para a análise do estado dos isolamentos. Esse robô, o qual deverá locomover-se autonomamente no interior do duto, apresenta um sistema de navegação autônomo que permite à plataforma o monitoramento de linhas de energia. Tal sistema

¹<http://www.ceee.com.br>

²É importante destacar que não há um padrão para a distribuição subterrânea de energia elétrica no Brasil.

deve levar em conta os seguintes requisitos:

- ambiente estruturado: composto por cabos retilíneos cuja estrutura pode guiar a navegação do robô;
- ambiente parcialmente conhecido: há três cabos dispostos em diferentes conformações dentro do duto a serem percebidas pelo robô durante a sua navegação (*online*)
- missões longas e monótonas: o monitoramento deve ser constante em missões de ida e volta do robô ao longo de dutos com grande comprimento;
- uma vez que a inspeção visual fornece informações pertinentes para a detecção de falhas, estas informações serão aproveitadas no auxílio à navegação.

Assim, o projeto TATUBOT necessita de uma estratégia de navegação diferenciada capaz de lidar com os requisitos citados acima, buscando o desenvolvimento de um sistema de navegação autônomo para realização do monitoramento de linhas subterrâneas de energia.

1.2 Objetivos

O ambiente de inspeção no qual a plataforma TATUBOT atuará é formado por dutos com cabos em seu interior. O robô fará a inspeção sendo posicionado no interior do duto e sobre os cabos. Este ambiente e a forma como a plataforma atuará, possuem características peculiares, sendo necessário um sistema robótico diferenciado assim como sua proposta de navegação. Neste contexto, tem-se como objetivo geral deste trabalho estudar e implementar estratégias de navegação para a plataforma TATUBOT de forma a dar suporte ao monitoramento de linhas subterrâneas de distribuição de energia.

De forma mais específica, no desenvolvimento do trabalho, deve-se passar pelas seguintes atividades para se alcançar o objetivo geral:

- Estudar trabalhos sobre monitoramento e inspeção utilizando robôs móveis e as diferentes formas de percepção e atuação nos seus ambientes de aplicação;

- Ajustar a plataforma TATUBOT, em aspectos de *software* e *hardware*, para permitir o desenvolvimento da navegação autônoma;
- Tornar apto o simulador TATUBOT para testes de navegação;
- Obter modelo cinemático do robô proposto pela plataforma TATUBOT;
- Estudar, analisar e propor diferentes estratégias de navegação autônoma;

Espera-se que, ao final do trabalho, com o cumprimento dos objetivos, a plataforma TATUBOT estará apta para realizar testes de monitoramento autônomo de linhas subterrâneas de distribuição de energia.

1.3 Organização

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. O capítulo 2 faz uma revisão sobre robôs móveis para inspeção e monitoramento e trabalhos que utilizam sensores para auxiliar a navegação. No capítulo 3, será feita uma descrição da plataforma TATUBOT, indispensável para a compreensão das necessidades para um sistema de navegação. O desenvolvimento de propostas para a navegação do robô TATUBOT são demonstradas no capítulo 4. Experimentos e resultados para as propostas de navegação são apresentados no capítulo 5. Por fim, o capítulo 6 apresenta algumas conclusões sobre o trabalho e discussões sobre trabalhos futuros para a continuidade do projeto.

Capítulo 2

Trabalhos Correlatos

O projeto TATUBOT visa desenvolver um sistema robótico para monitorar dutos de forma autônoma, navegando no interior deste ambiente. Sabendo-se que existe um sensor visual fornecendo informações sobre os cabos, esta informação pode ser utilizada no auxílio à navegação. Dadas estas duas premissas, inspeção de dutos subterrâneos para energia elétrica e navegação autônoma, tendo a visualização de cabos retilíneos como orientação a navegação, serão apresentados neste capítulo sistemas robóticos para realizar serviços em linhas de energia elétrica e sistemas de auxílio a navegação utilizando estrutura retilíneas como guia.

2.1 Plataformas para inspeção e monitoramento

Na bibliografia encontram-se alguns trabalhos relacionados ao desenvolvimento de robôs para monitoramento móvel de redes elétricas. Os trabalhos aqui relatados têm por objetivo o auxílio à tarefa de inspeção em locais de alto risco e insalubres aos operadores técnicos.

As propostas são classificadas em abordagens de navegação tele-operada, onde é imprescindível a presença de operador humano, e autônoma, onde o robô conduz sua navegação.

[Nio and Maruyama, 1993] apresenta um sistema robótico voltado para manutenção em linha-viva, ou seja, um sistema capaz de operar com as linhas energizadas, sem a interrupção do fornecimento de energia. Este robô é equipado com um sistema de câmeras estereoscópicas operadas remotamente para facilitar a manutenção das linhas de alta tensão.

O trabalho proposto por [Santamaria et al., 1997] descreve uma plataforma mecânica capaz de realizar reparos e manutenções em linhas de distribuição de energia. A arquitetura do sistema é dividida em interfaces responsáveis pelo telecomando, leitura de sinais de sensores e envio de comandos de atuação nas linhas.

Outro trabalho onde uma solução robótica teleoperada foi adotada é descrito em [Boyer, 1996]. Neste trabalho, braços robóticos, controlados através de uma interface, são empregados para executar os trabalhos em redes elétricas.

No que tange abordagens autônomas, a Tokyo Electric Power Co. apresenta um sistema robótico autônomo que navega e monitora linhas de fibra-ótica instaladas sobre linhas de transmissão de energia já existentes [Sawada et al., 1991]. O robô desenvolvido, ilustrado na figura 2.1, possui dois braços em forma de arco que permitem transpor obstáculos (esferas, sinalizações, emendas de cabos) nas linhas criados por equipamentos de outras empresas ou pelas torres de transmissão. A solução apresentada destaca-se por substituir trabalhadores da perigosa tarefa de inspeção utilizando gôndolas suspensas nas linhas. Em acréscimo, devido ao fato do robô navegar junto as linhas, o grau da precisão da inspeção é elevado.

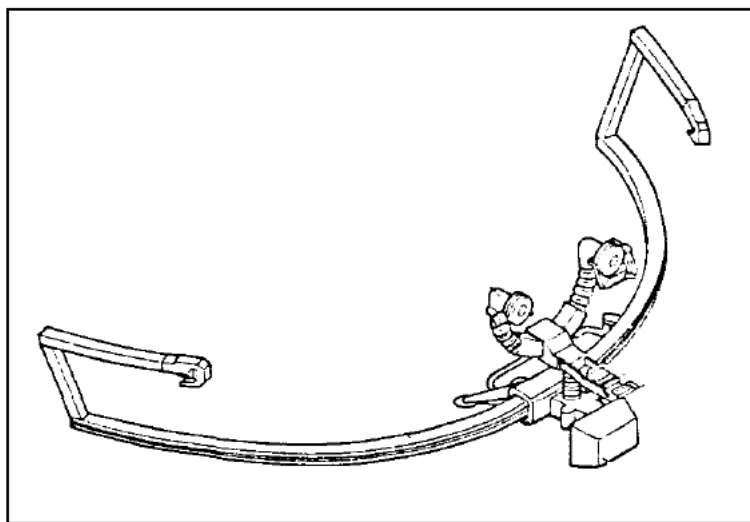


Figura 2.1: Configuração básica do robô com braços em forma de arco.

[Kobayashi et al., 1991] desenvolveu um robô móvel, com uma estrutura multi-bases, para inspecionar linhas elétricas ferroviárias. Este robô é fixado ao cabo de energia através de sua configuração multi-bases, ilustrado pela figura 2.2. Tal robô navega autônoma-

mente utilizando uma abordagem bio-inspirada, conseguindo contornar as irregularidades encontradas ao longo das linhas, como junções e isolamentos.

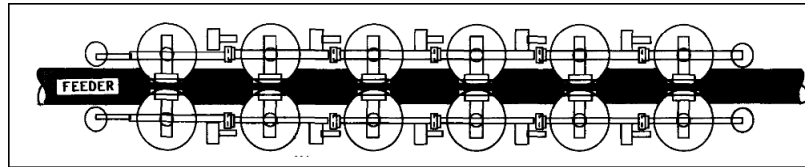


Figura 2.2: Robô multi-bases para inspeção de linhas aéreas com navegação bio-inspirada.

[Jiang et al., 2002] desenvolveu um robô móvel para inspecionar linhas subterrâneas de distribuição de forma autônoma. Sua plataforma robótica, exibida na figura 2.3, consiste de três segmentos acoplados por duas junções de livre rotação. Cada segmento terminal possui um par de pernas servo-controladas que pode abraçar ou soltar o duto de energia, devido a obstáculos como ramificações. O segmento central possui atuadores para as rodas, eletrônica para controle e baterias. Os segmentos das extremidades também possuem um conjunto de sensores capaz de identificar os principais fenômenos relacionados a falhas neste tipo de ambiente. Segmentos extras podem ser adicionados provendo outras funcionalidades.

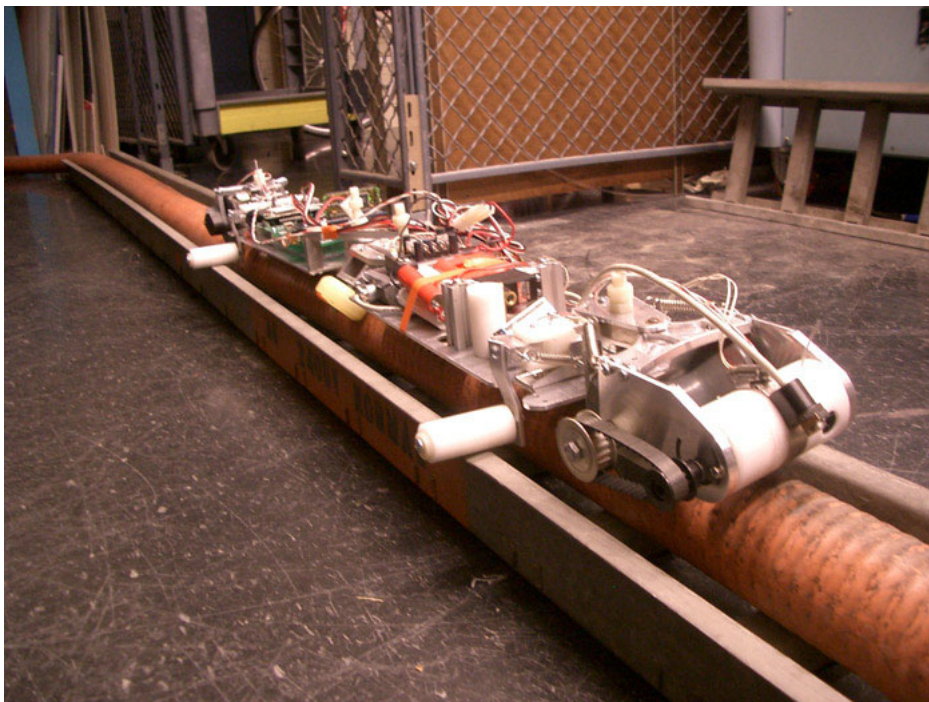


Figura 2.3: Robô autônomo para inspeção de linhas subterrâneas.

Como outro exemplo de robô autônomo tem-se o projeto da Korea Electric Power Research Institute que inspeciona o isolamento de linhas de distribuição [Cho et al., 2006]. Este robô, além de analisar o isolamento e detectar fissuras nos cabos, aproveita a navegação para limpar as linhas.

Tanto sistemas teleoperados como autônomos trazem benefícios por substituírem a presença de operadores humanos na realização de tarefas de inspeção em linhas vivas, reduzindo a ocorrência de acidentes fatais. Agora, o técnico poderá contribuir na análise das informações obtidas pelos sensores, a fim de contribuir com seu *know-how* na detecção de possíveis problemas nos isolamentos dos cabos.

2.2 Navegação de robôs móveis baseada na percepção visual do ambiente

A interação com o ambiente se dá basicamente através de ciclos de percepção-ação que consistem em três passos fundamentais: (i) Obtenção de informação através de sensores; (ii) Processamento das informações para seleção de ação; e, (iii) Execução da ação através do acionamento dos atuadores [Pessin et al., 2007].

Assim, a seção seguinte apresenta uma revisão de trabalhos os quais utilizam a percepção visual do ambiente como guia à navegação robótica. Também são analisadas as estratégias de navegação utilizadas. Com base em tal levantamento, serão definidas propostas para aplicar à plataforma TATUBOT.

Um sistema de navegação autônomo para navegar em estradas, usando lógica nebulosa e imagens obtidas de uma câmera comercial é apresentado em [Castro et al., 2001]. Tal veículo, um robô móvel, deslocar-se-á no ambiente com base na obtenção de ângulos das faixas da estrada, extraídos por um filtro de borda, com linhas horizontais. Estes ângulos servem como entrada para o sistema nebuloso determinar a direção a seguir em cada ponto da estrada. Tal proposta foi inspirada em ações humanas quando dirigindo um veículo.

[Fernandez and Casals, 1997] apresenta uma metodologia para navegação autônoma em ambientes externos fracamente estruturados (difícil descrição através de primitivas geométricas), como estradas de terra e estradas em montanhas. A tarefa principal deste trabalho é encontrar a estrada, a partir de uma estrutura parcialmente definida, e iden-

tificar obstáculos no cenário, considerando um ambiente com condições de iluminação variável. Uma câmera foi usada para capturar imagens e identificar a estrada a partir de uma transformação do espaço de cores, determinação da cor da estrada, segmentação da imagem em baixo nível e classificação de regiões.

Na inspeção externa de dutos,[Choi and Jung, 2006] fazem uso de um sistema de visão computacional, baseado na Transformada de Hough, o qual monitora através de câmeras a diferença de inclinação entre a orientação do robô e do duto. A configuração do sistema e as etapas de visão computacional podem ser vistos na figura 2.4. Uma simples análise baseada no erro de posição determina se o robô deve se mover ou rotacionar com uma velocidade constante.

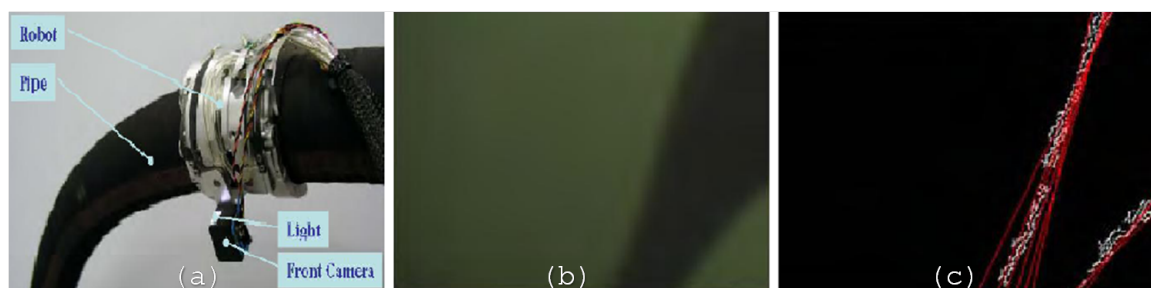


Figura 2.4: (a)Configuração do sistema; (b) Imagem capturada pela câmera do robô; (c) Identificação de retas.

Baseado em observações de comportamento de navegação humana, [Meng and Kak, 1993] projeta um sistema de navegação para robôs móveis auxiliado por visão, em que a partir de imagens fornecidas por uma câmera são extraídas características do ambiente através do operador Sobel para extração de bordas. Retas são identificadas pela transformada de Hough. Por fim, as informações obtidas das imagens alimentam o sistema o qual utiliza uma base de conhecimento e uma coleção de redes neurais para imitar o comportamento reativo de um humano navegando.

Uma metodologia para extração de bordas de estradas e informação de faixas para navegação inteligente de veículos é apresentado em [Wijesoma et al., 2001]. Neste trabalho é utilizado um dispositivo laser o qual permite ter informação sobre a distância da estrada. Tal informação é processada por um filtro de Kalman estendido possibilitando extrair a borda da estrada ou informação sobre o meio-fio. A informação da borda da estrada resultante é usada para auxiliar na extração dos limites da pista em

um sistema de captura usando uma câmera CCD (*charge-coupled device*, Dispositivo de Carga Acoplado). A transformada de Hough é usada para extrair as bordas do limite da faixa candidata e o provável limite da faixa é determinado usando o método *active line model*[Kang et al., 1996].

Uma proposta para navegação de robôs móveis baseado em visão monocular é apresentado em [Neto and Rittner, 2006]. O sistema é organizado em camadas hierárquicas e independentes, com processamento distribuído. Consiste em segmentar e identificar a área para navegação, no caso, detecção da estrada. Tais dados serão usados como entrada de um sistema de geração de movimento. O sistema é baseado em imagens adquiridas por uma única câmera e uso de filtros simples e técnicas de *thresholding*, a fim de deixar mais rápido e eficiente a navegação em tempo real, como mostra a figura 2.5. O sistema pré-processa a imagem através da utilização de um filtro passa baixa seguido pela segmentação utilizando a técnica Otsu. A identificação de obstáculos e a navegação consideram a imagem binarizada, gerando um vetor com a direção que deve ser seguida.

