



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
ESPECIALIZAÇÃO EM CONTROLE, AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA**

**PEDRO XAVIER ALCANTARA**

**SISTEMA DE POSICIONAMENTO E DETECÇÃO PARA  
ULTRAPASSAGEM AUTÔNOMA DE OBSTÁCULOS EM  
ROBÔ DE INSPEÇÃO DE LINHA DE ALTA TENSÃO**

Salvador  
Fevereiro, 2015

**PEDRO XAVIER ALCANTARA**

**SISTEMA DE POSICIONAMENTO E DETECÇÃO PARA ULTRAPASSAGEM  
AUTÔNOMA DE OBSTÁCULOS EM ROBÔ DE INSPEÇÃO DE LINHA DE ALTA  
TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Automação e Controle da Faculdade de Tecnologia SENAI-CIMATEC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Controle, Automação e Robótica.

Orientador: Prof. MSc. Marco Antonio dos Reis

Salvador  
Fevereiro, 2015

---

PEDRO XAVIER ALCANTARA

SISTEMA DE POSICIONAMENTO E DETECÇÃO PARA ULTRAPASSAGEM  
AUTÔNOMA DE OBSTÁCULOS EM ROBÔ DE INSPEÇÃO DE LINHA DE ALTA  
TENSÃO/ PEDRO XAVIER ALCANTARA. – Salvador, Fevereiro, 2015-

51 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. MSc. Marco Antonio dos Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Fevereiro,  
2015.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. I. Orientador. II. Universidade xxx. III.  
Faculdade de xxx. IV. Título

CDU 02:141:005.7

---

PEDRO XAVIER ALCANTARA

SISTEMA DE POSICIONAMENTO E DETECÇÃO PARA ULTRAPASSAGEM  
AUTÔNOMA DE OBSTÁCULOS EM ROBÔ DE INSPEÇÃO DE LINHA DE ALTA TENSÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Automação e Controle da Faculdade de Tecnologia SENAI-CIMATEC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Controle, Automação e Robótica.

Aprovado em 11 de fevereiro de 2015 .

**Banca Examinadora**

Marco Antonio dos Reis - Orientador \_\_\_\_\_  
Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,  
Brasil  
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Rômulo Guedes Cerqueira \_\_\_\_\_  
Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil  
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Fevereiro, 2015

Dedico o fruto desse trabalho a Deus, meus pais, minha companheira e amiga e todos os meus colegas de trabalho que fizeram parte dessa jornada.

# AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda sabedoria e saúde, com as quais eu não poderia vencer mais esse desafio.

Aos meus pais, fonte de amor e força, exemplo a ser seguido.

A minha companheira Vívian, pelo companheirismo, apoio, "puxões de orelha" e foco.

A Samy Marcelo Nascimento, companheiro de trabalho e amigo nas horas difíceis.

Aos colegas de trabalho pelo apoio, ajuda e companheirismo.

A meu orientador Marco Antônio dos Reis pela contribuição e orientação nesse trabalho.

# RESUMO

A robótica vem sendo utilizada com uma frequência cada vez maior em diversas aplicações, desde aplicações na linha de produção, até situações e atividades extremamente perigosas e/ou danosas para o ser humano. Um exemplo de atividade perigosa é a inspeção de linha de transmissão de energia elétrica. Dentro desse contexto, o Senai CIMATEC, em parceria com a UFMG e a CEMIG, desenvolveu um robô autônomo para realizar inspeção nas linhas de transmissão da CEMIG, sob tensão de 138kV. Neste trabalho, serão apresentados os sensores e técnicas escolhidas, juntamente com as razões que levaram aos sistemas de posicionamento e detecção de obstáculos. Esses sistemas são de grande importância em uma das tarefas essenciais para o sucesso do projeto, que é a ultrapassagem autônoma de alguns obstáculos presentes na linha, fazendo com que a realização da inspeção seja viabilizada. Os sistemas selecionados foram implementados e testados, com sucesso, tanto no laboratório de testes no Senai, quanto no laboratório da CEMIG, onde esteve submetido a tensão real de trabalho.

**Palavras-chaves:** ROS(Robotic Operation System), Sensor Ultrassônico, Odometria, Robótica Autônoma.

# ABSTRACT

Robotics has been used with increasing frequency in several different applications, from production lines uses, to extremely dangerous situations and tasks os harmful for people. An example of dangerous tasks is the inspection of transmission powerline. In this context, Senai CIMATEC, in partnership with UFMG and CEMIG, develops an autonomous robot to do the inspection at the CEMIG's transmission powerlines, under 138kV voltage. In this work, the sensors and chosen techniques will be presented, as well as the reason for its choice as position and obstacle detection systems. These systems are very important to perform one of the essential tasks to the success of the project, wich is the autonomous overcoming of some obstacles present on lines, enabling the inspection. The selected system was implemented and tested, succesfully, both at Senai laboratories and CEMIG's, was subject to the working voltage.

**Key-words:** ROS(Robotic Operation System), Ultrasonic Sensor, Odometry, Autonomous Robotic.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Inspeção de linhas de transmissão realizadas por aeronaves tripuladas. . . . .                                 | 15 |
| Figura 2 – Obstáculos encontrados na linha de transmissão :grampo de suspensão (a), emenda(b) e amortecedor (c) . . . . . | 17 |
| Figura 3 – PIRO na linha de teste no laboratório no Senai - CIMATEC . . . . .   | 17 |
| Figura 4 – Diagrama da arquitetura geral do robô . . . . .  | 18 |
| Figura 5 – Intel Nuc DC3217BY . . . . .   | 19 |
| Figura 6 – Sistema mecânico PIRO . . . . .  | 20 |
| Figura 7 – Sensores para robótica móvel . . . . .   | 21 |
| Figura 8 – Sinais de sensor ultrassônico . . . . .  | 24 |
| Figura 9 – Cone de diretividade de sensor ultrassônico . . . . .  | 25 |
| Figura 10 – Princípio de funcionamento de sensores infra-vermelho . . . . .   | 26 |
| Figura 11 – Princípio de funcionamento de sensores infra-vermelho por triangulação . . . . .                              | 26 |
| Figura 12 – Estimacão de distância de laser scanner por detecção de fase . . . . .  | 29 |
| Figura 13 – Esquema de funcionamento de sensor lase scanner 2D . . . . .  | 30 |
| Figura 14 – Grampo de suspensão da cadeia de isoladores . . . . .   | 33 |
| Figura 15 – Tabela qualitativa de avaliacao . . . . .   | 34 |
| Figura 16 – Tabela quantitativa de avaliacao . . . . .  | 34 |
| Figura 17 – Calculo de posicionamento utilizando odometria . . . . .  | 36 |
| Figura 18 – <i>Encoders</i> incremental (esquerda) e absoluto (direita) . . . . .   | 37 |
| Figura 19 – Unidade de tracão . . . . .   | 40 |
| Figura 20 – Motor Dynamixel MX-106R . . . . .   | 41 |
| Figura 21 – Esquema de implementacao da odometria . . . . .   | 43 |
| Figura 22 – Unidade frontal do robô PIRO . . . . .  | 44 |
| Figura 23 – PIRO aproximando-se do obstáculo . . . . .  | 45 |
| Figura 24 – PIRO com unidade frontal levantada e garras abertas . . . . .   | 45 |
| Figura 25 – PIRO avançando com unidade frontal abaixada . . . . .   | 45 |
| Figura 26 – Unidade frontal do PIRO apoiando-se no outro lado do obstáculo . . . . .                                      | 46 |
| Figura 27 – Unidade central livre, possibilitando a ultrapassagem . . . . .   | 46 |
| Figura 28 – Deslocamento do PIRO com a unidade traseira abaixada . . . . .  | 46 |

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| BIR   | Brazilian Institute of Robotics       |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais  |
| LS    | Laser Scanner                         |
| m     | Metro                                 |
| m/s   | Metros por segundo                    |
| Kp    | Ganho proporcional do controlador PID |
| N     | Newton                                |
| nm    | Nanometro                             |
| PIRo  | Powerline Inspection Robot            |
| PSD   | Position-sensitive Device             |
| rad   | Radiano                               |
| ROS   | Robot Operating System                |
| SIV   | Sensor Infra-Vermelho                 |
| SO    | Sistema Operacional                   |
| TOF   | Time-of-Flight                        |
| UFMG  | Universidade Federal de Minas Gerais  |

# SUMÁRIO

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .   | <b>11</b> |
| <b>1.1</b> | <b>OBJETIVOS</b> . . . . .  | <b>11</b> |
| <b>1.2</b> | <b>JUSTIFICATIVA</b> . . . . .  | <b>12</b> |
| <b>1.3</b> | <b>METODOLOGIA</b> . . . . .  | <b>12</b> |
| <b>2</b>   | <b>ROBÓTICA</b> . . . . .   | <b>14</b> |
| <b>2.1</b> | <b>INSPEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO</b> . . . . . | <b>14</b> |
| <b>2.2</b> | <b>ROBÔ PIRo - POWERLINE ROBOT INSPECTION</b> . . . . .                               | <b>16</b> |
| 2.2.1      | Sistema de Processamento Central . . . . .  | 18        |
| 2.2.2      | Sistema Mecânico . . . . .  | 20        |
| <b>3</b>   | <b>SISTEMAS DE SENSORIAMENTO E POSICIONAMENTO</b> . . . . .                           | <b>21</b> |
| <b>3.1</b> | <b>SISTEMA DE DETECÇÃO DE OBSTÁCULOS</b> . . . . .                                    | <b>21</b> |
| 3.1.1      | Análise de Alternativas de Sensoriamento . . . . .                                    | 23        |
| 3.1.1.1    | Sensor de Ultrassom . . . . .   | 23        |
| 3.1.1.2    | Sensor Infra-Vermelho . . . . .   | 25        |
| 3.1.1.3    | Laser Scanner . . . . .   | 27        |
| 3.1.1.4    | Análise Comparativa . . . . .   | 31        |
| <b>3.2</b> | <b>SISTEMA DE POSICIONAMENTO</b> . . . . .  | <b>35</b> |
| 3.2.1      | Odometria . . . . .   | 36        |
| <b>4</b>   | <b>IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS</b> . . . . .   | <b>40</b> |
| <b>4.1</b> | <b>IMPLEMENTAÇÃO</b> . . . . .  | <b>40</b> |
| 4.1.1      | Odometria . . . . .   | 40        |
| 4.1.2      | Detecção de Obstáculo . . . . .   | 43        |
| <b>4.2</b> | <b>RESULTADOS</b> . . . . .   | <b>44</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO</b> . . . . .  | <b>48</b> |
|            | <b>Referências</b> . . . . .  | <b>49</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 30 anos, a robótica tem alcançado grande relevância, principalmente no ambiente industrial. Os braços robóticos, ou robôs manipuladores, compreendem uma indústria de 2 bilhões de dólares. Integrados à linha de produção, esses robôs são capazes de aumentar a produtividade e a repetibilidade da linha, visto que possuem uma velocidade e precisão humanamente impossível de ser alcançada. Contudo, apresentam uma limitação que é a sua mobilidade extremamente restrita. Por outro lado, robôs móveis tem uma boa capacidade de locomoção porém apresentam dispositivos de manipulação pouco eficientes ou inexistentes(SIEGWART; NOURBAKSH; SCARAMUZZA, 2011).

Além da aplicação em plantas industriais, existe também a necessidade da execução de tarefas em lugares onde a utilização de mão-de-obra humana é difícil, arriscada ou até impossível, como no fundo do mar (à elevadas profundidades) ou no espaço. Para realização dessas tarefas, a robótica apresenta-se como alternativa interessante, visto que, há um grande benefício que é a preservação da vida e/ou da saúde das pessoas envolvidas (ROSÁRIO, 2006).

Dentro deste contexto inseri-se o PIRo (Powerline Inspection Robot) um robô autônomo para inspeção de linhas de transmissão de alta tensão. Este robô foi desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Robótica, vinculado ao Senai - CIMATEC. Em parceria com a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e a UFMG(Universidade Federal de Minas Gerais), desenvolveu-se o projeto, P&D 311, com o intuito de propor um robô capaz de fazer inspeção de linhas de transmissão de 138 kV, com a capacidade de ultrapassagem de obstáculos de forma autônoma, ou seja, sem que haja a necessidade de intervenção de um operador.

O PIRo consiste no segundo protótipo desenvolvido pelo projeto P&D 311. O modelo desse robô apresenta uma certa complexidade, visto que sua estrutura combina características de robôs manipuladores e móveis. Dessa forma, este trabalho insere-se para auxiliar na resolução desse desafio, mais precisamente na tarefa da ultrapassagem de obstáculos.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a definição e implementação de um sistema de ultrapassagem de obstáculos para o PIRo, no que se refere a detecção dos obstáculos e localização do robô. O robô tem a função de percorrer a linha de transmissão realizando inspeção térmica e visual. Para executar a tarefa de inspeção de maneira ininterrupta, o robô precisa ter a capacidade de, autonomamente, ultrapassar obstáculos que encontram-se obstruindo seu caminho.

