

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

THIAGO ALBERTO CABRAL DA CRUZ

**Investigação e desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel
de suspensão passiva**

EESC/USP
Serviço de Pós Graduação
Protocolado em 03.07.2013


São Carlos
2012

THIAGO ALBERTO CABRAL DA CRUZ

**Investigação e desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel
de suspensão passiva**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.



Área de concentração: Dinâmica das máquinas e sistemas.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Becker

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE
DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA EESC-USP.

São Carlos
2012

Class.	TESE
Cutt.	8500
Tombo	T0146/13
Sysno	2,395905

32 100161124

15.07.13

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

CC957i

Cruz, Thiago Alberto Cabral da
Investigação e desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel de suspensão passiva / Thiago Alberto Cabral da Cruz; orientador Marcelo Becker. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica de Máquinas e Sistemas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Robôs móveis inteligentes. 2. Algoritmos genéticos. 3. Projeto simultâneo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **THIAGO ALBERTO CABRAL DA CRUZ**.

Título da dissertação: "Investigação e desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel de suspensão passiva".

Data da defesa: 12/04/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Marcelo Becker (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Daniel Varela Magalhães**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Eduardo do Valle Simões**
(Instituto de Ciências de Matemáticas e de Computação/ICMC)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que me ensinaram, confrontaram e acompanharam. E também aqueles que por ventura continuarem a desenvolver os trabalhos aqui expostos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer, pela paciência, conhecimento e companheirismo, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha formação intelectual e profissional e conseqüentemente a esta pesquisa.

Assim como, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), também agradeço a empresa Dietech Automação Industrial e Robótica Ltda., por seus apoios financeiros.

Por último, mas não com menos intensidade, agradeço ao Prof. Marcelo Becker, por me apoiar e acreditar neste trabalho.

RESUMO

CRUZ, T. A. C. **Investigação e desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel de suspensão passiva.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel de suspensão passiva, livre para a reprodução, bem como sua confecção, destinada à busca por objetos de interesse, tanto em ambientes desestruturados e dinâmicos quanto em locais estruturados. Para tais tarefas há a necessidade do robô possuir mecanismos que o permitam superar percalços como escadas, buracos ou formações rochosas. Além da aptidão para a navegação nos mais diversos ambientes. Tal plataforma deve possuir estrutura física que a possibilite levar os equipamentos necessários para a realização da tarefa objeto de interesse; tais como sensores laser, câmeras, manipuladores e etc. Usualmente, em robôs que são capazes de navegar nos mais diversos ambientes, são empregados mecanismos baseados em pernas ou esteiras. Tais abordagens possuem alguns empecilhos, como a baixa eficiência energética ou o complexo controle. Como alternativa a tais abordagens, é proposta uma morfologia mecânica baseada em dois robôs de duas rodas, unidos através de duas juntas universais e uma barra, para assim formar um robô de quatro rodas tracionantes e suspensão passiva. Como tais unidades robóticas possuem sistemas de tração diferencial o controle de mobilidade torna-se simples. Porém, devido às juntas universais, aos diferentes planos instantâneos de deslocamento entre as unidades robóticas e à robustez necessária para a navegação em ambientes desestruturados, o controle de cooperação entre as duas unidades não é trivial. Para se resolver tal tarefa, empregou-se o uso de um controlador baseado em algoritmos genéticos. Esta abordagem trata as unidades de forma independente, como dois robôs diferentes. O robô mestre sabe para onde e como deve ir, já o robô escravo, controlado através do algoritmo genético, deve cooperar de forma eficiente para que o mestre atinja seu objetivo. Tal controlador, por realizar poucas operações aritméticas e apenas algumas leituras periódicas de seis sensores proprioceptivos, pôde ser embarcado em um microcontrolador de reduzido consumo energético e custo. Isto proporciona uma maior autonomia energética, bem como uma maior facilidade para a construção de tal plataforma, uma vez que os custos financeiros são reduzidos.

Palavras chave: Robôs móveis Inteligentes, Algoritmos genéticos, Projeto simultâneo.

ABSTRACT

CRUZ, T. A. C. **Development and investigation of a mobile robotic platform with passive suspension.** 2013. Dissertation (Master Degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2013.

This work aims the development of a mobile robotic platform with passive suspension, copy free, directed to autonomous navigation in rough and dynamics terrain or structured places, seeking for objects of interest. Therefore the robot must be able to overcome large obstacles, such as rock formations, stairways and hollows. It also must possess physical structure to carry equipments necessary for the task in question. Equipments as laser sensors, cams, manipulator and etc. Usually to solve such challenge is employed legged or tracked robots. However, these approaches have some handicaps such as high energy consumption, complex control and complex mechanical structure. As an alternative is proposed a mechanical morphology based on a combination of two two-wheeled robots to form a four-wheel-drive platform with passive suspension. Independently, which robot is able to be controlled trough a differential model. But due the universal joints, the different displacement plans between the robots and the robustness necessary for rough terrain navigation the cooperation control between the robots is not trivial. To solve this problem was used a controller based on genetic algorithm. This approach treats the platform as two independently robots. The master robot knows how and where to go, while the slave robot controlled by the genetic algorithm must coop efficiently for that the master robot gets until its objective. The genetic controller realizes just a few arithmetic operations and sensor readings. This permits that this controller can be embedded into a micro-controller of low power consumption and low financial cost. This way, a bigger autonomy is achieved as a simpler and cheaper construction also is.

Keywords: Intelligent mobile robots, Genetic algorithm, Simultaneous project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ilustração artística, desenvolvida no software SolidWorks, da plataforma proposta de quatro rodas motrizes	2
Figura 2- Robô de tração diferencial Pioneer P3 DX.....	7
Figura 3 – Robô de rodas planetárias Parent Child Robot	8
Figura 4 – Robô de rodas e esteiras NEZA I	9
Figura 5 – Robô de seis pernas HITCR-II	10
Figura 6 – Robô saltador dotado de apenas uma perna SAHR	11
Figura 7 – Humanóide NÃO, robô de duas pernas	12
Figura 8 – Robô híbrido HyLoS2, dotado de quatro pernas e quatro rodas	13
Figura 9 – Robô híbrido Chariot III, dotado de quatro pernas e duas rodas.....	14
Figura 10 – Robô híbrido RT-Mover a	15
Figura 11 - Robô híbrido RT-Mover b	16
Figura 12 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto mecânico	18
Figura 13 – Diagrama de corpo livre do robô de duas rodas	20
Figura 14 – Robô de quatro rodas, solução proposta	21
Figura 15 - Transmissão ShockBurst. Fonte: (LAIPAC TECH, 2012).....	23
Figura 16 - Consumo energético do modo ShockBurst. Fonte: (LAIPAC TECH, 2012).	24
Figura 17 - Mecanismo de aferição do ângulo relativo entre o robô e a barra de união	24
Figura 18 - Organograma da eletrônica embarcada.....	25
Figura 19 - PCI da eletrônica embarcada.....	25
Figura 20 – Plataforma simulada dinamicamente subindo escada em ambiente da (ODE)	28

Figura 21 - Plataforma simulada dinamicamente subindo caixote em ambiente da (ODE)	29
Figura 22 – Ilustração do pontos após o crossover.....	31
Figura 23 – Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 1%	32
Figura 24 - Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 3%	32
Figura 25 - Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 5%	33
Figura 26 - Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 10%	33
Figura 27 - Diagrama de "fuzzificação" do ângulo entre o robô e a barra de união ..	35
Figura 28 - Diagrama de "fuzificação" da diferença de velocidades entres as rodas dos robôs.....	35
Figura 29 - Diagrama de "defuzzificação" do ângulo entre a barra de união e o robô	36
Figura 30 - Diagrama de "defuzzificação" da diferença de velocidades.....	37
Figura 31 - Gráfico comparativo do ângulo entre a barra de união e o robô entre os controladores fuzzy e AG	39
Figura 32 - Gráfico comparativo da diferença de velocidades das rodas direitas dos robôs entre os controladores fuzzy e AG	40
Figura 33 - Gráfico comparativo da diferença de velocidades das rodas esquerdas dos robôs entre os controladores fuzzy e AG.....	40
Figura 34 - Perceptron desenvolvido como filtro dos sinais provenientes do sonar ..	42
Figura 35 - Ambiente simulado de parede para o treinamento da rede neural do sistema anti colisão	43
Figura 36 - Erro inserido na largura do pulso simulada para o treinamento da rede neural do sistema anti colisão	43
Figura 37 - Resposta da rede neural do sistema anti colisão no período de aprendizado.....	44
Figura 38 - Resposta da rede neural após o período de convergência.....	44
Figura 39 - Síntese do circuito de aferição da corrente que transpassam os motores	

das duas plataformas robóticas.....	47
Figura 40 – Fotografia da plataforma real transpondo obstáculo	49
Figura 41 - Fotografia da plataforma real subindo uma escada	49
Figura 42 - Fotografia da plataforma real em configuração do robô escravo defasado em 180 graus em row.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
AG	Algoritmo Genético
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FIFO	First In First Out
I/O	Input Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
ISM	Industrial, Scientific and Medical radio Bands
LPM	Low Power Mode
ODE	Open Dynamics Engine
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random-access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computing
RMS	Root Mean Square
RS232	Recommended Standard 232 (<i>TIA-232-F Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange</i>)
SOC	System On Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

CM	Centro de massa
d	Distância entre o centro de massa e o centro de rotação das rodas
Mm	Momento desenvolvido pelo motor
F _n	Força normal
F	Pontuação do indivíduo
α, β, δ	Fatores multiplicativos
$\Delta \sum_i$	Somatório dos ângulos entre os robôs e a barra de união
$\Delta \varphi_2$	Somatório das correntes do robô escravo
$\Delta \varphi_1$	Somatório das correntes do robô mestre
PPw	Predicted Pulse Width
Pw	Pulse Width

SUMÁRIO

RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS	XXI
SUMÁRIO.....	XXIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Solução proposta	2
1.1.1. Aplicações.....	3
1.2. Objetivo do projeto.....	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	5
2. MORFOLOGIAS MECÂNICAS.....	6
2.1. Robôs baseados em rolagem.....	7
2.1.1. Pioneer P3-DX	7
2.1.2. Parent-Child Robot.....	8
2.1.3. NEZA-I.....	9
2.2. Robôs baseados em pernas	9
2.2.1. HITCR-II	10
2.2.2. SAHR.....	11
2.2.3. NAO	12
2.3. Robôs de sistemas híbridos	13
2.3.1. HyLoS2.....	13

2.3.2.	Chariot III.....	14
2.3.3.	RT-Mover	14
3.	METODOLOGIA	17
3.1.	Projeto Mecânico	18
3.1.1.	Plataforma robótica de duas rodas	19
3.1.2.	Plataforma robótica de quatro rodas	20
3.2.	Sistema eletrônico.....	22
3.3.	Algoritmo de controle	25
3.4.	Simulações	27
3.5.	Controlador Genético.....	29
3.5.1.	Gerador de números pseudo aleatórios.....	34
3.6.	Sistema Fuzzy	34
3.7.	Fuzzy X AG.....	39
3.8.	Sistema anti-colisão	40
3.8.1.	Rede neural	41
4.	TESTES	45
4.1.	Eletrônica de potência.....	45
4.2.	Sensor de corrente	46
4.3.	ROBÔ MESTRE	47
4.4.	Robô escravo.....	48
5.	CONCLUSÃO	51
5.1.	Trabalhos futuros	51
5.1.1.	<i>Driver</i> de Potência	51
5.1.2.	Interface com Player/Stage/Gazebo	52
5.1.3.	Sistema anti-colisão	52
5.1.4.	Função de fitness	53
5.1.5.	Neuro-fuzzy	53
5.1.6.	Análise energética	53

5.1.7. Motores	54
6. REFERÊNCIAS	55
7. ANEXOS.....	62

1. INTRODUÇÃO

Com o advento e a evolução da robótica, cada vez mais, tarefas maçantes ou perigosas são destinadas às máquinas automatizadas ou autônomas (ALMIRIB; AL-QRIMLI; KUMAR, 2011) (PARASSURAMAN; SHERIDAN; WICKENS, 2000). Porém, para algumas destas tarefas como estocagem e logística de armazéns, missões de busca e resgate, inspeções de áreas de desastres e etc. faz-se necessária a mobilidade (DUBOWSKY et al., 2002) (CHEN et al., 2010) (DANTU et al., 2004). Tal habilidade manifesta-se tanto em quesitos de autonomia energética quanto na capacidade de deslocação e conseqüentemente na capacidade de superação de obstáculos (SHEENI; SCHÄFER; HIRZINGER, 2010) (BOXERBAUM et al., 2012).

Em ambientes naturais, estes percalços podem existir na forma de buracos no terreno, formações rochosas ou áreas de baixo atrito (lama e areia). Já em locais estruturados como prédios e residências os empecilhos podem se manifestar na forma de escadas, rampas e áreas de grande atrito (carpetes) (KLEIN et al., 2012) (BRUNNER; BRÜGGEMANN; SCHULZ, 2012). Assim, a robótica exploratória é um dos mais instigantes campos da tecnologia moderna e esta conjuntura justifica-se pela necessidade destes robôs possuírem algoritmos de controle não triviais, estrutura mecânica que os possibilite percorrer grande distâncias em terrenos irregulares e dinâmicos e sem interferência humana.

Pelos motivos acima expostos, uma plataforma robótica móvel, destinada à navegação em ambientes desestruturados e estruturados deve possuir a habilidade de navegar em áreas externas, sem perder a tração em nenhuma de suas rodas. Ter uma morfologia mecânica que a permita superar obstáculos, muitas vezes maiores que sua própria altura, além de possuir um reduzido peso e tamanho para aumentar sua autonomia energética e ser capaz de navegar em locais de reduzido espaço.

As abordagens geralmente utilizadas para o tratamento destes casos é a utilização de mecanismos baseados em esteiras ou pernas. Como robôs com esteiras se submetem a um alto escorregamento lateral, quando em curvas, tal abordagem torna-se inviável em pisos delicados, com carpete ou em um jardim

residencial com gramado. Os robôs com mecanismos de propulsão baseados em pernas além de apresentarem um alto consumo energético e um controle complexo, apresentam um alto custo financeiro de construção, uma vez que os mecanismos mecânicos e componentes eletroeletrônicos são sofisticados (KIM et al., 2012).

1.1. Solução proposta

De acordo com (Faiña et al., 2009) as necessidades e capacidades de um robô são alteradas de acordo com a morfologia empregada. Assim, considerando-se as problemáticas apresentadas, alta capacidade de deslocação em ambientes internos e externos, reduzido tamanho e peso, simplicidade construtiva e de controle e reduzido custo financeiro, para que tal plataforma possa ser amplamente replicada em universidades e centros de pesquisa, propõem-se como solução para a morfologia mecânica um sistema baseado em dois robôs de duas rodas cada, para formar uma plataforma de quatro rodas motrizes e suspensão passiva (Fig. 1).



Figura 1- Ilustração artística, desenvolvida no software SolidWorks, da plataforma proposta de quatro rodas motrizes

Estas duas unidades são unidas entre si através de uma barra e duas juntas universais. Tal abordagem forma uma plataforma de quatro rodas motrizes e suspensão passiva, o que privilegia o contato entre o solo e as rodas. Estas juntas, são fixadas em cada uma das unidades robóticas e possuem seus ângulos de *pitch* e *yall* livres de -17° a $+17^\circ$ e o *roll* de livre de -180° a $+180^\circ$.

Como cada unidade robótica possui seu centro de massa abaixo do eixo de rotação das rodas e estas possuem diâmetro de 26 polegadas, maior que as dimensões externas do robô, a unidade robótica é uma estrutura pendular. Fato que garante seu equilíbrio estático.

A motivação pela utilização de tal configuração reside nos seguintes fatos:

- Observação da dinâmica e capacidades de cada unidade robótica. Tal robô possui grande agilidade e desenvoltura para se locomover em ambientes internos e externos, sendo a grande problemática deste projeto a altura dos obstáculos a serem superados em cenários quase estáticos.
- Simplicidade construtiva e de controle. Basicamente, o robô é constituído de uma caixa de alumínio, utilizada para enclausurar a eletrônica embarcada e suportar equipamentos para testes e experimentos, dois motorreductores e duas rodas de bicicleta. O controle cinemático é dado por um modelo de tração diferencial. Assim, facilmente se controla a deslocação do robô.
- Adaptabilidade ao terreno da plataforma de quatro rodas. Este robô conserva quase todas as características de adaptabilidade ao terreno de cada unidade robótica. Podendo assumir diversas configurações e diferentes planos de deslocação.

1.1.1. Aplicações

Devido ao tamanho das rodas o peso e à desenvoltura da plataforma, este robô pode servir para os propósitos a seguir, entre diversos outros:

- Plataforma de pesquisa. Facilmente, embarcam-se sensores e dispositivos

para as mais diversas pesquisas em robótica móvel. Pesquisas em navegação (MENDES, 2012), localização (ZOU et al., 2012), planejamento de trajetórias (WEI et al., 2012), controle de cooperação (MUSTAFA et al., 2012), visão computacional (MORI et al., 2012), controle de armazéns (VIVALDINI et al., 2011) e etc.