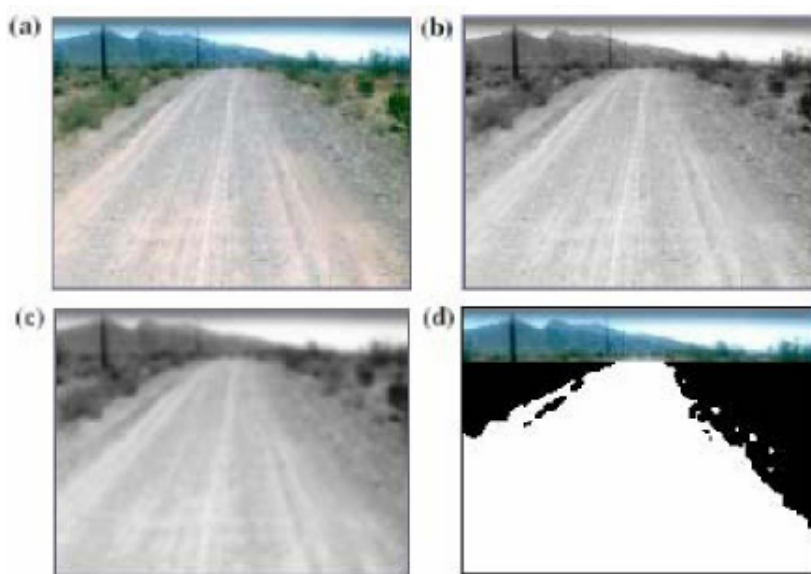


Figura 2.5: (a) Imagem original; (b) Imagem em tons de cinza; (c) Imagem filtrada; (d) área de navegação após segmentação.

[Shihavuddin et al., 2008] aborda a geração de mapas de estrada em ambientes desconhecidos utilizando aproximação trapezoidal para segmentação. Nesta proposta, a transformada de Radon é usada para extrair os limites da estrada, seguida pela apli-

cação de um filtro mediana de forma a reduzir ruídos. Após, as bordas são detectadas pela aplicação de um filtro de Sobel seguidos pela detecção de linhas retas através da transformada de Hough. Então, aproximando uma seção trapezoidal da estrada tem-se definido um comprimento. Assim, o veículo se move através desse trapézio até que outra aproximação trapezoidal seja encontrada. Com base nisso uma trajetória é definida para o veículo mover-se pela estrada. Ainda são identificados obstáculos através de sensores infravermelhos.

O uso de câmera omnidirecional o qual permite capturar imagens do ambiente ao redor é abordado em [Sugiura et al., 2007]. Assim foi desenvolvido um algoritmo para reconhecimento de ambientes para estas câmeras. A partir dos resultados do reconhecimento do ambiente, o robô móvel pode achar um caminho apropriado para a navegação. Nesse novo algoritmo, destacam-se: as operações morfológicas aplicadas à detecção de obstáculos de forma robusta e precisa; e a aplicação de segmentação de regiões baseada em detecção de raia. Estes métodos são comparados com uma transformada de Hough melhorada para confirmar os resultados obtidos.

No trabalho [Feng et al., 2008] é pesquisado mudanças de pistas e ultrapassagens para um veículo inteligente baseado em navegação por visão. Para o processamento da imagem da raia é utilizado um filtro de mediana, o operador Sobel e o algoritmo de Otsu. A fim de extrair características da estrada e detectar a borda da raia aplicou-se a Transformada de Hough. Ainda, uma área de interesse da borda da raia é estabilizada, podendo ser ajustada dinamicamente para mapear a borda da raia precisamente, através do uso de filtro de Kalman. O controle do veículo é feito baseado em seu modelo cinemático.

A implementação de um algoritmo robusto para a detecção de estradas em um ambiente de simulação de voo, capaz de definir comandos para o sistema de controle lateral de uma aeronave virtual, é abordada no trabalho [Neto, 2007]. Para tal, foi utilizado um ambiente simulado, do qual se adquiriu dados referentes aos estados de voo da aeronave e forneceu-se dados para o sistema de controle da mesma. Além disso, foram capturadas imagens de uma câmera virtual posicionada abaixo do veículo, apontada exatamente para baixo. Nas imagens capturadas pretende-se detectar a estrada. Para tal, utilizou-se, primeiramente, um algoritmo de segmentação de cores. Após, faz-se a localização da estrada em relação à câmera da aeronave aplicando-se um o filtro detector de borda

Canny, para retirar parte do ruído e facilitar a identificação de retas da estrada. Esta feita pela transformada de Hough. Os passos da extração de informação de uma estrada simulada são demonstrados pela figura 2.6. Finalmente, com base nas informações extraídas a aeronave tem sua navegação realizada através de um controle PID.

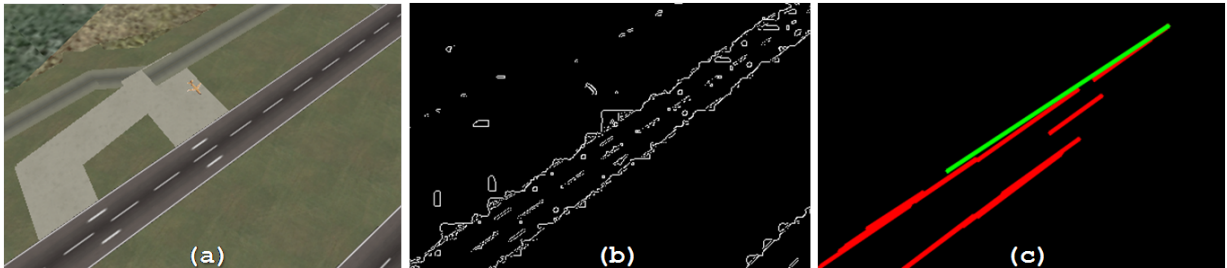


Figura 2.6: (a) Imagem do simulador; (b) Extração de bordas; (c) Identificação de retas.

Capítulo 3

Plataforma TATUBOT

Para um completo entendimento das necessidades de navegação da plataforma TATUBOT, faz-se necessária uma descrição detalhada do sistema robótico associada aos aspectos de *software* e *hardware*. Outro ponto importante, que deve também ser descrito, é o ambiente de inspeção e a forma como o robô TATUBOT atua nesse mesmo ambiente. Somente desta forma pode se definir quais elementos e quais restrições deve se levar em conta no desenvolvimento das propostas de navegação. Assim, este capítulo descreverá o ambiente de inspeção, bem como a plataforma TATUBOT, dividindo-a em aspectos de Hardware e Software.

3.1 Ambiente de inspeção

A distribuição de energia subterrânea, no Brasil, caracteriza-se por uma galeria de dutos com cabos em seu interior. Os cabos empregados nestas construções possuem material condutor de alumínio ou cobre sendo revestidos por um isolamento de polietileno reticulado, suportando níveis elevados de tensão e corrente. A figura 3.1 mostra um cabo com um corte transversal, descrevendo o material que o forma. Já os dutos, são feitos em estruturas de concreto. A figura 3.2 exhibe um exemplo de estrutura de uma galeria da CEEE na cidade de Porto Alegre.

No projeto TATUBOT, por não haver um padrão para instalações de distribuição subterrânea de energia, foi especificada uma estrutura padrão de análise possuindo 30 centímetros de diâmetro. Por sua vez, admite-se que os cabos não ocuparão mais do que

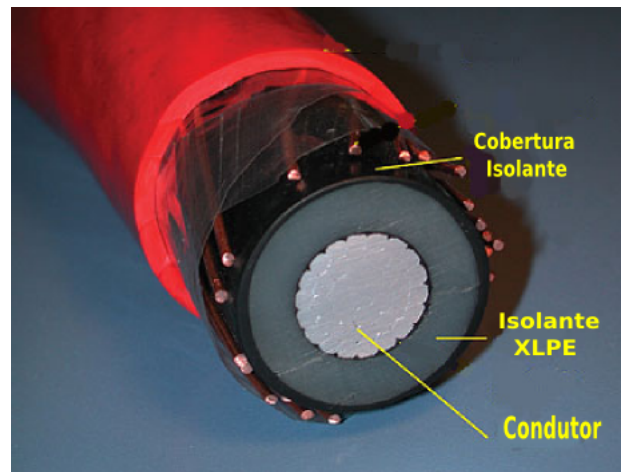


Figura 3.1: Corte em um cabo utilizado na distribuição subterrânea de energia.



Figura 3.2: Duto e cabos de uma distribuição subterrânea de energia.

$1/3$ da área da seção transversal do duto, ou seja, existirá sempre $2/3$ de área livre para a navegação do robô. A figura 3.3 ilustra a estrutura em que o robô TATUBOT navegará, dando idéia da área livre necessária para o deslocamento.

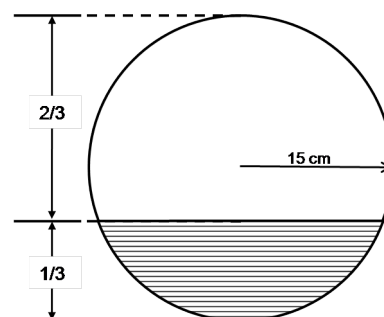


Figura 3.3: Ambiente proposto para a plataforma TATUBOT.

Partindo-se de tais premissas, as próximas seções apresentam elementos de hardware e software desenvolvidos para permitir lidar com os possíveis cenários de inspeção.

3.2 Plataforma Robótica TATUBOT

A plataforma robótica TATUBOT foi desenvolvida levando em conta as restrições do ambiente, descritas na seção 3.1, e considerando ainda que o robô fará a inspeção junto às linhas, precisando adquirir vários tipos de informação a respeito de uma possível falha. Esta plataforma ainda deve permitir a execução de inspeções de forma autônoma (preferencialmente) ou teleoperada, sempre se comunicando com uma estação remota. A figura 3.4 exibe todos os aspectos citados, representando a arquitetura geral da plataforma TATUBOT.

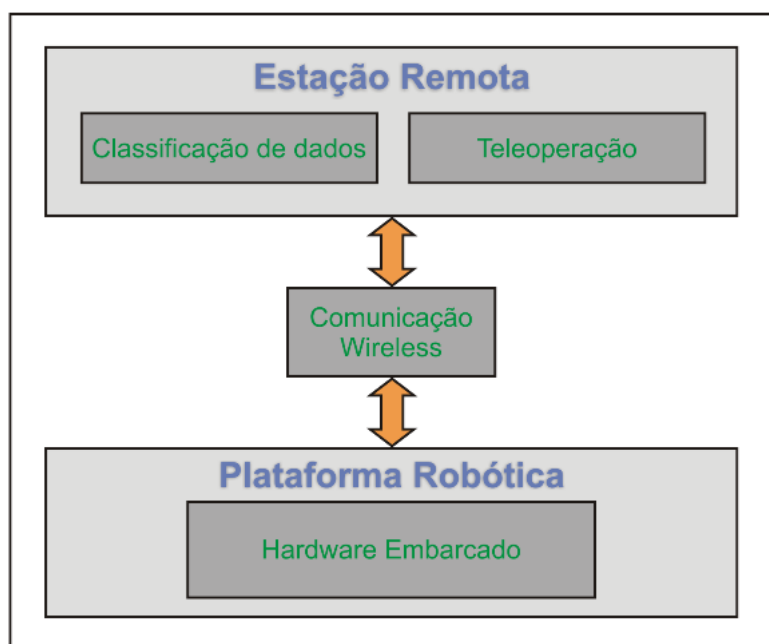


Figura 3.4: Arquitetura geral da plataforma TATUBOT.

3.2.1 Estrutura Mecânica

A estrutura mecânica proposta à realização da tarefa foi projetada a fim de ser capaz de transpor obstáculos, garantir autonomia necessária e transportar os circuitos de medição necessários à inspeção dos cabos [Botelho et al., 2008].

Para se locomover no interior de um duto, foi proposta uma estrutura mecânica com rodas que sempre estejam em contatos com as paredes. Tal situação é ilustrada pela figura 3.5.

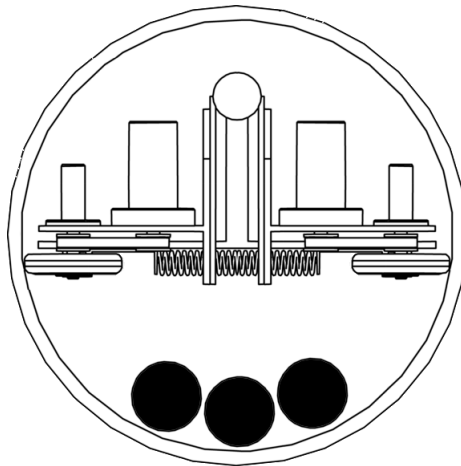


Figura 3.5: Posição em que o robô deve realizar a inspeção.

A estrutura mecânica, exibida na figura 3.6, foi construída para atender às necessidades do projeto. Ela apresenta uma base com quatro rodas, sendo duas em cada extremidade. Uma das extremidades será responsável pela tração da plataforma robótica. Esta extremidade é formada por atuadores, presos a uma base móvel em formato de 'L'. Estas bases são unidas por um eixo e afastadas por uma mola, garantindo a compressão das rodas nas paredes do duto, de forma a adaptarem-se às variações de diâmetro e imperfeições do mesmo. A estrutura mecânica, ainda, possui um *spot* de iluminação na mesma extremidade onde se encontram as rodas motrizes. Tal dispositivo tem o objetivo de garantir a visualização dos cabos e da parede do duto em diferentes condições de iluminação. O robô, ainda, comporta em sua base baterias necessárias para alimentar os motores, circuitos eletrônicos e o *spot* de iluminação.

A figura 3.7 mostra uma situação em que o diâmetro do duto aumenta, de um diâmetro D_1 para D_2 , e as rodas motrizes continuam em contato com o duto. Esta base ainda possui outros atuadores que permitem rotacioná-las, como pode ser visto na figura 3.8, possibilitando realizar movimentos helicoidais no interior do duto. Estes movimentos são fundamentais para contornar as conformações as quais os cabos podem encontrar-se.

Na figura 3.9 pode-se ver com clareza um movimento no interior do duto, onde o robô



Figura 3.6: Estrutura mecânica.

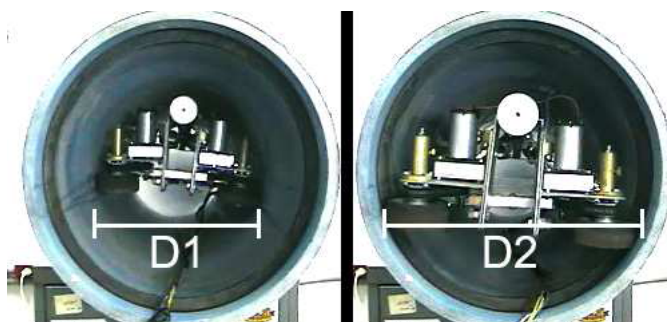


Figura 3.7: Variação de diâmetro.



Figura 3.8: Rotação da base das rodas motrizes.

avança e rotaciona ao mesmo tempo. Considera-se a fim de simplificar a navegação que o robô sempre estará posicionado no centro do duto tal qual uma corda que cruze o centro de um círculo.

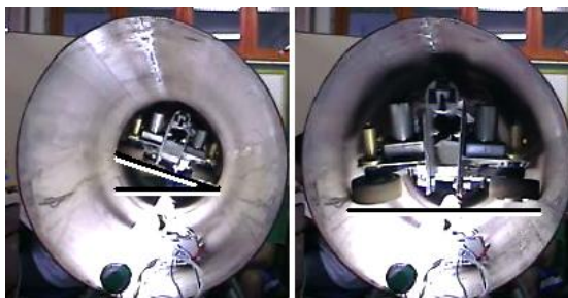


Figura 3.9: Movimento helicoidal da estrutura robótica.

3.2.2 Hardware Embarcado

A arquitetura de hardware consiste em uma arquitetura composta por módulos interconectados através de um barramento, no caso, um barramento CAN (*Controller Area Network*) [Souto, 2009]. A este barramento, como apresentado na figura 3.10, estão conectados o módulo principal (MP), os módulos sensoriais e o módulo de acionamento (MA). O MP executa o sistema de navegação e comunica-se com a estação remota. Os módulos sensoriais são necessários para a implementação das funcionalidades relativas a percepção de falhas em cabos. Por último, o módulo de atuação é responsável pelo acionamento dos atuadores.

Para essa solução foi definido um sistema computacional distribuído, no qual os módulos da arquitetura possuem funções independentes, tornando-se imprescindível a utilização de prioridade de acesso ao barramento do sistema, por se tratar de um barramento multimedial. Cada módulo do hardware embarcado é constituído por um microcontrolador Microchip® família dsPIC30F e um circuito integrado transceptor MCP2551, o qual serve de interface entre o controlador de protocolo CAN e o barramento físico. Estes modelos de componentes foram escolhidos por possuírem dispositivos que atendem as necessidades do sistema. Outros modelos de microcontroladores e transceptores podem ser acoplados ao sistema atual sem que haja necessidade de se realizar modificações [Souto, 2009].