Ao final da realização deste trabalho, espera-se obter um sistema eficaz em auxiliar na tarefa de ultrapassagem de obstáculo. A eficácia desse sistema será avaliada através da

implementação e verificação prática dos resultados a que se propõe.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Uma dos requisitos mais importantes para um sistema autônomo de qualquer tipo é possuir informações sobre o ambiente. Isso é feito através do uso de vários sensores para obtenção de dados que serão convertidos em informações úteis sobre o ambiente. Essas informações serão utilizadas para diversos propósitos, dentre eles a navegação. A navegação é uma das tarefas mais desafiadoras para um sistema autônomo, para possuir um sistema eficaz de navegação é necessário possuir essa característica também nos "blocos" que o formam, que são: percepção, localização, conhecimento e controle dos movimentos (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011). Em outras palavras, é necessário que o robô perceba o ambiente através dos sensores, tome conhecimento de sua localização no espaço e tenha controle sobre os seus movimentos. A navegação consiste um robô poder se deslocar de um ponto A a um ponto B, sem colisões e pelo menor caminho.

O sistema de posicionamento de um robô é algo extremamente importante pois fornece as informações de localização e portanto é imprescindível para a navegação. Só com posse dessas informações que o robô é capaz de se deslocar de forma "consciente" e realizar tarefas e missões determinadas para o mesmo. Da mesma forma, os sistemas de percepção são imprescindíveis para um robô autônomo, uma vez que é através dos dados obtidos por esse sistema que o robô terá a percepção do ambiente a sua volta e da influência dele sobre o seu comportamento e tomada de decisão.

Outro ponto importante que justifica a realização desse trabalho é que, com o sucesso desse projeto, será possível remover, ou ao menos diminuir, o número de pessoas que realizam a tarefa de inspeção da linha de transmissão. Essa é uma tarefa extremamente perigosa e com acidentes frequentes, assim, esse projeto irá propiciar a redução desses acidentes e do número de vítimas. Além disso, a detecção e o desvio autônomo dos obstáculos permite a interoperabilidade da atividade de inspeção das linhas de transmissão.

Como mencionado anteriormente, o PIRo é um robô autônomo. Dessa forma, deve possuir um sistema de sensoriamento e posicionamento que o auxilie na tarefa de ultrapassagem de obstáculos. Sendo assim, a realização desse trabalho motiva-se pela necessidade da definição de um sistema capaz de auxiliar efetivamente, a tarefa de ultrapassagem de obstáculos e, com isso, contribuir para o sucesso do desenvolvimento desse projeto.

## 1.3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para realização deste trabalho pode ser representada pelos seguintes passos:

1. Levantamento de possíveis abordagens para resolução do problema.
2. Escolha da abordagem mais compatível.
3. Implementação dos sistemas escolhidos no PIRO.
4. Verificação de funcionalidade através da execução da ultrapassagem de obstáculo.

## 2 ROBÓTICA

Há algumas décadas atrás, os robôs faziam parte apenas do imaginário do ser humano, aparecendo em obras de ficção científica. A partir dos anos 60, os robôs começaram a ser utilizados para substituir o ser humano em tarefas que este não podia realizar, pois, eram executadas em ambientes e condições desagradáveis como: altos níveis de ruído e calor, esforço físico extremo, presença de gases tóxicos. Nos últimos 30 anos, dois fatores tem contribuído para a evolução dos sistemas robóticos, o primeiro é o aumento dos níveis salariais, o segundo é o extraordinário avanço da tecnologia no ramo de computadores e sistemas computacionais, trazendo assim, uma melhoria significativa de desempenho e redução de preços (ROSÁRIO, 2006).

Segundo Fuller (1999), normalmente os robôs apresentam 3 tipos de componentes: partes físicas, instruções internas e instruções adaptáveis para tarefas. Nas partes físicas estão presentes 4 ou 5 unidades:

1. Estrutura mecânica
2. Atuadores
3. Sistema de Controle
4. Sensores
5. Console de controle manual

Os sensores são os elementos sensíveis aos fenômenos físicos como a pressão ou a temperatura de um fluido, enquanto que os atuadores são os mecanismos capazes de interagir no ambiente, alterando o valor das variáveis manipuláveis. Os controladores, por sua vez, são os dispositivos que, através do processamento dos dados obtidos pelos sensores e em função da programação pré-estabelecida, geram comandos para os atuadores (SILVEIRA; SANTOS, 2004).

### 2.1 INSPEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO

Segundo o EPE (2014), no Brasil 17,1% do consumo final de energia é de energia elétrica. Este valor mostra a importância desse tipo de energia para o funcionamento da indústria, dos grandes centros urbanos e da população em geral. O mercado consumidor é de aproximadamente

47 milhões de unidades, 56% nas regiões Sudeste/Centro-Oeste, 22% na região Nordeste, 15% na região Sul, 5% na região Norte e 2% em sistemas isolados. Para fazer a interligação entre as unidades geradoras e os centros consumidores, são utilizados cerca de 77.640 km de linhas de transmissão, que devem operar 24 horas por dia, 7 dias por semana, durante todo o ano (ONS, 2006).

As linhas de transmissão de energia são formadas por cabos condutores de energia elétrica, torres e isoladores que sustentam os cabos (RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009). A energia é transmitida em alta tensão, guiada por esses cabos, que devem estar em perfeitas condições de operação para garantir o bom fornecimento de energia.

Devido a sua importância, as linhas de transmissão devem receber manutenção frequentemente. Atualmente, a inspeção de linhas de transmissão é feita por aeronaves tripuladas. As aeronaves realizam voos em baixas altitudes e próximo das linhas de transmissão, conforme mostrado na Figura 1. Em determinadas situações, condições climáticas e/ou características geográficas dificultam muito o sobrevoo, o que torna a inspeção uma tarefa bastante arriscada, expondo toda a tripulação à ocorrência frequente de acidentes, inclusive fatais (RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009 apud OLIVEIRA; LAGES, 2007).



Figura 1 – Inspeção de linhas de transmissão realizadas por aeronaves tripuladas

Uma alternativa à inspeção com helicópteros é a utilização de veículos terrestres. Contudo, esse tipo de inspeção é muito limitada, uma vez que boa parte das torres ficam localizadas em áreas de difícil acesso, tornando restrito a capacidade de inspeção da equipe.

Além dos problemas encontrados para realização da inspeção, a manutenção das linhas é uma tarefa ainda mais problemática. Essa atividade apresenta um elevado grau de risco uma vez que o profissional necessita estar suspenso nas linhas a uma altura de cerca de 100 metros do chão. Na realização da manutenção, também é necessário que a linha seja desligada, causando a sobrecarga de outra linha, ou em alguns casos, interrompendo o fornecimento de energia elétrica para alguma localidade (DEBENEST et al., 2008).

Considerando os fatores mencionados, juntamente com o aumento da demanda por

energia elétrica, os proprietários das redes de transmissão tem sido pressionados para melhorar as condições das linhas, aumentando assim sua confiabilidade, o que implica num aumento da necessidade de manutenção das mesmas. Segundo Toussaint, Pouliot e Montambault (2009), esses fatores tem incentivado o desenvolvimento de robôs para a realização das tarefas de inspeção e manutenção das linhas.

De acordo com Debenest et al. (2008) e Toussaint, Pouliot e Montambault (2009), a utilização de robôs é uma alternativa para reduzir os custos e perigos da inspeção nas linhas de transmissão. Existem alguns centros de pesquisas desenvolvendo robôs, como alternativas viáveis, para a realização da inspeção e manutenção de linhas de transmissão. Um desses institutos é o Hidro Québec Research Institute, que desde 1998 tem intensificado o desenvolvimento de robôs aplicados à manutenção em linhas de transmissão. Seus protótipos são capazes de, em cerca de um segundo, ultrapassar obstáculos como: espaçadores, amortecedores e grampos de suspensão (TOUSSAINT; POULIOT; MONTAMBAULT, 2009). No Japão, o Kansai Electric Power Corp. (KEPCO, Japan) e Japan Systems Corp. (JPS) também desenvolveram um robô de inspeção em linhas de transmissão chamado *Expliner*, capaz de se mover sobre os cabos de alta tensão, ultrapassar espaçadores de maneira segura e rápida e grampos de suspensão sem tocar na estrutura da torre.

## 2.2 ROBÔ PIRO - POWERLINE ROBOT INSPECTION

Seguindo a tendência dos referidos centros de pesquisa e, em consonância com as necessidades do mercado de transmissão de energia elétrica, o PIRO apresenta-se como alternativa de tecnologia nacional, atendendo às necessidades desse mercado. Levando-se em conta as dimensões continentais do Brasil e seus mais de 77.000 km de linhas de transmissão, é extremamente importante que o país detenha domínio sobre esse tipo de tecnologia.

De acordo com Rangel, Kienitz e Brandão (2009), as inspeções nas linhas de transmissão têm a função de verificar a integridade física dos componentes da linha. Busca-se por problemas como: fissuras, corrosões e eventuais danos que possam comprometer o fornecimento de energia. Esses problemas provocam um aumento da resistência da linha, ocasionando "pontos quentes". Através da utilização de sensores térmicos e termográficos pode-se avaliar a temperatura desses pontos e, conseqüentemente, o nível de comprometimento da estrutura dos cabos. Outros pontos a serem inspecionados envolvem as condições das torres e da cadeia de isoladores, bem como do terreno onde as torres estão instaladas, uma vez que é necessário manter uma distância segura das linhas em relação a vegetação e construções, na chamada área de servidão, evitando assim o contato e a ocorrência de falhas no sistema de transmissão.

O PIRO possui a capacidade de realizar inspeção visual, térmica e termográfica da linha de transmissão, além de verificar as condições na faixa de servidão, em busca de vegetação ou construções que possam entrar em contato com a linha, atendendo assim, as necessidades

de verificação de inspeção de uma linha de transmissão enumeradas por Rangel, Kienitz e Brandão (2009). De acordo com as especificações de projeto, este robô também deve estar apto a inspecionar linhas de transmissão com tensão entre 124,2 a 151,8 kV com corrente trifásica de 500 A de forma autônoma, necessitando de operadores apenas para a sua instalação e remoção no trecho inspecionado ou por eventuais paradas de emergência. Isso implica na necessidade de algoritmos de ultrapassagens de obstáculos presentes nas linhas como: grampos de suspensão, emendas e amortecedores, ilustrados na Figura 2. Na Figura 3 pode-se observar a estrutura física do PIRO além da configuração do mesmo durante a locomoção na linha .

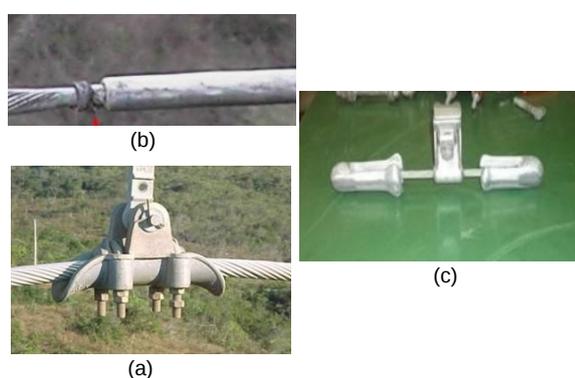


Figura 2 – Obstáculos encontrados na linha de transmissão :grampos de suspensão (a), emenda(b) e amortecedor (c)



Figura 3 – PIRO na linha de teste no laboratório no Senai - CIMATEC

A solução proposta para confecção do protótipo propõe a divisão do robô em 8 sistemas (SENAI - CIMATEC, 2013):

1. Sistema de Acionamento;
2. Sistema de Comunicação Externa;

3. Sistema de Controle;
4. Sistema Mecânico;
5. Sistema de Potência;
6. Sistema de Processamento Central;
7. Sistema de Sensores;
8. Sistema de Visualização.

Na Figura 4 pode-se visualizar um esquema com os sistemas e arquitetura planejada para o robô, bem como suas interligações e funcionalidades.

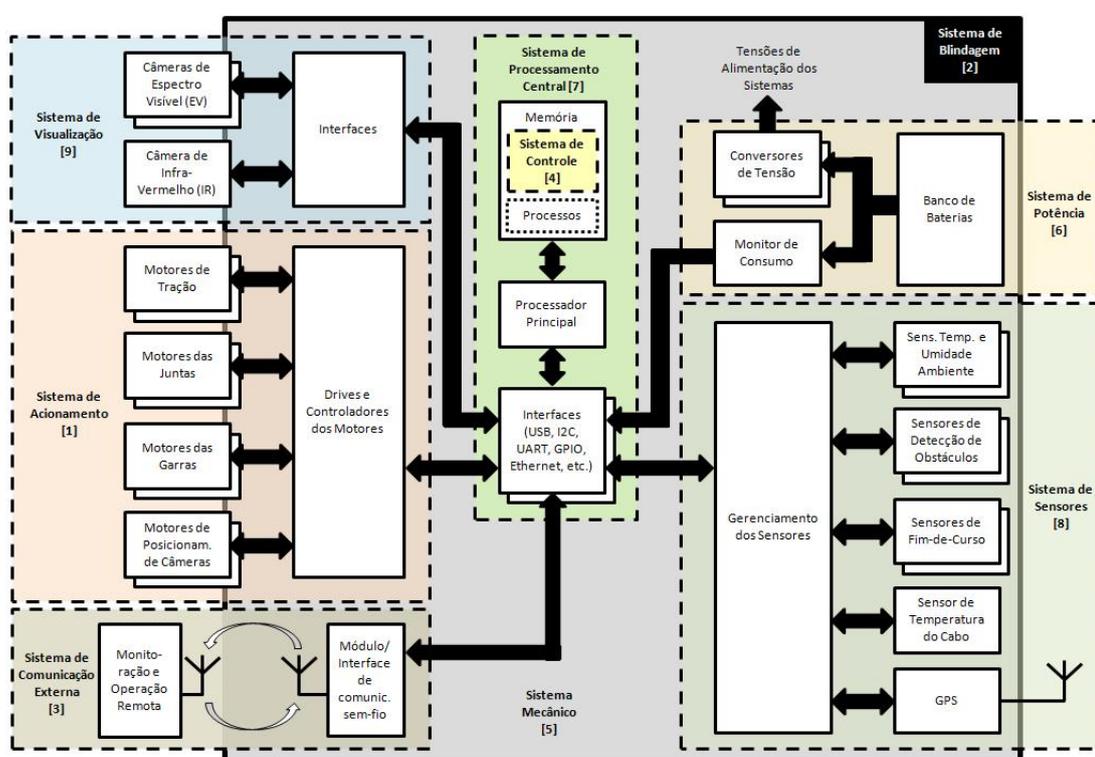


Figura 4 – Diagrama da arquitetura geral do robô (SENAI - CIMATEC, 2013)

### 2.2.1 Sistema de Processamento Central

O sistema de processamento é a unidade central onde se desenvolve toda a "inteligência" dos sistemas robóticos. Ele é responsável por conversão de dados em informações, tomadas de decisão e diversos outros algoritmos que são necessários para o funcionamento efetivo de um robô. A unidade de processamento utilizada foi a Intel Nuc modelo DC3217BY, Figura 5, esse computador de pequeno porte possui 32 Gbyte de memória SSD e 4 Gbyte de memória ram, com processador Intel Core i3, 3ª geração, 1,8 GHz. Esta plataforma possui o Ubuntu 12.04

como Sistema Operacional (SO) nativo. O Ubuntu é uma distribuição do Linux, SO de código aberto e livre. Ser um SO de código aberto implica ter acesso a todos os códigos fontes que o compõe, tornando possível inúmeras modificações, adaptações ou adequações para a necessidade do usuário ou desenvolvedor. Essa liberdade é uma característica muito importante quando se trabalha com pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, uma vez que, muitas vezes, as condições de trabalho dos sistemas robóticos são bem específicas, o que requer uma adequação do SO para determinadas especificidades.