- Guia turístico. Como esta plataforma é capaz de subir escadas, ela pode ser empregada como guia turístico em museus, institutos, universidades (LI et al., 2012) e etc.
- Plataforma de busca e resgate (TUNA; GUNGOR; GULEZ, 2012). Este robô pode ser empregado em locais de alta periculosidade como em ambientes de desastres, ameaças e etc.
- Dispositivo de inspeção. Devido à mobilidade que tal plataforma possui, ela pode ser empregada em inspeção de circuitos de gás natural e petróleo (RAFFAELI et al., 2012), tendo-se que apenas adicionar os sensores necessários à localização e à inspeção.

1.2. Objetivo do projeto

Tal trabalho possui como objetivo demonstrar a viabilidade de um projeto simples, de baixo custo financeiro na área de robôs móveis destinados à navegação em ambientes internos e externos, bem como a construção de um protótipo para a validação dos resultados obtidos nas simulações.

Assim como a construção de um protótipo, intentou-se a elaboração de um material de divulgação de tal projeto para que o mesmo possa ser replicado ou modificado por quem assim o desejar.

Juntamente com uma cópia do material de divulgação, o protótipo construído será doado ao Laboratório de Robótica Móvel da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

1.3. Estrutura da dissertação

Na introdução, primeiro capítulo, faz-se uma abordagem sobre os problemas encontrados em robótica móvel, bem como a apresentação do objetivo do trabalho e da solução proposta para tais empecilhos.

No segundo capítulo, discorre-se sobre as principais morfologia da robótica móvel, bem como suas capacidades e limitações.

No capítulo adiante, descreve-se os métodos e procedimentos realizados durante esta pesquisa, começando pelos procedimentos para a confecção do projeto mecânico, eletrônico e computacional, bem como, os componentes utilizados e as simulações realizadas, juntamente com seus resultados.

Na quarta seção são apresentados os resultados obtidos durante as a fase de implementação no sistema físico, bem como as problemáticas encontradas.

Após, é tecido a conclusão e a exposição dos trabalhos futuros. Trabalhos que foram descobertos durante a realização deste projeto.

2. MORFOLOGIAS MECÂNICAS

Existem três formas construtivas básicas de robôs móveis. Os baseados em rolagem (rodas ou esteiras), os dotados de pernas e aqueles que possuem um mecanismo de propulsão híbrido (rolagem e pernas). Cada um destes sistemas possui suas vantagens e suas limitações (BRUZZONE; QUAGLIA, 2012).

Aqueles robôs que possuem rodas apresentam um sistema construtivo e de controle simples, além de serem energeticamente mais eficientes que robôs baseados em esteiras ou pernas (MACHADO; SILVA, 2006) (BOTELHO et al., 2011). Porém, são limitados quando à transposição de obstáculos, pois se suas rodas perderem o contato com o solo, perderão sua capacidade de locomoção (MICHAUD et al., 2005).

Os dotados de esteiras possuem a vantagem de conseguirem navegar melhor que os baseados em rodas ou pernas em locais de baixo atrito (RANJAN et al., 2009), como um terreno com lama. Tais robôs, apesar de consumirem menos energia que os robôs com pernas, eles dispendem uma grande quantidade de energia para realizarem curvas ou se deslocarem em movimento retilíneo, devido ao grande atrito de suas esteiras no solo, além de serem impraticáveis em ambientes com piso delicado como carpetes ou grama.

Por sua vez, os robôs que utilizam pernas para se locomoverem, adaptam-se bem à terrenos irregulares (WEI et al., 2011) mas, possuem sistemas construtivos complexos além de seus controladores também o serem (WANG; CHAOVALITWONGSE; BABUSKA, 2012) (PIJUAN et al., 2012).

Já os sistemas híbridos, dotados de rodas ou esteiras e pernas unem a eficiência energética da rolagem à adaptabilidade para terrenos irregulares dos robôs baseados em pernas (KOOS; MOURET, 2011). Porém, como mais acionadores são adicionados o custo financeiro e computacional aumenta, bem como sua complexidade construtiva e de controle.

A seguir, alguns trabalhos em robótica móvel são apresentados e brevemente discutidos sobre suas características, potencialidades e limitações.

2.1. Robôs baseados em rolagem

Geralmente, tal morfologia é a mais simples em quesitos construtivos e de controle. Porém, com o decorrer e a evolução das pesquisas em robótica móvel, muitos resultados foram obtidos e diversos outros problemas foram encontrados. Um dos principais problemas encontrados é a habilidade limitada que tais dispositivos possuem para navegar em terrenos irregulares. Assim, vários mecanismos foram agregados à estrutura simples de tais robôs em uma tentativa de contornar tais empecilhos. Abaixo, são citados alguns destes robôs.

2.1.1. Pioneer P3-DX

Este robô (Fig. 2) é amplamente utilizado em universidades e centros de pesquisa em robótica móvel. Ele possui um sistema de tração diferencial, o que torna seu controle simples, porém, devido ao tamanho de suas rodas e à sua estrutura mecânica, tal plataforma é limitada em ambientes de terreno irregular. (ADEPT TECHNOLOGY, 2011)



Figura 2- Robô de tração diferencial Pioneer P3 DX

2.1.2. Parent-Child Robot

Este sistema de robôs, composto por um pai e dois filhos (Fig. 3), possui como mecanismo propulsor principal do robô pai, seis rodas planetárias. Tais rodas, em conjunto com o chassis articulado, fazem com que o robô pai seja capaz de escalar obstáculos. Quando em ambientes de reduzido espaço livre para locomoção, o robô pai libera os outros dois robôs filhos. Devido à configuração morfológica, tal robô é incapaz de galgar obstáculos com ângulos de inclinação entre 40 e 90 graus ou maiores que 90 graus (YANG et al., 2009), além de facilmente perder a tração em suas rodas, devido ao reduzido tamanho das mesmas.

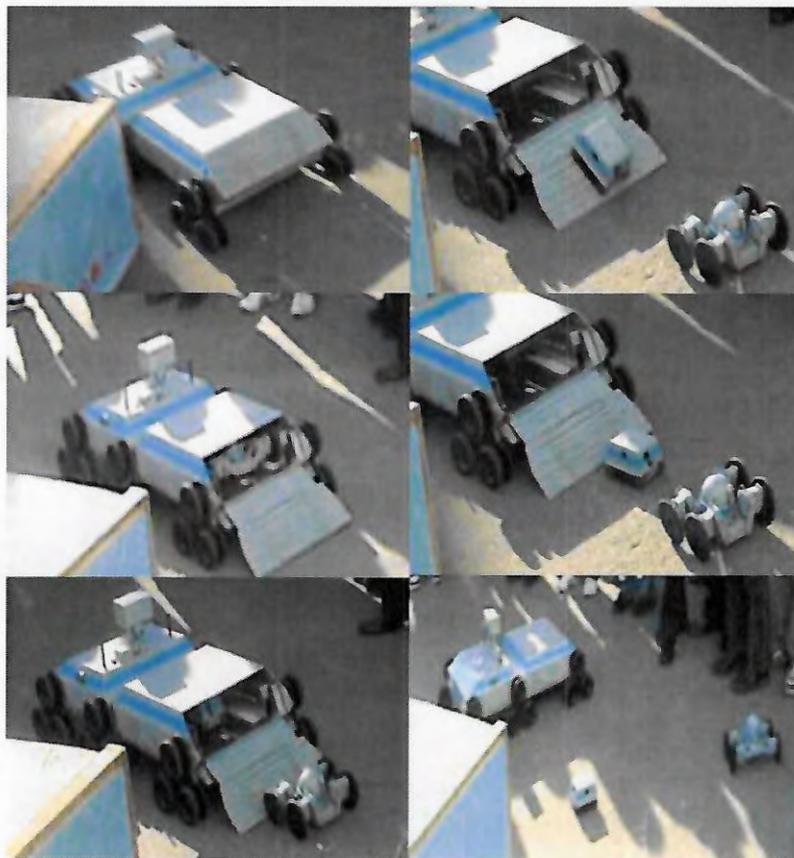


Figura 3 – Robô de rodas planetárias Parent Child Robot

2.1.3. NEZA-I

Este robô (Fig. 4) é baseado em um mecanismo híbrido de esteiras e rodas. Este mecanismo possui a capacidade de se auto adaptar ao tipo de terreno e solicitação. Tal adaptação dá-se através de um sistema mecânico elaborado que de acordo com a tração despendida para a locomoção e algumas molas, ajusta o mecanismo de propulsão para o terreno em questão. Assim, tal robô é capaz de navegar de forma energeticamente eficiente e superar diversos percalços (LI et al., 2010). Entretanto, como seus mecanismos de adaptação são elaborados, seu peso e seus custos financeiros são altos.

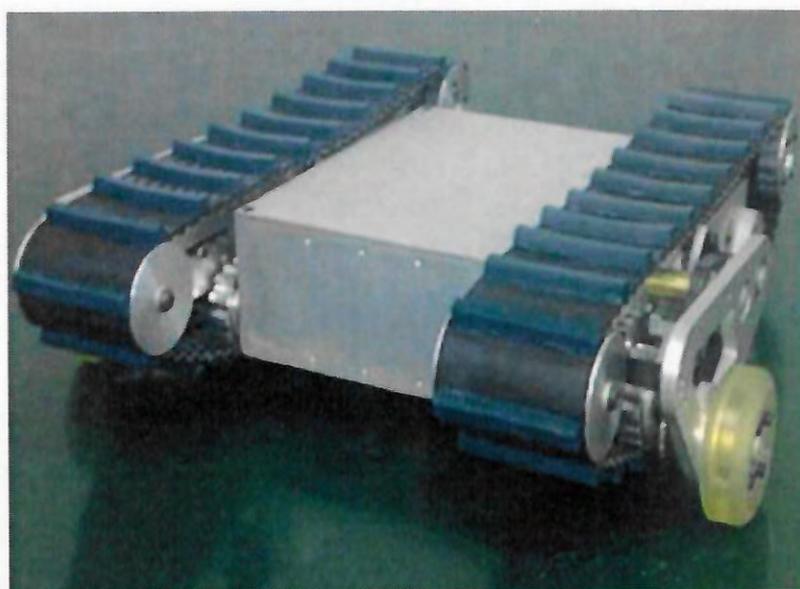


Figura 4 – Robô de rodas e esteiras NEZA I

2.2. Robôs baseados em pernas

Tão grande como o número de robôs baseados em pernas é grande a variedade do número de pernas em cada robô. Facilmente, encontram-se robôs de

uma, duas, três, quatro, seis ou oito pernas. Cada projeto possui seu foco, ou reduzir o número de atuadores, ou aumentar a estabilidade, ou agregar funcionalidades a algumas pernas, funcionando como garras e etc. Abaixo, apresentam-se alguns de tais projetos.

2.2.1. HITCR-II

Este robô (Fig. 5) é baseado em um mecanismo de seis pernas. Cada uma possui três graus de liberdade, totalizando 18 atuadores. A vantagem de se ter um sistema com 6 pernas é que sempre se tem 3 pontos de contato com o solo, o que torna o caminhar mais simples, sem haver a necessidade de colocar o robô momentaneamente em desequilíbrio (ZHAO et al., 2012). Porém, a tarefa de coordenar e controlar 18 atuadores não é simples, não podendo ser realizada por um microcontrolador.



Figura 5 – Robô de seis pernas HITCR-II

2.2.2. SAHR

Na tentativa de minimizar o número de atuadores, Nicholas Cherouvim e Evangelos Papadopoulos propõem um robô saltador (Fig. 6), dotado apenas de uma perna. Como demonstrado, tal dispositivo possui a capacidade de navegar em terrenos irregulares (CHEROUVIM; PAPADOUPOLOS, 2009). Porém, sua estabilidade é crítica, sendo assim, inviável em aplicações que envolvam alto risco.



Figura 6 – Robô saltador dotado de apenas uma perna SAHR

2.2.3. NAO

Este humanóide (Fig. 7) é um robô de duas pernas desenvolvido por Aldebaran Robotics. Em 2007 NAO substituiu o robô Aibo da Sony na Robot Soccer World Cup e desde então vem largamente sendo utilizado em pesquisas robóticas sendo hoje fácil de encontrar muitos algoritmos para localização, controle e planejamento. Porém, com seus 25 graus de liberdade e sua altura de 58 cm, tal plataforma possui capacidade limitada de navegação (GOUAILLIER et al., 2009).

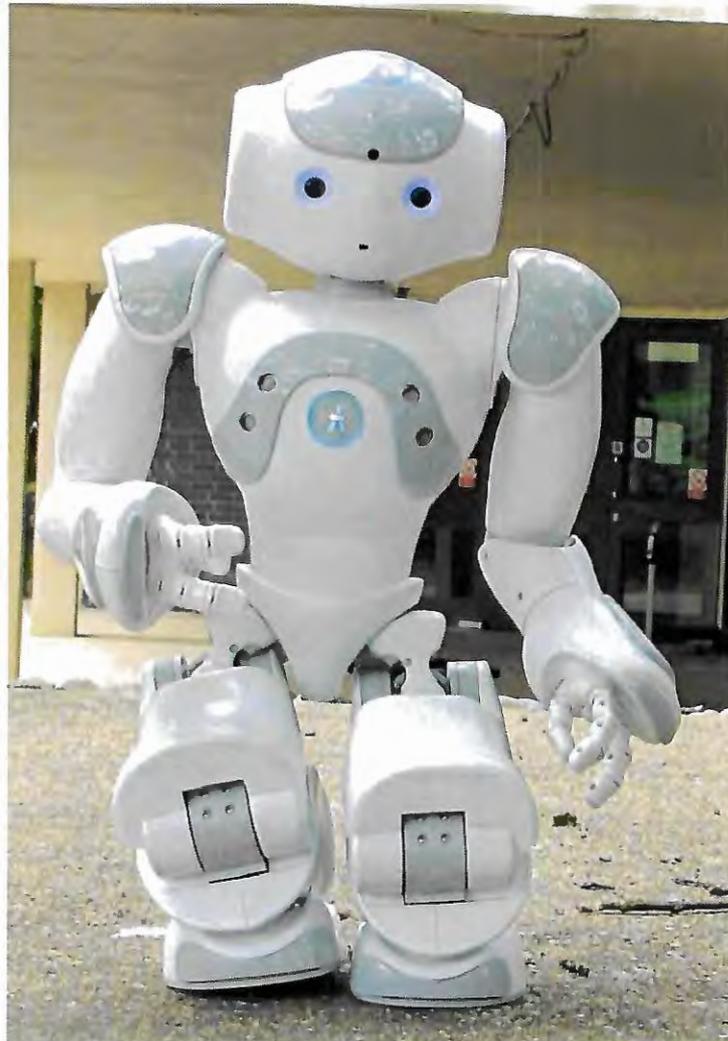


Figura 7 – Humanóide NAO, robô de duas pernas

2.3. Robôs de sistemas híbridos

Os robôs dotados de uma combinação de mecanismos de rolagem e pernas tentam combinar a eficiência energética dos mecanismos de rolagem com a capacidade de superar percalços dos robôs baseados em pernas. Assim, quando em deslocação em um terreno plano, tais robôs utilizam seus sistemas de rolagem e quando em situação de transposição de percalços, utilizam seus sistemas de pernas.

2.3.1. HyLoS2

Este robô é um sistema híbrido de rodas e pernas (Fig. 8), em que as rodas localizam-se onde seria o ponto de contato das pernas com o solo. Estes mecanismos lidam com a alteração do centro de massa da plataforma para superar os obstáculos (JARRAULT; GRAND; BIDAUD, 2011). Geralmente, nesta classe de robôs é acrescentado de uma ou duas vezes o número de atuadores. Se o robô possui quatro rodas motrizes, são acrescentados mais quatro ou oito atuadores para se construir o mecanismo das pernas. Isto eleva o custo do projeto, assim como a complexidade de controle.



Figura 8 – Robô híbrido HyLoS2, dotado de quatro pernas e quatro rodas

2.3.2. Chariot III

Nesta plataforma utiliza-se, ao mesmo tempo, um sistema baseado em rodas e pernas (Fig. 9). Tal abordagem é empregada para se utilizar a estabilidade dinâmica de um sistema baseado em rodas com a capacidade de transposição das pernas. As pernas do robô são capazes de empurrá-lo e puxá-lo para fazer com que o mesmo transpasse os obstáculos (NAKAJIMA; NAKANO, 2009). Mas, como tal abordagem utiliza ao mesmo tempo os mecanismos baseados em pernas e as rodas, pouco se ganha no quesito energético.



Figura 9 – Robô híbrido Chariot III, dotado de quatro pernas e duas rodas

2.3.3. RT-Mover

Em especial é citado este trabalho baseado em sistemas híbridos. Tal ação é realizada tanto pela simplicidade conceitual e eficiência energética do trabalho, quanto por sua similaridade com o projeto aqui exposto.

Este projeto é baseado em um robô de quatro rodas motrizes e suspensão ativa. Além dos quatro acionadores das rodas, esta plataforma utiliza mais cinco

acionadores para se locomover em ambientes desestruturados e ao mesmo tempo manter sua plataforma superior no nível do horizonte (NAKAJIMA, 2009). Se não fosse necessário o controle da plataforma superior, um dos nove acionadores poderiam ser descartados.

Este robô quando percebe um obstáculo, inclina o eixo de união entre as rodas dianteiras em relação ao horizonte. Após, utiliza outro acionador, que permite a plataforma deslocar-se com uma arquitetura de Ackerman, para avançar a roda levantada sobre o obstáculo. Assim, o procedimento é repetido até que todas as rodas transpassem o obstáculo.