Para uma melhor organização, foi atribuída uma lista de funcionalidades para cada módulo pertencente ao hardware embarcado. O módulo principal é baseado em um processador x86 e um microcontrolador, possuindo as seguintes atribuições:

- acesso ao barramento para leitura e escrita;

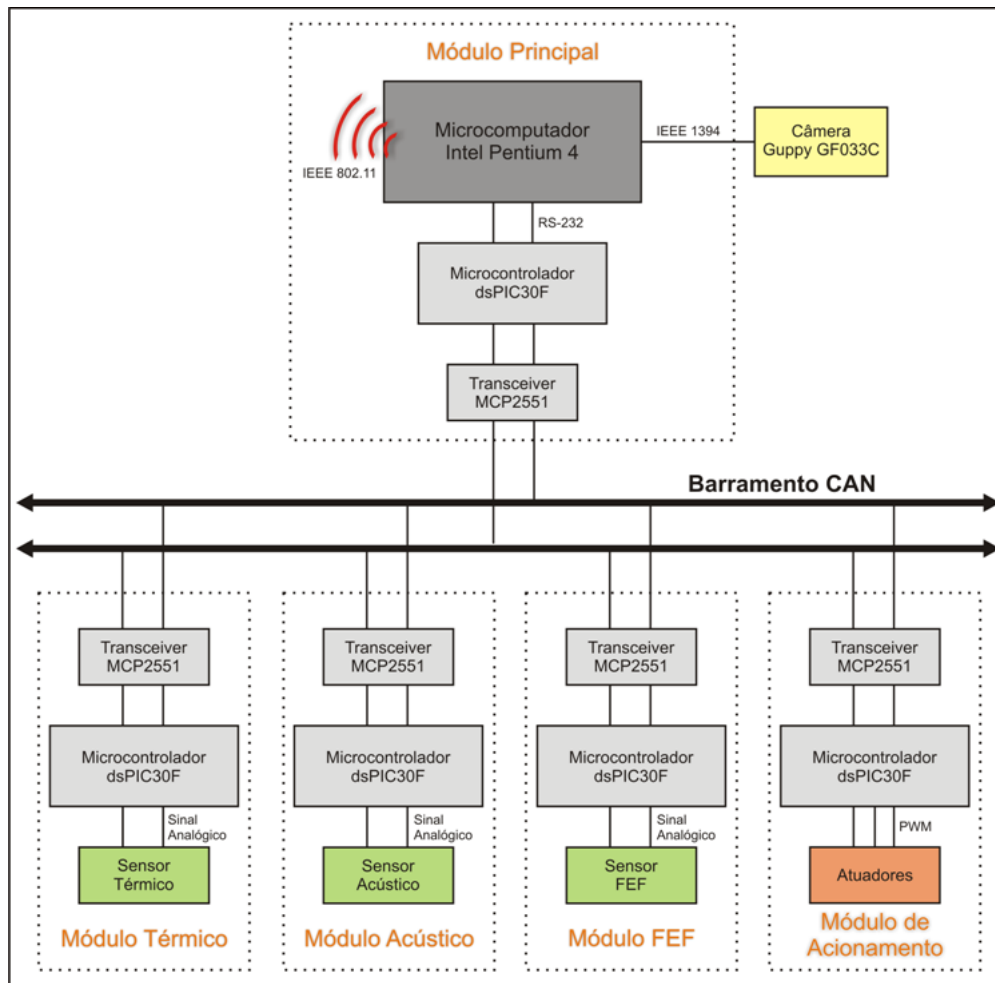


Figura 3.10: Arquitetura do sistema de hardware embarcado.

- comunicação bidirecional com a estação remota;
- navegação do robô.

Já os demais módulos, sensoriais e de acionamento, baseados em microcontroladores e um conjunto de sensores, devem realizar:

- a aquisição, conversão e pré-processamento de sinais oriundos dos sensores;
- o controle do acionamento e atuadores.

A seguir as implementações e funcionalidades dos módulos da arquitetura são mais bem detalhados.

Módulo Principal

O Módulo Principal (MP) foi implementado utilizando um computador portátil, o qual é munido principalmente por uma unidade x86 com suporte a comunicação sem fio (padrão IEEE 802.11g) e controladora *firewire* (padrão IEEE 1394). Para gerenciamento de seus periféricos utilizou-se uma sistema operacional GNU/LINUX. O MP também é provido de um microcontrolador Microchip® dsPIC família 30F. Este é responsável pela interface de comunicação entre o MP e o barramento CAN, via porta serial do computador portátil.

Uma das principais funções do MP é portar o sistema de navegação. Este sistema pode tanto ser autônomo ou teleoperado. Quando operando em modo autônomo, o MP deve utilizar os dados de inspeção adquiridos como entrada do sistema de navegação autônomo. Este módulo deve, também, transferir dados coletados para a estação remota através do enlace de rede sem fio. O meio pelo qual é feita a transferências é o mesmo pelo qual o MP recebe dados de controle. Por fim, em ambos os modos de operação, o MP deve sempre controlar os motores, através do módulo de acionamento.

Módulos Sensoriais

A fim da averiguação do estado dos cabos do sistema de distribuição subterrâneo, necessita-se de um conjunto de sensores com capacidade de detectar sinais comuns no ambiente inspecionado. Além disso, por atuar em um ambiente com dimensões reduzidas e necessitar uma boa autonomia energética, estes sensores devem possuir características como: dimensão e peso reduzidos, baixo consumo energético e não serem intrusivos ao ambiente. Inicialmente, quatro sensores foram escolhidos para realizar a inspeção de cabos [da Silva Diaz Estrada, 2008]: sensor térmico infravermelho, sensor acústico, sensor dielétrico e sensor visual. O evento associado a degradação de cabos que cada sensor identifica é descrito na tabela 3.1.

Módulo Acionamento

No acionamento dos atuadores da plataforma robótica foi utilizado um recurso presente no microcontrolador padrão da arquitetura embarcada. Este recurso é o PWM¹ (Pulse

¹Técnica de chaveamento para controle da corrente em motores elétricos.

Tabela 3.1: *Sensores acoplados ao robô TATUBOT.*

Sensor	Função
Infravermelho	Pontos de calor
Acústico	Descargas parciais
Dielétrico	Presença de umidade
Visual	Falhas mecânica

Width Modulation - modulação por largura de pulso). O microcontrolador fornece níveis de PWM os quais são convertidos para os níveis de tensão dos motores DC através de circuitos PONTE-H². A fim de permitir os movimentos necessários para navegação são gerados sinais de PWM para movimentação do robô e variação do ângulo de ataque das rodas motrizes.

Em virtude da estrutura mecânica permitir alterar o ângulo de ataque das rodas motrizes, através de atuadores, é necessário um circuito o qual permita identificar o ângulo em que as rodas encontram-se. Para tal, adaptou-se um dispositivo resistivo do tipo potenciômetro fixado aos eixos de rotação das bases das rodas. Ao dispositivo foi aplicada uma tensão fixa de 5 Volts. Conforme a variação da resistência é fornecida, um nível de tensão é fornecido ao conversor analógico-digital do microcontrolador do módulo de acionamento. Desta forma é possível obter o ângulo em que se encontram as rodas em relação à base do robô.

A adaptação feita permitiu, também, fazer um levantamento que relaciona nível de PWM com velocidade do ângulo de ataque. A figura 3.11 mostra a relação da variação da velocidade do ângulo de ataque das rodas em relação nível de PWM. Os valores deste gráfico serão usados para ajustar o simulador para realização de testes.

3.2.3 Software TATUBOT

Esta seção descreve aspectos do software desenvolvido para ajudar auxiliar a plataforma TATUBOT na tarefa de inspeção de cabos de distribuição de energia.

²Circuito eletrônico que permite a aplicação de tensão em uma carga nos dois sentidos.

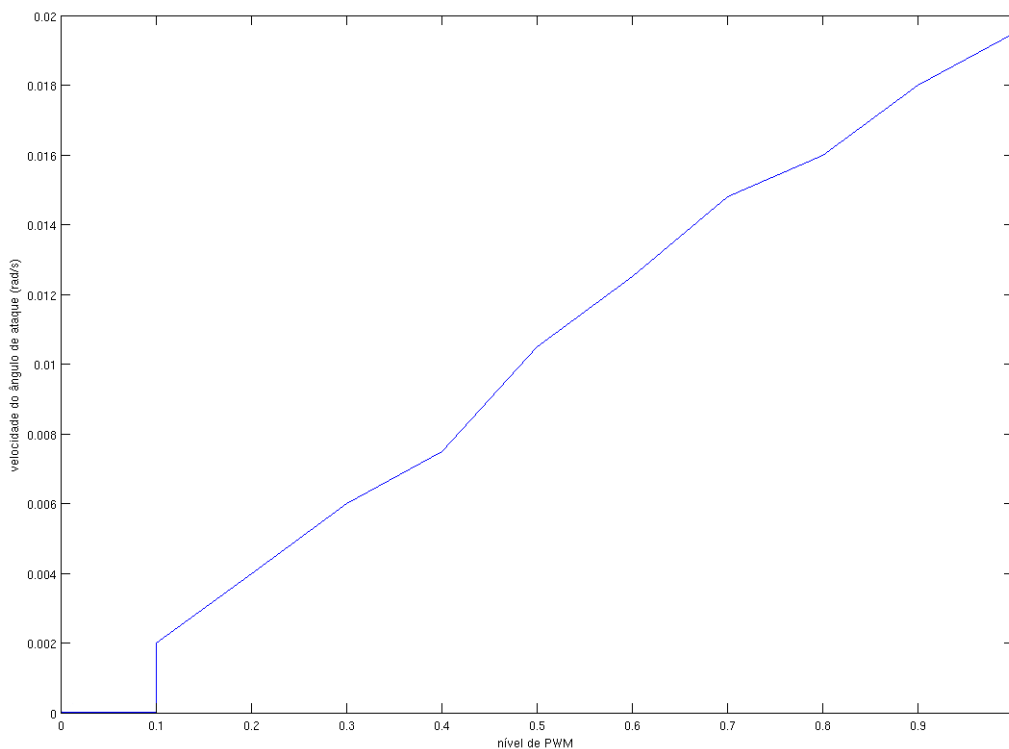


Figura 3.11: Velocidade ângulo de ataque em relação ao tempo.

Interface Remota

A interface remota tem a função de comunicar-se com o hardware embarcado, receber e classificar dados da inspeção. A interface, ver figura 3.12, permite a tele-operação do robô, a visualização dos dados obtidos e dos resultados da classificação dos dados.

No desenvolvimento da interface remota foi utilizado a linguagem C/C++ com o auxílio do ambiente de desenvolvimento QT Design³. A comunicação é feita através de *socket*⁴ por datagramas.

Simulador

Quando se trabalha com robôs, a utilização de ferramentas de simulação é de significativa importância. Muitas vezes desenvolver o sistema de navegação de robôs torna-se uma tarefa que exige tempo, espaço e recursos financeiros. Por esse motivo é comum

³<http://www.qtsoftware.com/>

⁴Protocolo de baixo nível para comunicação ponto-a-ponto

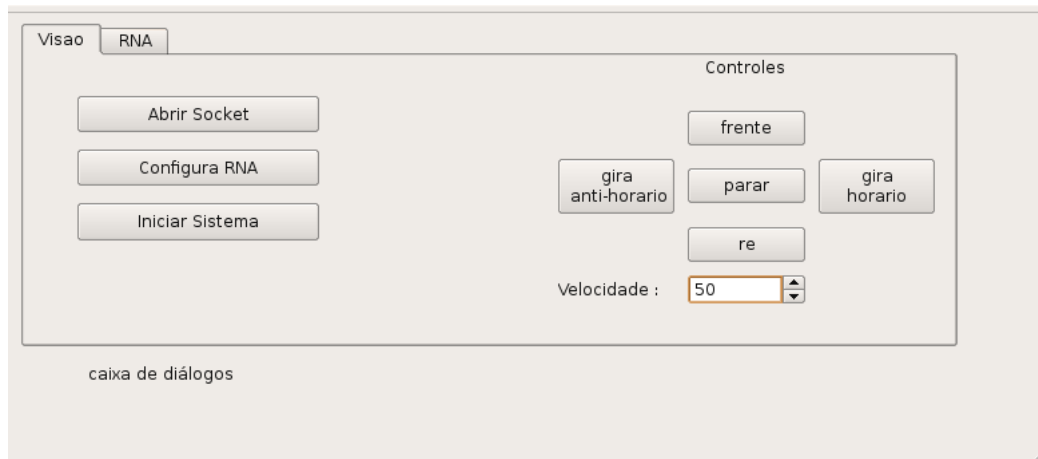


Figura 3.12: Interface remota de inspeção.

pesquisadores valerem-se de simuladores para validarem seus sistemas antes de os aplicarem em um ambiente real [de Almeida, 2009].

Com base nisso e com o intuito de validar a plataforma TATUBOT um ambiente simulado foi desenvolvido utilizando as bibliotecas ODE⁵ e OpenGL⁶. A primeira é responsável pela simulação da dinâmica física do movimento de corpos rígidos e, a segunda, pela visualização do ambiente e da plataforma simulados.

Através do simulador foi criada uma versão do robô TATUBOT, respeitando características de massa e dimensões. As velocidades de acionamento tanto para velocidade das rodas quanto mudança do ângulo de ataque das rodas, também correspondem ao do robô real. Em adição, é simulado o sensor visual, posicionado à frente do robô, permanecendo junto ao robô durante o deslocamento e rotações. A câmera virtual retrata os cabos e, por consequência, sua disposição no interior de duto. Em relação ao ambiente de monitoramento, o simulador possibilita a criação de dutos com quilômetros de comprimento e diversas conformações de cabos.

⁵ODE (Open Dynamics Engine) é uma biblioteca gratuita de código aberto para simulação da dinâmica de corpos rígidos

⁶OpenGL (Open Graphics Library) é uma especificação aberta e multiplataforma de uma biblioteca de rotinas gráficas e de modelagem, ou API (Application Programming Interface), utilizada para o desenvolvimento de aplicações de Computação Gráfica, tais como jogos e sistemas de visualização

Capítulo 4

Propostas de navegação para plataforma TATUBOT

Antes de definir um sistema de navegação para a plataforma TATUBOT, alguns aspectos precisam ser definidos. Como a navegação se dará em um ambiente conhecido, o sistema terá um comportamento reativo. Existe, ainda, a necessidade de definir quais sensores auxiliarão a navegação e, assim, desenvolver propostas para navegar neste ambiente.

De modo geral, os trabalhos apresentados na seção 2.1, embora visem o monitoramento de sistemas de energia, utilizam outras abordagens de navegação sobre as linhas de energia: diretamente sobre os cabos aéreos de distribuição ou pelo exterior do duto. Por sua vez o robô TATUBOT navega suspenso no centro do duto de energia, devendo permanecer paralelo aos cabos de energia para uma medição adequada dos sensores de inspeção.

Na definição da forma como seria feita a percepção do ambiente, os trabalhos apresentados na seção 2.2 indicaram que a percepção pode ser baseada em visão. Para a plataforma TATUBOT a percepção do ambiente utilizando uma câmera monocular, mostrou-se uma alternativa que permitiu extrair muitas características do ambiente de inspeção. Em vista disso, definiu-se a visão como fonte de percepção para o sistema de navegação.

Existem diversas técnicas empregadas em navegação autônoma, neste trabalho serão propostas duas estratégias de navegação para a plataforma TATUBOT. Baseado na bibliografia consultada, em geral, robôs são controlados utilizando técnicas de inteligência artificial ou através modelos analíticos. Para o robô TATUBOT, foram propostas duas

abordagens: i. redes neurais artificiais (RNA); ii. um controle proporcional, integral e derivativo (PID).

Assim, para realização deste trabalho será proposta uma arquitetura de navegação composta por duas etapas: o processamento de imagens recebidas e, baseado neste processamento, a política de navegação. As imagens fornecidas podem ser capturadas do ambiente virtual ou do ambiente real, da mesma forma que as ações serão enviadas para ambos. A figura 4.1 apresenta as etapas envolvidas na navegação autônoma da plataforma TATUBOT.

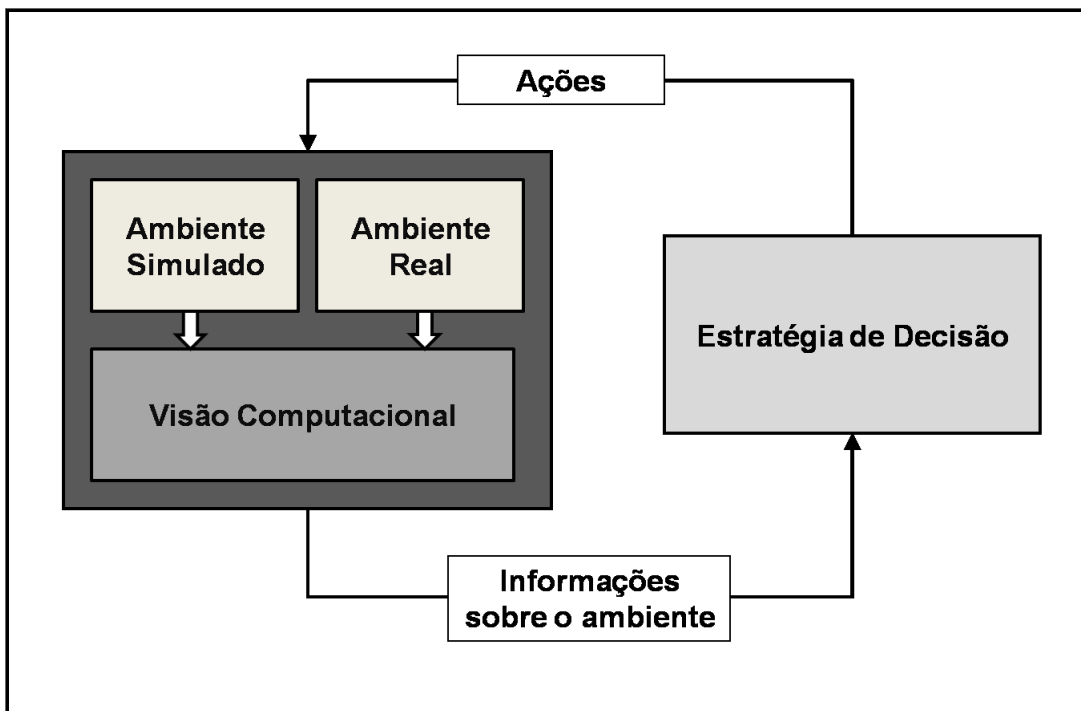


Figura 4.1: Arquitetura de navegação.