Figura 5 – Intel Nuc DC3217BY

O desenvolvimento de programas para controle de robôs é algo difícil e complexo. Os códigos, além de possuírem uma grande extensão, devem garantir o adequado funcionamento dos controles de baixo nível (*drivers*), percepção do ambiente, tomada de decisão e atuação no ambiente externo (MARCATO, 2013). Para auxiliar nessa árdua tarefa, utilizam-se plataformas de gerenciamento dos programas, os *frameworks*. O ROS (*Robotic Operating System*) é um *framework* de código fonte aberto, livre e colaborativo. Isso faz com que seu desenvolvimento e expansão seja muito mais rápido, uma vez que usuários de institutos de pesquisa, das indústrias e usuários comuns, aqueles que desenvolvem robótica por *hobbie*, possam contribuir e colaborar, em paralelo, para o aprimoramento dessa plataforma.

Outra característica interessante do ROS é ser leve, ou seja, necessita de pouca capacidade computacional, segundo Quigley et al. (2009) essa característica se deve a reutilização de outros projetos de código fonte aberto, como os *drivers*, sistemas de navegação, simuladores, algoritmos de visão computacional, dentre outros. Dentre esses projetos que possuem interação com o ROS pode-se citar o *OpenCV*, *OpenRAVE* e o Gazebo.

No PIRo, utiliza-se a versão *Groovy*, do *framework* ROS, compatível com a distribuição do Linux, Ubuntu 12.04.

## 2.2.2 Sistema Mecânico

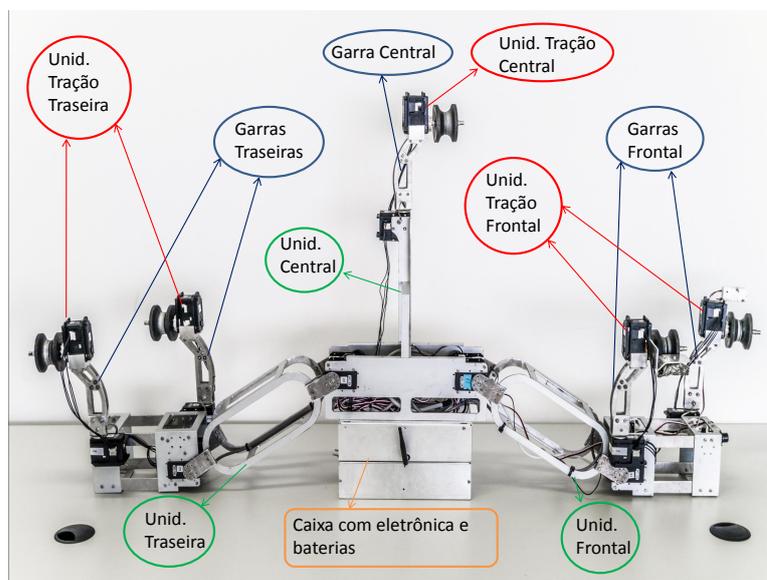


Figura 6 – Sistema mecânico PIRo

A Figura 6 mostra o sistema mecânico do PIRo com suas principais unidades. O robô possui duas unidades manipuladoras, (a frontal e a traseira) e uma unidade de apoio central. As garras estão presentes em todo o robô e são responsáveis por manter o robô preso a linha, sendo movimentadas no processo de ultrapassagem para "liberar" o manipulador, como será melhor descrito na seção de Resultados. Já as unidades de tração, como o nome sugere, são responsáveis pela movimentação linear do robô e também serão melhor descritas na implementação da odometria.

O PIRo é feito todo em alumínio para garantir resistência e baixo peso, além de que, com esse material, garante-se que todo o robô estará no mesmo potencial, aspecto importante para garantir a compatibilidade eletromagnética do robô na linha. Seu peso total é de 9Kg aproximadamente, incluindo parte mecânica, sensores, toda a eletrônica e as baterias.

## 3 SISTEMAS DE SENSORIAMENTO E POSICIONAMENTO

Como mencionado na seção de Justificativa ( Seção 1.2), necessita-se do desenvolvimento de um sistema eficaz, capaz de auxiliar na tarefa de ultrapassagem de obstáculo e que essa, possa ser realizada da melhor maneira possível. Para o desenvolvimento desse sistema, faz-se necessário um levantamento de técnicas e sensores capazes de auxiliar na realização dessa tarefa. A Figura 7 traz uma comparação de possíveis técnicas e sensores com o objetivo de sensoriamento à ser obtido, segundo Wolf et al. (2009).

| Sensor                       | Principal Função   | Exemplos  |
|------------------------------|--|---|
| De Posição e Orientação      | Determinar a posição absoluta ou direção de orientação do robô                   | GPS (Sistema de Posicionamento Global)                          |
|                              |  | Bússola [Compass]   |
|                              |  | Inclinômetro  |
|                              |  | Triangulação usando marcas (Beacons)                            |
| De Obstáculos                | Determinar a distância até um objeto ou obstáculo                                | Sensor Infra-Vermelho (IR - Infrared)                           |
|                              |  | Ultrassom (Sonar)   |
|                              |  | Radar   |
|                              |  | Sensor Laser (Laser rangefinder)                                |
|                              |  | Sistemas de Visão Estéreo (Stereo Vision)                       |
| De Contato                   | Determinar o contato com um objeto ou posição de contato com marcação            | Sensores de Contato (Bumpers, Switches)                         |
|                              |  | Antenas e "bigodes" (Animal whiskers)                           |
|                              |  | Marcações (barreiras óticas e magnéticas)                       |
| De Deslocamento e Velocidade | Medir o deslocamento do robô e Medidas relativas da posição e orientação do robô | Inercial (Giroscópio, Acelerômetros)                            |
|                              |  | Odômetro (Encoders: Optical, Brush)                             |
|                              |  | Potenciômetros (Angular)  |
|                              |  | Sensores baseados em Visão                                      |
| Para Comunicação             | Envio e recepção de dados e sinais externos (troca de informação)                | Sistemas de Visão e Sensores Óticos                             |
|                              |  | Sistemas de Comunicação (RF)                                    |
| Outros tipos                 | Sensores magnéticos, indutivos, capacitivos, reflexivos                          | Sensores de temperatura, carga (bateria), pressão e força, etc. |
|                              |  | Detectores: detector de movimento, de marcações, de gás/odores  |
|                              |  |   |

Figura 7 – Sensores para robótica móvel (WOLF et al., 2009)

O processo de ultrapassagem de obstáculo pode ser dividido em duas etapas. A primeira consiste na detecção do obstáculo e aproximação. A segunda é composta pelas movimentações dos "manipuladores" para ultrapassar, efetivamente, o obstáculo, uma vez que, como mencionado anteriormente, o PIRo apresenta característica tanto de robôs manipuladores como de robôs móveis. Por isso, são necessários sistemas de detecção e deslocamento efetivos para garantir a correta execução desse processo.

### 3.1 SISTEMA DE DETECÇÃO DE OBSTÁCULOS

Quando o ambiente onde o robô esta inserido não é controlado, "sentir" o mundo externo é uma importante tarefa de um robô. Para isso, é necessário a utilização de sensores externos e

internos que captem sinais e que possam ser convertidas em dados, possibilitando que o robô interaja de uma maneira flexível com sua "vizinhança" (DO; KIM, 2013). Como exemplo de sensores internos tem-se câmeras, lasers, giroscópios e são exemplos de sensores externos gps e gps *indoor*. Nas plantas industriais é bastante comum a presença de robôs manipuladores junto a esteiras de produção onde o robô é capaz de perceber onde está o produto e seu posicionamento, possibilitando a interação entre robô e produto de maneira flexível e eficiente, segundo Do e Kim (2013). Para a robótica móvel, sensoriamento do ambiente é necessário para detectar e evitar obstáculos ou fontes de perigo, possibilitando o deslocamento pelo ambiente de forma segura, através da tomada rápida de decisão, tanto para o robô quanto para seres humanos, no caso da ocorrência dessa interação.

Inúmeros estudos têm sido realizados com a finalidade de se obter métodos de sensoriamento efetivos para diversas aplicações e topologias de robôs. A grande maioria desses métodos são baseados em sensores que não entram em contato diretamente com o alvo, ao invés disso, obtêm informações a distância, através da captação de ondas ou sinais externos, naturais ou artificiais (DO; KIM, 2013).

Pode-se dividir os sensores de medição de distância em dois grupos: sensores ativos e passivos. Os sensores passivos não necessitam de uma fonte própria para emitir o sinal ao objeto, eles utilizam sinal externo, geralmente a luz ambiente, para obter a informação de distância ao alvo. Como exemplo tem-se as câmeras. Já os sensores ativos utilizam uma fonte de sinal próprio que, ao interagir com o alvo, gera um sinal de retorno que é captado pelo sensor, obtendo-se assim a informação da distância entre sensor e alvo, sensores de ultrassom, de infravermelho, são exemplos de sensores ativos. Segundo Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), esse tipo de sensor ainda é o mais popular nas aplicações de robótica pois, muitos deles, possuem baixo custo e a informação de distância pode ser facilmente interpretada a partir do sinal de saída do sensor.

Esse trabalho irá se concentrar numa melhor descrição dos sensores ativos, uma vez que são os mais utilizados e que, no contexto do projeto de desenvolvimento do PIRo, atendem de maneira satisfatória as condições de projeto.

De acordo com Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), os métodos de medição ativos podem ser divididos em:

- Time-of-Flight (TOF) : Utiliza-se a propagação de onda sonora ou de uma onda eletromagnética para obtenção da distância. Pode ser subdividido em:
  - Medição direta do tempo;
  - Ondas contínuas moduladas em frequência (FMCW-*Frequency Modulation Continuous Wave*);
  - Ondas contínuas moduladas em amplitude (AMCW- *Amplitude Modulation Continuous Wave*) ou Detecção de Fase;

- Métodos Geométricos ou Triangulação: Utiliza-se das propriedades geométricas de triangulação entre o sensor e o alvo para obtenção da medida de distância.

### 3.1.1 Análise de Alternativas de Sensoriamento

Considerando Wolf et al. (2009) em termos de alternativas para detecção de obstáculos e após discussão entre a equipe de desenvolvimento, chegou-se a 3 possibilidades de topologia para o sistema. Essas topologias e seus métodos serão melhor descritos e analisados para embasar a escolha da alternativa mais indicada. Para melhor compreensão na comparação, serão adotados as seguintes denominações:

- **Topologia 1:** Sensores de Ultrassom + Odometria;
- **Topologia 2:** Sensores Infra-Vermelho + Odometria;
- **Topologia 3:** Laser Scanner + Odometria;

#### 3.1.1.1 Sensor de Ultrassom

O sensor ultrassônico é um tipo de sensor TOF. Um pulso de onda sonora em alta frequência é emitida pelo dispositivo emissor, ao entrar em contato com um obstáculo, parte da onda é refletida e captada pelo elemento sensor, que geralmente está encapsulado junto com o elemento emissor ou bem próximo. Captando-se a onda refletida, tem-se o sinal de eco, dessa forma, sabendo-se a duração entre a emissão do sinal e o sinal de eco, calcula-se a distância percorrida pelo mesmo.

Na robótica móvel, esses tipos de sensores são bastante utilizados para detectar e evitar obstáculos. Isso deve-se ao fato de que, muitos desses sensores apresentam um baixo custo e são fáceis de utilizar pois possuem um sinal de saída de fácil interpretação, ou seja, há uma medição direta da distância entre o robô e o obstáculo (DO; KIM, 2013).