Desta forma, apenas quando necessário e com alta eficiência energética o robô utiliza suas “pernas” para transpor os obstáculos. Abaixo, nas figuras 10 e 11 o robô encontra-se em transposição de alguns percalços.



Figura 10 – Robô híbrido RT-Mover a



Figura 11 - Robô híbrido RT-Mover b

3. METODOLOGIA

Para se atingir o objetivo deste trabalho primeiramente teve-se que modelar a unidade robótica de duas rodas, desenvolvida no ano de 2007, em ambiente de *computer aided design* (CAD) para a modelagem em três dimensões (3D). O software utilizado foi o SolidWorks¹. Após, foi transposto tal modelo para o ambiente de simulação dinâmica 3D e assim, pode-se validar o modelo. Após a validação do modelo da unidade robótica, esta foi modificada para a união com a outra unidade em ambiente de CAD 3D.

Dotado do modelo físico da plataforma de quatro rodas, modelado em ambiente de CAD 3D, novamente um modelo no ambiente de simulação dinâmica foi construído. Assim, em um processo iterativo de modelagem 3D, simulação dinâmica 3D e análise estrutural, através de um software de *computer aided engineering* (CAE), denominado ANSYS², as partes e componentes mecânicos da plataforma foram otimizadas para as cargas, solicitações e desempenhos necessários.

Estando o projeto mecânico pronto, passou-se para elaboração do projeto eletrônico de potência e de controle da plataforma. Tal projeto teve como imposições a eficiência energética, a simplicidade construtiva e o reduzido custo financeiro, atentando-se para os elementos necessários para os mais diversos tipos de algoritmos de controle.

Após o desenvolvimento da eletrônica embarcada, algumas classes de controladores foram estudadas e entre essas algumas foram implementadas e simuladas em ambiente 3D, juntamente com o modelo mecânico e eletrônico da plataforma.

Através destes procedimentos, conseguiu-se validar a idéia do projeto, além de reunir resultados suficientes para a construção do protótipo e a escolha do controlador a ser proposto para a plataforma robótica. Adiante, cada passo e procedimento acima brevemente citado serão aprofundados e esclarecidos.

¹ <http://www.solidworksbrasil.com.br/>

² <http://www.ansys.com/>

3.1. Projeto Mecânico

Como o objetivo desta plataforma é a exploração de ambientes tanto controlados/estruturados quanto não controlados/desestruturados, buscando objetos de interesse, a morfologia mecânica deste robô deve possuir a capacidade de navegação e de carga para tais ambientes. O robô deve ser capaz de carregar os sensores, os computadores e os dispositivos necessários à realização da tarefa desejada, além de ser capaz de navegar até seu objetivo. Logo, o trabalho inicial deste projeto reside na estrutura mecânica desta plataforma.

Assim sendo, o procedimento de projeto mecânico deu-se através de um processo iterativo de modelagem 3D, simulação estrutural com análise de elementos finitos e simulações dinâmicas em ambiente 3D (CRUZ; BECKER; SIMÕES, 2012).

Inicialmente, as unidades robóticas de duas rodas foram aperfeiçoadas e modificadas para união através de modelagem em ambiente 3D. Após, o modelo do software de análise estrutural foi atualizado e otimizado. Sendo o desempenho estrutural satisfatório, atualizava-se o modelo construído no software de simulações dinâmicas 3D e analisava-se o comportamento global do robô. O programa de simulação dinâmica é baseado na biblioteca *Open Dynamics Engine* (ODE)³. Sendo ambos os comportamentos, estrutural e dinâmico, satisfatórios, elaborou-se a documentação correlata para a fabricação, montagem e de compra. O fluxograma abaixo (Fig. 12) ilustra tal procedimento.

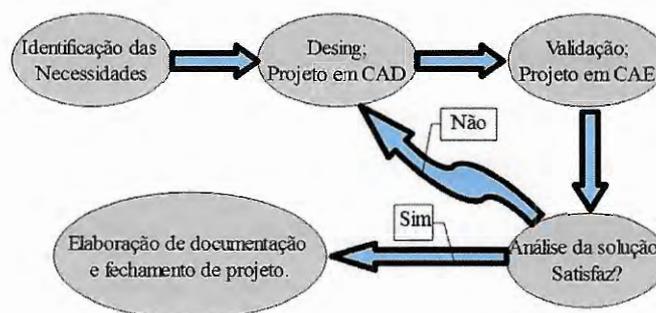


Figura 12 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto mecânico

³ <http://www.ode.org/>

Por meio deste procedimento interativo de projeto mecânico, conseguiu-se projetar, validar e construir a plataforma sem o desperdício de materiais. Pois, o protótipo foi construído e colocado a testes, sem que nenhum elemento mecânico necessite-se de posterior ajuste ou ser reprojetoado.

3.1.1. Plataforma robótica de duas rodas

Este robô (SIMÕES, 2008) é constituído, basicamente, de duas rodas de bicicleta de 26 polegadas de diâmetro e uma caixa de alumínio, utilizada para acomodar a eletrônica embarcada. Possui, internamente à caixa de alumínio, um volume livre de 20 litros e externamente, na tampa superior, um espaço livre de 400 mm por 330 mm. A estrutura desta plataforma foi projetada para suportar uma carga extra de 30 Kg.

Todo o projeto, após ser modelado em ambiente de CAD, foi submetido a uma otimização estrutural, através de análise de elementos finitos, na qual as dimensões de todas as peças foram ajustadas para o tipo de solicitação e carga a qual serão submetidas. Após a otimização, as novas dimensões eram ajustadas no modelo 3D.

Para a redução do peso da plataforma, foi analisada a estrutura necessária em uma liga de alumínio (AL5052) e aço carbono (SAE1020). Mesmo as dimensões das peças em aço serem menores que as de alumínio, o peso total da plataforma em aço é superior à de alumínio. Além de que, para muitos componentes baseados em aço, a espessura do material necessário não é comercial. Tal fato implicaria ou na adição extra de peso ou no aumento do custo financeiro do projeto. Assim, todo o projeto é baseado em peças de alumínio, sendo o único componente em aço SAE1045 os eixos de tração das rodas.

Como o centro de massa (CM na Fig. 13) se localiza abaixo do centro de rotação das rodas, o robô se torna um pêndulo e seu modelo matemático é construído como tal. Assim, a habilidade de transposição de obstáculos, em um cenário quase estático, é limitada pela distância entre o centro de massa e o centro

de rotação das rodas (d na Fig. 13). Uma vez que o torque desenvolvido pelo motor (M_m na Fig. 13) é capaz de fazer com que o robô gire completamente sobre o eixo de rotação das rodas ou superar a componente horizontal da força normal (F_n na Fig. 13), quando em transposição de obstáculos.

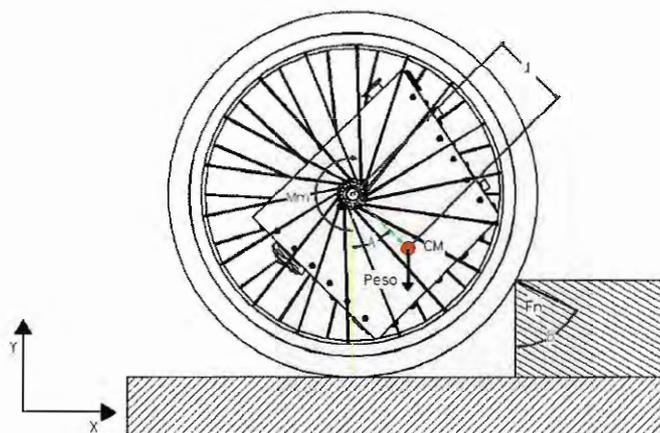


Figura 13 – Diagrama de corpo livre do robô de duas rodas

A motivação pela utilização desta morfologia mecânica encontra-se na agilidade que a plataforma possui em esgueirar-se entre obstáculos, na sua peculiar dinâmica, em sua simplicidade construtiva, em seu fácil controle e no seu reduzido custo de confecção.

Devido ao tamanho das rodas, e aos dois motorreductores de corrente-contínua de 24V e 48Nm (Bosch F 006 WM0 310), esta plataforma locomove-se facilmente em praças, parques e salas.

3.1.2. Plataforma robótica de quatro rodas

O cerne deste projeto encontra-se no movimento relativo entre as plataformas, proporcionado pelas rótulas. Isto faz com que o robô possa navegar em regiões de terreno acidentado, sem perder a tração em nenhuma roda. Além deste

fato, a plataforma é capaz de escalar obstáculos em “canto vivo” com alturas de 63 cm. A Figura 14 é uma foto artística de tal robô.

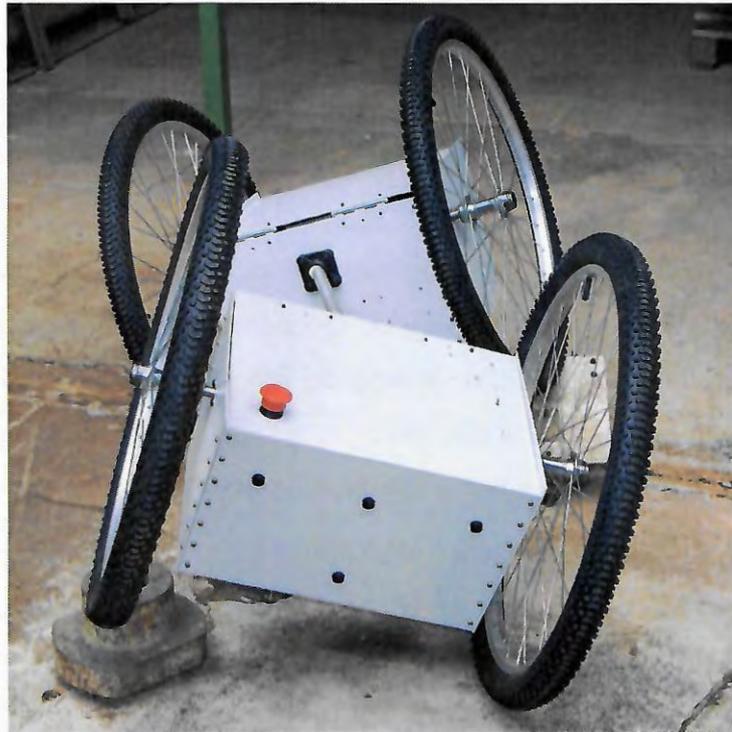


Figura 14 – Robô de quatro rodas, solução proposta

Quando em transposição de algum obstáculo, devido à configuração utilizada, sempre se tem uma unidade consumindo energia para elevar a plataforma e a outra unidade consumindo energia para levar a plataforma adiante. Isto possibilita o robô escalar obstáculos maiores que sua altura. A posição de fixação das rótulas, na mesma altura do centro de rotação das rodas foi escolhida por ser a que menos restringe o movimento pendular dos módulos robóticos e não compromete, significativamente, a habilidade de escalada da plataforma.

3.2. Sistema eletrônico

Assim como uma morfologia mecânica inteligente, (Nassiraei; Ishii, 2007), a eletrônica embarcada do robô também deve ser projetada para que o mesmo se torne energeticamente mais eficiente, permitindo que a plataforma utilize a energia armazenada para a realização de tarefas e para aumentar sua autonomia, ao invés de ser dissipada como calor.

Baseando-se no fato acima citado, a eletrônica embarcada, tanto de potência, quanto de sinal foi projetada. O controle da plataforma é baseado em um microcontrolador de consumo energético ultra baixo. Tal classe de controladores, cujo fabricante é a Texas Instruments, consome aproximadamente 1,1 μA em *Low Power Mode* (LPM) e pode ser alimentado com tensões de 1,8 a 3,6V.

O controlador escolhido, MSP430F1611(Texas Instruments a, 2012), possui arquitetura RISC de 16 bits, 48KB de memória Flash e 10KB de memória RAM, disponíveis ao usuário. Além de, 8 canais de conversão analógica-digital com resolução de 12 bits, 2 canais de conversão digital-analógica, também com resolução de 12 bits, 2 *Timers* de 16 bits com 16 canais de captura e comparação, duas portas de comunicação serial com capacidade de trabalhar em modo assíncrono ou síncrono, USART, I2C e SPI e 48 portas de I/O.

A eletrônica de potência é baseada no componente DRV8842 (Texas Instruments b, 2012), também da Texas Instruments. Tal componente é uma ponte-H completa, capaz de entregar 5A de pico e 3,5A RMS em 24V. O controle de potência pode ser efetuado tanto através dos 32 níveis de corrente que podem ser ajustados de forma dinâmica ou através de controle de *Pulse Width Modulation* (PWM). A escolha deste componente deu-se pelo seu compacto tamanho, alta eficiência energética e por ser uma solução completa.

Para o sistema de proteção contra choques, empregou-se a utilização de sonares da MaxBotix *LV-MaxSonar[®]-EZ1[™]*. Este sensor pode ser alimentado com tensões de 2,5V a 5,5V, fornecendo leituras de distâncias de 0 a 6,5m com resolução de 2cm. Tais leituras são fornecidas com uma taxa de atualização de 20Hz através de largura de pulso (147 μs /pol), saída analógica (Vcc/512/pol) ou serial.

O sistema de proteção contra choques é um sistema que opera em baixo nível. Caso o robô não receba nenhum comando de desvio ou para parar e exista algum objeto em menos de 0,5m do robô e em sua rota de colisão, o robô automaticamente desviará do objeto em questão. Tal sistema será melhor descrito na seção que descreve o algoritmo controlador.

Para a comunicação entre as duas unidades robóticas ou para a comunicação entre as unidades e um computador base, utiliza-se um sistema baseado em rádios TRF 2.4G Transceiver (LAIPAC TECH, 2012). Tal rádio opera na banda ISM de 2,4 a 2,5 GHz, utiliza a tecnologia *ShockBurst*, transmitindo dados em 1Mb/s, é alimentado com 3.3V, possui consumo máximo de 18mA e pode receber dados de duas fontes diferentes ao mesmo tempo.

A escolha deste rádio deu-se principalmente por seu baixo consumo, devido ao emprego da tecnologia *ShockBurst*. Esta tecnologia utiliza uma fila (*FIFO – First In First Out*) para fazer a aquisição dos dados do microcontrolador a uma taxa de transmissão baixa e realizar uma transmissão dos dados a uma alta taxa de transferência (Fig. 15).

Este modo de transmissão além de reduzir drasticamente o consumo de energia (Fig. 16) reduz também o risco de colisões de dados no ar.

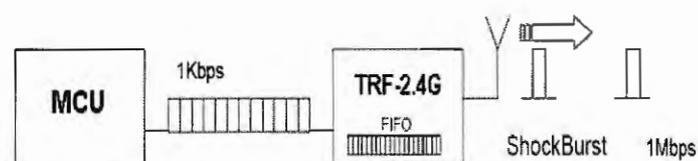


Figura 15 - Transmissão ShockBurst. Fonte: (LAIPAC TECH, 2012).

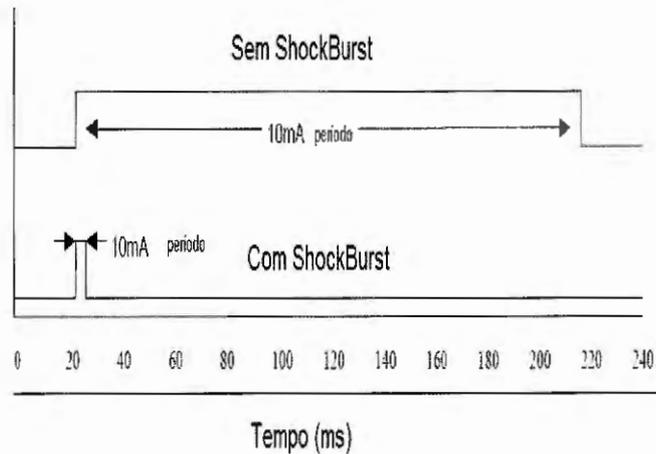


Figura 16 - Consumo energético do modo ShockBurst. Fonte: (LAIPAC TECH, 2012).

Para se realizar a aferição do ângulo de posição relativa entre as unidades robóticas, utilizou-se um *encoder* magnético (AS5043) (AUSTRIA MICROSYSTEMS, 2012) da Austria Microsystems. Tal *encoder* é uma solução do tipo system-on-chip (SOC), combinando elementos de efeito Hall, *front end* analógico e processamento digital de sinais em um único circuito integrado.

Através deste componente e mecanismo da figura 17, afere-se o ângulo entre o robô e a barra de união com uma precisão de 10 bits. Ou seja, $360^\circ/1024 = 0,352^\circ$. A leitura dos dados do encoder é realizada através de uma interface analógica-digital de resolução de 12 bits.