Nas próximas seções será descrito cada componente da arquitetura de navegação.

4.1 Visão Computacional

4.1.1 Fontes de imagens

As fontes de imagens, como descrito anteriormente, serão duas: o ambiente virtual e o ambiente real. Em ambos os casos, as imagens retratam o mesmo cenário, cabos e parede interna do duto, havendo apenas algumas diferenças de cores e luminosidade que não

afetam o processo de navegação. As figuras 4.2.a e 4.2.b apresentam imagens capturadas a partir da versão anterior do ambiente virtual e do ambiente real, respectivamente.

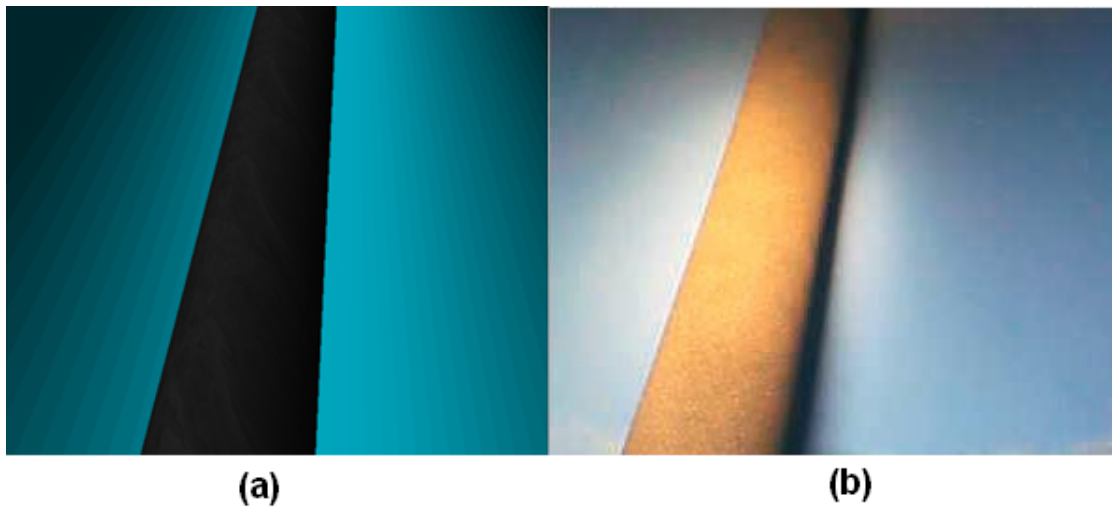


Figura 4.2: (a) Captura da câmera simulada (b) Captura da câmera real.

Conhecidas as características das imagens fornecidas, os próximos passos do processamento de imagem podem trabalhar sem a necessidade de mudanças devido à fonte de obtenção de imagens.

4.1.2 Extração de características visuais do ambiente

Sabendo-se que o tipo de imagem fornecida apresenta sempre o mesmo padrão, ou seja, os cabos e a parede interna do duto como fundo, necessita-se a partir deste padrão obter-se informação para auxiliar a navegação. Identificou-se nestas imagens que poderia extrair-se características da mesma forma que os trabalhos [Meng and Kak, 1993, Wijesoma et al., 2001, Choi and Jung, 2006, Neto, 2007, Feng et al., 2008] descritos na seção 2, principalmente pela boa intensidade do gradiente entre os cabos e a parede do duto. Conforme os trabalhos supracitados, a partir deste gradiente encontrado é possível extrair bordas e identificar retas coincidentes com a extremidade dos cabos. Tendo as retas de interesse identificadas, calcula-se uma reta mediana que servirá como guia para o sistema de navegação. A figura 4.3 ilustra a obtenção da reta mediana (em vermelho), onde esta indicará o erro de posição da base do robô em relação aos cabos de energia. Os passos envolvidos na obtenção da reta mediana são descrito a seguir.

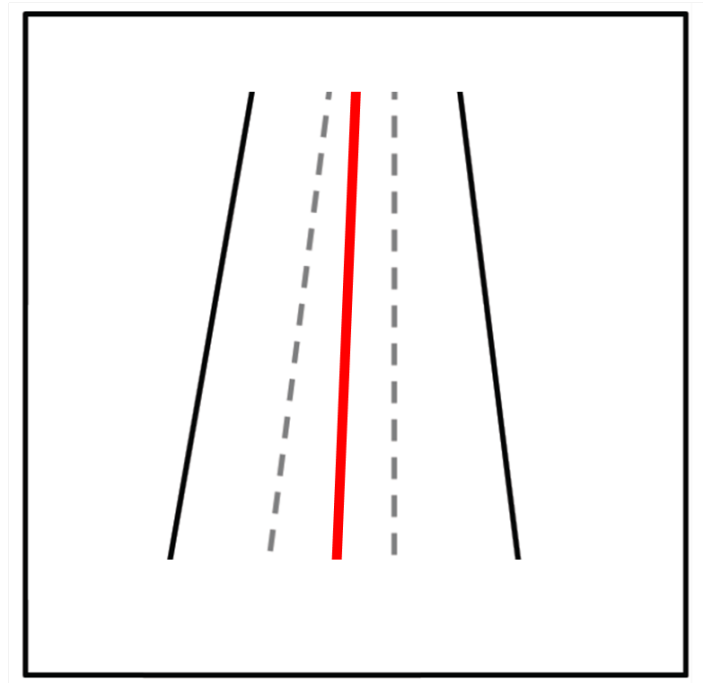


Figura 4.3: Em vermelho, reta mediana obtida a partir de retas coincidentes com as extremidades dos cabos.

Identificação de retas através da transformada de Hough

Antes da identificação de retas através da TH é necessário um pré-processamento das imagens, devido à variação de iluminação e diferentes cores dos elementos do ambiente, pelo realce de bordas.

A maioria das técnicas de detecção de bordas emprega operadores diferenciais de primeira ou de segunda ordem. Os operadores diferenciais ressaltam os contornos das bordas, mas também geram ruído da cena. Grande parte dos operadores de borda utiliza algum tipo de suavização da imagem antes da operação diferencial. O operador de Canny é um destes suavizadores. Este pode atenuar as bordas fracas, onde o contraste é pequeno. Resumidamente, o detector de bordas Canny é um operador gaussiano de primeira derivada que suaviza os ruídos e localiza as bordas [de Almeida, 2009]. A saída de detector de borda é uma imagem binarizada. Na figura 4.4 é exemplificada a aplicação do algoritmo, onde a partir da imagem original (a), extraiu-se bordas onde a intensidade do gradiente é maior.

Após a detecção de bordas, é possível identificar formas na imagem mais confiavel-



Figura 4.4: (a) Imagem original (b) Imagem com bordas extraídas após aplicação do algoritmo de Canny.

mente. Para isto é aplicada a transformada de Hough (TH) na imagem binarizada. A TH é um dos métodos mais utilizados para identificação de formas em imagens [Calvo et al., 2009]. Neste caso, as formas procuradas são retas.

A transformada de Hough é capaz de detectar grupos de pixels que pertencem a uma linha reta, ou seja, colineares. Uma reta é pode ser descrita como $y = mx + b$. As características desta reta são a inclinação m e a intersecção b . Assim, uma reta $y = mx + b$ pode ser representada como um ponto (b, m) no espaço dos parâmetros (espaço de Hough). Porém, ambos os parâmetros são ilimitados, isto é, à medida em que a reta torna-se vertical, as magnitudes de b e m tendem ao infinito. Assim, é melhor parametrizar as retas usando dois outros parâmetros (θ, ρ) , conforme a equação 4.1.

$$x \cos(\theta) + y \sin(\theta) = \rho \quad (4.1)$$

Isto associa cada reta da imagem a um único ponto (θ, ρ) no plano dos parâmetros. Sendo n pontos na imagem $(x_1, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, os pontos colineares no plano cartesiano geram curvas senoidais com um ponto de intersecção (θ, ρ) no espaço de parâmetros, conforme exemplifica a figura 4.5. Monta-se uma tabela que relaciona θ e ρ para achar a intersecção dos parâmetros. Com a tabela preenchida, regiões da tabela fornecem os parâmetros de cada reta encontrada.

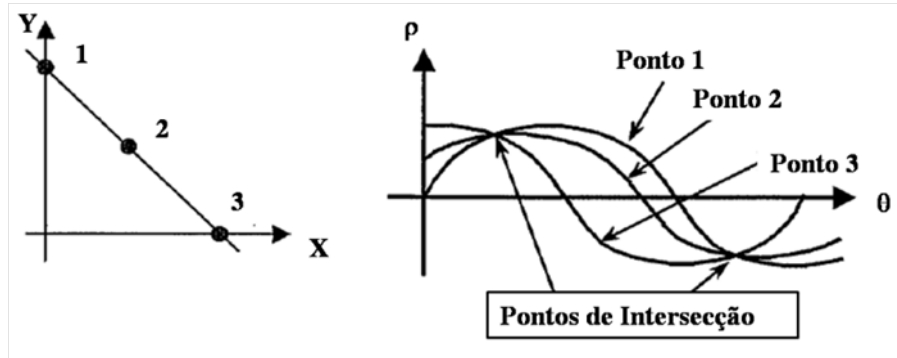


Figura 4.5: Pontos colineares no plano e retas senoidais no espaço de Hough

Especificamente, utilizou-se a transformada de Hough probabilística. Esta permite identificar segmentos de retas ao contrário da TH padrão. Estes segmentos são encontrados pelo ajuste de três parâmetros: i. comprimento mínimo de reta; ii. a distância mínima entre segmentos de retas para estas serem consideradas uma única reta e iii. o número mínimo de pixels que uma reta deve acumular para ser considerada uma reta encontrada. No uso desta transformada, a partir da imagem interna do duto, identificaram-se diversas retas. A fim de se identificar somente aquelas coincidentes com os cabos de energia, são feitos ajustes nos parâmetros da TH os quais permitem determinar o comprimento mínimo de reta e a distância mínima entre duas retas para estas não sejam consideradas dois segmentos distintos. Feito isto, tem-se como saída da aplicação da TH uma série de coordenadas no plano, correspondentes às extremidades das retas. A partir da imagem com bordas já identificadas, a figura 4.6 exibe a aplicação da TH em uma imagem com bordas já destacadas.

Seleção de retas e ângulo da reta mediana

Das retas identificadas no processamento das imagens do interior do duto, nem todas são úteis. Precisa-se, ainda, com o propósito de simplificar a quantidade de informações fornecidas ao sistema de navegação, classificar somente as retas coincidentes com as bordas dos cabos mais externos. Isto é feito selecionando o par de retas com coordenadas mais próximas as extremidades da imagem, conforme é exemplificado pela figura 4.7. Nesta, após a identificação de quatro retas, duas retas são selecionadas (coordenadas destacadas) e duas retas são descartadas (tracejadas).



Figura 4.6: (a) Imagem com bordas detectadas (b) Imagem com retas identificadas.

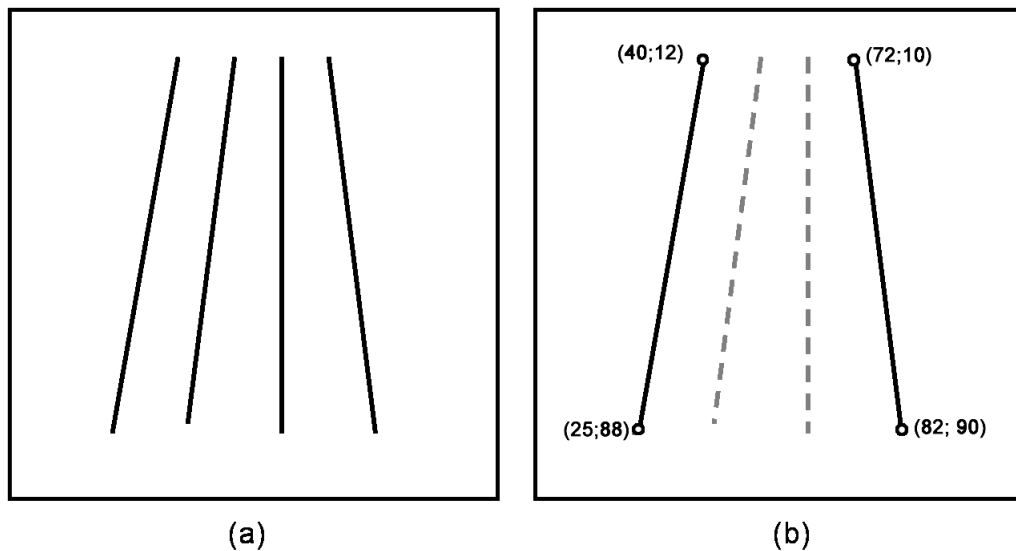


Figura 4.7: (a) Retas identificadas; (b) Retas selecionadas.

Com base no par de retas identificadas é obtida uma reta mediana a partir delas. A figura 4.8 apresenta o par de retas identificado (em preto) e a reta obtida pela média dos pontos (em cinza e tracejada).

Tendo as coordenadas da nova reta, é calculado um ângulo α com um vetor vertical. Este ângulo corresponde ao erro de posição do robô em relação aos cabos (α). A figura 4.9 auxilia a descobrir como é calculado o ângulo. Com base nas coordenadas apresentadas nesta imagem, o ângulo é calculado pela relação trigonométrica demonstrada em 4.2. Tal

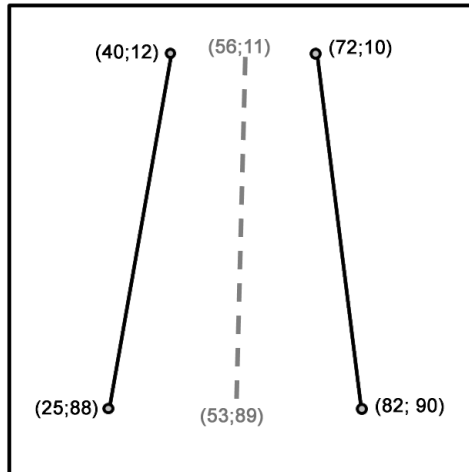


Figura 4.8: Reta mediana obtida a partir das duas retas coincidentes com as bordas do cabos.

informação é fundamental, pois ela está relacionada com as rotações que o robô deve realizar para ficar com sua base paralela aos cabos, servindo como entrada para as duas propostas de navegação.

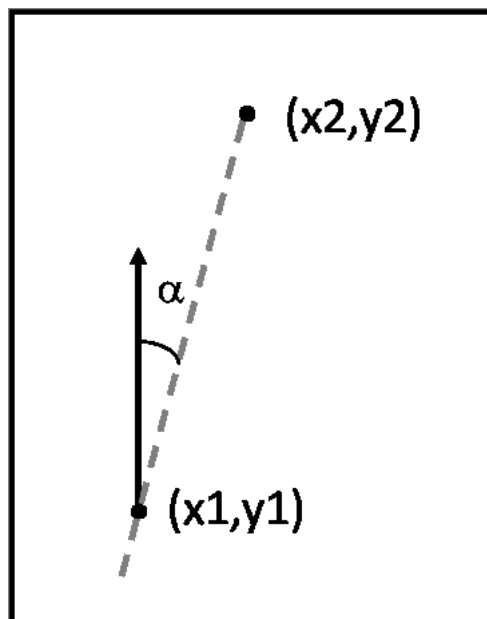


Figura 4.9: Ângulo entre mediana e vetor vertical.

$$\begin{aligned}\tan(\alpha) &= \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \\ \alpha &= \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right)\end{aligned}\tag{4.2}$$

4.2 Propostas de navegação

O segundo módulo da arquitetura de navegação para a plataforma TATUBOT visa propor estratégias de navegação que permitam uma navegação autônoma de linhas subterâneas de energia. Para tal, é necessário possuir informações do ambiente. Estas informações são obtidas através de técnicas de visão computacional, onde a partir de imagens identificaram-se retas e posteriormente um ângulo de erro de posição, como descrito na seção 4.1.2. Ainda é necessário conhecer as características físicas do robô e suas restrições de deslocamento no ambiente.

A seguir serão apresentadas duas propostas para navegação autônoma baseadas em visão, com o intuito permitir um monitoramento das linhas de energia.

4.2.1 Modelo Cinemático

Para se entender a navegação do robô no interior do duto, foi obtido um modelo cinemático do robô. O desenvolvimento do modelo cinemático baseia-se nos referenciais apresentados nas figuras 4.10 e 4.11. A figura 4.10 apresenta o robô no interior do duto e o sistema de coordenadas adotado. Já a figura 4.11 detalha a variação do ângulo de ataque da roda.

onde:

- (x,y,z) = posição do referencial fixo no robô;
- θ = ângulo de orientação da base do robô em relação ao eixo x;
- ϕ = ângulo de ataque da roda em relação a base do robô;
- R_D = raio do duto;
- R_R = raio da roda do robô;
- \vec{V}_R = velocidade linear da roda do robô.