A equação 3.1 mostra a função de obtenção da distância.

$$d = \frac{v * t}{2} \quad (3.1)$$

onde:

- $d$  = distância do objeto
- $v$  = velocidade de propagação do som
- $t$  = tempo entre emissão do pulso e detecção do eco

A velocidade de propagação é influenciada pela temperatura, pressão e umidade. Sobre condições usuais, a velocidade de propagação do som no ar é de aproximadamente 340m/s. Na Figura 8, pode-se observar o funcionamento de um sensor ultrassônico em termos dos sinais de entrada e saída. Primeiro é emitido uma série de pulsos de sinal sonoro, denominado *pacote de onda*. Nesse instante o integrador de tempo, que será utilizado para medir o tempo total entre a emissão e a detecção do eco, é acionado e inicia a contagem progressiva do tempo. O sinal de detecção do eco possui um valor limite (*threshold*), para que o sinal de retorno possa ser considerado um sinal de eco ou não. No momento da emissão do *pacote de onda* o *threshold* é ajustado bem alto e mantido assim por alguns milissegundos, para que não haja possibilidade da interpretação do sinal emitido como um possível eco, esse ajuste provoca o "faixa morta ou instável" do sensor, definindo assim uma distância mínima de detecção de objetos. Contudo, com o passar do tempo, o valor de *threshold* é reduzido uma vez que quanto maior o tempo, mais longe o *pacote de onda* viaja, provocando uma perda maior de energia.

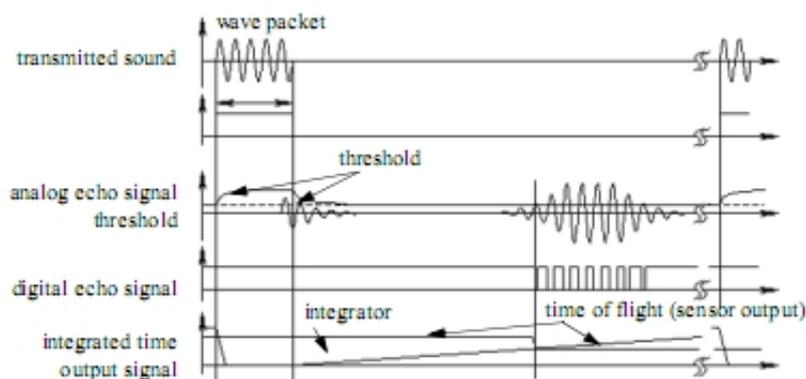


Figura 8 – Sinais de sensor ultrassônico (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011)

As ondas emitidas pelos sensores ultrassônicos operam, em média, numa frequência entre 40 e 180 kHz e geralmente são geradas por transdutores piezoelétricos ou eletrostáticos. Na maioria dos casos, o emissor e o receptor do sensor são encapsulados no mesmo dispositivo, contudo, condições de aplicação em que a "faixa morta" tenha de ser reduzida, pode necessitar de sensores em que o emissor e o receptor sejam separados. Outra forma de selecionar a faixa de medição é definindo a frequência do sensor para determinada aplicação. Baixas frequências, aumentam a faixa de medição com a desvantagem de aumentarem também a "faixa morta". A precisão divulgada por sensores ultrassônicos comerciais varia entre, 98% e 99,1% (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011).

Os sensores que irradiam sinais possuem uma determinada característica de diretividade. Nos sensores ultrassônicos, segundo Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), a abertura do cone de medição varia de 8° a 40°. Na Figura 9, pode-se observar uma representação da diretividade de um sensor ultrassônico que possui 3 lóbos. O lóbo principal é o onde o sinal

possui maior intensidade e por isso, o sensor deve ser posicionado para que o objeto passe perpendicular ao eixo direcional nessa direção. Já os lóbulos laterais são secundários, contudo, sua presença é importante por possibilitar a detecção de objetos que estejam, indevidamente, na direção desses lóbulos. Devido a esse aspecto de diretividade, esse tipo de sensor não possibilita a aquisição da distância de pontos, mas de uma região que irá ser representada com distância constante, ou seja, a região de medição pode ser representada como um segmento de arco para uma representação 2D ou de uma esfera, para uma representação 3D.

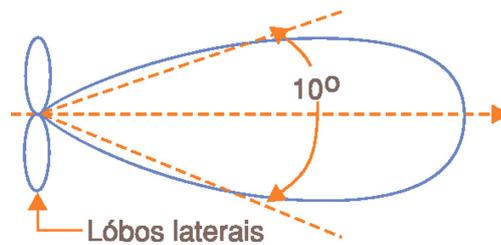


Figura 9 – Cone de diretividade de sensor ultrassônico (NEWTON C. BRAGA, 2014)

Ainda segundo Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), são fontes de erros para sensores ultrassônicos:

- Variação da velocidade de propagação provocada por corrente de ar;
- Interação com a superfície do objeto (ex: absorção pela superfície, reverberação no objeto);
- O cone de dispersão do feixe emitido;
- A velocidade do robô e do obstáculo (no caso de obstáculos móveis);

#### 3.1.1.2 Sensor Infra-Vermelho

Assim como os sensores ultrassônicos, os sensores infra-vermelhos (SIV) também apresentam baixo custo e simples utilização, o que os torna uma alternativa bastante utilizada para detecção de obstáculos externos na robótica móvel (DO; KIM, 2013). Em Wen et al. (2011), por exemplo, um robô segue um alvo móvel que emite sinais infra-vermelho. Nove SIVs são utilizados no robô possibilitando a detecção do alvo num ângulo de 180°. Um sistema parecido é utilizado em Kim et al. (2005) onde os sensores auxiliam na detecção e localização de um sistema de docagem autônoma. Outra aplicação para detecção de obstáculos, mas em robôs manipuladores é apresentada em Gandhi e Cervera (2003), onde um anel com 10 SIVs são colocados ao redor do braço do manipulador para evitar colisão com outros equipamentos ou pessoas, detectando objetos que encontram-se à uma distância dentro de uma faixa de 4 a 30cm.

Os sensores infra-vermelhos podem funcionar por dois métodos: por reflexão ou por triangulação.

O princípio de funcionamento por reflexão, como ilustrado na Figura 10, é semelhante ao dos sensores ultrassônicos, funcionando também por reflexão do sinal emitido como o próprio nome indica. Um feixe direcional de fonte de luz infra-vermelho é emitido, ao entrar em contato com o alvo, este reflete parte do feixe que é captado por uma lente e projetado num fotosensor. O sensor mede a distância do emissor para o objeto com base na intensidade de luz refletida, conforme gráfico apresentado no lado direito da Figura 10 (LOBO et al., 1998).

Como a intensidade do sinal refletido depende fortemente das características óticas da superfície do objeto, bem como da orientação, esses sensores apresentam uma baixa repetibilidade para medição de distância, por isso, são usados mais comumente apenas para detectar objetos, ao invés de medir a distância (LOBO et al., 1998).

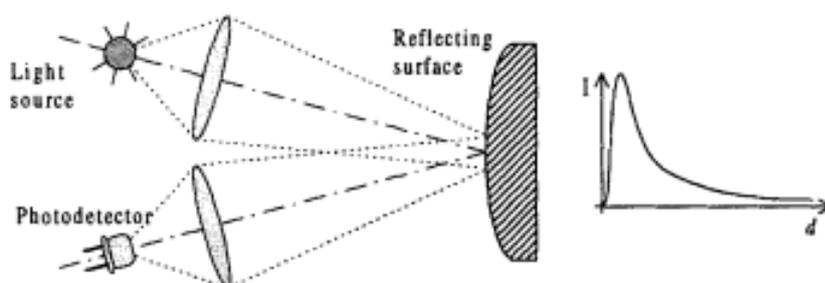


Figura 10 – Princípio de funcionamento de sensores infra-vermelho (LOBO et al., 1998)

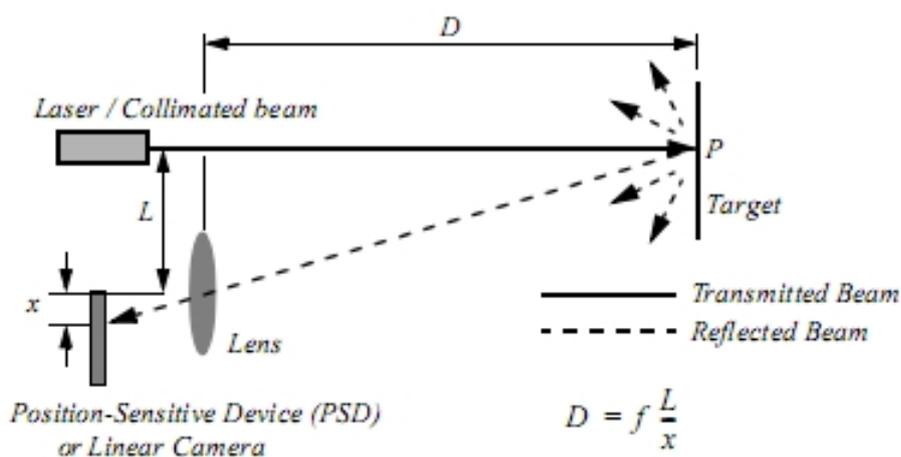


Figura 11 – Princípio de funcionamento de sensores infra-vermelho por triangulação (SIGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011)

Já os SIVs que funcionam pelo método geométrico utilizam a reflexão de um feixe emitido e capturado pelo sensor e, através de valores geométricos conhecidos, calcula-se a distância ao objeto. O princípio de funcionamento para esses tipos de sensores é o mesmo para sensores laser de uma dimensão (1D) com a diferença do tipo de sinal emitido, sendo um feixe infra-vermelho e outro laser, respectivamente a cada tipo de sensor. A Figura 11 ilustra o funcionamento dos sensores infravermelho geométricos. Um feixe de luz direcional é projetado

em direção ao objeto. A luz refletida é captada por uma lente que projeta num dispositivo sensível de posição, no inglês *position-sensitive device (PSD)*. Através da geometria do dispositivo, chega-se que a distância é dada pela equação 3.2.

$$D = f \frac{1}{x} \quad (3.2)$$

Uma vez que se tem  $f$  que é a distância focal da lente e  $x$  que é o ponto medido pelo PSD, obtêm-se a distância ao objeto ( $D$ ). Tem-se então que a distância  $D$  é diretamente proporcional a ( $1/x$ ). Segundo Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), SIVs desse tipo possuem uma boa resolução com uma alta exatidão, quando utilizados para objetos próximos, numa distância entre 1m e 2m.

Os SIVs apresentam também a característica de diretividade. Comparando com os sensores ultrassônicos, os SIVs apresentam um feixe de detecção mais estreito, ou seja, são mais direcionais. Isso resulta numa maior precisão angular de medição, possibilitando a detecção de aberturas relativamente estreitas e que poderiam passar despercebidas com a utilização de sensores de ultrassom (DO; KIM, 2013).

Outra característica dos sensores infra-vermelho é sofrerem influência de outra fonte de luz. Devido a isso, sua utilização em ambientes externos ou internos que possuam outras fontes de iluminação pode ser comprometida. Uma estratégia para amenizar esse problema é a utilização de modulação do sinal emitido pelo sensor, dessa forma, o sinal refletido pelo obstáculo proveniente da interação com o SIV e captado pelo sensor é diferente da iluminação externa (LOBO et al., 1998). Essa mesma estratégia foi utilizada em Kim et al. (2005) para identificar o sinal emitido por cara um dos sensores presentes no robô, auxiliando assim a localização e ajuste de posição entre o robô e a estação de docagem.

### 3.1.1.3 Laser Scanner

O Laser Scanner (LS) é um tipo de sensor ativo que mede a distância entre o sensor e o objeto através da emissão de um feixe laser. Sendo um sensor ativo, é capaz de trabalhar no escuro ou em condições de baixa luminosidade, uma vez que tem sua fonte própria de emissão de sinal. Suas características de possuir boa precisão e exatidão de medida tornam desse tipo de sensor bastante efetivo na medição de distâncias, devido a isso, pode ser utilizado para solução de diversas tarefas no sensoriamento de robôs móveis (DUCHON et al., 2012). Além disso, o LS é capaz de fornecer uma grande densidade de dados, mesmo para longas faixas de medição (DO; KIM, 2013). Em Sasaki e Hashimoto (2009) e Brscic e Hashimoto (2006) o LS é utilizado para rastreamento de objetos. Segundo Do e Kim (2013), a utilização de laser scanner tem crescido bastante no número de aplicações em robótica móvel e veículos autônomos, tanto para evitar obstáculos, já utilizado em Negishi, Miura e Shirai (2004), quanto para construção de mapas, auxiliando na tarefa de navegação.

Os laser scanner operam tanto através do método TOF, quando do método de triangulação.

### **Sensores Laser Scan (*Time-of-flight*)**

Também conhecidos como Radar Ótico, LIDAR (*Light Detection and Ranging*, Detecção e Medição por Luz) ou LADAR (*Laser Detection and Ranging*, Detecção e Medição por Laser), os LSs que funcionam através do TOF possuem a vantagem de que, o feixe emitido e refletido são coaxiais, assim a exatidão das medições não dependem da distância, como ocorre na maioria dos sensores que utilizam o método de triangulação (KILPELÄ, 2004). Como mencionado, esses sensores podem trabalhar de 3 maneiras: medição de tempo, FM-CW e AM-CW. Segundo Hebert (2000), Kilpelä (2004) e Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), a grande maioria das aplicações utilizam sensores do tipo AM-CW e medição por tempo, sendo assim, essas estratégias de medição serão priorizadas nesse trabalho.