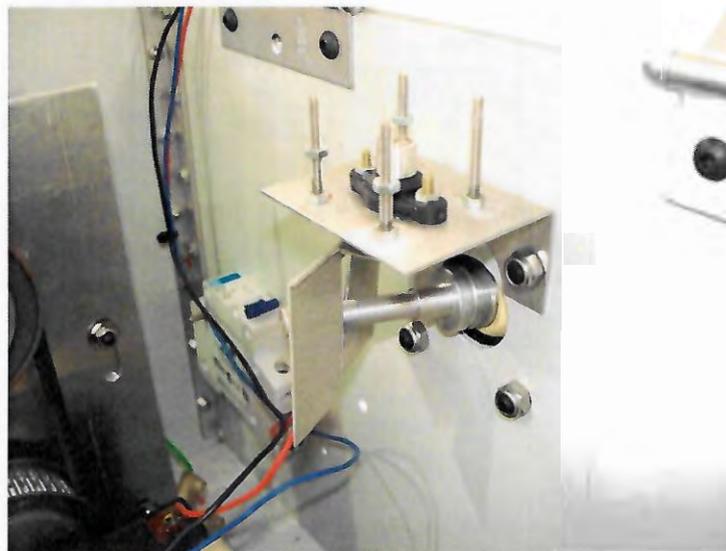


Figura 17 - Mecanismo de aferição do ângulo relativo entre o robô e a barra de união

Na figura 18, encontra-se o arranjo eletrônico de cada unidade robótica. Como se percebe na figura, existem mais dois canais de comunicação em padrão RS232 para a eventual comunicação com um computador embarcado.

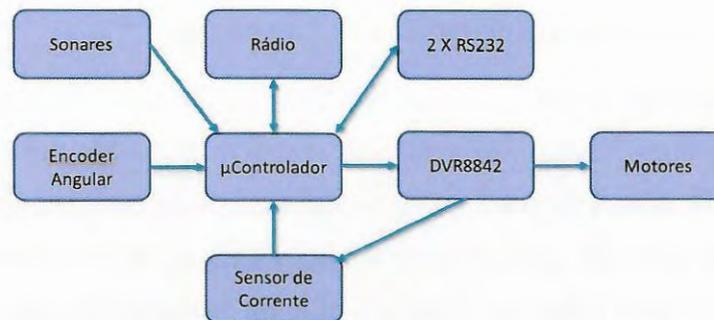


Figura 18 - Organograma da eletrônica embarcada

A figura abaixo (Fig. 19) é uma foto da placa de circuito impressa com cada elemento acima citado em destaque. Esta placa de duas camadas possui dimensões de 9 cm por 5,5 cm.

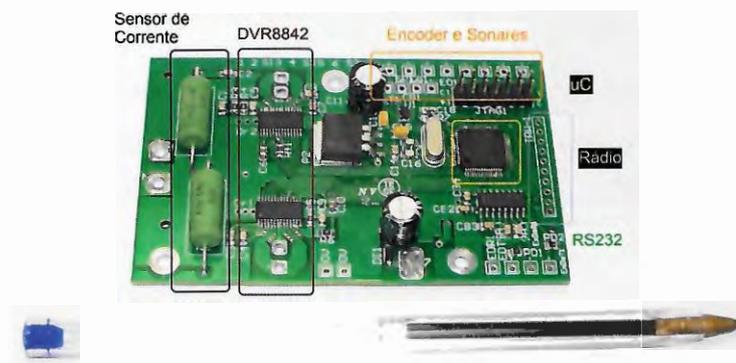


Figura 19 - PCI da eletrônica embarcada

3.3. Algoritmo de controle

Como o sistema de propulsão de cada robô é um sistema de tração

diferencial o controle desta plataforma é simples quanto ao acionamento e características construtivas. Porém, como os robôs adquirem planos de deslocamento diferentes entre si e em terrenos irregulares a probabilidade de escorregamento das rodas é alta, o controle de cooperação e de coordenação entre os robôs não é trivial. Assim, o controlador de tais dispositivos deve ser capaz de se adaptar aos mais diversos cenários e circunstâncias.

Apesar de cada unidade robótica poder ser controlada separadamente, baseadas em um modelo de tração diferencial, a plataforma como um todo não o pode. Pois, se assim for feito, cada unidade se deslocaria ou sem nenhum efeito de uma sobre a outra ou uma unidade sempre imitaria sobre a outra uma componente de força de forma a adicionar componentes de velocidades indesejáveis.

Assim, o controlador trata a plataforma como dois robôs que cooperam entre si. O robô mestre sabe para onde e como deve ir. Já o escravo, deve cooperar de forma eficiente e eficaz para que o mestre atinja seu objetivo.

Como a plataforma é dotada de quatro motorreduzores de corrente contínua, o controlador, baseado nos ângulos de posição relativa entre os robôs e nas correntes que perpassam os motores, controla através da modulação de largura de pulso (PWM) a potência de acionamento e conseqüentemente a velocidade dos motores do robô escravo.

Por tratar a plataforma como dois robôs independentes, torna-se necessário o desenvolvimento de um controlador de cooperação que busque a maior transferência energética e de forma eficiente do escravo para o mestre. Ou seja, a unidade auxiliadora deve empurrar o módulo principal de modo que a direção do deslocamento e a velocidade do mestre não sejam alteradas.

Para a resolução desta problemática, propôs-se um controlador bio-inspirado, baseado em algoritmos genéticos (AG) (Goldberg; 1989) e um controlador baseado em lógica nebulosa (*fuzzy*) (Celikyilmaz; Türksen; 2009). A escolha destas classes de controladores deu-se pela alta capacidade de adaptação, pela capacidade de resolução do problema e por não demandarem um recurso computacional elevado, podendo assim, ser embarcado em um microcontrolador de reduzido tamanho e custo.

Como os robôs admitem diversas posições relativas entre si, devido aos

graus de liberdade em *roll*, *pitch* e *yaw*, a posição entre os dois módulos deve ser conhecida para se ter eficácia na transferência energética. Para tanto, utiliza-se um sensor de posição angular que mede o ângulo entre a barra de alumínio e o robô. Como o sistema é não holonômico, basta saber o ângulo, entre o robô e a barra, fiel ao plano instantâneo de deslocamento (Pruski; Rohmer; 1997).

Outro dado necessário ao controle é o conhecimento da velocidade de deslocamento da plataforma. Porém, como os robôs assumem planos de deslocamento diferentes entre si e a probabilidade de escorregamento de alguma roda é alta, utiliza-se a corrente que transpassa os motores como forma indireta de inferência da velocidade. Portanto, se a unidade auxiliadora conseguir minimizar a corrente que transpassa nos motores do mestre, bem como a que transpassa em seus motores, sabe-se que a transferência energética tende ao ótimo (Potts; Cruz, 2011).

Devido à capacidade limitada de processamento do microcontrolador, o controle de cooperação teve de ser projetado objetivando o mínimo uso do mesmo, sem que houvesse a perda da controlabilidade.

3.4. Simulações

Os processos de análise comportamental e de desempenho foram realizados em ambiente de simulação dinâmica 3D. Este ambiente é baseado na ODE é uma biblioteca C/C++, *open source*, que implementa, além de outras coisas, um integrador e um detector de colisões. Assim, dotado dos parâmetros físicos de massa, momentos de inércia, coeficientes de atrito estático e dinâmico, entre outros, foi-se capaz de realizar as simulações dinâmicas com auto grau de fidedignidade com o sistema real. Fato comprovado pelos experimentos realizados.

Após a conclusão do projeto mecânico, o modelo da plataforma construído na ODE foi atualizado com os novos parâmetros físicos de massa, momentos de inércia, coeficientes de atrito estático e dinâmico e etc. Tais dados foram obtidos através do *software* de CAD utilizado para a modelagem 3D ou extraídos de

experimento realizados em (Cruz, 2010). Isto fez com que a simulação dinâmica fosse mais fidedigna ao modelo real.

Inicialmente, para a validação da morfologia mecânica, controlava-se diretamente as velocidades da roda. Tanto para as simulações do robô de duas rodas, quanto para a plataforma de quatro rodas. Após estas simulações, realizaram-se as simulações com os controladores genético e fuzzy.

A figura 20 é uma sequência que mostra a plataforma subindo uma escada, e a figura 21 é uma sequência que mostra a plataforma subindo um obstáculo. Ambas são simulações realizadas como acionador do robô escravo o controlador genético.

Além destes desafios, a plataforma foi submetida a outros cenários contendo formas arredondadas, paredes e etc. Em todos estes cenários os controladores demonstraram um desempenho satisfatório, até mesmo quando o robô mestre estava defasado em 180 graus em *row*, em relação ao outro robô.

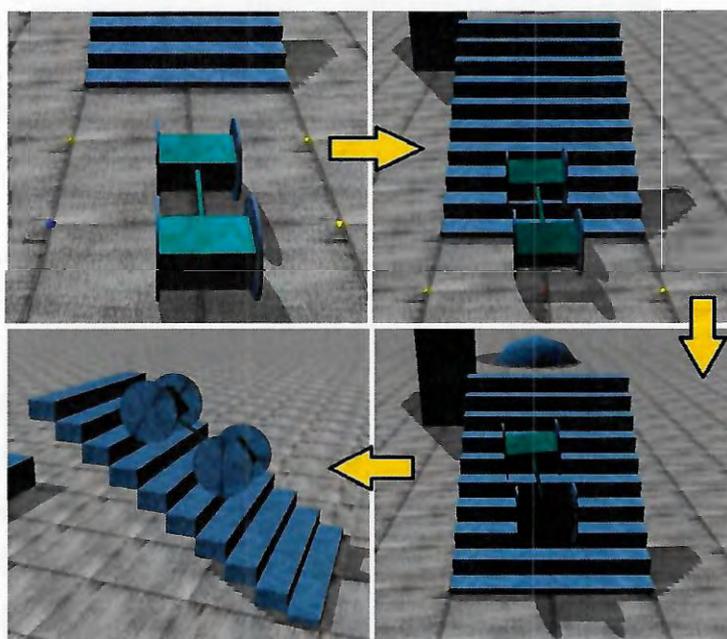


Figura 20 – Plataforma simulada dinamicamente subindo escada em ambiente da (ODE)

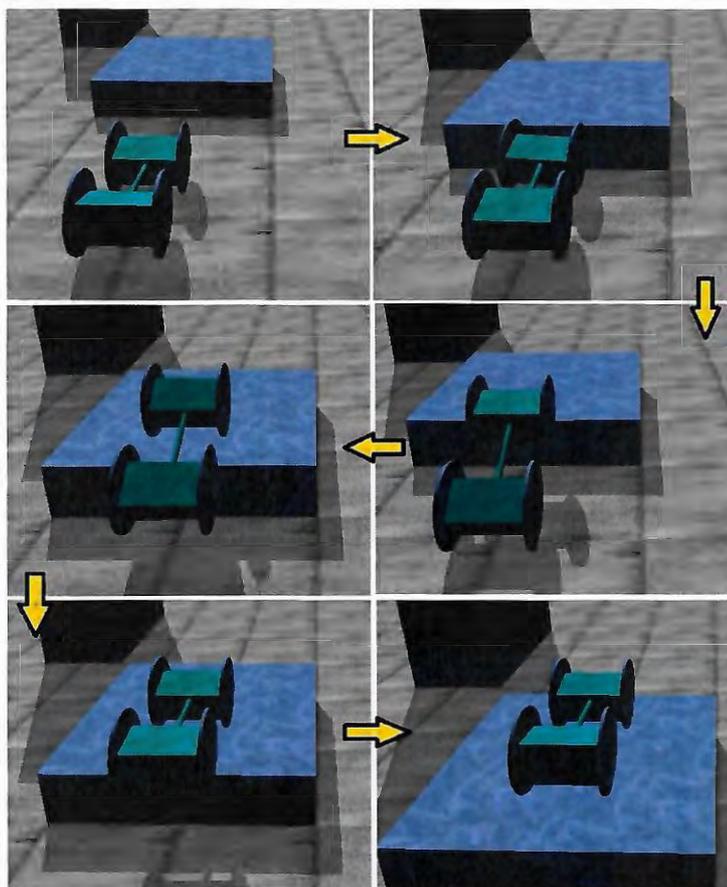


Figura 21 - Plataforma simulada dinamicamente subindo caixote em ambiente da (ODE)

3.5. Controlador Genético

O algoritmo genético utilizado é baseado em uma população de 10 indivíduos em que a cada 0,1 segundo, um novo indivíduo é utilizado como o acionador da unidade auxiliadora. Cada indivíduo é formado por dois números inteiros, sendo que um destes números determinam a velocidade e sentido da roda esquerda e o outro da roda direita. Os indivíduos da primeira geração são formados de forma aleatória.

Quando um indivíduo torna-se o acionador da unidade, o processador acessa os dados dos sensores duas vezes, com intervalo de 0,1 segundo. Assim, a pontuação do indivíduo é calculada de acordo com a equação 1.

$$P = \alpha \Delta \sum l + \beta \Delta \varphi 1 + \delta \Delta \varphi 2 \quad (1)$$

Sendo:

F - Pontuação do indivíduo

$\Delta \sum l$ - Diferença entre os somatórios das correntes

$\Delta \varphi 1$ - Diferença entre os ângulos da unidade principal

$\Delta \varphi 2$ - Diferença entre os ângulos da unidade auxiliadora

α, β, δ - Fatores de ajustes

Desta forma, quanto maior for a pontuação do indivíduo, maior será a redução das correntes e maior será a redução do desalinhamento entre os robôs.

Após o término de uma geração, quando todos os indivíduos foram avaliados, a nova geração é obtida através do seguinte procedimento de *crossover* entre o melhor indivíduo (denominado de Pai_1), que sobrevive para a próxima geração, e cada um dos indivíduos restantes na população atual (denominados Pai_2 no algoritmo a seguir).

a) Cinco pontos são calculados para cada indivíduo, sendo o valor central (VC) a média aritmética entre a velocidade do melhor indivíduo (Pai_1) e o indivíduo que está cruzando (Pai_2).

b) O ponto mais à esquerda é a velocidade do Pai_2 , subtraída da diferença entre VC e a velocidade do Pai_2 dividida por quatro.

c) O ponto à esquerda do centro é a velocidade do Pai_2 .

d) O ponto à direita do centro é a velocidade do Pai_1 .

e) O ponto mais à direita é a velocidade do Pai_1 , acrescida da diferença entre a velocidade do Pai_1 e VC dividida por quatro.

Com a mesma probabilidade, o filho pode assumir o valor de qualquer um dos cinco pontos calculados (Fig. 22). O Pai₂ é então eliminado da população para ser substituído por este filho. Após isto, uma mutação é realizada com probabilidade de 50% de ocorrer, através do acréscimo ou decréscimo de 1% do fundo de escala (taxa de mutação). Desta forma a avaliação da próxima geração é iniciada e o ciclo se repete continuamente.

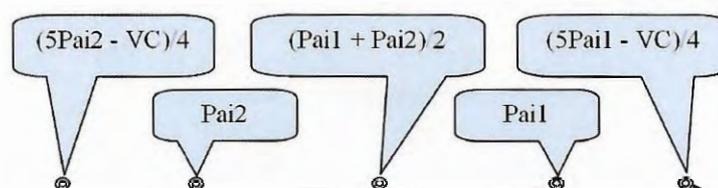


Figura 22 – Ilustração do pontos após o *crossover*

Os valores de 3%, 5% e 10% foram utilizados como taxa de mutação. Obteve-se uma resposta satisfatória com uma taxa de 5% quando há mudanças bruscas na velocidade ou direção da plataforma. Porém, quando as mudanças são suaves, o sistema converge mais rápido com a taxa de 1% de mutação.

Abaixo, nas figuras 23, 24, 25 e 26 é mostrado o impacto que as taxas de mutação de 1%, 3%, 5% e 10%, causam no sistema. O caso em que estes dados foram coletados foi o que o robô mestre deslocava-se com velocidade constante e em linha reta. Nas figuras, as linhas vermelhas referem-se à diferença de velocidade entre as rodas do lado esquerdo, as verdes à diferença de velocidade entre as rodas do lado direito e as linhas azuis representam o ângulo yaw entre a barra de união e o robô auxiliar.