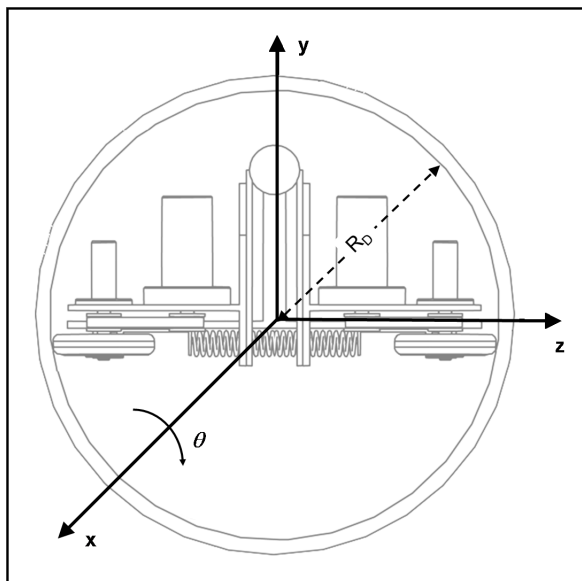


Figura 4.10: Sistemas de coordenadas.

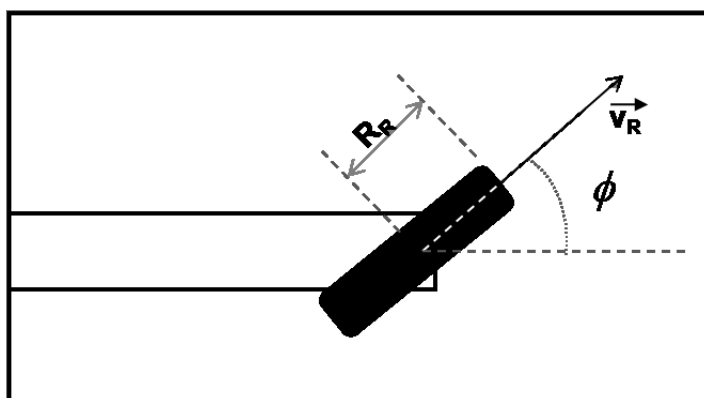


Figura 4.11: Ângulo de ataque da roda motriz.

De acordo com as restrições do projeto TATUBOT, o robô deve estar sempre paralelo aos cabos e alinhado com uma corda imaginária que cruza o centro do duto, como sugere a figura 4.12. Assim, os movimentos realizados pelo robô não devem desalinhá-lo com o centro do duto. Para estas restrições serem obedecidas, considerando o sistema de coordenadas apresentado na figura 4.10, só ocorrerão movimentos de translação no eixo x e rotação sobre o mesmo eixo. De forma que um movimento de rotação sempre implicará em um movimento de translação, pois os ângulos de ataque das rodas nunca se encontrarão em 90° . Movimentos nos outros eixos são desconsiderados.

Para garantir os movimentos descritos anteriormente as rodas motrizes sempre atuarão com o mesmo módulo de velocidade linear, e com sentido que proporcione o movimento

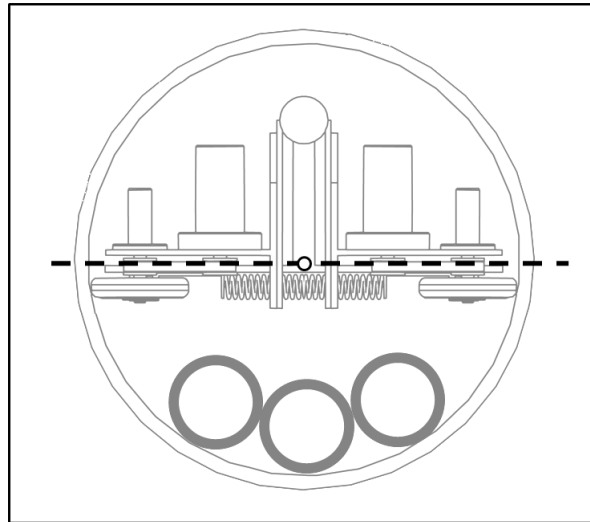


Figura 4.12: Corda, em tracejado, cruzando o centro do duto e alinhada com a base do robô.

de translação. Por sua vez, o ângulo de ataque de cada roda terá mesmo módulo, porém sentido oposto. Assim, defini-se:

$$\begin{aligned} |v_{Re}| &= |v_{Rd}| \\ \phi_{Re} &= -\phi_{Rd} \end{aligned}$$

onde:

- v_{Ri} = velocidade linear da roda. $i=\{\text{direita,esquerda}\}$;
- ϕ_{Rj} = ângulo de ataque da roda em relação a base do robô. $j=\{\text{direita,esquerda}\}$.

Considerando v a velocidade no sentido do deslocamento, está é obtida a partir de:

$$v = \frac{v_{Rd} + v_{Re}}{2} \quad (4.3)$$

A velocidade de translação (v_x) do robô no eixo x é dada por:

$$v_x = v \cdot \cos(\phi) \quad (4.4)$$

A velocidade angular de rotação sobre o eixo x pode ser obtida a partir da componente vertical da velocidade de deslocamento e do raio do duto:

$$\dot{\theta} = v \cdot \sin(\phi) R_D \quad (4.5)$$

Discretizando as equações 4.4 e 4.5, tem-se:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v \cdot \cos(\phi) \quad (4.6)$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = v \cdot \sin(\phi) R_D \quad (4.7)$$

Isolando v na equação 4.6, esta fica na forma como em 4.8.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t \cdot \cos(\phi)} \quad (4.8)$$

Substituindo a equação 4.8 em 4.7, encontra-se a equação 4.9. Está equação é equivalente a equação hélice no espaço.

$$\tan(\phi) = \frac{\Delta \theta}{\Delta x} \cdot R_D \quad (4.9)$$

4.2.2 Navegação autônoma utilizando redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) foram escolhidas como uma primeira proposta para navegação pela capacidade, frente aos diversos cenários, mapear o controle de um operador e a habilidade de lidar com dados ruidosos, imprecisos e incompletos [Haykin, 1999].

Nesta primeira proposta utilizou-se uma rede neural multicamada com propagação para frente e função de ativação sigmoideal e linear para as camadas escondida e de saída, respectivamente. Os ajustes de seus pesos são feitos através do algoritmo de aprendizagem por retropropagação do erro. Ver [Haykin, 1999] e [Freeman and Skapura, 1991] para maiores detalhes sobre RNA.

Em uma RNA um parâmetro importante é o número de neurônios em cada camada. Por isso, deve-se definir a dimensão da entrada da rede e quais saídas ela deve produzir. No caso do monitoramento de linhas subterrâneas, a partir das coordenadas de retas que caracterizam uma configuração de cabos, a rede deve produzir um comportamento para lidar com tal configuração. De acordo com as características apresentada na seção 3.2.1 o robô TAUTBOT pode realizar três tipos de movimentos durante a inspeção: i.

transladar com rotação horária; ii. transladar com rotação anti-horária; iii. somente transladar. Estes movimentos são definidos de acordo com a disposição dos cabos no interior do duto. A figura 4.13 ilustra situações onde cada tipo de movimento é indicado.

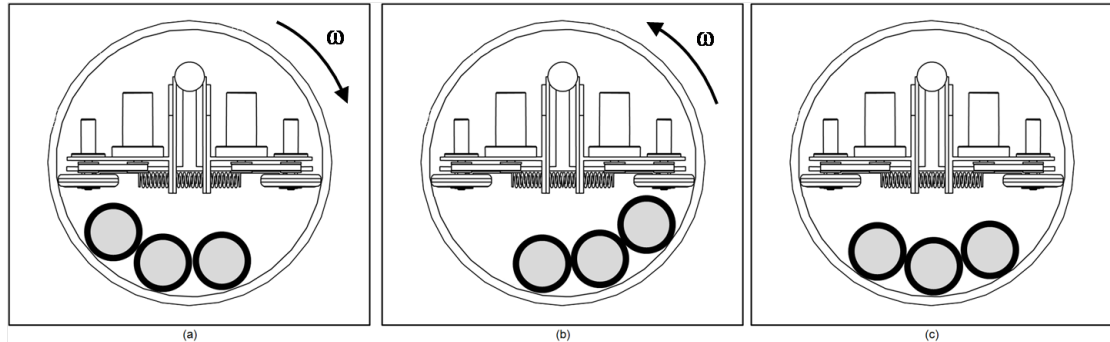


Figura 4.13: (a) translação com rotação horária; (b) translação com rotação anti-horária; (c) somente translação.

Visto que a disposição dos cabos é representada pelo ângulo encontrado a partir do ângulo obtido a de uma reta mediana, a arquitetura neural utilizada foi definida com três camadas. A camada de entrada possui dez neurônios, representando uma janela contendo o ângulo de erro de posição atual (α) e mais nove destes ângulos anteriormente obtidos. Cada novo valor de entrada é amostrado a cada 200 milissegundos, sendo estes valores números reais. Para representar os movimentos do robô, foi definido um neurônio como saída da rede neural, onde este indicará o ângulo de ataque das rodas (ϕ) para corrigir o erro de posição. O ângulo de saída, a fim de evitar saturações, tem o módulo de seu valor ajustado para 15° , sempre que ultrapassar este mesmo valor. Para a camada intermediária, serão testados diferentes números de neurônios para definir qual configuração fornece um melhor resultado à navegação. Em vistas a estas configurações da rede neural, a tabela 4.1 exibe exemplos de entradas apresentadas e de saídas utilizada para o treinamento da rede. Os valores dos ângulos utilizados no treinamento estão em radianos.

Tabela 4.1: Exemplos de entrada e saída utilizados no treinamento da RNA.

α	α_{-1}	α_{-2}	α_{-3}	α_{-4}	α_{-5}	α_{-6}	α_{-7}	α_{-8}	α_{-9}	ϕ
-0.19033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.22364
-0.13625	-0.13971	-0.13971	-0.1419	-0.1419	-0.14403	-0.14415	-0.14444	-0.14513	-0.14708	-0.2618
-0.084012	-0.084012	-0.084703	-0.084902	-0.08581	-0.08581	-0.08581	-0.086323	-0.086738	-0.087157	-0.23893
0.028162	0.028162	0.02739	0.02739	0.02666	0.02666	0.02666	0.026542	0.025856	0.025418	0.11993
0.18241	0.17367	0.17286	0.16515	0.16374	0.16293	0.1622	0.1622	0.16099	0.15809	0.19897

A arquitetura neural ficou definida conforme a figura 4.14, onde a camada escondida terá seu número de neurônios definido após testes. As funções de ativação para a camada de saída e escondida são linear e sigmoideal, respectivamente.

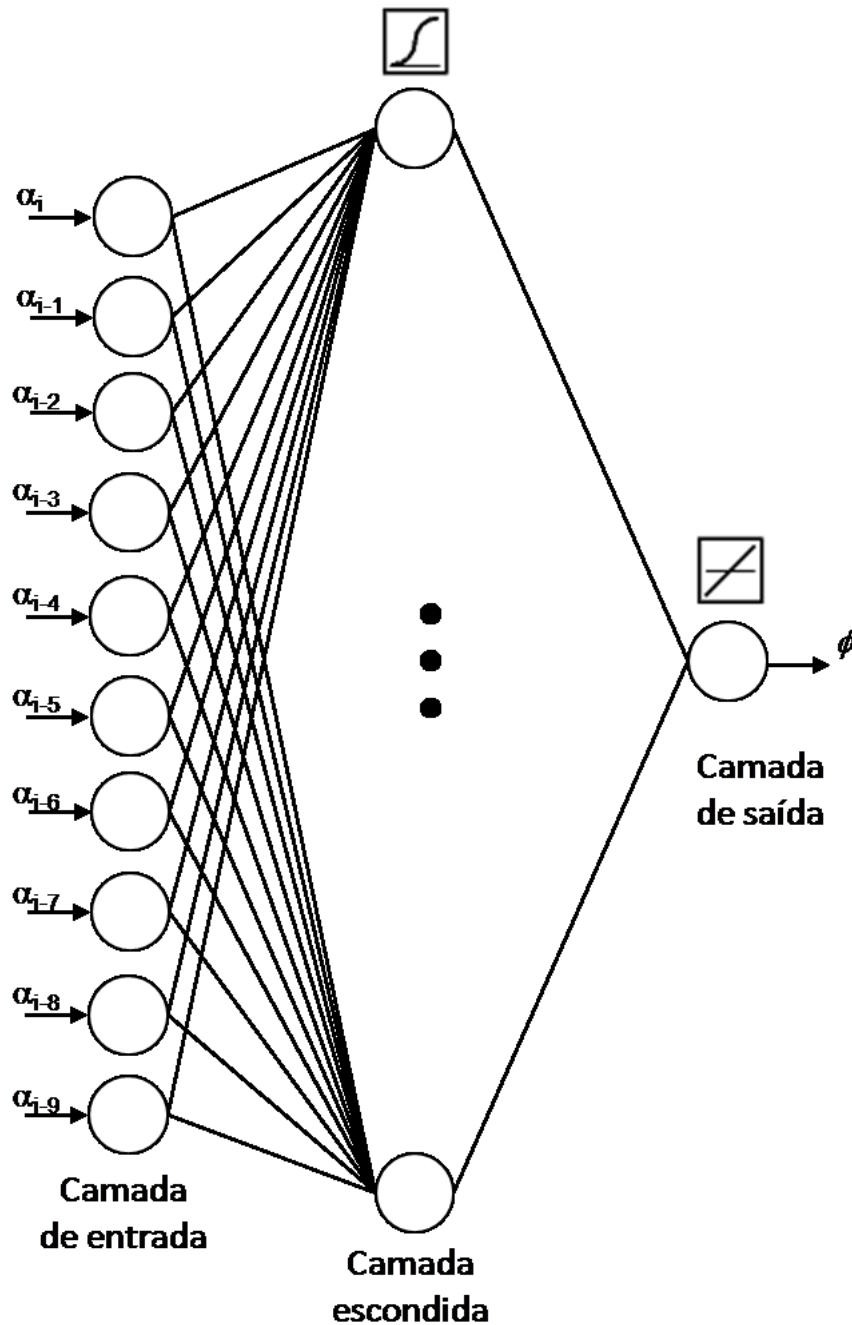


Figura 4.14: Arquitetura Neural

O aprendizado da RNA será supervisionado, ou seja, para cada padrão de entrada será indicado qual valor deseja-se para a saída da rede. O supervisor em questão será

um operador, onde a partir de imagens capturadas pela câmera embarcada do robô, ele indicará qual ângulo de ataque das rodas o robô deve produzir através de uma interface para treinamento. Os valores de entrada em conjunto com os de saída formarão um conjunto de treinamento da rede o qual definirá os pesos das camadas da RNA. Por não se conhecer o ambiente de navegação, optou-se por um treinamento *off-line* para ajustes dos pesos. O erro de treinamento será definido através da expressão do erro médio quadrático.

4.2.3 Navegação autônoma utilizando um controle PID

Nesse trabalho será utilizada a estratégia de controle PID para o sistema em malha-fechada, sendo a informação de posição realimentada por meio de visão computacional, a qual obtém o ângulo atual entre o robô e a mediana das retas que representam a disposição dos cabos no interior do duto.

Definindo que a velocidade de deslocamento (v) e o raio do duto (R_D) são constantes, os movimentos de rotação estarão somente em função do ângulo de ataque das rodas (ϕ). Considerando, também, o valor máximo do módulo do ângulo de ataque das rodas ser de 15° , nos dois sentidos, pode se fazer a seguinte simplificação:

$$\sin(\phi) \approx \phi \quad (4.10)$$

e aplicando na equação 4.7, obtém-se a equação na forma linear:

$$\phi = \frac{\Delta\theta}{\Delta t \cdot v \cdot R_D} \quad (4.11)$$

Lembrando que o ângulo de ataque da roda varia em mesmo módulo e sentido oposto, o sinal de atuação será o mesmo para alterá-lo. Desta forma, a variável a ser controlada é o ângulo de ataque das rodas ϕ , influenciada pelo erro de posição do robô em relação aos cabos (α).

A figura 4.15 apresenta o diagrama de blocos para o sistema controlado. O bloco Controlador é definido pela lei de controle PID discretizada, representada pela equação 4.12. A variável de referência (VR) sempre possuirá valor zero, então o erro do sistema fica da forma indicada em 4.13. Por sua vez, a variável de controle ϕ será atualizada

segundo a equação 4.14, gerando uma ação no processo.