Os sensores que utilizam a medição direta de tempo, operam de maneira bastante semelhante aos sensores ultrassônicos. Um sinal laser modulado é emitido, ao entrar em contato com o objeto, reflete o sinal que, captado pelo sensor, mede-se a distância ao alvo uma vez que a velocidade da onda é conhecida. Contudo, visto que a velocidade da luz é de aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s, os dispositivos eletrônicos desse tipo de sensor devem operar numa velocidade bastante elevada, possuindo um tempo de resposta na faixa de picosegundos ( $1 \times 10^{-12}$  s). Devido às necessidades desses tipos de componentes eletrônicos, esses dispositivos são bastante caros (HEBERT, 2000). Esse aspecto da velocidade do feixe emitido faz com que esses sensores consigam ter um bom desempenho para longas distâncias (500, 600 metros, por exemplo). As taxas de aquisição de dados desses sensores são baixas, quando comparados a outros LS, que geralmente operam com distâncias menores.

Outra característica do método por medição direta de tempo é que sofrem influência de condições externas do ar como: neblina, fumaça ou poeira, por exemplo. A presença desses materiais dispersos no ar interagem com o sinal emitido, causando problemas de medição e, conseqüentemente, comprometendo a utilização em ambientes menos controlados, como por exemplo, aplicações em ambiente externo. Para minimizar esse efeito, esses tipos de sensores aplicam uma técnica chamada "medição de último pulso". Esta técnica consiste basicamente na consideração, para efeito de cálculo, apenas do último sinal de eco relevante, ou seja, com valor acima do *threshold*. Isso faz com que os sinais de eco provenientes das interações com a fumaça, poeira ou neblina, por exemplo, não sejam considerados, evitando assim os erros de medição (HEBERT, 2000).

Já os sensores que operam por AM-CW são rápidos e trabalham com limite de faixa de medição entre curta e média (dezenas de metros). Segundo Hebert (2000), esses tipos de sensores são mais sensíveis a interferência da luz externa, sendo mais indicados para aplicação *indoor*. O princípio de funcionamento baseia-se na medição da diferença de fase entre o feixe de onda emitido e refletido. Um onda com frequência conhecida e modulada em amplitude é emitida pelo emissor. Ao entrar em contato com o alvo, grande parte da onda é refletida, porém

com uma diferença de fase, como ilustrado na Figura 12.

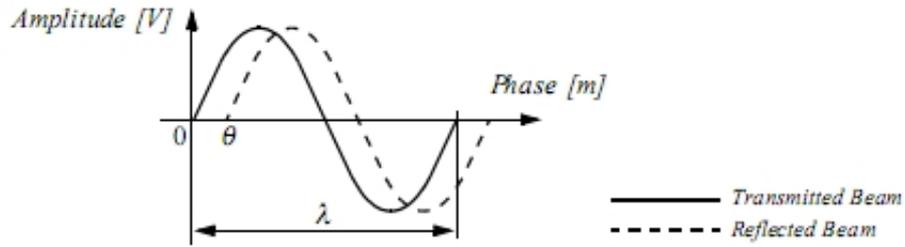


Figura 12 – Estimação de distância de LS por detecção de fase (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011)

Para objetos com a rugosidade maior que o comprimento de onda da onda incidente ocorre uma reflexão difusa, o que significa que a reflexão da onda ocorre de maneira isotrópica, ou seja, com a mesma velocidade. Considerando que o comprimento de onda esta na faixa de centenas de nanômetros uma vez que a frequência é na faixa de Megahertz, haverá problema na reflexão, ou seja, ela não será difusa apenas pra objetos extremamente polidos, o que faz com que esse tipo de sensor tenha uma boa aplicabilidade para detecção de diferentes tipos de objetos (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011).

A distância medida do alvo é obtida através da equação 3.3 onde  $D$  é a distância medida,  $\lambda$  o comprimento de onda do feixe emitido e  $\theta$  a diferença de fase entre a onda emitida e refletida.

$$D = \frac{\lambda}{4\pi} \theta \tag{3.3}$$

Considerando uma onda emitida com frequência  $f = 5MHz$ , tem-se que o comprimento de onda é de 60 m, visto que, como toda onda eletromagnética, o laser obedece a equação 3.4, onde  $c$  é a velocidade da luz,  $f$  a frequência de modulação da onda.

$$c = f * \lambda \tag{3.4}$$

Dessa forma, temos:

$$D' = \frac{60}{4\pi} \theta = \frac{15}{\pi} \theta \tag{3.5}$$

Considerando a relação de arcos cômputos, tem-se o mesmo valor de  $\theta$  para múltiplos inteiros de  $2\pi\theta$ , ou  $2\pi\theta k$  onde ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ). Se substituirmos na equação 3.5, tem-se:

$$D' = \frac{15}{\pi} 2\pi\theta k = 30\theta k \tag{3.6}$$

Logo, por 3.6 pode-se inferir que os valores de distância serão os mesmos para a detecção de arcos cômputos, gerando um "intervalo de ambiguidade". Contudo, segundo (SIEGWART;

NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011), na prática esse problema não ocorre pois, devido a atenuação do sinal no ar, a faixa de medição do sensor é bem abaixo do comprimento de onda utilizado. A faixa de medição confiável com sensores AM-CW é inversamente proporcional ao quadrado da amplitude do sinal refletido, afetando diretamente sua exatidão de medida. Nesse método, objetos distantes ou escuros não geram uma boa medição, justamente por essa relação (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011). Devido a essa característica, como mencionado, esses tipos de sensores operam com distâncias médias ou curtas.

### Sensor Laser Scanner por Triangulação

Os laser scanners que utilizam o método de triangulação podem ser de dois tipos: 1D e 2D. Os sensores 1D possuem o funcionamento exatamente da mesma forma que o sensor infravermelho que opera por esse método, com a diferença que a feixe emitido é de laser, ao invés de luz infravermelha.

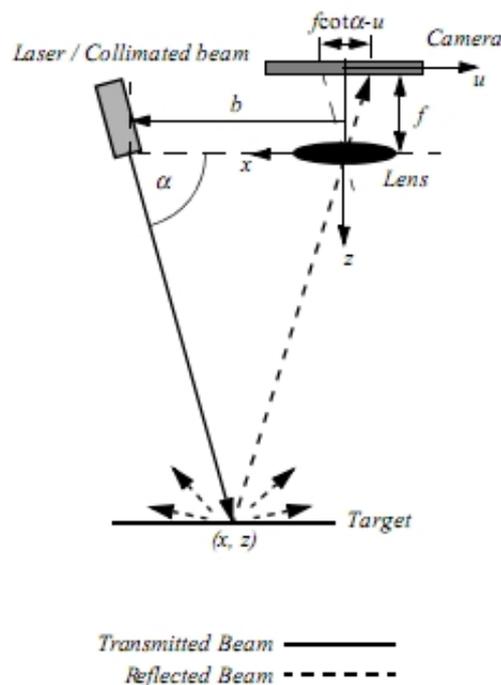


Figura 13 – Esquema de funcionamento de sensor laser scanner 2D (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011)

Os sensores 2D operam de forma bastante semelhante, com algumas alterações na sua estrutura. No lugar do PSD utiliza-se uma câmera CCD, capaz de medir pontos em um plano. A Figura 13 ilustra o esquema de funcionamento. Nessa topologia, o sensor possui um sistema mecânico que, através da utilização de espelhos móveis, varia a posição de  $\alpha$  fazendo uma varredura no sentido do eixo  $x$  mostrado na imagem. O valor de  $u$  também varia, mas esse é em função da distância ao objeto, sendo o ponto de projeção do sinal refletido na câmera CCD. Dessa forma, tem-se a informação de 2 dimensões, a valor do ponto no eixo  $x$  e no eixo  $z$  (valor

da distância medida). Esses valores são obtidos através da equação 3.7, onde  $f$  é a distância focal da lente e  $b$  é o *baseline* do sensor, ou seja, a distância entre a fonte emissora de laser e a lente.

$$x = \frac{b * u}{(f \cot \alpha) - u}; z = \frac{b * f}{(f \cot \alpha) - u} \quad (3.7)$$

Nesses sensores, a relação entre a resolução de imagem e a resolução de faixa de medição é dada pelo ganho de triangulação  $G_p$ , que é dado pela equação 3.8.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = G_p = \frac{b * f}{z^2} \quad (3.8)$$

A equação 3.8 mostra que a exatidão da medida, para uma determinada resolução de imagem, depende do valor do *baseline* do sensor ( $b$ ) e da distância focal de lente utilizada ( $f$ ), e que, diminui com o quadrado da distância aos objetos. Através dessa equação também pode-se entender uma das vantagens dos sensores TOF, em relação a faixa de medição, que é a não influência da exatidão de medida com a variação da distância. Assim, pode-se resumir algumas relações desses parâmetros construtivos com o desempenho do sensor, segundo Siegart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), tem-se que:

- *Baseline (b)*:
  - Define o tamanho do sensor;
  - Quanto maior, melhor a resolução do sensor;
  - O aumento de  $b$  pode levar a não detecção de objetos próximos, devido às limitações do ângulo de reflexão;
- *Distância focal (f)*:
  - Maior lente implica numa maior resolução, porém em piores características elétricas como ruído ou redução da largura de banda.
  - Uma distância focal maior, maior  $f$ , aumenta o campo de "visão" em detrimento da redução da exatidão do sensor e vice-versa.

#### 3.1.1.4 Análise Comparativa

Após pesquisa de diversos sensores e modelos, dentro dos tipos de sensores descritos acima, achou-se 3 sensores que atendiam as necessidades do projeto. Esses sensores foram:

- **Sensor Ultrassom:** LV-MaxSonar-EZ0
- **Sensor Infravermelho:** Sharp GP2Y0A02YK0F

- **Laser Scanner:** Hokuyo UTM-30LX

Esses sensores serão utilizados como base para a comparação e análise de qual é a melhor escolha pra ser aplicada , segundo os critérios utilizados nesse trabalho. Os critérios para escolha foram: preço, complexidade de implementação, peso, frequência de medição e ângulo de diretividade. Esses critérios serão melhor explicados para ter uma noção mais clara das razões que levaram a sua escolha.

1. **Preço:** O preço foi escolhido pois é um critério padrão em todos os projetos, afinal, todo projeto tem um orçamento e o seu desenvolvimento tem de estar dentro dessas condições. Quanto menor o preço, mais vantajoso é o sensor.
2. **Complexidade de Implementação:** Por complexidade de implementação entenda-se a necessidade e complexidade do algoritmo para a conversão de dados vindo do sensor em informação útil ao robô, para medição de distância e localização do obstáculo. Quanto menor a complexidade, melhor, pois requer menos tempo de implementação, o que se torna bastante atrativo, particularmente nesse projeto.
3. **Peso:** O peso foi escolhido por dois motivos. O primeiro deles foi a especificação de projeto. Segundo o cliente (CEMIG), o robô não poderia ultrapassar 14 Kg. Esse valor foi estipulado pois, para colocar o robô na linha seriam utilizados bastões de manobra, estes possuem uma comprimento de 3m logo, segundo o cliente, um peso acima do estabelecido tornaria essa atividade inviável para os operadores da linha de transmissão devido ao torque produzido na ponta do bastão. O segundo motivo é a solicitação de torque dos motores da junta que move a unidade manipuladora frontal. Como os sensores ficam na extremidade da unidade manipuladora, mesmo com pesos relativamente pequenos, devido ao braço de alavanca, pode tornar-se uma carga significativa para o motor movimentar. Com base nos motivos citados, busca-se sensores com o menor peso possível.
4. **Frequência de Medição:** A frequência de medição é a que taxa os sensores fazem medidas consecutivas. Esse critério foi escolhido pois, uma vez que o robô se move em direção ao obstáculo, pela própria configuração da linha, essa taxa pode determinar a velocidade máxima de deslocamento visto que, num intervalo entre uma medição e outra, o robô fica "cego", sem informações do ambiente a sua volta. Para evitar essa situação, uma frequência de medição elevada é interessante para esse projeto.
5. **Ângulo de Diretividade:** Como mencionado em 3.1.1.1, os sensores que emitem sinal possuem um ângulo em que conseguem detectar um objeto ou um anteparo. A utilização desse critério é justificada pois os obstáculos presentes nas linha de transmissão possuem algumas aberturas ou podem estar "desalinhados" com a trajetória do robô, assim, é interessante que o sensor possua um ângulo de abertura grande para aumentar a probabilidade

de detecção dos obstáculos. A Figura 14 mostra o grampo de suspensão da cadeia de isoladores com maior detalhe. Como mencionado anteriormente, esse será um dos obstáculos à ser transposto pelo PIRo. Nessa imagem, é possível observar algumas partes mais estreitas e aberturas, que poderiam comprometer a detecção no caso de sensores como ângulos estreitos. Para evitar esse problema de detecção, deseja-se ângulos grandes de diretividade do sensor.

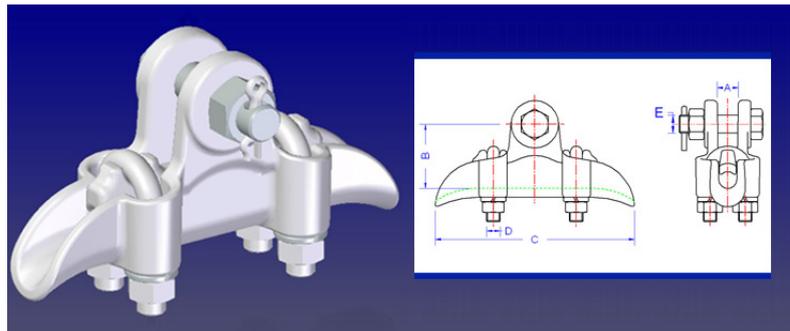


Figura 14 – Grampo de suspensão da cadeia de isoladores (FISHER, 2014)

As Figuras 15 e 16 mostram tabelas de comparação entre os 3 sensores. Utilizou-se 3 classificações, atribuindo um valor a cada uma delas, levando-se em conta as necessidades de cada critério. Assim, condições boas recebiam nota 5, medianas 3 e ruins 1. Foi também atribuído peso a cada critério, numa escala de 0 a 100, qual a relevância daquela característica na escolha do sensor. No final, é apresentado o somatório da pontuação de cada sensor.