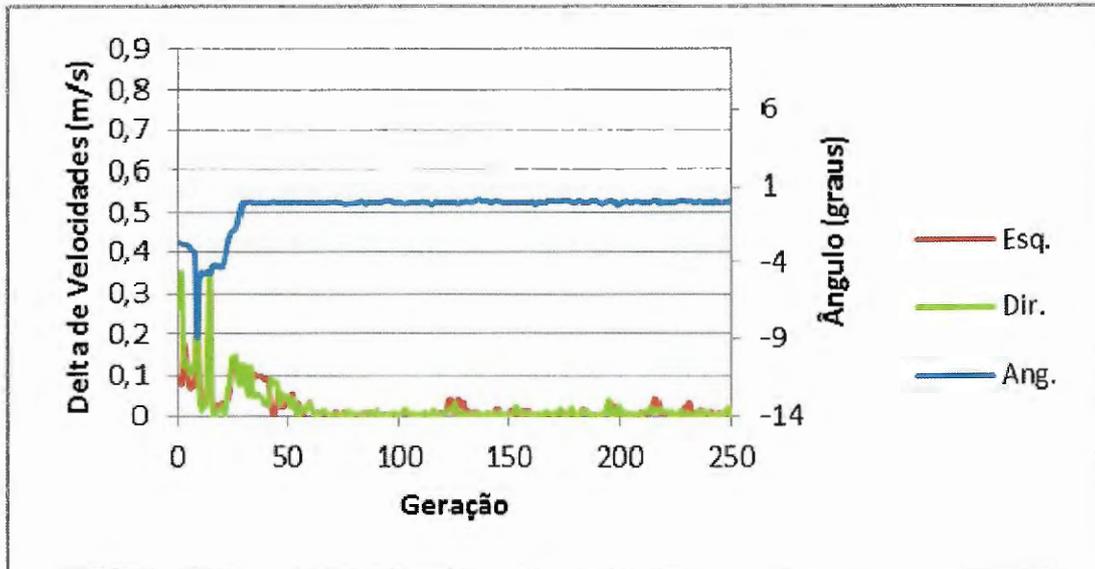


Figura 23 – Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 1%

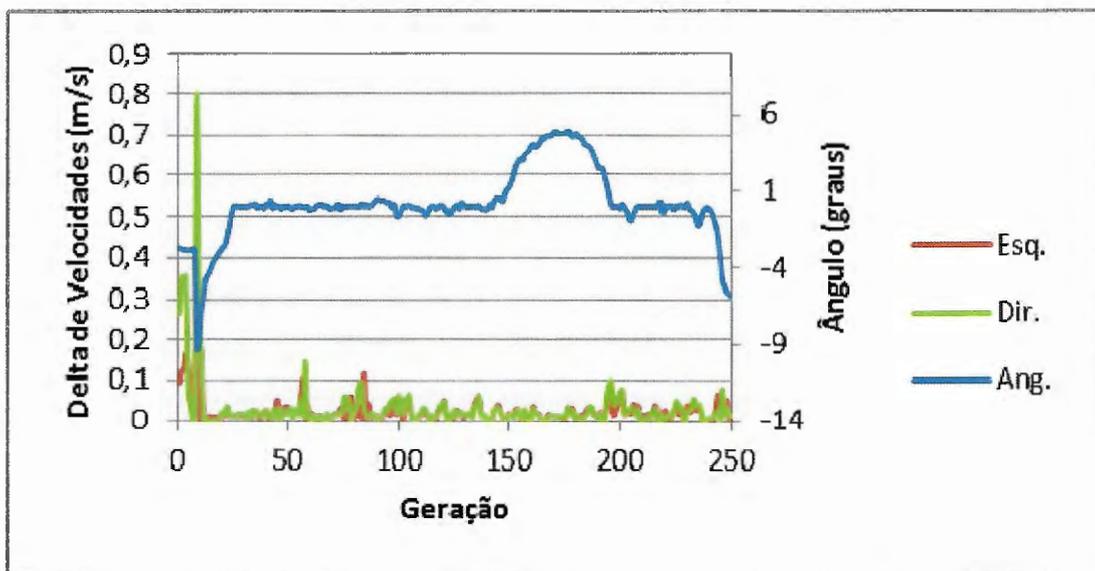


Figura 24 - Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 3%

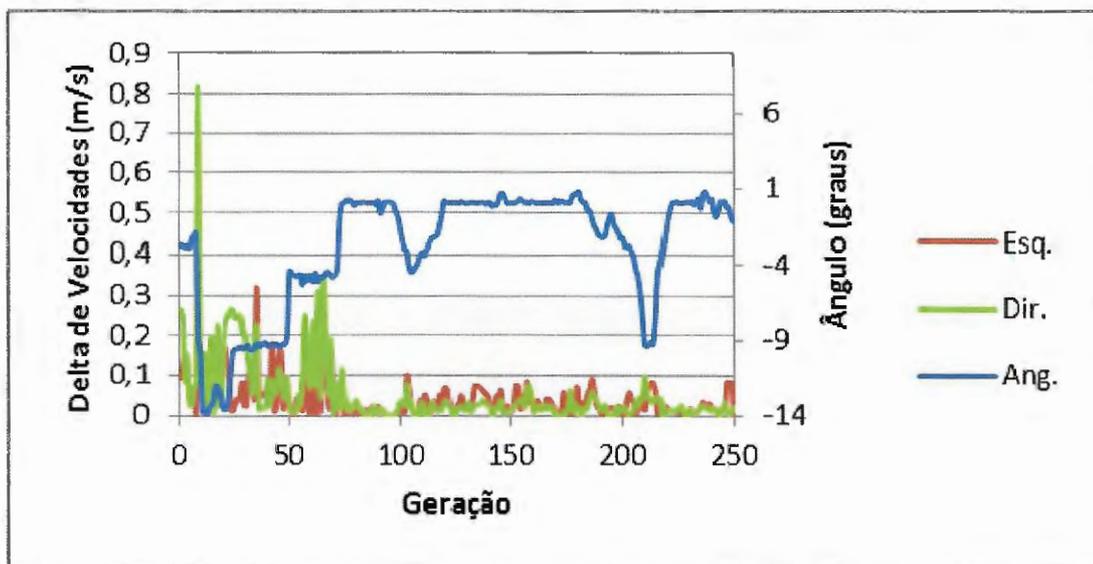


Figura 25 - Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 5%

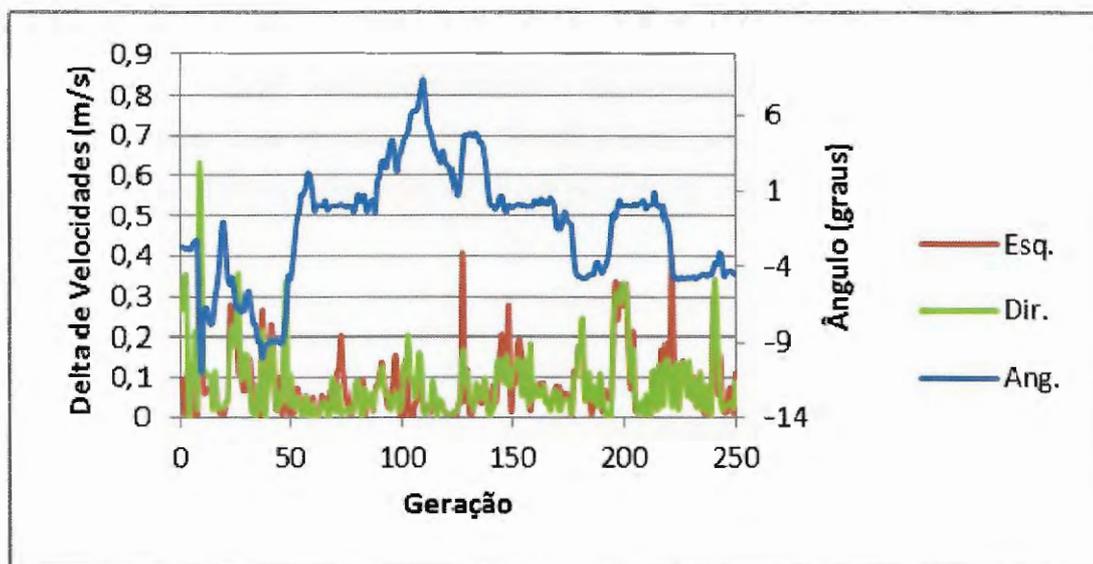


Figura 26 - Resposta do robô escravo com uma taxa de mutação de 10%

Estes dados foram extraídos das simulações dinâmicas realizadas em ambiente baseado na ODE.

No momento do desenvolvimento deste controlador na ODE, observou-se o comportamento simétrico da plataforma, ou seja, o comportamento do robô escravo quando desalinhado de certo ângulo para esquerda é o mesmo para a direita, sendo apenas necessária a inversão dos acionadores das rodas. Quem comandava a roda

direita passa a comandar a esquerda e vice-versa. Assim, quando o robô está desalinhado para a direita, o gene responsável pelo acionamento da roda direita, passa a acionar a roda esquerda.

3.5.1. Gerador de números pseudo aleatórios

Para a inicialização da população de indivíduos e também, para a realização do *crossover* e da mutação há a necessidade de se gerar números aleatórios. Em um microcontrolador que dispõem de canais de conversão analógico digital pode-se gerar tais números configurando um destes canais como entrada, ou seja, o microcontrolador lê o nível analógico do pino, e deixa-se este em aberto.

Através desta abordagem, associada com a resolução de conversão de 0,37mV, consegue-se a geração de números aleatórios. Porém, como a flutuação da tensão no pino é baixa, na escala de milivolts, utiliza-se este número para inicializar a função "srand()". Assim, consegue-se gerar números pseudo randômicos de 0 até 65536.

3.6. Sistema *Fuzzy*

Além do controlador bio-inspirado, foi realizada a análise de um controlador baseado em lógica fuzzy. O objetivo de tal controlador é o mesmo do algoritmo genético, ou seja, manter o maior alinhamento possível para a situação entre a barra de união e os robôs, (DONG et al, 2005) e buscar o menor consumo energético.

As variáveis que são fuzzificadas são as diferenças de velocidades entre as rodas esquerdas (ΔV_e), entre as rodas direitas (ΔV_d) e o ângulo yaw entre a barra de união e o robô escravo (ANG). Estas variáveis são fuzzificadas de acordo com os diagramas das figuras 27 e 28.

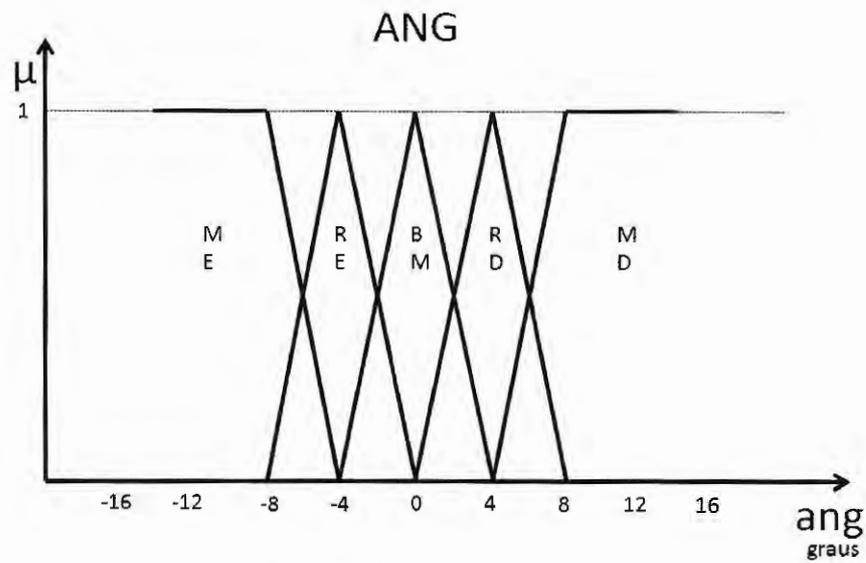


Figura 27 - Diagrama de "fuzzificação" do ângulo entre o robô e a barra de união

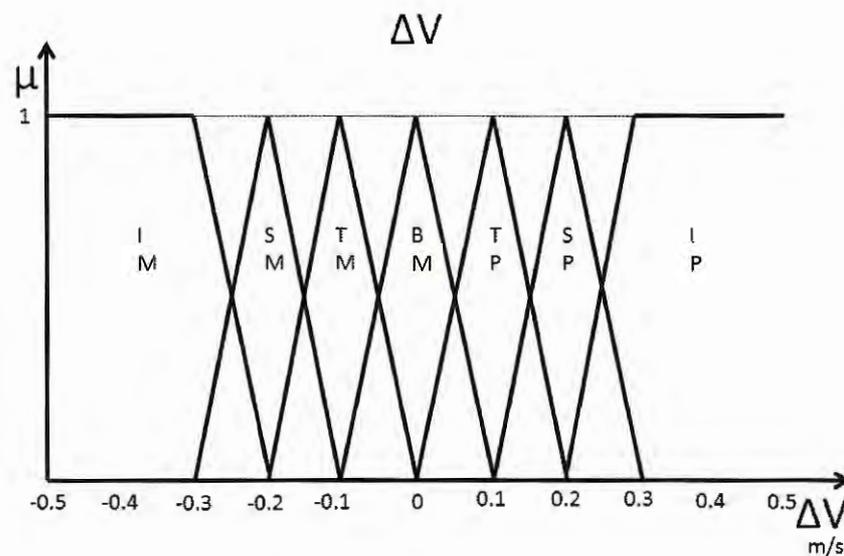


Figura 28 - Diagrama de "fuzzificação" da diferença de velocidades entre as rodas dos robôs

Na figura 27, as variáveis linguísticas são as seguintes:

ME – Muito ruim para a esquerda

RE – Ruim para a esquerda

BM – Bom

RD – Ruim para a direita

MD – Muito ruim para a direita

Se o ângulo for de seis graus positivos, a variável ANG é *fuzzificada* em RD e MD com função pertinência de 0,5, para ambas as situações.

Já na figura 28, as variáveis linguísticas são:

IM – Insuportável para menos (velocidade do mestre maior que a do escravo)

SM – Suportável para menos

TM – Tolerável para menos

BM – Bom

TP – Tolerável para mais (velocidade do escravo maior que a do mestre)

SP – Suportável para mais

IP – Insuportável para mais

Para a *defuzzificação* do sistema, utilizam-se os diagramas contidos nas figuras 29 e 30.

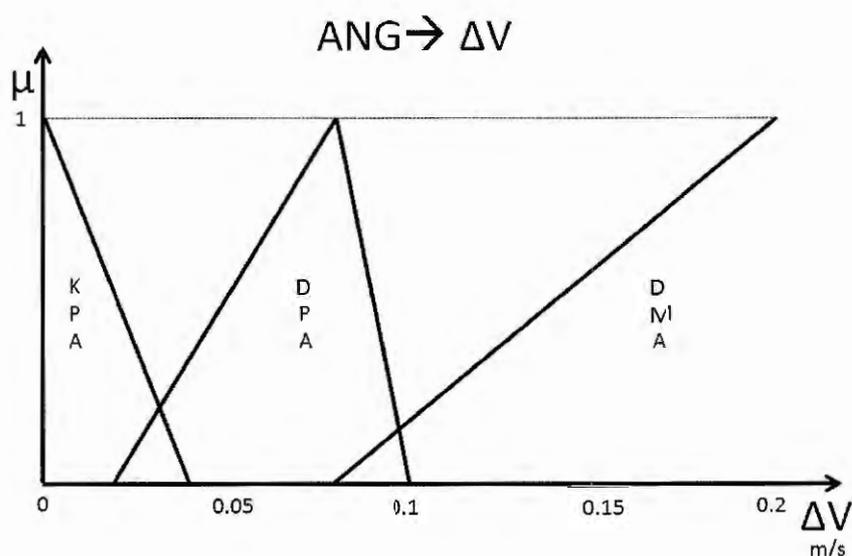


Figura 29 - Diagrama de "defuzzificação" do ângulo entre a barra de união e o robô

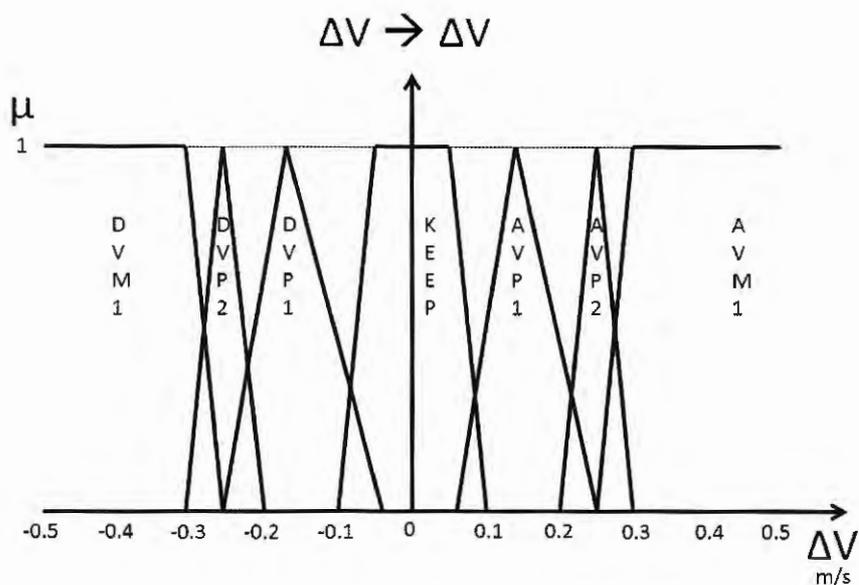


Figura 30 - Diagrama de "defuzzificação" da diferença de velocidades

As variáveis linguísticas, compreendidas nestes diagramas são:

KPA – Mantenha as velocidades pelo ângulo

DPA – Diminua um pouco a velocidade pelo ângulo

DMA – Diminua muito a velocidade pelo ângulo

KEEP – Mantenha a velocidade

DVM1 – Diminua muito a velocidade

DVP2 – Diminua a velocidade

DVP1 – Diminua um pouco a velocidade

AVP1 – Aumente um pouco a velocidade

AVP2 – Aumente a velocidade

AVM1 – Aumente muito a velocidade

Os diagramas de *defuzzificação* são utilizados para as rodas do lado direito e para as do lado esquerdo. Assim, de acordo com a base de conhecimento, se ΔV_d for IM com pertinência 1, a ação de controle ativada será AVM1 na roda direita. Por uma escolha de projeto, os erros provenientes do ângulo de alinhamento apenas

decrecem a velocidade. Desta forma se o ângulo for para a esquerda, a velocidade da roda direita será diminuída e se o ângulo for para a direita, a velocidade da roda esquerda será diminuída.

A base de conhecimento que determina a inferência da saída dá-se de acordo com as regras a seguir.

SE ΔV_e É IM ENTÃO ΔV_e RECEBE AVM1

SE ΔV_e É SM ENTÃO ΔV_e RECEBE AVP2

SE ΔV_e É TM ENTÃO ΔV_e RECEBE AVP1

SE ΔV_e É BM ENTÃO ΔV_e RECEBE KEEP

SE ΔV_e É TP ENTÃO ΔV_e RECEBE DVP1

SE ΔV_e É SP ENTÃO ΔV_e RECEBE DVP2

SE ΔV_e É IP ENTÃO ΔV_e RECEBE DVM1

As mesmas regras são aplicadas para a roda direita.