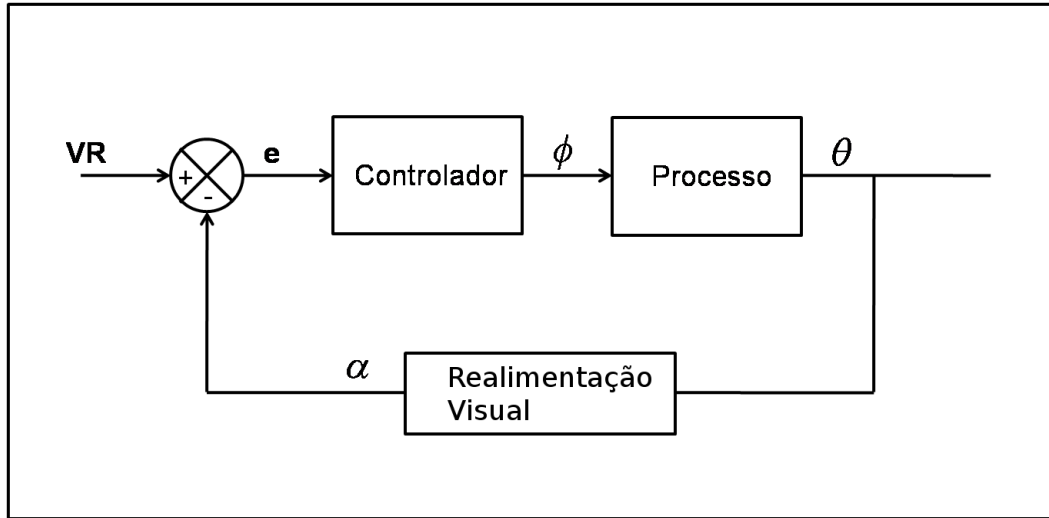


Figura 4.15: Diagrama de bloco para o controle do sistema de navegação.

$$u(t_k) = Kp \cdot e(t_k) + Ki \cdot \sum_{i=1}^k e(t_i) + Kd \cdot (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad (4.12)$$

$$e = VR - \alpha$$

$$e = -\alpha \quad (4.13)$$

$$\phi(t_k) = Kp \cdot e(t_k) + Ki \cdot \sum_{i=1}^k e(t_i) + Kd \cdot (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad (4.14)$$

O funcionamento do algoritmo de controle aplicado a navegação é detalhado na figura 4.16. No algoritmo após inicialização das variáveis e leitura do erro, é definido um novo valor para o ângulo de ataque das rodas. Este valor nunca ultrapassará o valor de 15° . Após um instante de tempo, um novo valor para o ângulo de ataque é calculado.

No próximo capítulo serão apresentados resultados referentes as alterações feitas no projeto TATUBOT, a extração de características do ambiente e as propostas de navegação abordadas neste capítulo.

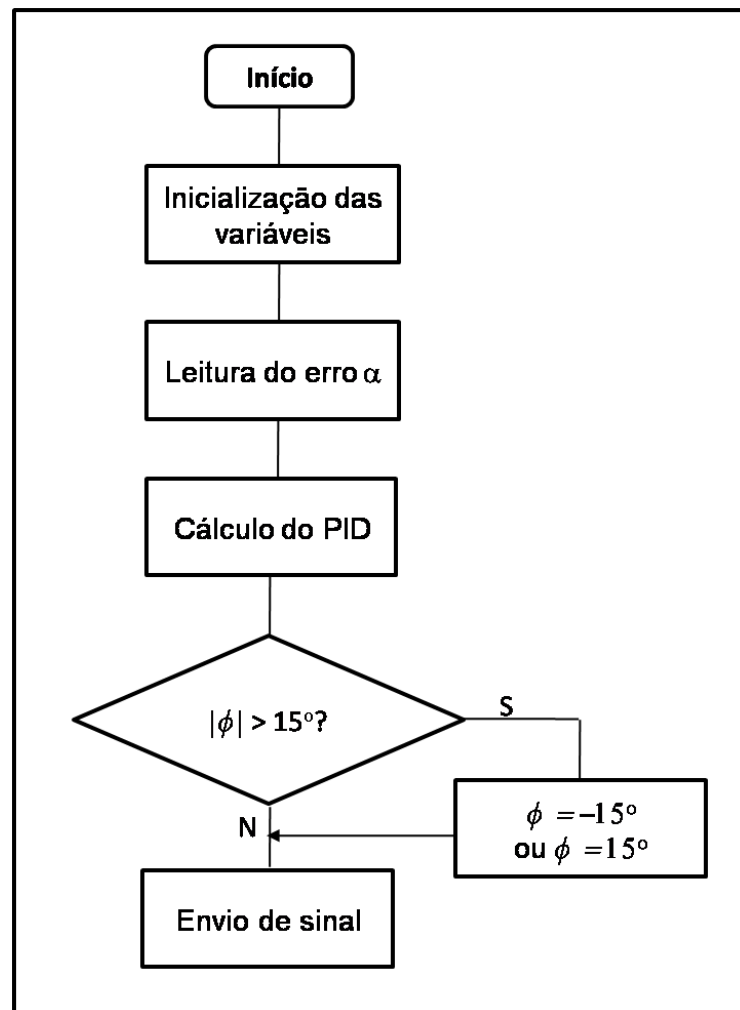


Figura 4.16: Fluxograma representando o algoritmo de controle.

Capítulo 5

Experimentos e Resultados

5.1 Simulador

O novo simulador permitiu criar cenários variados do ambiente de inspeção assim como representar o movimento do robô e a captura da câmera embarcada. Uma visão geral do simulador é apresentada pela figura 5.1, onde se pode ver o ambiente de o robô simulado. Quanto aos cenários criados, a figura 5.2 apresenta os cabos disposto no interior do duto em linha reta. Um caso pouco provável de ocorrer, cabos em uma disposição helicoidal, são representados na figura 5.3. Outro caso simulado, visto na figura 5.4, tem-se cabos com uma oscilação em sua disposição, tendendo de forma helicoidal nos dois sentidos de rotação. As figuras anteriores servem também como exemplo da imagem capturada pela câmera simulada, sendo usadas pelo sistema de navegação.

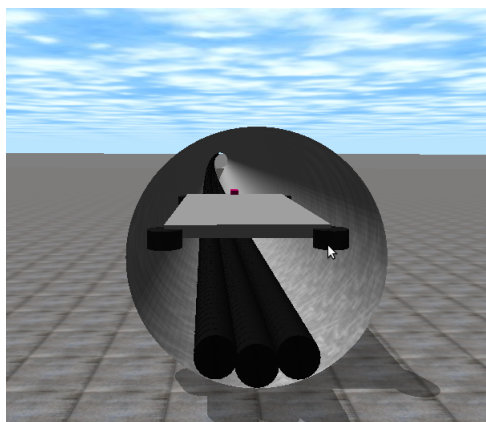


Figura 5.1: Visão externa do simulador TATUBOT.

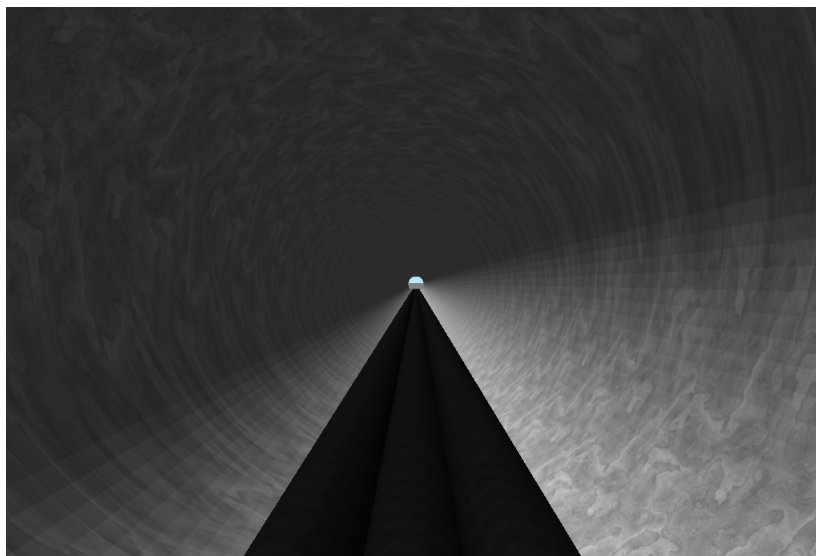


Figura 5.2: Cabos retos.

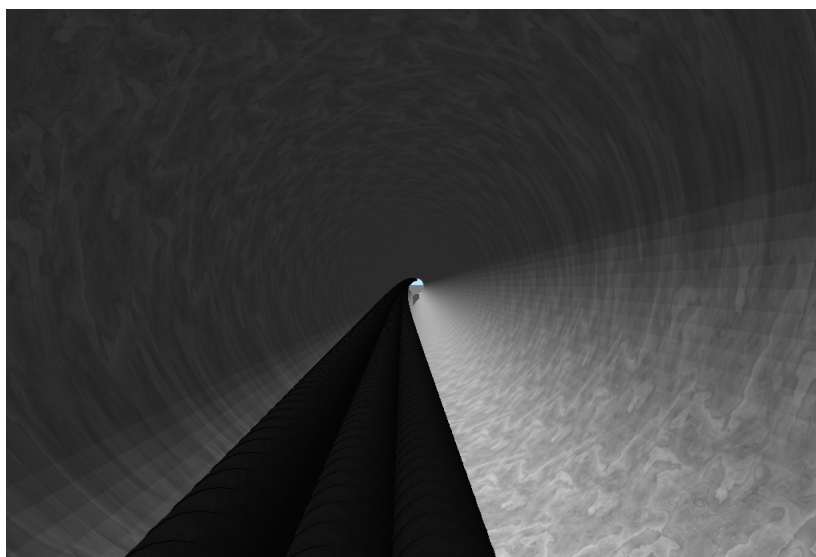


Figura 5.3: Cabos com disposição helicoidal.

5.2 Extração de informação do ambiente

As propostas de navegação são baseadas em informações extraídas de imagens capturadas. Nestas imagens, é necessário identificar retas que servirão de guia à navegação.

A identificação de retas pelo sistema de visão passa pelas etapas de extração de bordas e aplicação da transformada de Hough (TH). A robustez na identificação de retas foi testada para uma imagem com iluminação uniforme, iluminação forte e iluminação variável. Para cada teste, variaram-se os valores dos parâmetros de tamanho mínimo de segmento de

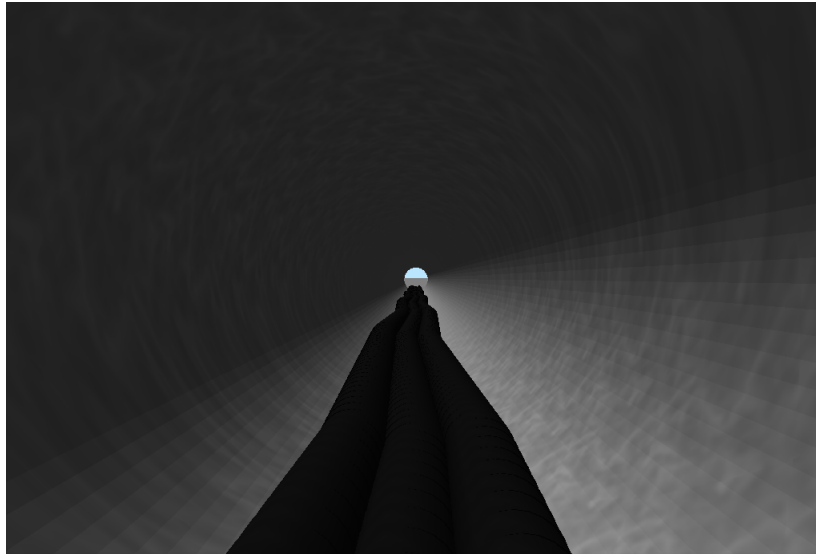


Figura 5.4: Cabos com oscilação na sua disposição.

reta, distância mínima entre dois segmentos de reta para serem considerados um segmento único (*gap*) e mínimo número de pontos que um segmento de reta deve possuir (limiar). A tabela 5.1 apresenta o valores atribuídos a cada parâmetro (pixels) e o número de retas encontradas, para cada tipo de configuração de parâmetro.

Tabela 5.1: *Configurações do parâmetros da TH.*

Parâmetros (pixels)			Nº de Retas encontradas		
Comp. Mínimo	<i>Gap</i>	Limiar	Ilum. Uniforme	Ilum. Forte	Ilum. Variável
10	10	10	34	35	20
10	10	100	2	1	3
40	40	40	4	4	6
10	40	40	4	4	6
10	40	10	36	28	22
20	10	40	4	4	6
20	40	20	14	15	11

Os casos onde foram encontrados mais e menos retas são apresentados pelas figuras 5.5, 5.6 e 5.7, onde tem-se iluminação uniforme, iluminação forte e iluminação variável, respectivamente. As imagens demonstram bem a tolerância do sistema à diferença de padrões de iluminação, onde através de ajustes conseguiu-se encontrar somente as retas

coincidentes com as boras dos cabos.

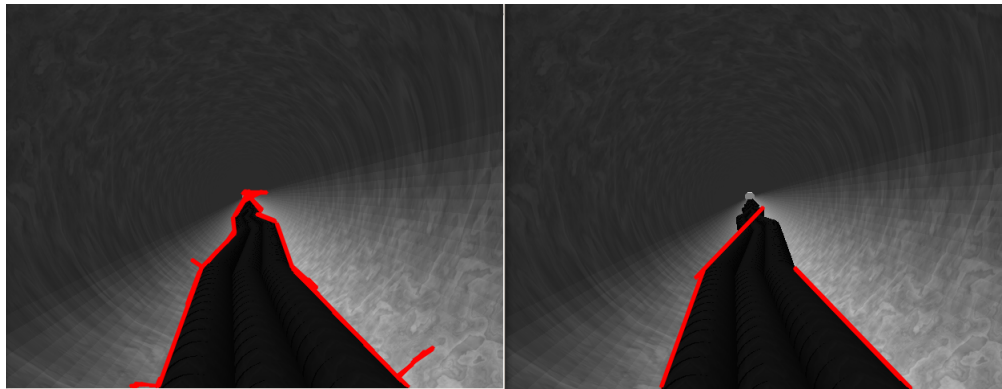


Figura 5.5: Iluminação uniforme:(a) Muitas retas encontradas; (b) Retas de interesse encontradas.

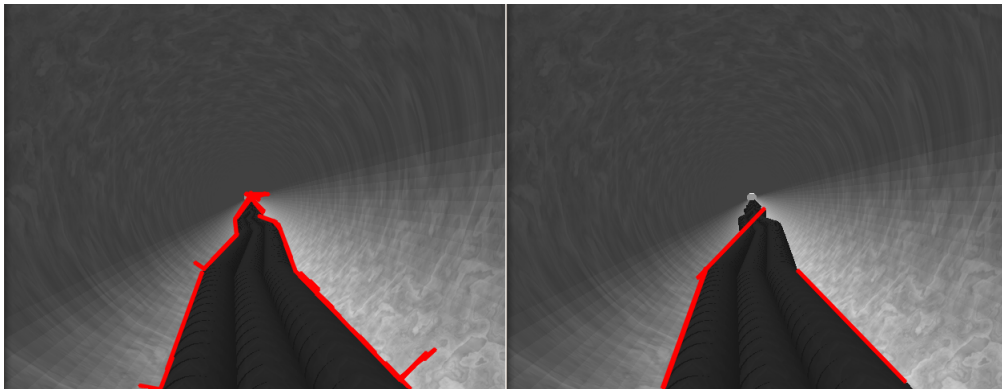


Figura 5.6: Iluminação forte:(a) Muitas retas encontradas; (b) Retas de interesse encontradas.

Existindo um conjunto de retas identificadas, é preciso selecionar as retas coincidentes somente com a borda exterior dos cabos. Desta forma, conforme descrito na seção 4.1.2, é feito em código a seleção das retas. O resultado desta seleção é exibido na figura 5.8.

A partir do par de retas selecionado é obtido o ângulo entre a reta mediana do par e um vetor vertical. Na figura 5.9 é mostrado a obtenção do ângulo. A reta em azul é a mediana entre as retas vermelhas e a reta em verde corresponde ao vetor vertical. Como já visto, este ângulo servirá para como entrada para os dois sistemas de navegação propostos.

Todos os algoritmos desenvolvidos para processamento de imagens foram escritos na

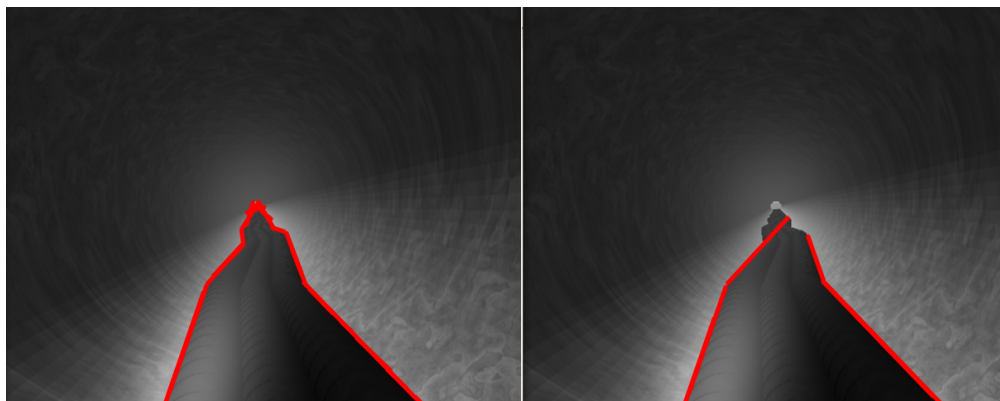


Figura 5.7: Iluminação variável:(a) Muitas retas encontradas; (b) Retas de interesse encontradas.

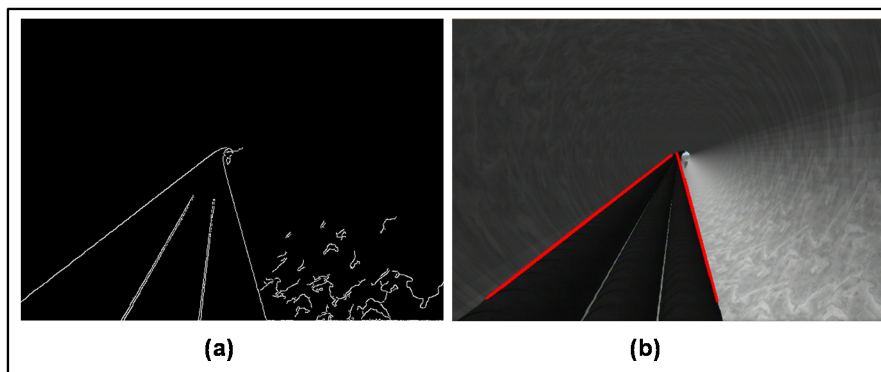


Figura 5.8: (a) imagem com bordas destacadas; (b) retas selecionadas.

linguagem C/C++ com o auxílio da biblioteca OpenCV¹.