Para melhor visualização, dividiu-se em 2 tabelas, uma qualitativa e uma quantitativa. Na qualitativa, apresentou-se as condições de bom, mediano ou ruim, junto com os valores utilizados como base para determinar essas condições, encontradas em MaxBotix Inc (2015), SHARP Electronics Co. Ltd. (2015) e Hokuyo Automatic Co. Ltd. (2015). Na tabela quantitativa estão as notas de cada critério, juntamente com o somatório total.

- (\*) : O critério de complexidade de implementação foi definido com base nas informações de saída dos sensores. O Max foi considerado o mais simples pois sua saída é simplesmente um sinal analógico, sendo necessário apenas multiplicar o sinal de saída por um fator para obtenção da distância. Já o Sharp apresenta uma curva de saída de tensão por distância, por isso, para realizar a conversão, é necessário levantar o modelo da curva. Essa tarefa não tem um grau de complexidade tão mais elevado que a realizada com o Max, mas como é uma comparação, foi considerada mediana. O Hokuyo apresenta uma série de pontos com informações de posição angular e distância, como o ângulo de varredura é de  $270^\circ$ , seria necessário um tratamento mais complexo desse sinal para poder diferenciar os obstáculos do cabo, por exemplo, que deve ser detectado durante o scaneamento, por essa razão, foi considerado mais complexo, sendo assim, ruim para os critérios adotados.

- (\*\*): O valor do ângulo de diretividade não foi encontrado em SHARP Electronics Co. Ltd. (2015), contudo, pela literatura, e como mencionado em Do e Kim (2013), considerou-se que o ângulo é menor que o do ultrassom.

| Tabela Qualitativa  |                      |                    |                     |
|---|----------------------|--------------------|---------------------|
| Critérios   | LV-MaxSonar-EZ0      | Sharp GP2Y0A02YK0F | Hokuyo UTM-30LX     |
| Preço (▼)   | Mediano (US\$ 26,60) | Bom (US\$ 11,28)   | Ruim (US\$ 4975,00) |
| Complexidade de Implementação (*) (▼)   | Bom                  | Mediano            | Ruim                |
| Peso (▼)  | Bom (5g)             | Bom (5g)           | Ruim (210g)         |
| Frequência de Medição (▲)   | Ruim (20Hz)          | Ruim (20Hz)        | Bom (40Hz)          |
| Ângulo de Diretividade (▲)  | Mediano (40°)        | Ruim (**)          | Bom (270°)          |
| Legenda:<br>(▼) = Deseja-se o menor possível (▲) = Deseja-se o maior possível |                      |                    |                     |

Figura 15 – Tabela qualitativa de avaliação

| Tabela Quantitativa                |                 |                  |                    |                  |                 |                  |
|------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Critérios (Peso)                   | LV-MaxSonar-EZ0 |                  | Sharp GP2Y0A02YK0F |                  | Hokuyo UTM-30LX |                  |
|                                    | Pontuação       | Pontuação x Peso | Pontuação          | Pontuação x Peso | Pontuação       | Pontuação x Peso |
| Preço (20)                         | 3               | 60               | 5                  | 100              | 1               | 20               |
| Complexidade de Implementação (30) | 5               | 150              | 3                  | 90               | 1               | 30               |
| Peso (15)                          | 5               | 75               | 5                  | 75               | 1               | 15               |
| Frequência de Medição (10)         | 1               | 10               | 1                  | 10               | 5               | 50               |
| Ângulo de Diretividade (25)        | 3               | 75               | 1                  | 25               | 5               | 125              |
| <b>Total</b>                       | <b>17</b>       | <b>370</b>       | <b>15</b>          | <b>300</b>       | <b>13</b>       | <b>240</b>       |

Figura 16 – Tabela quantitativa de avaliação

Os valores apresentados nos preços foram obtidos através de uma média de valores obtidos por 3 fornecedores diferentes, nos seguintes sites, em 20 de janeiro de 2015:

- LV-MaxSonar-EZ0: Roboshop , Amazon e Sparkfun
- Sharp GP2Y0A02YK0F: Roboshop, Sparkfun e Pololu
- Hokuyo UTM-30LX: Roboshop, Acroname e Robot in search

Assim, com base na análise realizada conclui-se que o sensor de ultrassom, LV-MaxSonar-EZ0 é o mais indicado para a aplicação no PIRO dentro das referidas condições.

## 3.2 SISTEMA DE POSICIONAMENTO

Segundo Borenstein et al. (1996), Leonard e Durrant-Whyte (1991) resumiu o problema da navegação de robôs móveis em 3 perguntas: "Onde estou?", "Onde estou indo?" e "Como devo chegar lá?". O sistema de posicionamento auxilia na resposta da primeira pergunta e pode ser dividido em 2 grandes grupos (BORENSTEIN et al., 1996):

### Medições de Posição Relativa

Os métodos de posicionamento relativos, também conhecido como *dead reckoning*, utilizam informações sobre a localização obtidas em instantes anteriores para estimar a posição atual do robô através de procedimentos matemáticos. Devido a utilizar valores de localização anteriores, este método de localização é susceptível a acumulo de erros, uma vez que pequenos erros nas medições anteriores, são acumulados e, com o passar do tempo, passam a ser significativos em relação ao valor da posição atual. Pode-se citar como exemplos de medições relativas:

- Odometria
- Navegação Inercial

### Medições de Posição Absoluta

Os métodos de posicionamento absolutos utilizam apenas as informações atuais dos sensores para definir a posição do robô, considerando um referencial absoluto fixo. Contudo, é importante salientar que, mesmo a localização sendo feita em relação a um referencial absoluto, esses métodos de posicionamento apresentam imprecisões devido aos ruídos oriundos dos sensores que são utilizados (SANTANA; MEDEIROS, ). São exemplos de sistemas absolutos:

- Reconhecimento de marcos naturais e artificiais
- *Map-matching*
- *Beacons* ativos
- GPS (Global Position System, Sistema de Posicionamento Global)

Os métodos absolutos apresentam maior complexidade e, conseqüentemente, necessitam de maior tempo de desenvolvimento e implementação. Como mencionado, o PIRo é o segundo protótipo desenvolvido no projeto e na sua execução, o fator tempo foi determinante para a tomada de algumas decisões. É bem conhecido que a odometria é método de posicionamento mais utilizado para robôs com rodas por apresentar boa exatidão de medição em pequenas distâncias, ser barato e simples de implementar (BORENSTEIN et al., 1997); (BEZERRA, 2004). Devido a isso, optou-se por utilizar a odometria como sistema de posicionamento uma vez que, na tarefa de ultrapassagem de obstáculo, as distâncias percorridas são pequenas. Dessa

forma, acreditou-se que essa técnica de posicionamento atenderia as condições de projeto, o que pôde ser constatado na implementação e que será melhor apresentado no capítulo de resultados desse trabalho. Sendo assim, faz-se necessário um maior detalhamento dessa técnica de posicionamento.

### 3.2.1 Odometria

Como já mencionado a odometria é o método mais utilizado em robôs móveis com rodas devido ao seu baixo custo, simplicidade e, até determinado ponto, eficiência (BEZERRA, 2004);(BORENSTEIN; FENG, 1996).

O método de odometria consiste em determinar a posição do robô através da integração do deslocamento incremental de suas rodas, medidos em relação a um referencial fixo. Normalmente, esse referencial fixo é o próprio solo. No caso do PIRo, o referencial fixo será o cabo da linha de transmissão pois, como pode ser visto na Figura 3, o robô move-se com suas rodas de tração apoiadas no cabo. Para exemplificar o funcionamento do método Bezerra (2004) traz um esquema bem simples e didático, Figura 17.

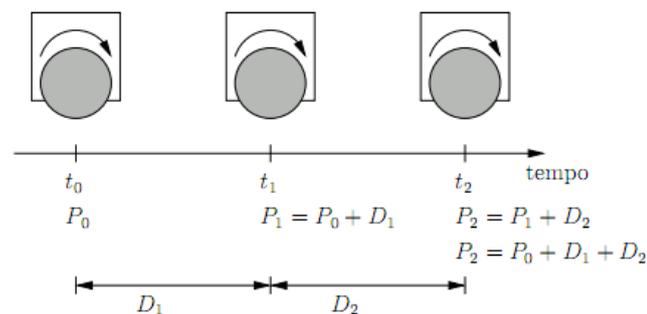


Figura 17 – Cálculo de posicionamento utilizando odometria (BEZERRA, 2004)

Considere um robô seguindo uma determinada trajetória. No instante  $t_0$  o robô encontra-se na posição  $P_0$  e inicia o deslocamento. No instante  $t_1$  o robô está na posição  $P_1$  que pode ser obtida somando-se a posição anterior  $P_0$  e o deslocamento  $D_1$ , ocorrido entre os instantes  $t_0$  e  $t_1$ . No instante seguinte  $t_2$ , a posição atual do robô ( $P_2$ ) é novamente calculada somando-se a posição anterior  $P_1$  com o deslocamento  $D_2$ . Dessa forma, pode-se encontrar a posição do robô através do incremento dos deslocamentos em relação a posição inicial. Pode-se então chegar a uma equação geral da posição em função dos deslocamentos:

$$P_1 = P_0 + (D_1 + \delta_1)$$

$$P_2 = P_1 + (D_2 + \delta_2)$$

$$P_3 = P_2 + (D_3 + \delta_3)$$

⋮

$$P_k = P_0 + \sum_{i=1}^k D_i + \sum_{i=1}^k \delta_i \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (3.9)$$

Onde  $P_k$  é a posição no instante  $k$ ,  $D_k$  o deslocamento do instante anterior para o atual e  $\delta_k$  o erro associado a esse deslocamento. Para calcular o deslocamento, necessita-se medir a rotação das rodas. É bastante comum a utilização de sensores chamados *encoders* para este fim (BORENSTEIN et al., 1996);(BEZERRA, 2004); (BORENSTEIN et al., 1997). Os tipos de *encoders* mais utilizados na robótica são os *encoders* óticos, tanto os incrementais como os absolutos.

Os *encoders* óticos funcionam baseados na emissão e recepção de luz através de um disco perfurado. Esse disco permite, ou não, a passagem de luz e a sensibilização dos receptores por parte dos emissores. Este disco fica preso no eixo do *encoder* que será acoplado ao eixo do sistema rotativo a ser medido, geralmente motores ou caixas de redução. Como mencionado, esse tipo de sensor pode ser dividido em 2 grupos: *encoders* incrementais ou relativos e *encoders* absolutos.

Os *encoders* incrementais possuem discos com orifícios igualmente espaçados, o que faz com que, seu sinal de saída seja um trem de pulsos. Geralmente possuem 2 canais de saída que apresentam uma defasagem entre eles. Essa defasagem permite que seja inferida a direção de giro do sensor. Com esse tipo de sensor, mede-se diretamente a velocidade de rotação do eixo, enquanto a posição relativa pode ser inferida (BORENSTEIN et al., 1996).

Segundo Borenstein et al. (1996), os *encoders* absolutos apresentam o disco onde os orifícios seguem um padrão de uma palavra binária. Esse tipo de *encoder* possui múltiplos receptores, cujo número está associado ao tamanho da palavra binária que irá determinar a resolução do sensor. Esses receptores então são sensibilizados seguindo o padrão do disco que, em cada parte, possui o padrão de orifícios referentes a posição angular absoluta. Com os *encoders* absolutos a medição da posição angular se dá de forma direta, enquanto que a velocidade é inferida. A Figura 18 ilustra a estrutura dos 2 tipos de *encoders*.

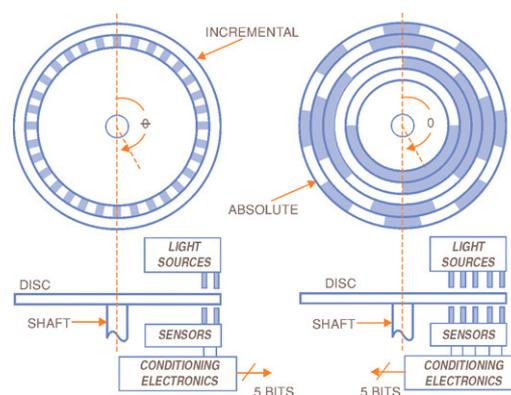


Figura 18 – *Encoders* incremental (esquerda) e absoluto (direita) **COLOCAR REFERENCIA**

Na odometria, assume-se que o deslocamento angular da roda do robô será convertida

em deslocamento linear do mesmo em relação ao referencial fixo. Essa premissa faz com que a odometria tenha uma precisão e eficácia limitada (BORENSTEIN; FENG, 1996). Um exemplo extremo de erro é a derrapagem. Considere um robô móvel sobre uma superfície extremamente lisa, como o gelo, por exemplo. Em uma condição extrema, ao girar suas rodas para se mover, o sistema de odometria iria indicar que o robô deslocou-se metros, enquanto que, provavelmente, terá se deslocado apenas alguns centímetros. Isso ocorre pois as rodas derraparíamos sobre o gelo sem fazer o robô se movimentar de fato.