Com relação ao ângulo de alinhamento, as regras são:

SE ANG É ME ENTÃO ΔV_d RECEBE DMA

SE ANG É RE ENTÃO ΔV_d RECEBE DPA

SE ANG É BM ENTÃO ΔV_d E ΔV_e RECEBE KPA

SE ANG É RD ENTÃO ΔV_e RECEBE DPA

SE ANG É MD ENTÃO ΔV_e RECEBE DMA

O processo de *defuzzificação* é baseado na união dos conjuntos de saída. Após a inferência de todas as regras, a resposta final é calculada pelo método do centroide e o valor calculado é acrescido ou decrescido ao valor atual da velocidade, atentando-se para os valores de saturação do sistema real.

Este controlador foi implementado no ambiente da ODE e colocado à prova nos mesmos cenários que o AG. Assim como o controlador baseado em algoritmos genéticos, o controlador fuzzy demonstrou-se eficaz no processo de controle do robô escravo.

3.7. Fuzzy X AG

Ambos controladores, fuzzy e AG, foram testados em diversas situações: percurso retilíneo, curvas, superando obstáculos como escadas, plataformas e etc. Os resultados de três cenários foram comparados: robô mestre deslocando-se em movimento retilíneo, realizando curva com velocidade da roda esquerda de 0,2m/s e roda direita de 0,25m/s e curva com velocidade da roda esquerda de 0,2m/s e roda direita de 0,35m/s.

Os dois controladores demonstraram-se eficazes no processo de controle, porém devido à complexidade para realizar os cálculos necessários para se encontrar as áreas e centróides do sistema, em um microcontrolador de reduzida capacidade computacional, optou-se por implementar no sistema físico o controlador genético.

Abaixo nas figuras 31, 32 e 33, é mostrado o desempenho dos dois controladores quando o robô mestre deslocava-se em movimento retilíneo. Como se percebe, o controlador baseado em fuzzy consegue manter o ângulo de alinhamento entre as plataformas menor, porém, a variação de velocidades não o é. Isto acarretaria um maior consumo energético.

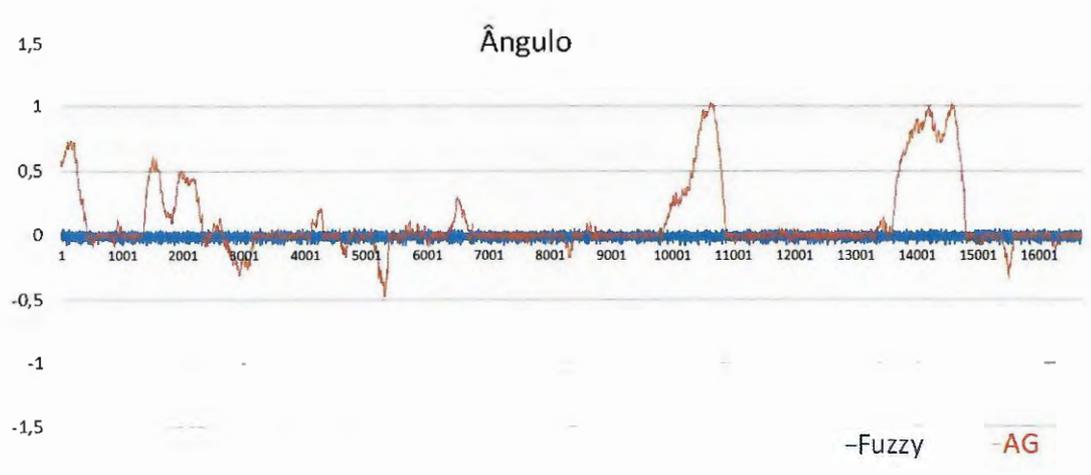


Figura 31 - Gráfico comparativo do ângulo entre a barra de união e o robô entre os controladores fuzzy e AG

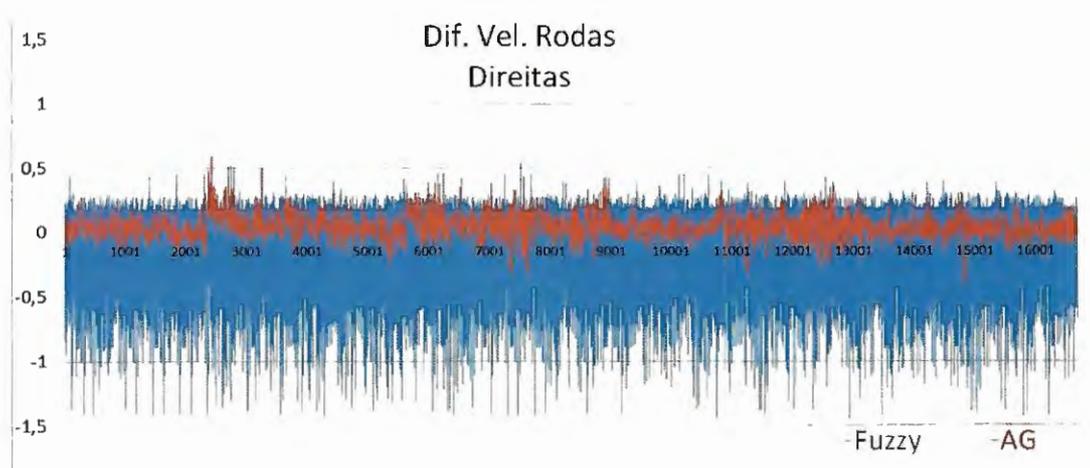


Figura 32 - Gráfico comparativo da diferença de velocidades das rodas direitas dos robôs entre os controladores fuzzy e AG

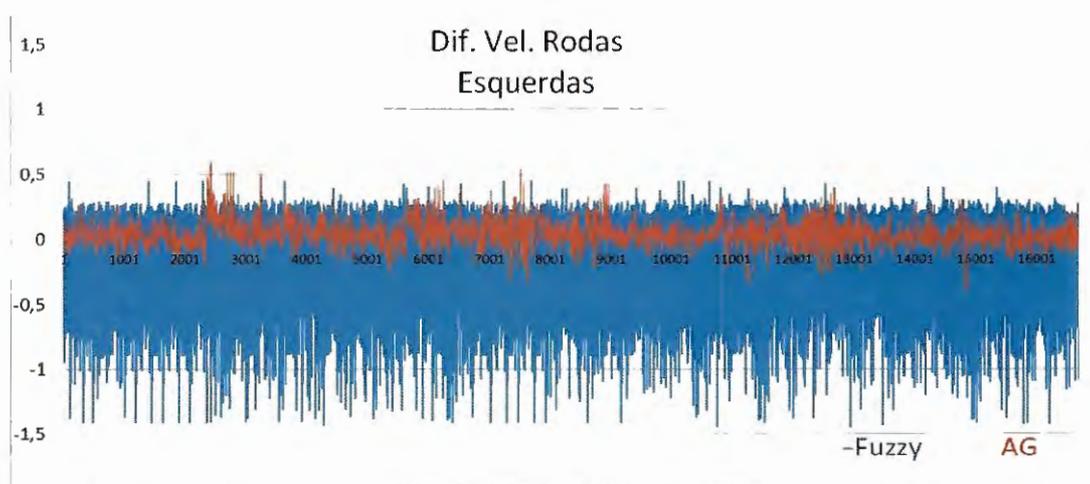


Figura 33 - Gráfico comparativo da diferença de velocidades das rodas esquerdas dos robôs entre os controladores fuzzy e AG

3.8. Sistema anti-colisão

Sensores de distância baseados em sonar (Sound Navigation and Ranging) são amplamente utilizados em robótica móvel. Porém, com o passar dos anos,

diversos outros sensores foram desenvolvidos, aprimorados e barateados. Sendo comum, nos dias de hoje, a utilização de sensores baseados em laser. Tais sensores possuem precisões de milímetros à centésimo de milímetro.

Um dos fatores que fez com que os sonares tivessem seu uso diminuído é a sua baixa precisão. A grande maioria dos sensores baseados em sonar possui precisão real de centímetros. Existem vários fatores que corroboram para a imprecisão destes dispositivos. Entre alguns cita-se: reflexão, deflexão, múltiplos caminhos, eco e variabilidade da velocidade do som no ar. Entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a velocidade de propagação do som no ar varia em quase 24m/s .

Ainda assim, devido ao seu baixo custo optou-se pela utilização destes sensores para o sistema anti-colisão da plataforma. Tal sistema opera em baixo nível, assumindo o controle da plataforma apenas se houver um risco de colisão eminente.

Como os sonares são posicionados na frente do robô, se algum objeto for detectado pelos sonares ele está potencialmente na rota de colisão. Assim, quando um obstáculo é detectado a menos de $0,5\text{m}$ da plataforma, o robô desviará para o lado oposto. Se o objeto for detectado à esquerda o robô vai para a direita, se for detectado à direita ele vai para a esquerda e se for detectado na frente (sensor central) a plataforma vai para a esquerda. Os comandos de desvio permanecem ativos até que não se tenha objetos a menos de $0,5\text{m}$ do robô.

3.8.1. Rede neural

Para melhorar a qualidade do sinal proveniente do sonar elaborou-se uma rede neural, baseada em um perceptron (Wu, MvLarty, 2000). Este neurônio recebe como entrada a largura do pulso ($P_w(k)$), proveniente do sensor e a largura prevista ($PP_w(k-1)$) no instante $(k-1)$ para o instante (k) . Na figura 34, tem-se uma ilustração de tal neurônio.

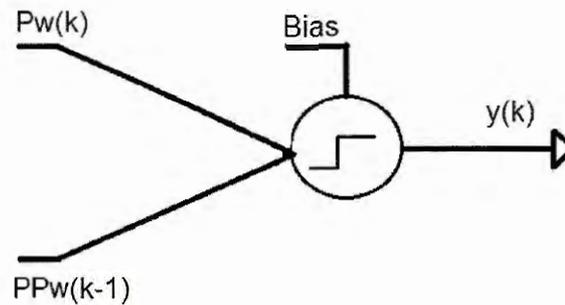


Figura 34 - *Perceptron* desenvolvido como filtro dos sinais provenientes do sonar

O pulso previsto funciona como um filtro. Sendo calculado de acordo com a equação 2.

$$PPw(k-1) = \left\{ \sum_{i=1}^5 Pw(k-i) + 2 * [Pw(k-5) - Pw(k-1)] \right\} / 5 \quad (2)$$

Em que $\sum_{i=1}^5 Pw(k-i) / 5$ é o pulso médio das ultimas cinco amostras e $[Pw(k-5) - Pw(k-1)] / 5$ é a derivada média das ultimas cinco amostras. O fator multiplicador de 2 é o que projeta o sinal de $(k-1)$ para o período (k) .

Tal rede neural, primeiramente, foi implementada e simulada em um programa em linguagem C. Após a convergência da mesma, esta rede neural foi embarcada no microcontrolador em que obteve-se erros abaixo de 0,5 cm.

Quando em simulação, um ambiente, ilustrado na figura 35, foi criado. Neste ambiente o sonar se deslocava entre uma distância de 6 a 0,5 m do chão e a distância deste para com o chão era conhecida. Para se implementar um erro na leitura do sensor, adicionou-se um erro aleatório à largura do pulso proveniente do sonar. O erro inserido está ilustrado no gráfico da figura 36.

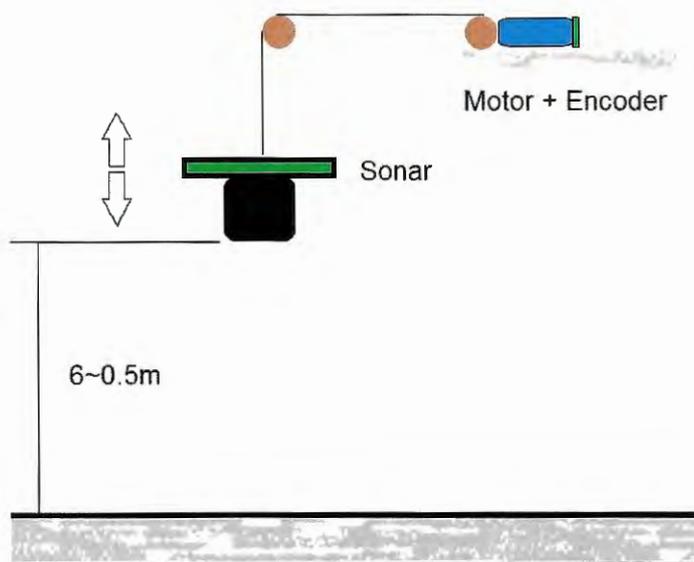


Figura 35 - Ambiente simulado de parede para o treinamento da rede neural do sistema anti colisão

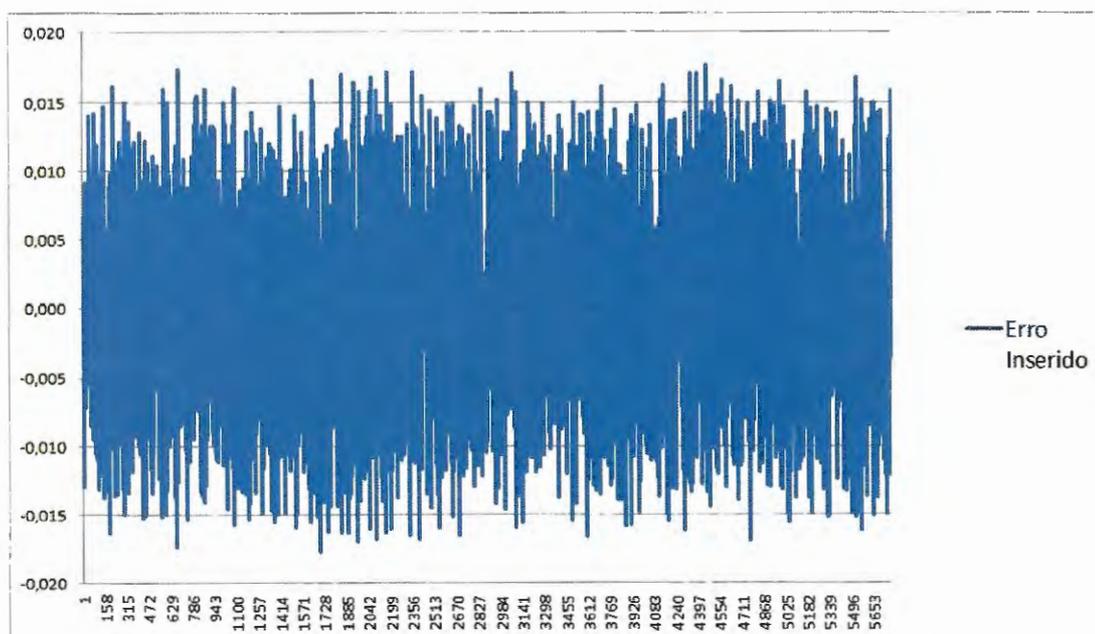


Figura 36 - Erro inserido na largura do pulso simulada para o treinamento da rede neural do sistema anti colisão

Na figura 37 encontra-se a saída da rede em comparação à resposta real, no período de treinamento. Após seis mil interações o processo de aprendizado foi interrompido. A resposta da rede encontra-se na figura 38.