5.3 Proposta utilizando redes neurais artificiais

Na proposta utilizando RNA, primeiramente, é importante definir o número de neurônios da camada escondida da rede. Para isto, através da interface de treinamento, criaram-se 200 padrões para serem apresentados à rede neural e realizaram-se dez treinamentos, com pesos gerados de forma aleatória, para cada uma das três configurações diferentes de camada escondida. Após, testes foram realizados utilizando 50 casos de classe para avaliar a performance das redes.

¹OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Originalmente, desenvolvida pela Intel, em 2000, é uma biblioteca multiplataforma, totalmente livre ao uso acadêmico e comercial, para o desenvolvimento de aplicativos na área de Visão Computacional [Wikipedia, 2009]

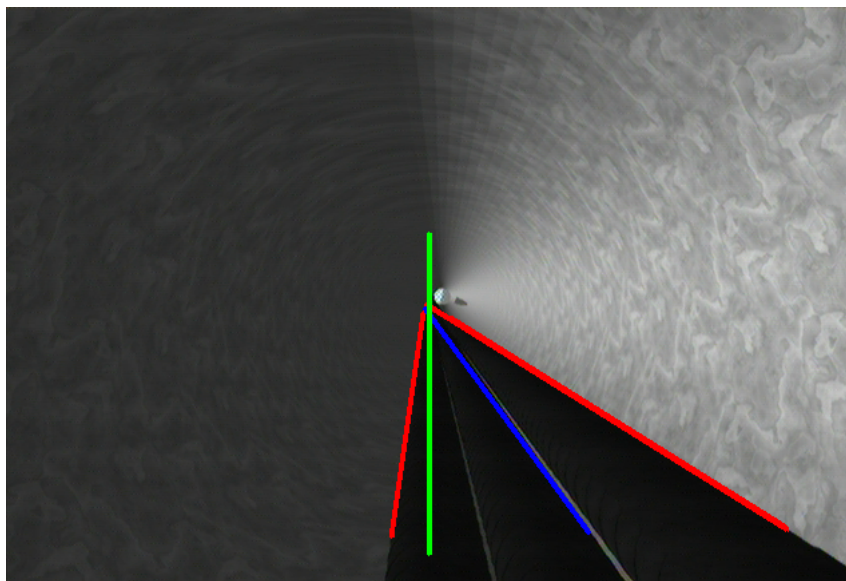


Figura 5.9: Em azul, reta calculada a partir da média das coordenadas do pontos das retas em vermelho.

Os resultados, para todas as configurações, foram considerados aceitáveis. Em treinamentos para cada configuração, os menores valores encontrados de erro médio absoluto foram de 0.0466, 0.0473 e 0.0460, para 16, 24 e 32 neurônios para a camada escondida. Por ter apresentar o menor erro, a configuração com 32 neurônios foi escolhida para a arquitetura da rede neural.

Após a definição do melhor número de neurônios para a camada escondida, realizaram-se os testes de navegação utilizando RNA. Por não se possuir um duto e cabos para criar um ambiente com um comprimento onde se pudessem realizar testes consistentes de navegação, foram realizados testes apenas no ambiente simulado. Para estes testes criaram-se cenários virtuais para um duto com 200 metros comprimento. No primeiro cenário, os cabos estão numa disposição sempre reta ao longo do duto, conforme a figura 5.2, e o robô começa a navegação com o sistema encontrando um ângulo de 15° da reta mediana obtida a partir dos cabos. A figura 5.10 apresenta gráficos do erro de posição do robô em relação aos cabos e da variação do ângulo de ataque das rodas, ambos em relação ao tempo.

No segundo experimento é testada a navegação para o cenário com cabos em disposição helicoidal, retratado na figura 5.3, com o robô partindo com a o sistema de visão retornando um erro de 32° em relação aos cabos. A figura 5.11 é exibido os gráficos para

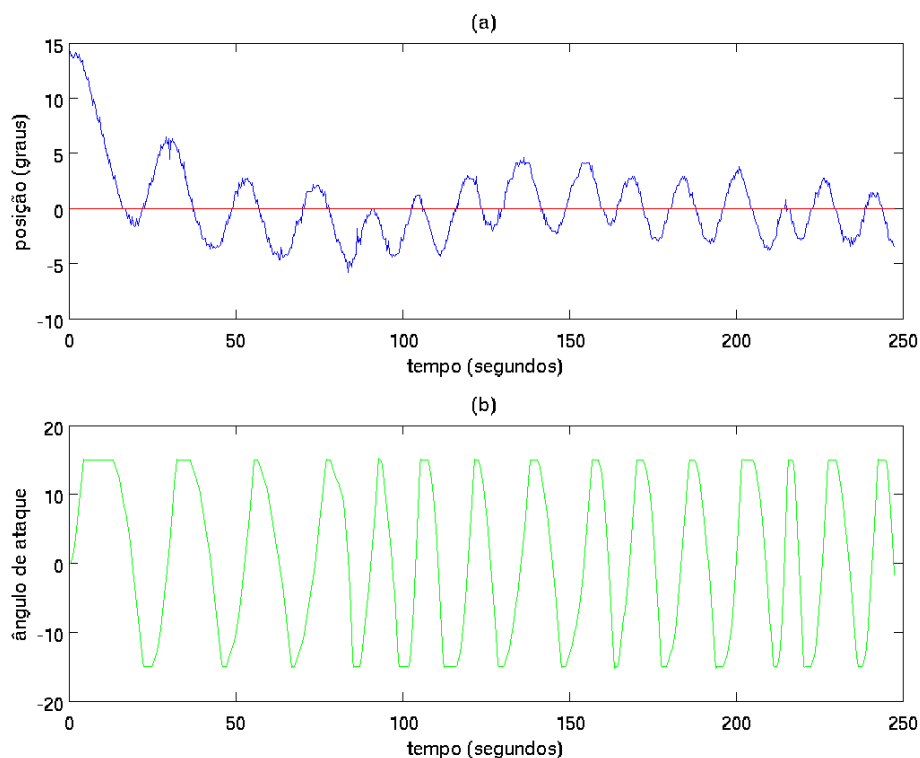


Figura 5.10: RNA - Cabos em disposição reta:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.

está conformação de cabos.

O ultimo cenário testado com a navegação utilizando RNA foi o que os cabos possuem uma disposição helicoidal variando o sentido, da mesma forma que a figura 5.4. Neste cenário o robô iniciou a navegação com o sistema de visão indicando uma defasagem de 4° em relação aos cabos. Os gráficos do erro de posição em relação aos cabos e do ângulo de ataque da roda, é exibido na figura 5.12. Neste caso, o erro de posição é freqüentemente alterado de forma brusca devido à conformação dos cabos.

Uma série de imagens representando a navegação do robô podem ser visto na figura 5.13, onde percebe-se visualmente a navegação do robô ao longo do duto.

5.4 Proposta utilizando controle PID

Os cenários testados para navegação utilizando controle PID foram os mesmo dos testes com a navegação utilizando RNA. Os erros apontados pelo sistema de visão com que o

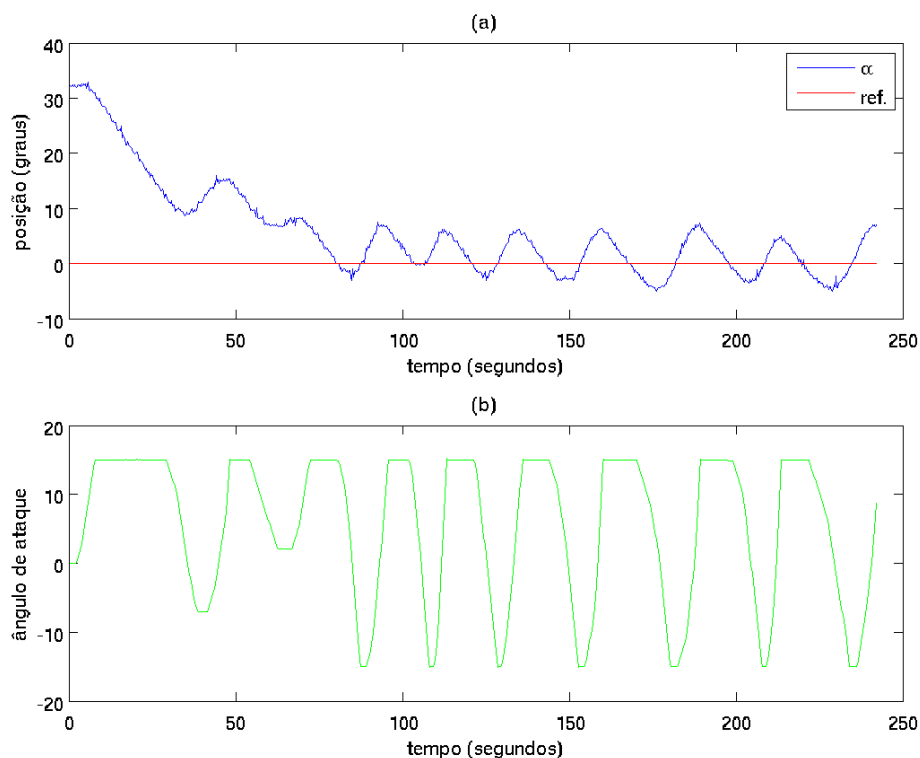


Figura 5.11: RNA - Cabos em disposição helicoidal:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.

robô iniciou as navegações foram de 15° , 18° e -7° , para os casos de dutos em disposições reto, helicoidal e helicoidal variando o sentido, respectivamente. Os gráficos apresentados pela figura 5.14 para o primeiro caso, cabos retos, mostram que o robô conseguiu reduzir o erro de posição a praticamente zero. As oscilações presentes quando a referência é alcançada se devem em boa parte a aferição do erro por visão.

Gráficos para o segundo caso de testes, cabos em disposição helicoidal, são apresentados na figura 5.15. Neste caso, depois da referência ser alcançada, pode-se observar pequenas oscilações aparecendo com uma determinada frequência. Tais oscilações ocorrem devido à configuração helicoidal do cabo e à resolução mínima de erro que se pode identificar através da visão.

O caso onde a disposição helicoidal muda de sentido frequentemente, tem seus gráficos de navegação demonstrados na figura 5.16. Neste caso, assim como aconteceu com a navegação utilizando RNA, o erro obtido pelo sistema de visão é bruscamente alterado, devido à variação frequente da conformação dos cabos.

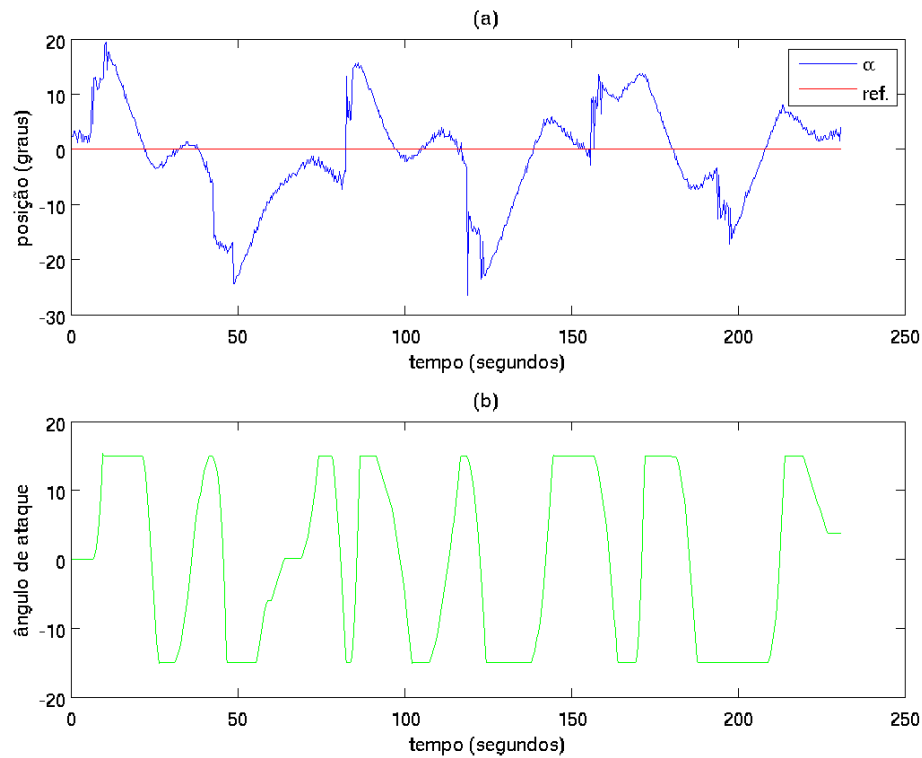


Figura 5.12: RNA - Cabos em disposição helicoidal variável:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.

Para todos os casos testados, o controlador PID utilizou o mesmo valor para seus ganhos. Os ganhos proporcional, integral e derivativo tiveram seus valores ajustados em 1,7, 1,8 e 0,1, respectivamente. Foi, ainda, definida uma janela de integração com 10 elementos. Tais valores foram obtidos a partir de testes práticos até alcançar valores que proporcionassem uma navegação aceitável.

5.5 Comparativo entre redes neurais artificiais e o modelo analítico

Os casos criados para os testes de navegação foram atendidos pela proposta utilizando RNA. Esta abordagem mostra-se uma alternativa para implementar um sistema de navegação autônoma para o projeto TATUBOT, visto que a base do robô manteve-se praticamente paralela aos cabos de energia durante todo o deslocamento no interior do duto.

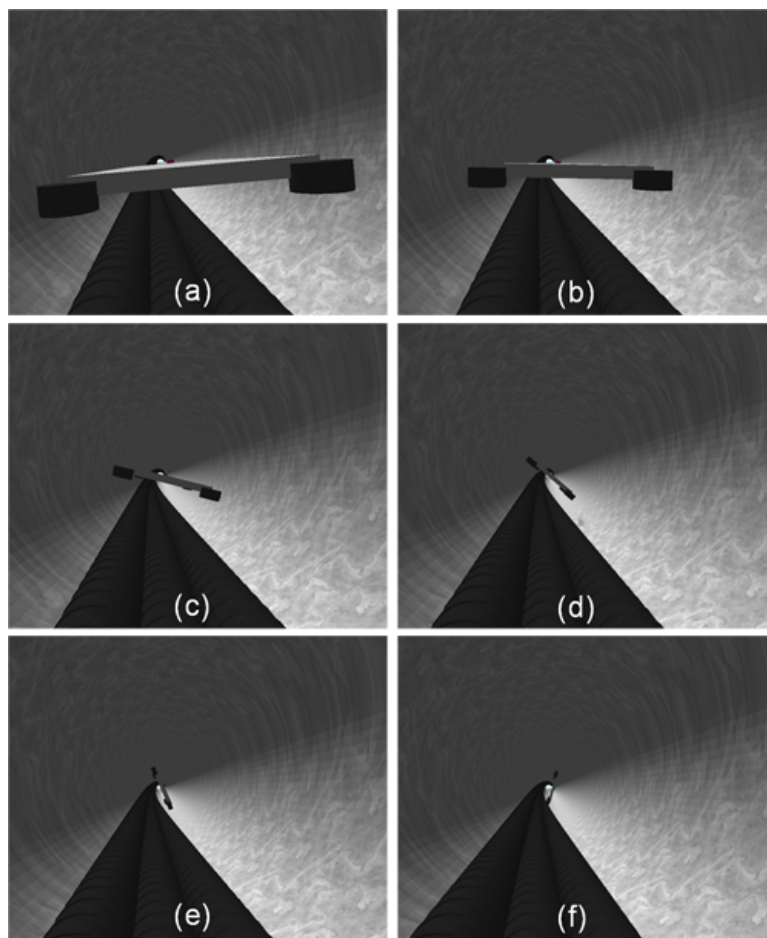


Figura 5.13: Robô deslocando-se a partir da origem. (a) 1,1 metros; (b) 1,65 metros; (c) 4,7 metros; (d) 5,8 metros; (e) 7,3 metros, (f) 9,1 metros,

Os erros apresentados pelos gráficos são aceitáveis e provavelmente similares aos erros gerados quando o robô é guiado por um operador humano.

A navegação utilizando o controle PID fornece outra boa proposta autônoma para o projeto. Quando utilizado um controle PID, o robô apresentou uma navegação que conseguiu manter o erro de posição praticamente nulo.

Na comparação entre as propostas de navegação, ambas as propostas demonstram atender a necessidades iniciais de navegação. A proposta utilizando um controle PID apresentou vantagens por dispensar um treinamento *off-line* e pela navegação com menor erro de posição.