Analisando a equação 3.9, observa-se que a estimação da posição atual é dada pelo incremento dos deslocamentos adicionado ao acúmulo dos erros. É possível então visualizar a limitação da técnica de odometria. Sendo diretamente influenciada pelos erros, essa técnica fica muito vulnerável a problemas de erro de modelo, imperfeições construtivas do robô ou características desfavoráveis do meio. Essas fontes de erros podem ser classificadas em *erros sistemáticos e não-sistemáticos*, segundo Borenstein e Feng (1996);Filho (2002), as principais causas dos erros são:

- **Erros sistemáticos**

- Diferença entre o diâmetro das rodas;
- Média do diâmetro das rodas diferente do diâmetro nominal;
- Comprimento do eixo diferente do comprimento nominal;
- Desalinhamento das rodas;
- Resolução finita dos *encoders*;
- Taxa de amostragem do *encoder* finita;

- **Erros não-sistemáticos**

- Terreno irregular;
- Objetos inesperados no caminho;
- Escorregamento das rodas devido a:
  - \* Terreno escorregadio;
  - \* Aceleração acentuada;
  - \* Forças internas;
  - \* Forças externas;
  - \* Falta de contato com a superfície;

Os erros sistemáticos são devido a problemas de incerteza do modelo do robô, que interferem diretamente no modelo cinemático ou devido a problemas de carácter construtivo. Esse erros são mais significativos na estimação final, uma vez que estão sempre presentes do

calculado da posição, sendo incrementados indefinidamente. Contudo, por se tratar de condições inerentes à plataforma robótica utilizada, podem ser compensados, até certo ponto, utilizando plataformas mais robustas e precisas ou ajustando determinados parâmetros no *software*. Para isso, algumas técnicas de calibração são desenvolvidas, como a apresentada em Borenstein e Feng (1996), que apresenta uma técnica de calibração para o sistema de odometria em um robô móvel com configuração de acionamento diferencial.

Já os erros não-sistemáticos são imprevisíveis e muito difíceis de serem tratados. Uma vez que dependem das condições do meio, estes ocorrem de forma inesperada e serão tão mais significativos e presentes, quanto mais dinâmico for o meio que o artefato robótico esteja se locomovendo.

Dessa forma, tem-se que a topologia escolhida para implementação no PIRO como sistema para auxiliar na detecção do obstáculo e posicionamento do robô durante a ultrapassagem foi a Topologia 1.

## 4 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Este capítulo foi dividido em duas seções. Primeiro a seção de implementação irá detalhar e discutir o processo de implementação dos sistemas de odometria e detecção de obstáculos através do sensor de ultrassom, fazendo descrição do hardware utilizado e explanação sobre os algoritmos desenvolvidos. Na segunda seção, será descrito o algoritmo e resultados da ultrapassagem do obstáculo, demonstrando assim a eficácia dos sistemas e algoritmos desenvolvidos.

### 4.1 IMPLEMENTAÇÃO

#### 4.1.1 Odometria

Como mencionado, o PIRO se movimenta através de rodas de tração que giram apoiadas nos cabos da linha de transmissão. Esse cabos são feitos de alumínio por ser um material bom condutor e leve, característica necessária a esses tipos de condutores uma vez que os vãos entre as torres são de centenas de metros.

A Figura 19 mostra em destaque a unidade de tração do PIRO. Como o nome sugere, esse sistema é responsável pela movimentação linear do robô ao longo da linha possibilitando seu deslocamento e realização da tarefa de inspeção.

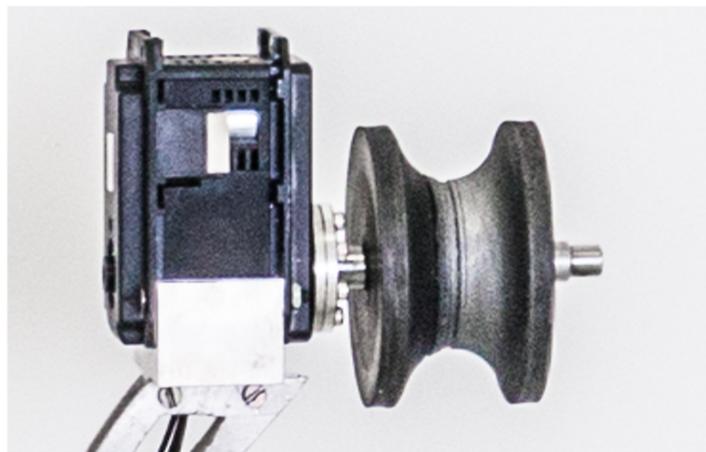


Figura 19 – Unidade de tração

As rodas são feitas de borracha, juntamente com o fato de o robô estar suspenso por elas, faz com que a força de atrito aumente, reduzindo bastante a possibilidade da ocorrência de escorregamento, uma das causas de erros em odometria. Durante os testes, o atrito mostrou-se bastante eficiente uma vez que não foi verificado escorregamento em nenhuma ocasião, tanto no cabo do laboratório no Senai CIMATEC, quanto no laboratório da CEMIG em Minas Gerais.

Outro aspecto importante da roda é seu formato. Ele é feito para que o cabo encaixe no meio, evitando escorregamento lateral, o que poderia causar uma queda do robô da linha. Contudo, a utilização desse formato trouxe alguns efeitos negativos. A roda foi feita de maneira manual, o que causa uma diferença natural do diâmetro interno entre elas, causando um erro inicial na odometria. Esse erro foi corrigido através de calibração e correção no código. Utilizou-se uma medida padrão de distância linear e comparou com o valor dado pelo programa, foram necessárias algumas correções no valor do diâmetro da roda até que o valor da odometria estivesse correto.

Uma outra característica importante da unidade de tração é o fato de o eixo do motor estar acoplado diretamente na roda, sem a utilização de sistemas de transmissão como engrenagens, polias ou correias. Casos sistemas como esses fossem necessários poderiam ocorrer problemas como deslizamento da correia, ou efeito de *backlash* nas engrenagens, por exemplo, o que causaria pequenos erros de medição, podendo levar a diferenças significativas de medição, tendo em vista o carácter acumulativo da odometria. Essa configuração também facilitou a medição de deslocamento das rodas pois, o motor utilizado, Dynamixel MX-106R, possui *encoder* interno, sendo desnecessário a utilização de um *encoder* nas rodas



Figura 20 – Motor Dynamixel MX-106R (ROBOTIS INC., 2014)

O Dynamixel MX-106R, Figura 20, é um servo motor multivolta, produzido pela empresa Robotis. Este modelo apresenta um torque máximo de 10,6 Nm e pesa aproximadamente 150g, o que o torna bastante interessante para aplicações em robótica uma vez que possui um elevado torque e um baixo peso. Sua alimentação é de 10 a 14,8V e se comunica através do protocolo RS-485 o que permite a comunicação de vários motores numa rede, onde cada um possui seu número de ID específico, parâmetro que pode ser configurado. Este motor possui um sistema de processamento interno que fornece algumas possibilidades de configurações e informações, como:

1. Controlador PID interno;

2. Possibilidade de configuração de 254 ID's diferentes (0-253)
3. *Encoder* absoluto com resolução de 12 bits(360°)
4. Limitação de torque
5. Acesso a informações como: temperatura, corrente, tensão, velocidade, posição, dentre outras.

Outra característica que torna esse motor bastante interessante é possuir 2 modos de operação, modo junta e modo *wheel* (roda). Isso fez com que fosse possível a utilização do mesmo motor para tração e movimentação das juntas do robô, facilitando a manutenção e substituição em caso de defeito ou queima, por exemplo. Em especial, o modelo 106, dos motores Dynamixel, podem operar também no modo mestre-escravo, o que facilita bastante a utilização conjunta e sincronizada de 2 motores, possibilitando dobrar o torque numa junta em que se utilize 2 motores nessa configuração, por exemplo. Particularmente no PIRO, a configuração mestre-escravo evitou a necessidade de utilização de sistemas de redução para aumento de torque nas juntas, condição que aumentaria a complexidade do controle de movimento e posição.

Na implementação do algoritmo de odometria, a escolha do ROS como *framework* de desenvolvimento foi bastante importante. O ROS já possui um pacote de bibliotecas para o Dynamixel, chamado "dynamixel\_motor". Esse pacote inclui diversos drivers e controladores, para vários modelos de motores Dynamixel, o que permite a integração desses motores com o ambiente do ROS, tornando possível a programação num nível de abstração mais alto.

O ROS funciona, de maneira bem simplificada, através de "nós" que se comunicam utilizando mensagens, que são pacotes com determinados tipos de informações. O pacote "dynamixel\_motor" também possui um padrão de mensagem, o "dynamixel\_msgs". Essa mensagem já tem atributos para disponibilização de informações como: tempo de medida, velocidade, posição, carga, entre outras. O ROS também possui o formato de mensagem de odometria, o *Odometry\_msgs*, com informação de velocidade angular e linear, posição angular e linear, covariância. Esses formatos de mensagens permitem que os dados sejam transmitidos em um padrão, garantindo a intercambialidade dos códigos, tanto dentro de um projeto quanto para ser disponibilizado e utilizado pela comunidade do ROS uma vez que, como mencionado, é um *framework* aberto e colaborativo.

Assim, considerando as condições citadas, a implementação do algoritmo de odometria se deu uma vez que, possuindo as informações de tempo e velocidade, obtêm-se de maneira simples o deslocamento e, através da equação 3.9, encontra-se a posição. Como o robô, durante a transposição do obstáculo, não mantém todas as unidades de tração no cabo, foram desenvolvidos 3 servidores de odometria: *front*, *center*, *back*. Dessa forma, garante-se que sempre haverá informação de posição disponível para a sistema de tomada de decisão. Na Figura 3, pode-se observar que as partes frontal e traseira possuem 2 unidades de tração. No desenvolvimento do

algoritmo do servidor de odometria, utilizou-se como saída a média entre essas 2 unidades, a fim de reduzir o impacto das diferenças de diâmetro da rodas, causada pela confecção manual, como já citado no trabalho. A Figura 21 ilustra o esquema desse algoritmo.

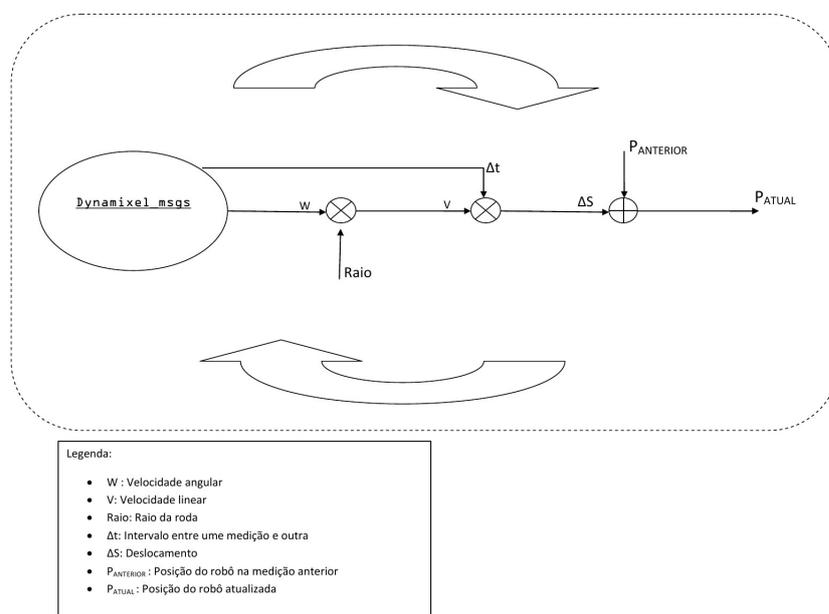


Figura 21 – Esquema de implementação da odometria

Dessa forma, como será melhor detalhado adiante, o sistema de odometria funcionou de forma satisfatória no objetivo de fornecer a posição do robô no processo de ultrapassagem de obstáculo.

#### 4.1.2 Detecção de Obstáculo

Na Figura 22, observa-se, em destaque, a unidade frontal do PIRO. Nela percebe-se 2 sensores LV-MaxSonar-EZ0, bem a frente do robô. Esses sensores foram colocados nessa disposição pois, os obstáculos a serem ultrapassados, principalmente, o grampo de suspensão e o amortecedor, Figura 2, estão um em cima e outro em baixo da linha, respectivamente, dessa forma, os sensores podem detectar ambos os obstáculos.

O sensor LV-MaxSensor-EZ0 é um sensor de medição ultrassônico que opera emitindo sinal em 42KHz. Sua faixa de alcance é de 30cm a 6,5m, aproximadamente. Como mencionado na tabela de comparação, sua taxa de medição é de 20Hz, com alimentação de 3,3 ou 5V. O sinal é emitido através de um "gatilho" em um determinado pino, ao receber o sinal de retorno, o valor da distância pode ser obtido de duas formas. A primeira delas é através de um sinal PWM com largura de pulso de  $147\mu s$  (microsegundos) por polegada. A segunda forma é um sinal analógico com fator de  $9,8mV/polegada$ , para alimentação de 5V, e  $6,4mV/polegada$ . O modo de leitura utilizado no robô foi o segundo.