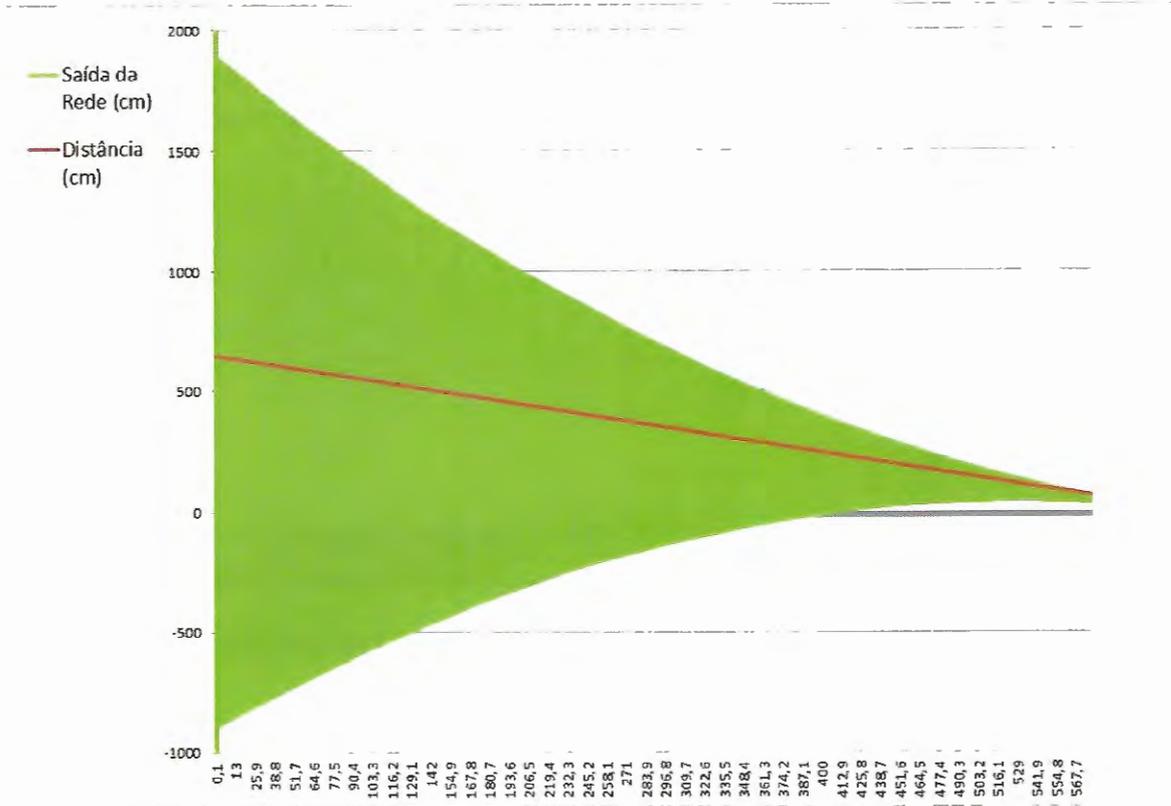


Figura 37 - Resposta da rede neural do sistema anti colisão no período de aprendizado

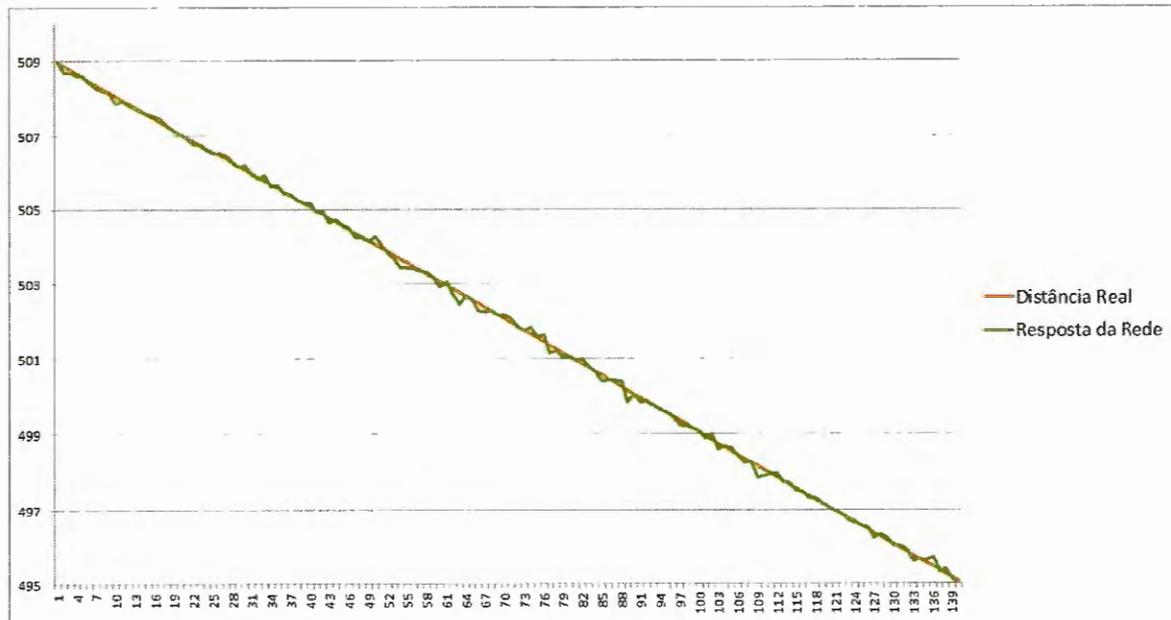


Figura 38 - Resposta da rede neural após o período de convergência

4. TESTES

Nesta seção, serão descritos os procedimentos e resultados obtidos durante a fase de testes e de translação dos algoritmos e controladores acima descritos para a plataforma física.

4.1. Eletrônica de potência

A fase de testes teve início com os *drivers* de potência. Estes foram colocados em funcionamento com quatro motores de diversas potências, partindo-se do de menor potência para o de maior. Os *drivers* funcionaram por 4 horas consecutivas com cada motor. Após a constatação do correto funcionamento, passou-se para os testes de corrente e temperatura.

Nos testes de corrente e temperatura, foi conectado ao *driver*, ao invés da bobina do motor uma série de resistores de potência. Estes resistores eram gradativamente retirados do circuito, para elevar a corrente entregue pelo *driver*. A série com menor resistência utilizada foi de 5 Ω e 100 W. Com tal série de resistências o *driver* limitou a corrente máxima em 3,5 A.

Quando tal corrente foi atingida, o circuito permaneceu em funcionamento por algumas horas. Isto para que o regime térmico fosse atingido. Como a placa de circuito impresso foi confeccionada com o cobre de 70 μ m de espessura e a área de cobre conectada ao terra do circuito é grande, a placa funciona como um dissipador, mantendo assim, a temperatura do circuito integrado dentro do regime de operação. A temperatura atingida na placa não foi suficiente para causar danos à qualquer componente eletrônico ou queimaduras em um humano.

Após estes testes, o *driver* foi configurado para operar com uma corrente máxima de 3 A. Assim, o motor do robô foi novamente conectado ao circuito e este foi colocado em funcionamento. Com a adição de torque resistivo, carga no eixo do

motor, verificou-se a eficácia do circuito regulador de corrente. Pois, sem carga, o motor consome aproximadamente 0,7 A e com a adição de torque resistivo a corrente não ultrapassou o valor de 3 A.

Nestes testes a ponte H sempre estava acionada, não sendo utilizado o controle de potência através de PWM. Quando o controle de potência de PWM começou a ser testado, juntamente com o motor verificou-se uma perda excessiva do torque. Quando o PWM possuía um ciclo ativo de 90% o torque entregue pelo motor era de cerca de 20% do torque entregue quando com um PWM de ciclo ativo de 100%.

No processo de investigação da causa, questionado em falha do projeto eletrônico ou excesso de tensão contra-eleto-motriz, quatro placas foram danificadas, sendo seu posterior uso impraticável.

Após mais alguns testes se descobriu que a falha era computacional. O PWM foi configurado para um ciclo ativo de 90% com uma banda morta de tempo. Assim, tinha-se o PWM funcionando perfeitamente durante 10 ms e desativado durante outros 35 ms. Porém quando o sinal era verificado através de um osciloscópio digital, o osciloscópio travava a amostragem no sinal de PWM, não mostrando a banda morta. Esta só foi vista quando a divisão temporal do osciloscópio foi colocada em 10 ms. Assim, corrigiu-se o erro no software embarcado e colocou-se em funcionamento do controle de potência através de PWM.

4.2. Sensor de corrente

Terminada a fase de testes acima, passou-se para os testes do sistema de aquisição da corrente que transpassam os motores. A figura 39 sintetiza o circuito utilizado para a aferição da corrente que transpassa o motor. Sendo R uma resistência de 5W e 0.1 Ω e tolerância de 1% e C um capacitor cerâmico de 10 nF.

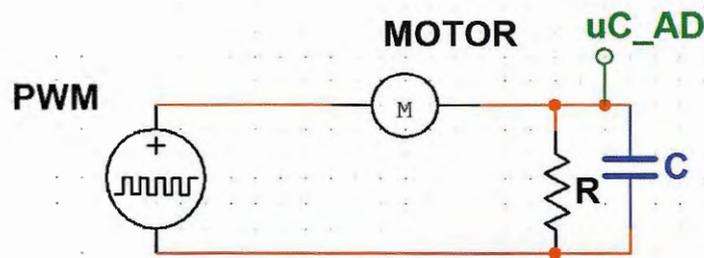


Figura 39 - Síntese do circuito de aferição da corrente que transpassam os motores das duas plataformas robóticas

Como o sistema trabalha com acionamento através de PWM, o motor de corrente contínua é um sistema de segunda ordem e existem indutâncias parasitas entre o nó u_{C_AD} e o motor, na placa de circuito impresso, quando a tensão aplicada no motor é momentaneamente retirada, observa-se sinais elétricos transientes de alta frequência e de tensão negativa, medindo-se no ponto u_{C_AD} na figura. Este ponto vai para o canal de conversão analógico digital do microcontrolador. Portanto, para se saber a corrente RMS que transpassa os motores, foi necessário implementar um filtro digital. Este filtro, realiza a média de 30 conversões analógico-digital, rejeitando valores que sejam maiores ou menores que 20% da média.

A validação das leituras das correntes que transpassava os motores foi realizada utilizando, como instrumento de medida padrão, um amperímetro analógico que fornece leituras RMS.

4.3. Robô mestre

O comportamento padrão implementado para o robô mestre foi o de vagar. Neste comportamento, o robô mestre simplesmente aciona seus motores com potência de 80% da total e desvia de obstáculos. Primeiramente, esse comportamento foi testado em bancada, sendo que para o teste de desvio uma pessoa posicionava-se na frente do robô e aproximava-se até a distância de 0,5m.

Tudo estando de acordo, colocou-se tal unidade para vagar em ambientes fechados e abertos. Em ambos os casos o robô não colidiu com nenhum obstáculo.

4.4. Robô escravo

Os primeiros testes do algoritmo genético embarcado foram realizados em bancada. Em tais testes o robô mestre encontrava-se desacoplado da plataforma.

Como o robô não encontrava-se em deslocamento e a unidade mestre encontrava-se desacoplada do sistema, o AG convergiu para um PWM de ciclo ativo de 0%. Isto porque a corrente dita para o robô escravo que transpassava os motores do mestre era fixa em 0,7A. Assim, o máximo da função de *fitness*, quando a barra de união encontrava-se alinhada, dá-se quando os motores do escravo estão parados.

Para se contornar tal problemática e testar o AG a função de *fitness* foi implementada com a diferença entre os ciclos ativos do PWM do mestre e do escravo e foi dito ao escravo que o ciclo ativo do PWM do mestre era de 80%. Assim, conseguiu-se verificar a eficácia deste controlador no sistema real e ajustar os fatores multiplicativos na função de *fitness*.

Após os testes em bancada, a plataforma foi levada a campo para ser testada. Os cenários testados foram no campo de futebol da USP, em escadas (Fig. 41) e em obstáculos de diversas formas (Fig. 40). Porém, o sistema de proteção contra choques teve de ser desativado no momento que o robô foi colocado para subir as escadas e altos obstáculos, pois, o mesmo detectava a escada e os obstáculos como um objeto a ser desviado.



Figura 40 – Fotografia da plataforma real transpondo obstáculo



Figura 41 - Fotografia da plataforma real subindo uma escada



Figura 42 - Fotografia da plataforma real em configuração do robô escravo defasado em 180 graus em *row*

5. CONCLUSÃO

Mesmo sendo um trabalho inicial, acredita-se no sucesso deste trabalho e nos futuros. Pois, com os procedimentos acima descritos, foi-se capaz de mostrar que uma plataforma robótica, dotada de uma estrutura mecânica inteligente e simples, com reduzido número de atuadores, pode atender uma enorme gama de requisitos e cenários em robótica móvel.

Porém, ainda se faz necessário o aperfeiçoamento dos controladores, interfaces e componentes, para que assim, outras pesquisas possam ser conduzidas sobre tal plataforma.

Estando os trabalhos futuros desenvolvidos e implementados, esta plataforma robótica poderá ser utilizada nos mais diversos lugares e ocasiões. Devido ao baixo custo construtivo, simplicidade de projeto, controle e de trabalho, o modelo de tal plataforma, poderá ser replicado por diversos grupos de pesquisa no Brasil e no mundo, contribuindo assim para o avanço da ciência e da robótica móvel.

5.1. Trabalhos futuros

No decorrer deste trabalho diversos pontos de investigação foram levantados. Porém, como estes não se encontravam contemplados no objetivo deste projeto, os mesmos foram deixados como trabalho futuro e nesta seção são comentados.

5.1.1. *Driver* de Potência

O *driver* de potência, responsável pelo acionamento dos motores não é

capaz de fornecer a corrente necessária para que a plataforma consiga galgar grandes percursos ou rampas inclinadas. Assim, para o usufruto completo das capacidades deve-se projetar um novo driver capaz de entregar mais que os 3,5A, limite do DRV8842.

5.1.2. Interface com Player/Stage/Gazebo

Amplamente utilizado em diversos centros de pesquisa em robótica móvel os simuladores, baseados em sistemas de cliente-servidor, Player, Stage e Gazebo oferecem uma ótima abstração do hardware para o desenvolvimento de algoritmos de controle mais elaborados. Algoritmos de planejamento de trajetória, localização, mapeamento e etc.

Além de serem amplamente utilizados, tais simuladores já possuem diversos drivers para uma enormidade de sensores empregados na robótica móvel.

Assim, como trabalho a ser realizado fica o desenvolvimento do modelo da plataforma em tais simuladores e o desenvolvimento do driver de interface entre o simulador e o robô.

5.1.3. Sistema anti-colisão

Como a plataforma é capaz de superar obstáculos maiores que sua altura, o sistema anti-colisão deve ser aperfeiçoado para que o mesmo não interfira quando a plataforma robótica vai transpassar um empecilho.

5.1.4. Função de fitness

Os indivíduos do AG são selecionados tendo por base que o melhor ser é aquele que consegue manter o menor desalinhamento entre as unidades robóticas. Porém, a forma mais ágil de se realizar curvas é os robôs terem ângulos entre a barra de união simétricos. Se o mestre realiza uma curva e a barra inclina-se em 5° o escravo deve fazer com que o ângulo entre ele e a barra seja de -5° . Mas, como não foi investigado a influência de um robô sobre o outro nesta situação, optou-se por, no momento, não implementar tal solução.

5.1.5. Neuro-fuzzy

Devido ao desempenho satisfatório do controlador Fuzzy, propõem-se o desenvolvimento de um controlador baseado em Neuro-Fuzzy. Acredita-se que tal controlador será capaz de modificar os diagramas de fuzzyficação e defuzzyficação a ponto de controlar o robô escravo com alta eficiência energética, reduzindo as variações de velocidade entre as rodas.

5.1.6. Análise energética

Realizar a análise do consumo energético da plataforma com os dois controladores propostos. Através do monitoramento da tensão das baterias, juntamente com a medição das correntes que perpassam os robôs. Assim, pode-se avaliar a potência consumida pela plataforma e avaliar qual controlador é energeticamente mais eficiente.

5.1.7. Motores

Os motores utilizados neste projeto são motores utilizados em limpadores de para-brisas de caminhões. Por pertencerem a uma classe de componentes utilizados na indústria automotiva o custo deste motor é extremamente reduzido. Porém, sua eficiência energética é baixa, devido ao grande entremeio entre o rotor e o estator, isto acarreta em um baixo fluxo magnético, ao sistema de redução baseado em parafuso sem fim, o que acarreta em grandes perdas por atrito e em seus ímãs que são de ferrita e não de terras-raras.

6. REFERÊNCIAS

ADEPT TECHNOLOGY. 2011. Disponível em:
<<http://www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/Pioneer3DX-P3DX-RevA.sflb.ashx>>. Acesso em Dez. 2012.

ALMURIB, H. A. F.; AL-QRIMLI, H. F.; KUMAR, N. **A Review of Application Industrial Robotic Design**. 2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering. 2011.

AUSTRIA MICROSYSTEMS, 2012. Disponível em:
<<http://www.ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Rotary-Magnetic-Position-Sensors/AS5043>>. Acesso em Dez. 2012.

BOTELHO, W. T.; OKADA, T.; MAHMOUD, A.; SHIMIZU, T. **Software and Hardware control of a hybrid robot for switching between leg-type and wheel-type modes**. 2011. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, 22(1), 9-22.

BOXERBAUM, A. S.; KLEIN, M. A.; KLINE, J. E.; BURGESS, S. C.; QUINN, R. D.; HARKINS, R.; VAIDYANATHAN, R. **Design, Simulation, Fabrication and Testing of a Bio-Inspired Amphibious Robot with Multiple Modes of Mobility**. Journal of Robotics and Mechatronics, 24, (pp. 629), 2012. ISBN: 0915-3942.

BRUNNER, M.; BRÜGGEMANN, B.; SCHULZ, D. **Towards Autonomously Traversing Complex Obstacles with Mobile Robots with Adjustable Chassis**. 13th International Carpathian Control Conference (ICCC), . 28-31 May 2012. pp 63 – 68.

BRUZZONE, L.; QUAGLIA, G. **Review article: locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments**. Mech. Sci., 3, 49-62, doi:10.5194/ms-3-49-2012, 2012.

CELIKYILMAZ, A.; TÜRKSEN, I., B. **Modeling Uncertainty with Fuzzy Logic: With Recent Theory and Applications (Studies in Fuzziness and Soft Computing)**. Ed. 1. Berlin: Springer, 400 p., 2009

CHEN C. Y.; SHIH B. Y.; SHIH C. H.; CHOU W. C. **The development of autonomous low-cost biped mobile surveillance robot by intelligent bricks**. Journal of Vibration and Control. 2010. DOI: 10.1177/1077546310371349.

CHEROUVIM, N.; PAPADOPOULOS, E. **Control of hopping speed and height over unknown rough terrain using a single actuator**. Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on, pp. 2743-2748. IEEE, 2009.

CRUZ, T. A. C.; BECKER, M.; SIMÕES, E. V. **Desenvolvimento de uma plataforma robótica autônoma de suspensão passiva baseado em eficiência energética**. CONEM 2012 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luiz - MA. Anais do CONEM 2012. Rio de Janeiro: ABCM, 2012. v. 1. p. 1-10.