Os códigos fonte desenvolvidos para o simulador, a extração de características do ambiente e para as duas propostas de navegação encontram-se em uma mídia de CD-

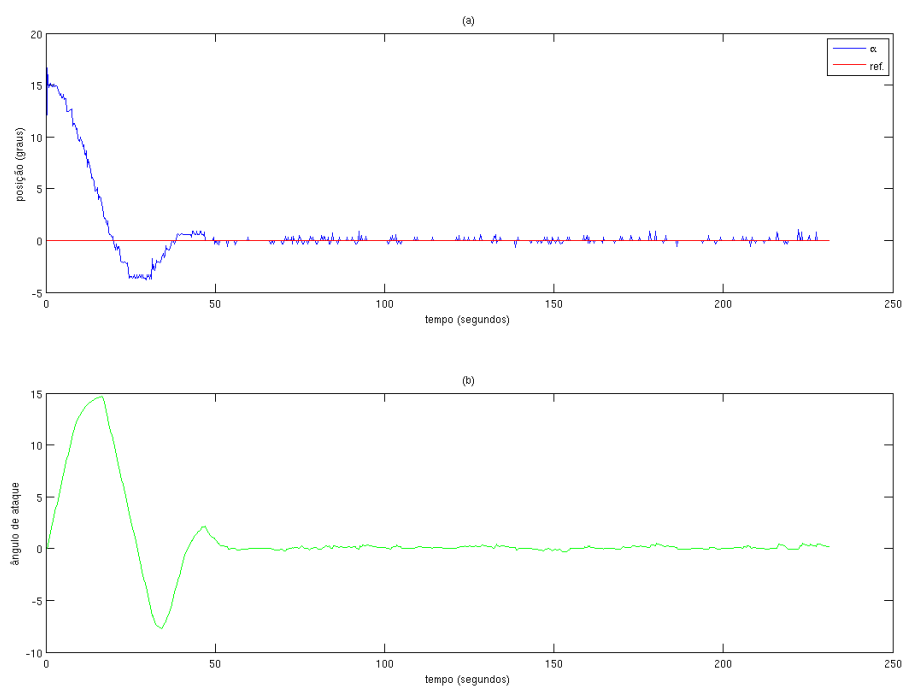


Figura 5.14: Controle PID - Cabos em disposição reta:(a)Erro de posição; (b)Variação do ângulo de ataque das rodas.

ROM em anexo ao volume.

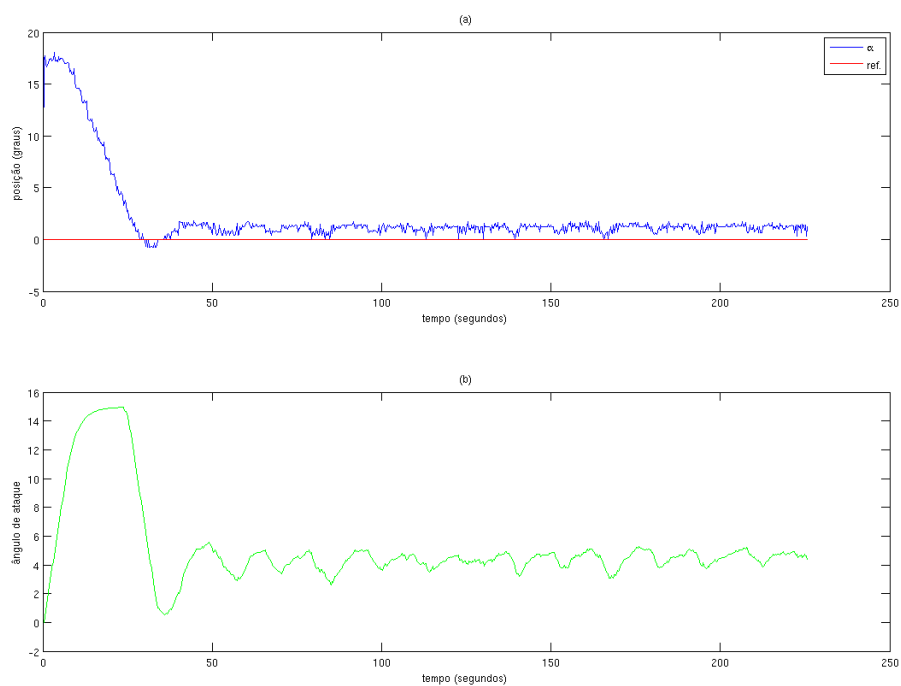


Figura 5.15: Controle PID - Cabos em disposição helicoidal:(a)Erro de posição;
(b)Variação do ângulo de ataque das rodas.

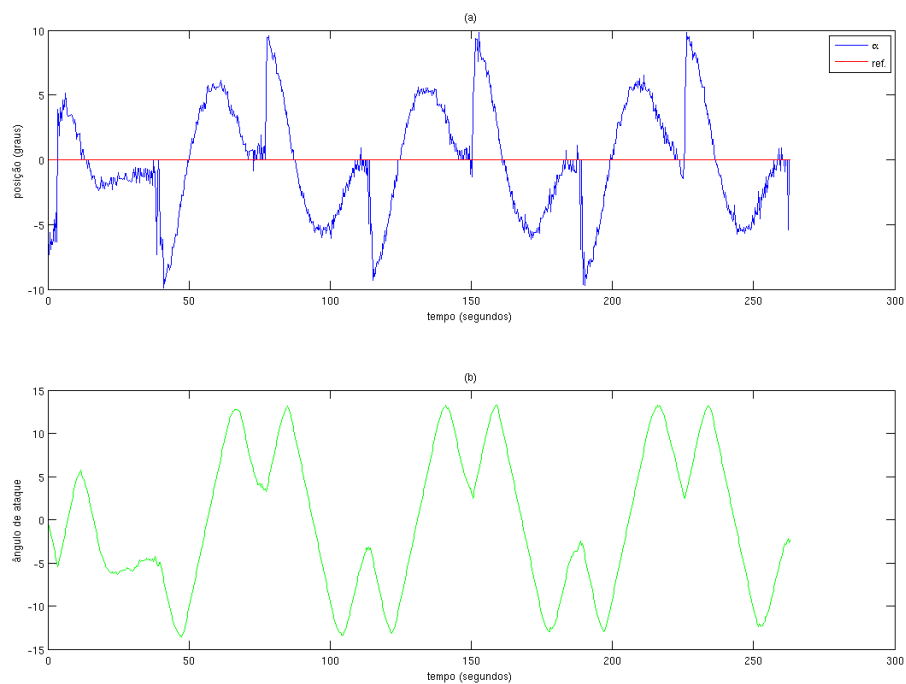


Figura 5.16: Controle PID - Cabos em disposição helicoidal variável:(a)Erro de posição;
(b)Variação do ângulo de ataque das rodas.

Capítulo 6

Conclusão

Soluções para garantir o funcionamento de um sistema que preze pela qualidade do serviço prestado são de fundamental importância nos dias atuais. Tendo isto em vista, soluções autônomas para inspeção e monitoramento de serviços estão sendo cada vez mais requeridas, de forma a agregar valor a estes serviços.

Nos cenários onde se podem aplicar soluções autônomas, há grandes desafios para a navegação, uma vez que estes podem ser inóspitos, confinados e imprevisíveis.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma arquitetura de navegação autônoma para a plataforma TATUBOT. Esta plataforma foi projetada para atuar no interior de dutos os quais apresentam cabos de distribuição de energia. A arquitetura de navegação desenvolvida deve permitir a inspeção de tais cabos, provendo o deslocamento livre de obstáculos do veículo móvel dotado de sensores. A arquitetura proposta possui duas etapas principais: a extração de características do ambiente e a estratégia de navegação. Com base nos sensores existentes no robô TATUBOT, optou-se por usar a visão para aquisição de informações para auxiliar a navegação. Já para a estratégia de navegação autônoma foram propostas duas soluções, uma utilizando redes neurais artificiais e outra utilizando um controle proporcional, integral e derivativo.

A extração de características do ambiente fornece retas a serem utilizadas pelo sistema de navegação, a partir da aplicação do filtro de borda Canny e da transformada de Hough. Mesmo as retas não coincidindo perfeitamente com as extremidades dos cabos, apresentando um pequeno erro, a visão computacional mostrou-se confiável para identificar as conformações dos cabos no interior do duto.

Por sua vez, as propostas de navegação desenvolvidas atenderam as necessidades da plataforma. Para validar as propostas, utilizou-se um simulador que permitiu criar diversos cenários para testes. A proposta utilizando RNA, após definição de qual melhor configuração para a camada escondida da rede, conseguiu manter o robô paralelo aos cabos durante os testes realizados. Mesmo apresentando alguns erros de posição, estes são aceitáveis e consideram-se similares aos de um operador humano. Já a segunda proposta, utilizando o modelo cinemático do robô com um controle PID, também atendeu as necessidades de navegação. Esta proposta destaca-se por apresentar uma navegação com erro de posição praticamente nulo, após alcançar a referência. Outra vantagem desta proposta é a não necessidade de realizar um treinamento *off-line*, o que é feito na proposta utilizando RNA. Embora os testes tenham sido realizados em ambiente simulado, a arquitetura de navegação proposta provavelmente terá um desempenho semelhante quando aplicada em um ambiente real.

Comparando-se com os trabalhos de inspeção apresentados no capítulo 2, embora estes serviram como ponto de partida para desenvolvimento, a solução adotada aqui diferenciou-se por realizar a inspeção no interior do duto de energia e, por consequência, ter que adotar um sistema e navegação próprio para este ambiente.

Este trabalho, cujo foco foi a navegação, culmina no fechamento de uma das etapas do projeto TATUBOT, dando continuidade a trabalhos anteriores responsáveis pelas etapas de projeto mecânicos, eletrônica embarcada e *software* ([da Silva Diaz Estrada, 2008], [Souto, 2009] e [de Almeida, 2009]). A finalização do projeto será dada após teste em ambiente real, permitindo que a plataforma TATUBOT realize um monitoramento de linhas subterrâneas de distribuição de energia.

6.1 Trabalhos Futuros

Sabendo que podem existir casos em que a disposição dos cabos, no interior do duto, impossibilite a passagem do robô, por estes estarem cruzados ou muito afastados entre si, uma primeira proposta de trabalho futuro seria a identificação destes pontos intranponíveis e uma medida de ação para o robô lidar com tal situação.

Outro trabalho que pode ser agregado é a fusão sensorial de outras informações para

auxiliar a navegação, tais como sensor inercial, sensor ultra-sônico, odômetros e outras câmeras. Isto ajudará a ter mais informações sobre o ambiente e o próprio robô durante a navegação.

Pretende-se ainda aprimorar as propostas de navegação, principalmente a abordagem utilizando RNA, pelo uso de outras técnicas de inteligência artificial. Pode-se, também, com a acoplagem de novos dispositivos à estrutura robótica, levantar um modelo dinâmico do robô. Pretende-se, ainda, aplicar técnicas de determinação e ajustes dos ganhos do controlador PID e, também, desenvolver técnicas de controle não linear.

Uma última proposta de trabalho futuro, de grande importância e que deve ser feita na seqüência do trabalho, é a validação do sistema em um ambiente real permitindo dizer de fato que a plataforma TATUBOT está apta a atuar no ambiente para qual foi desenvolvida.

Bibliografia

- [Botelho et al., 2008] Botelho, S., Oliveira, V., Fo., N. D., Jr., C. D. M., Estrada, E., Galeriano, M., Drews, P., and Corrêa, U. B. (2008). Tatubot - sistema robótico de inspeção para linhas de distribuição elétrica subterrâneas. In *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belo Horizonte, Brasil.
- [Boyer, 1996] Boyer, M. (1996). Systems integrations in telerobotics: Case study: Maintenance electric power lines. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1042–1047.
- [Calvo et al., 2009] Calvo, O., Sousa, A., Rozenfeld, A., and Acosta, G. (2009). Smooth path planning for autonomous pipeline inspections. *6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, pages 1–9.
- [Castro et al., 2001] Castro, A., Silva, J., and Simoni, P. (2001). Image based autonomous navigation with fuzzy logic control. *International Joint Conference on Neural Networks*, 3(15-19):2200–2205.
- [Cho et al., 2006] Cho, B.-H., Byun, S.-H., Park, J.-Y., and Kim, J.-S. (2006). Development of automatic inspection robot for live-line insulators. *IEEE 11th International Conference on Transmission and Distribution Construction*, pages 15–19.
- [Choi and Jung, 2006] Choi, C. and Jung, S. (2006). Pipe inspection robot with an automatic tracking system using a machine vision. *SICE-ICASE, International Joint Conference*, pages 1285–1290.
- [da Silva Diaz Estrada, 2008] da Silva Diaz Estrada, E. (2008). Uma arquitetura embarcada para um robô de inspeção de linhas de distribuição subterrânea. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Computação - Universidade Federal do Rio Grande.

- [de Almeida, 2009] de Almeida, R. R. (2009). Uma plataforma para navegação autônoma de robôs reais e simulados de inspeção de linhas de distribuição subterrânea de energia. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Computação - Universidade Federal do Rio Grande.
- [de Oliveira, 2008] de Oliveira, V. M. (2008). *Estudo e Controle de Robôs Bracejadores Subatuados*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [Feng et al., 2008] Feng, Y., Rongben, W., and Ronghui, Z. (2008). Research on lane changing and overtaking for intelligent vehicle based on vision navigation. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pages 1–6.
- [Fernandez and Casals, 1997] Fernandez, J. and Casals, A. (1997). Autonomous navigation in ill-structured outdoor environment. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1(7-11):395–400.
- [Freeman and Skapura, 1991] Freeman, J. A. and Skapura, D. M. (1991). *Neural networks: algorithms, applications, and programming techniques*. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA.
- [Haykin, 1999] Haykin, S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice-Hall, 2nd edition edition.
- [Jiang et al., 2002] Jiang, B., P. Stuart, M. R., Villa, D., and Mamishev, A. V. (2002). Robotic platform for monitoring underground cable systems. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, 2:1105–1109.
- [Jiang et al., 2005] Jiang, B., Sample, A., Wistort, R., and Mamishev, A. (2005). Autonomous robotic monitoring of underground cable systems. *12th International Conference on Advanced Robotics*, pages 673–679.
- [Kang et al., 1996] Kang, D. J., Choi, J. W., and Kweon, I. S. (1996). Finding and tracking road lanes using line-snakes. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 189–194.

- [Kobayashi et al., 1991] Kobayashi, H., Nakanura, H., and Shimada, T. (1991). An inspection robot for feeder cable-basis structure and control. *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pages 992–995.
- [Mello et al., 2008] Mello, C., Gonçalves, E. M., Estrada, E., Oliveira, G., Souto, H., Almeida, R., Botelho, S., Santos, T., and Oliveira, V. (2008). Tatubot - robotic system for inspection of undergrounded cable system. In *Proceedings of the 5th Latin American Robotics Symposium (LARS 2008)*, Salvador, Brazil.
- [Meng and Kak, 1993] Meng, M. and Kak, A. (1993). Mobile robot navigation using neural networks and nonmetrical environmental models. *IEEE Control Systems Magazine*, 13:30–39.
- [Nassiraei et al., 2007] Nassiraei, A., Kawamura, Y., Ahrary, A., and Y. Mikuriya Ishii, K. (2007). Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot kantaro. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 136–143.
- [Neto, 2007] Neto, A. A. (2007). Identificação de estradas em imagens para uma aeronave em ambiente simulado. VERLAB-UFMG.
- [Neto and Rittner, 2006] Neto, A. M. and Rittner, L. (2006). A simple and efficient road detection algorithm for real time autonomous navigation based on monocular vision. *IEEE 3rd Latin American Robotics Symposium*, pages 92–99.
- [Nio and Maruyama, 1993] Nio, S. and Maruyama, Y. (1993). Remote-operated system for live-line maintenance work. *ESMO-93Sixth International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance*, 1(425-435).
- [Pessin et al., 2007] Pessin, G., Osório, F., Musse, S., Nonnemacher, V., and Ferreira, S. (2007). Utilizando redes neurais artificiais no controle de rebôs móveis aplicados ao combate de incêndios florestais. *Anais do XVI Seminário de Computação*, pages 19–30.
- [Santamaria et al., 1997] Santamaria, A., Aracil, R., Tuduri, A., Martinez, P., Val, F., Penin, L. F., Ferre, M., Pinto, E., and Barrientos, A. (1997). Teleoperated robots for

- live power lines maintenance (robot). *14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 3:31/1–31/5.
- [Sawada et al., 1991] Sawada, J., Kusumoto, K., Maikawa, Y., Munakata, T., and Ishikawa, Y. (1991). A mobile robot for inspection of power transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6:309–315.
- [Shihavuddin et al., 2008] Shihavuddin, A., Ahmed, K., Munir, S., and Ahmed, K. R. (2008). Road boundary detection by a remote vehicle using radon transform for path map generation of an unknown area. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 8(8):64–69.
- [Silva et al., 2001] Silva, G. C., Leguenza, E. L., Gulmine, J. V., Munaro, M., Tamioka, J., and Moraes, M. L. (2001). Uma estimativa do perfil de degradação da isolação em xlpe de cabos de potência utilizados na rede subterrânea da ceb. In *I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*.
- [Souto, 2009] Souto, H. D. (2009). Implementação de um hardware embarcado para um robô de inspeção de linhas de distribuição subterrânea. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Computação - Universidade Federal do Rio Grande.
- [Sugiura et al., 2007] Sugiura, M., Sakazaki, H., Shimizu, M., Kobayashi, K., and Watanabe, K. (2007). A study of omni-directional image based environment recognition for mobile robots. *SICE Annual Conference*, pages 2034–2037.
- [Wijesoma et al., 2001] Wijesoma, W., Kodagoda, K., Balasuriya, A., and Teoh, E. (2001). Road edge and lane boundary detection using laser and vision. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3:1440–1445.
- [Wikipedia, 2009] Wikipedia (2009). Opencv. World Wide Web electronic publication.