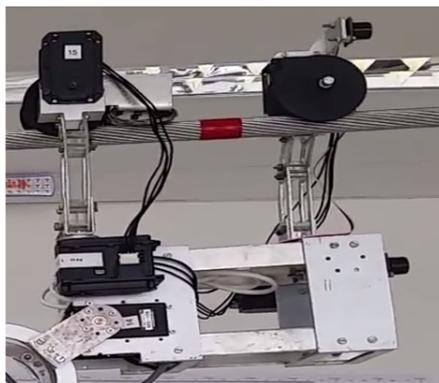


Figura 22 – Unidade frontal do robô PIRo

Para realizar interface do sensor com a NUC, utilizou-se um kit de interface da Phidgets, modelo 1019\_1. Essa placa possui 8 entradas analógicas, 8 entradas digitais, 8 saída digitais e funciona como hub usb com 6 portas. Para acessar as informações desse kit de interface utiliza-se um API (*Application Programming Interface* ou Interface de Programação de Aplicações), que são uma série de funções e programas que permitem acessar as funcionalidade da placa num nível de abstração de programação mais alto do que tratando as informações diretamente do *hardware*. Esse API tem compatibilidade com o Linux, dessa forma, para integrar as informações no ROS, foi necessário apenas a criação de um "nó" utilizando as funções da biblioteca do API e disponibilizando os dados no padrão utilizado pelo ROS.

Devido ao uso frequente na robótica, o ROS também já possui um formato de mensagens para sensores de distância, "sensor\_msgs" tanto para sensores infravermelho quanto de ultrassom. Esse formato de mensagem já possui os atributos de valor máximo e mínimo de medida, valor da distância, ângulo de medição de diretividade a ser considerado. Assim, para a implementação da medição do sensor, utilizou-se dessas condições para disponibilizar os dados de distância lidos pelos sensores e detectar os obstáculos que se encontravam a frente do robô.

## 4.2 RESULTADOS

Nesta seção, o algoritmo de ultrapassagem de obstáculos será melhor detalhado, com a descrição dos seus passos e ilustrações através de imagens retiradas de um vídeo gravado no cabo de teste instalado no laboratório do BIR. A nível de exemplo, será utilizado a ultrapassagem do grampo de suspensão, mas o robô se mostrou apto para a ultrapassagem tanto do amortecedor quanto da emenda.

1. **Aproximação:** O robô desloca-se pela linha utilizando apenas o sensor de ultrassom para monitorar obstáculos a sua frente, sem a necessidade de utilização da odometria, o que minimiza a possibilidade de erros de posição devido a longa extensão do cabo. Quando chega a uma distância de 30cm, distância mínima medida pelo MaxSonar, a velocidade

é reduzida e, a partir daí, o posicionamento é todo realizado a partir do algoritmo de odometria.



Figura 23 – PIRo aproximando-se do obstáculo

- 2. Ultrapassagem da unidade frontal:** Ao chegar próximo do grampo de suspensão, levanta-se a unidade frontal para que as rodas de tração não estejam mais apoiadas no cabo e as garras são "abertas" como pode ser visto na Figura 24. A unidade frontal então é abaixada para não se chocar com o grampo e o robô avança, Figura 25, levantando a unidade no outro lado do grampo de suspensão e apoiando novamente no cabo, situação ilustrada na Figura 26.



Figura 24 – PIRo com unidade frontal levantada e garras abertas



Figura 25 – PIRo avançando com unidade frontal abaixada



Figura 26 – Unidade frontal do PIRo apoiando-se no outro lado do obstáculo

- 3. Ultrapassagem da unidade central:** Na ultrapassagem da unidade central, o processo é semelhante, ela é levantada para soltar do cabo e gira  $180^\circ$  para evitar o contato com o grampo de suspensão e o parafuso que o prende a cadeia de isoladores. A PIRo então avança e a unidade central volta a posição inicial. Na Figura 27 pode ser visto a unidade central após virar os  $180^\circ$  e antes de se deslocar para o outro lado do grampo.



Figura 27 – Unidade central livre, possibilitando a ultrapassagem

- 4. Ultrapassagem da unidade traseira:** Para a ultrapassagem da unidade traseira o procedimento é igual a da unidade frontal. O robô se aproxima do grampo, a unidade é levantada, as garras abertas, abaixa-se a unidade e desloca-se para frente. A Figura 28 mostra o deslocamento para o outro lado do grampo de suspensão com a unidade traseira abaixada.



Figura 28 – Deslocamento do PIRo com a unidade traseira abaixada

Como mencionado, durante todo esse processo de ultrapassagem, o deslocamento é realizado através das informações fornecidas pelo sistema de odometria. Assim, tem-se a utilização do sensor ultrassônico e da odometria, auxiliando na tomada de decisão no processo de ultrapassagem. Foram realizados testes também, no laboratório de testes da CEMIG, localizado em Contagem-MG. Nesse laboratório foi instalado um cabo semelhante ao das linhas de transmissão e energizado com tensão de 138kV. Sobre essas condições o robô funcionou perfeitamente tanto locomovendo-se livremente pela linha, quanto ultrapassando um grampo de suspensão.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível ter um maior conhecimento das técnicas que foram implementadas no PIRO, o segundo protótipo do P&D 311, desenvolvido para a CEMIG. Pôde-se também fazer uma análise um pouco mais detalhadas e com parâmetros quantitativos acerca de qual o melhor tipo de sensor para a detecção de obstáculos, levando-se em consideração as condições de projeto à que o PIRO estava submetido.

Além da análise em termos bibliográficos, pode-se atestar a eficácia dos métodos escolhidos para auxiliar na ultrapassagem dos obstáculos, tanto do sistema de posicionamento quando do de detecção de obstáculos, através da implementação e testes no robô. Avaliou-se a eficácia, logrando êxito, sobre diferentes condições, tantos nas condições de teste no Senai CIMATEC, quando no galpão de teste da CEMIG, este segundo, sobre condições mais próximas das encontradas na aplicação real no campo.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma análise mais detalhada dos sistemas implementados, a fim de obter parâmetros quantitativos do desempenho, buscando a melhora contínua desse sistema, uma vez que as condições reais de trabalho são mais desafiadoras que as encontradas nos laboratórios de teste. Outro ponto a ser desenvolvido é a implementação dos outros sistemas planejados para o PIRO a fim de que este apresente sua funcionalidade completa. Sugere-se ainda testes após a implementação de técnicas de fusão de sensores para "unir" os dados de sensores de ultrassom e infra-vermelho, por exemplo, além do desenvolvimento de algoritmos de ultrapassagem dos outros obstáculos presentes na linha de transmissão. Por último, como todo projeto de inovação, sugere-se a avaliação de outras configurações mecânicas, a fim de se obter um robô mais eficiente, robusto e apresentando melhor desempenho.

# REFERÊNCIAS

- BEZERRA, C. G. *Localização de um robô móvel usando odometria e marcos naturais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004. Citado nas páginas 35, 36 e 37.
- BORENSTEIN, J. et al. Where am i? sensors and methods for mobile robot positioning. *University of Michigan, Citeseer*, v. 119, n. 120, p. 15, 1996. Citado nas páginas 35 e 37.
- BORENSTEIN, J. et al. *Mobile robot positioning-sensors and techniques*. [S.l.], 1997. Citado nas páginas 35 e 37.
- BORENSTEIN, J.; FENG, L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 12, n. 6, p. 869–880, 1996. Citado nas páginas 36, 38 e 39.
- BRSCIC, D.; HASHIMOTO, H. Tracking of objects in intelligent space using laser range finders. In: IEEE. *Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2006. p. 1723–1728. Citado na página 27.
- DEBENEST, P. et al. Expliner-robot for inspection of transmission lines. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 3978–3984. Citado nas páginas 15 e 16.
- DO, Y.; KIM, J. Infrared range sensor array for 3d sensing in robotic applications. *Int J Adv Robotic Sy*, v. 10, n. 193, 2013. Citado nas páginas 22, 23, 25, 27 e 34.
- DUCHON, F. et al. Some applications of laser rangefinder in mobile robotics. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, v. 14, n. 2, p. 50–57, 2012. Citado na página 27.
- EPE. type, *Balço Energético Nacional 2014:Ano base 2013 / Empresa de Pesquisa Energética*. 2014. Citado na página 14.
- FILHO, J. Hilário de Ávila V. *Uma Metodologia para Correção Dinâmica de Erros de Odometria em Robôs Móveis*. 2002. Citado na página 38.
- FISHER. *Fisher- Catálogo de Produtos*. 2014. Accessed: 10-01-2015. Disponível em: <[http://www.fischerweb.com.br/Catalogo/interna.asp?id\\_linha=14](http://www.fischerweb.com.br/Catalogo/interna.asp?id_linha=14)>. Citado na página 33.
- FULLER, J. L. *Robotics: Introduction, Programming and Projects*. [S.l.]: Prentice Hall, 1999. Citado na página 14.
- GANDHI, D.; CERVERA, E. Sensor covering of a robot arm for collision avoidance. In: IEEE. *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2003. v. 5, p. 4951–4955. Citado na página 25.
- HEBERT, M. Active and passive range sensing for robotics. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2000. v. 1, p. 102–110. Citado na página 28.

- HOKUYO AUTOMATIC CO. LTD. *Scanning Laser Range Finder UTM-30LX/LN Specification*. [S.l.], 2015. Disponível em: <[http://www.robotsinsearch.com/sites/default/files/literature/Hokuyo%20UTM-30LX%20Specifications/UTM-30LX\\_spec\\_en.pdf](http://www.robotsinsearch.com/sites/default/files/literature/Hokuyo%20UTM-30LX%20Specifications/UTM-30LX_spec_en.pdf)>. Citado na página 33.
- KILPELÄ, A. *Pulsed Time-of-flight Laser Range Finder Techniques for Fast, High Precision Measurement Application*. 2004. Citado na página 28.
- KIM, K. et al. Development of docking system for mobile robots using cheap infrared sensors. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Sensing Technology*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 287–291. Citado nas páginas 25 e 27.
- LEONARD, J. J.; DURRANT-WHYTE, H. F. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 376–382, 1991. Citado na página 35.
- LOBO, J. et al. Sensors for mobile robot navigation. In: *Autonomous Robotic Systems*. [S.l.]: Springer, 1998. p. 50–81. Citado nas páginas 26 e 27.
- MARCATO, A. L. M. *Controle de Trajetória Baseado em Visão Computacional Utilizando o Framework ROS*. Dissertação de Mestrado, 2013. Citado na página 19.
- MAXBOTIX INC. *LV-MaxSonar®-EZ0™ High Performance Sonar Range Finder*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.robotshop.com/media/files/pdf/lv-maxsonar-ez0-datasheet-mb1000.pdf>>. Citado na página 33.
- NEGISHI, Y.; MIURA, J.; SHIRAI, Y. Mobile robot navigation in unknown environments using omnidirectional stereo and laser range finder. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.], 2004. v. 3, p. 2737–2742. Citado na página 27.
- NEWTON C. BRAGA. *Como funcionam os sensores ultrassônicos (ART691)*. 2014. Accessed: 20-12-2014. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/5273-art691>>. Citado na página 25.
- OLIVEIRA, V.; LAGES, W. Comparação entre duas classes de robôs bracejadores subatuados utilizando controle preditivo baseado em modelo, viii simpósio brasileiro de automação inteligente, Florianópolis, Brasil. 2007. Citado na página 15.
- ONS. type, *Dados Relevantes 2006: Operação do Sistema Interligado Nacional*. 2006. Citado na página 15.
- QUIGLEY, M. et al. Ros: an open-source robot operating system. In: *ICRA workshop on open source software*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 3, n. 3.2, p. 5. Citado na página 19.
- RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P. Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados. In: *3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control ocorrido entre*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 14–16. Citado nas páginas 15, 16 e 17.
- ROBOTIS INC. *Robotis e-Manual v1.25.00*. 2014. Accessed: 11-01-2015. Disponível em: <[http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/mx\\_series/mx-106.htm](http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/mx_series/mx-106.htm)>. Citado na página 41.

- ROSÁRIO, J. M. *Princípios de mecatrônica*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2006. Citado nas páginas 11 e 14.
- SANTANA, A. M.; MEDEIROS, A. A. Localizacao de um rob^o movel baseada em odometria e marcos naturais utilizando filtro de kalman estendido. Citado na página 35.
- SASAKI, T.; HASHIMOTO, H. Calibration of laser range finders based on moving object tracking in intelligent space. In: IEEE. *Networking, Sensing and Control, 2009. ICNSC'09. International Conference on*. [S.l.], 2009. p. 620–625. Citado na página 27.
- SENAI - CIMATEC. *Memorial Descritivo - Robô de Inspeção de Linhas Vivas de 138 kV*. 1. ed. Avenida Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador, BA, 2013. Citado nas páginas 17 e 18.
- SHARP ELECTRONICS CO. LTD. *Distance Measuring Sensor Unit GP2Y0A02YK0F Datasheet*. [S.l.], 2015. Disponível em: <[https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk\\_e.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk_e.pdf)>. Citado nas páginas 33 e 34.
- SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. *Introduction to autonomous mobile robots*. [S.l.]: MIT press, 2011. Citado nas páginas 11, 12, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31.
- SILVEIRA, P. R. da; SANTOS, W. E. dos. *Automação e controle discreto*. [S.l.]: Érica, 2004. Citado na página 14.
- TOUSSAINT, K.; POULIOT, N.; MONTAMBAULT, S. Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 26, n. 5, p. 477–499, 2009. Citado na página 16.
- WEN, Y. J. et al. Infrared sensor based target following device for a mobile robot. In: IEEE. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 49–54. Citado na página 25.
- WOLF, D. F. et al. Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real. In: *Mini-Curso: Jornada de Atualização em Informática (JAI), Congresso da SBC*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado nas páginas 21 e 23.