CRUZ, T. A. C. **Desenvolvimento de uma plataforma robótica de suspensão passiva e navegação autônoma**. (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. 2010.

DANTU K.; RAHIMI M.; SHAH, H.; BABEL S.; DHARIWAL A.; SUKHATME G. S. **Robomote: Enabling Mobility In Sensor Networks**. ACM Journal. Vol. 1. No. 1. 12 2004.

DONG, Y.; SUN, H.; LIU, Z.; BAO, Z. **Kinematics and constraint analysis of tractor-trailer mobile robot**. Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Vol. 3, pp. 1380-1384.

DUBOWSKY S.; GENOT F.; GODDING S.; KOZONO, H.; SKERSKY, A.; YU, H.; YU, L. S. **PAMM A robotic aid to the elderly for mobility assistance and monitoring: A helping-hand for the elderly**. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), San Francisco, CA, 2002, ICRA.

FAIÑA, A.; ORJALES, F.; BELLAS, F.; DURO, R. J. **First Steps towards a Heterogeneous Modular Robotic Architecture for Intelligent Industrial Operation**. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2009 IEEE/RSJ International Conference. IEEE, 2009.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Ed. 1, Reading, Mass: Addison-Wesley Pub. Co.; 412p, 1989.

GOUAILLIER, D. ; HUGEL, V.; BLAZEVIC, P. ; KILNER, K. ; MONCEAUX, J. ; LAFOURCADE, P. ; MARNIER, B. ; SERRE, J. ; MAISONNIER, B. **Mechatronic design of NAO humanoid**. Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on, pp. 769-774. IEEE, 2009.

JARRAULT, P.; GRAND, C.; BIDAUD, P. **Robust obstacle crossing of a wheel-legged mobile robot using minimax force distribution and self-reconfiguration**. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 2753-2758. IEEE, 2011.

KIM, Y. G.; KWAK, J. K.; HONG, D. H.; Kim, I. H.; SHIN, D. H.; AN, J. **Autonomous terrain adaptation and user-friendly tele-operation of wheel-track hybrid mobile robot**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing October 2012, Volume 13, Issue 10, pp 1781-1788.

KLEIN, M. A.; BOXERBAUM, A. S.; QUINN, R. D.; HARKINS, R.; VAIDYANATHAN, R. **SeaDog: A Rugged Mobile Robot for Surf-Zone Applications**. 4th IEEE RAS/EMBS Int. Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), Roma, Italy, June 24-27, 2012.

KOOS, S.; MOURET, J.B. **Online Discovery of Locomotion Modes for Wheel-Legged Hybrid Robots: a Transferability-based Approach**. InCLAWAR'11: Proceedings of the 14th International Conference on Climbing and Walking Robots. 2011.

<http://www.laipac.com/pdf/TRF2_4Gdatasheet.pdf> Acesso em: Dez. 2012.

LI, X.; JIA, S.; FAN, J.; GAO, L.; GUO, B. **Autonomous mobile robot guidance based on ground line mark**. In SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of, pp. 1091-1095. IEEE, 2012.

LI, Z.; MA, S.; LI, B.; WANG, M.; WANG, Y. **Design and basic experiments of a transformable wheel-track robot with self-adaptive mobile mechanism**. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 1334-1339. IEEE, 2010.

MACHADO, J. A. T.; SILVA, M. F. **An Overview of Legged Robots**. Proceedings of the International Symposium on Mathematical Methods in Engineering. 2006.

MENDES, C. C. T. **Navegação de robôs móveis utilizando visão estéreo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-18062012-162436/>>. Acesso em: 2012-12-11.

MICHAUD, F.; LÉTOURNEAU, D.; ARSENAULT, M.; BERGERON, Y.; CADRIN, R.; GAGNON, F.; LEGAULT, M. A.; MILLETTE, M.; PARE, J. F.; TREMBLAY, M. C.; LEPAGE, P.; MORIN, Y.; BISSONN J. CARON S. **Multi-modal locomotion robotic platform using leg-track-wheel articulations**. Autonomous Robots 18, no. 2 (2005): 137-156.

MORI, J. Y.; ARIAS-GARCIA, J.; SÁNCHEZ-FERREIRA, C.; MUÑOZ, D. M.; LLANOS, C. H.; MOTTA, F. M. S. T. **An FPGA-based omnidirectional vision sensor for motion detection on mobile robots**. International Journal of Reconfigurable Computing 2012 (2012): 1.

MUSTAFA, M.; RAMIREZ-SERRANO, A.; DAVIES, K. A. WILSON, G. N. **Modeling and Autonomous Control of Multiple Mobile Manipulators Handling Rigid Objects**. Intelligent Robotics and Applications (2012): 397-406.

- NAKAJIMA, S. **Concept of a novel four-wheel-type mobile robot for rough terrain, RT-Mover**. Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on, pp. 3257-3264. IEEE, 2009.
- NAKAJIMA, S.; NAKANO, E. **Adaptive gait for large rough terrain of a leg-wheel robot (fifth report: integrated gait)**. Journal of Robotics and Mechatronics 21, no. 3 (2009): 419.
- NASSIRAEI, A. A. F.; ISHII, K. **Concept of Intelligent Mechanical Design for autonomous mobile robots**. Journal of Bionic Engineering 4, no. 4 (2007): 217-226.
- PARASURAMAN R.; SHERIDAN T. B.; WICKENS C.D. **A model for types and levels of human interaction with automation**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol30, No. 3, pp. 286-197, 2000.
- PIJUAN, J.; COMELLAS, M.; NOGUÉS, M.; ROCA, J.; POTAU, X. **Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain**. Journal of Terramechanics (2012).
- POTTS, A. S.; CRUZ, J. J. **An optimal energy control algorithm for a moving platform**. Proceedings of the 18th IFAC World Congress, 2011. Milano, Italy.
- PRUSKI, A.; ROHMER, S. **Robust path planning for non-holonomic robots**. Journal of intelligent & robotic systems 18, no. 4 (1997): 329-350.
- RAFFAELI, R.; CESETTI, A.; ANGIONE, G.; LATTANZI, L.; LONGHI, S. **Virtual planning for autonomous inspection of electromechanical products**. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (2012): 1-17.
- RANJAN, B. S. C.; PAL, U.; OJHA, P. S.; SRINIVASAN V.; CHAKRABARTI A. **Exploring Serially Connected Multi-Tracked All-Terrain Vehicles for Improved Obstacle Climbing Performance**. 14 th National Conference on Machines and

Mechanisms (NACoMM'09), NIT Durgapur, pp. 17-18. 2009.

SEENI, A.; SCHÄFER, B.; HIRZINGER, G. **Robot Mobility Systems for Planetary Surface Exploration – State-of-the-Art and Future Outlook: A Literature Survey**. Aerospace Technologies Advancements, Chapter 10, pp. 189-208. ed. Thawar T. Arif. ISBN 978-953-7619-96-1. January 2010.

SIMÕES, E. V.. **Dispositivo Robótico Móvel Pendular de Duas Rodas** - Pedido de patente de invenção nº. P.I. 0.801.859-6 - Data de Publicação 16.09.2008. 2008.

TEXAS INSTRUMENTS, a, 2012. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f1611.pdf>. Acesso em Dez. 2012.

TEXAS INSTRUMENTS, b, 2012. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8842.pdf>. Acesso em Dez. 2012.

TUNA, G.; GUNGOR, V. G.; GULEZ, K. **An autonomous wireless sensor network deployment system using mobile robots for human existence detection in case of disasters**. Ad Hoc Networks (2012).

VIVALDINI, K. C.T.; GALDAMES, J. P. M.; PASQUAL, T. B.; BECKER, M.; CAURIN, G. A. P. **Intelligent Warehouses: focus on the automatic routing and path planning of robotic forklifts able to work autonomously**. Mechatronics Series 1: Intelligent Transportation Vehicles (2011): 115.

WANG, S.; CHAOVALITWONGSE, W.; BABUSKA, R. **Machine Learning Algorithms in Bipedal Robot Control**. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on 42, no. 5 (2012): 728-743.

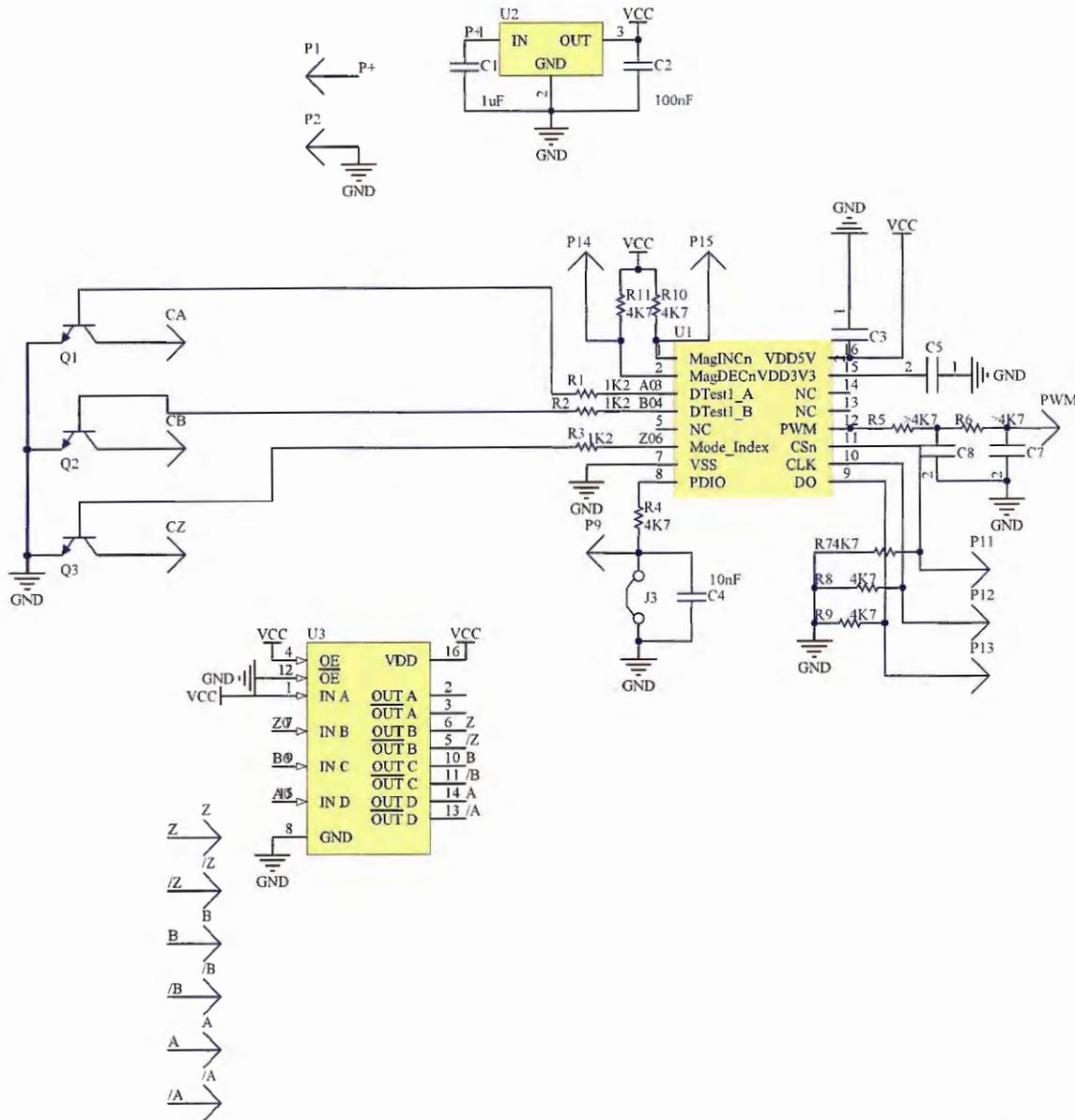
WEI, H.; WANG, B.; WANG, Y.; SHAO, Z.; CHAN, K. C. C. **Staying-alive path planning with energy optimization for mobile robots**. Expert Systems with Applications 39, no. 3 (2012): 3559-3571.

- WEI, J.; SHI, Z.; ZHANG, Q.; TU, J.; WANG, Z. **Gait and Stability Analysis of a Quadruped Robot**. Advanced Research on Computer Science and Information Engineering (2011): 347-354.
- WU, C.,H.; MCLARTY, J.W. **Neural Networks and Genome Informatics, Volume 1 (Methods in Computational Biology and Biochemistry)**. Ed. 1, 220 p., Elsevier Science, 2000.
- YANG, Y.; XU, G.; WU, X.; FENG, H.; XU, Y. **Parent-child robot system for rescue missions**. Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009 IEEE International Conference on, pp. 1427-1432. IEEE, 2009.
- ZHAO, J.; ZHANG, H.; LIU, Y.; YAN, J.; ZANG, X.; ZHOU, Z. **Development of the hexapod robot HITCR-II for walking on unstructured terrain**. Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on, pp. 64-69. IEEE, 2012.
- ZOU, Y.; CHEN, W.; WU, X.; LIU, Z. **Indoor localization and 3D scene reconstruction for mobile robots using the Microsoft Kinect sensor**. In Industrial Informatics (INDIN), 2012 10th IEEE International Conference on, pp. 1182-1187. IEEE, 2012.

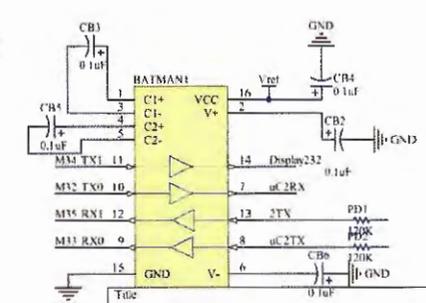
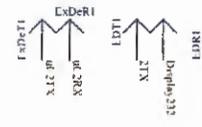
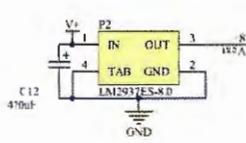
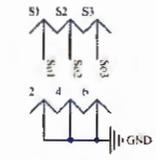
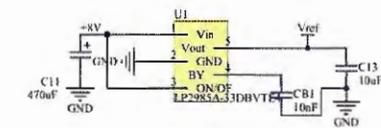
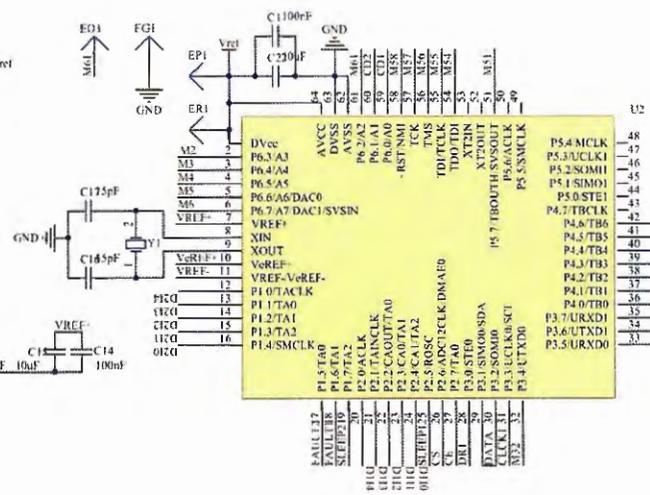
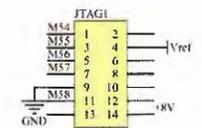
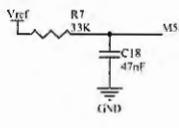
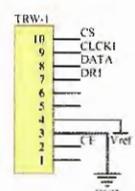
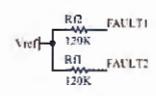
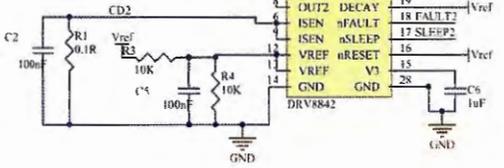
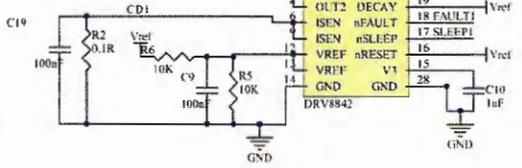
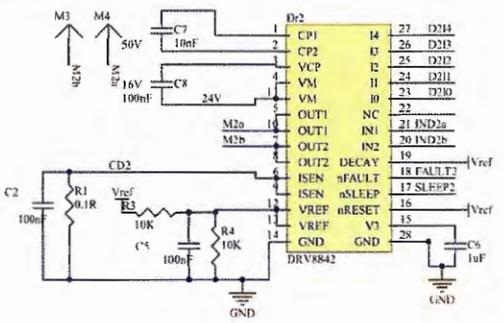
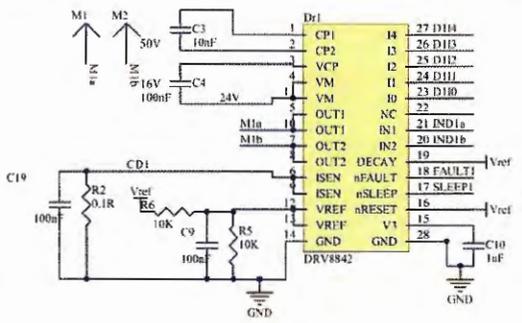
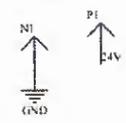
7. ANEXOS

Nas páginas seguintes, encontram-se os arquivos para a confecção da plataforma robótica, desenvolvida neste trabalho. Estando estes na seguinte ordem:

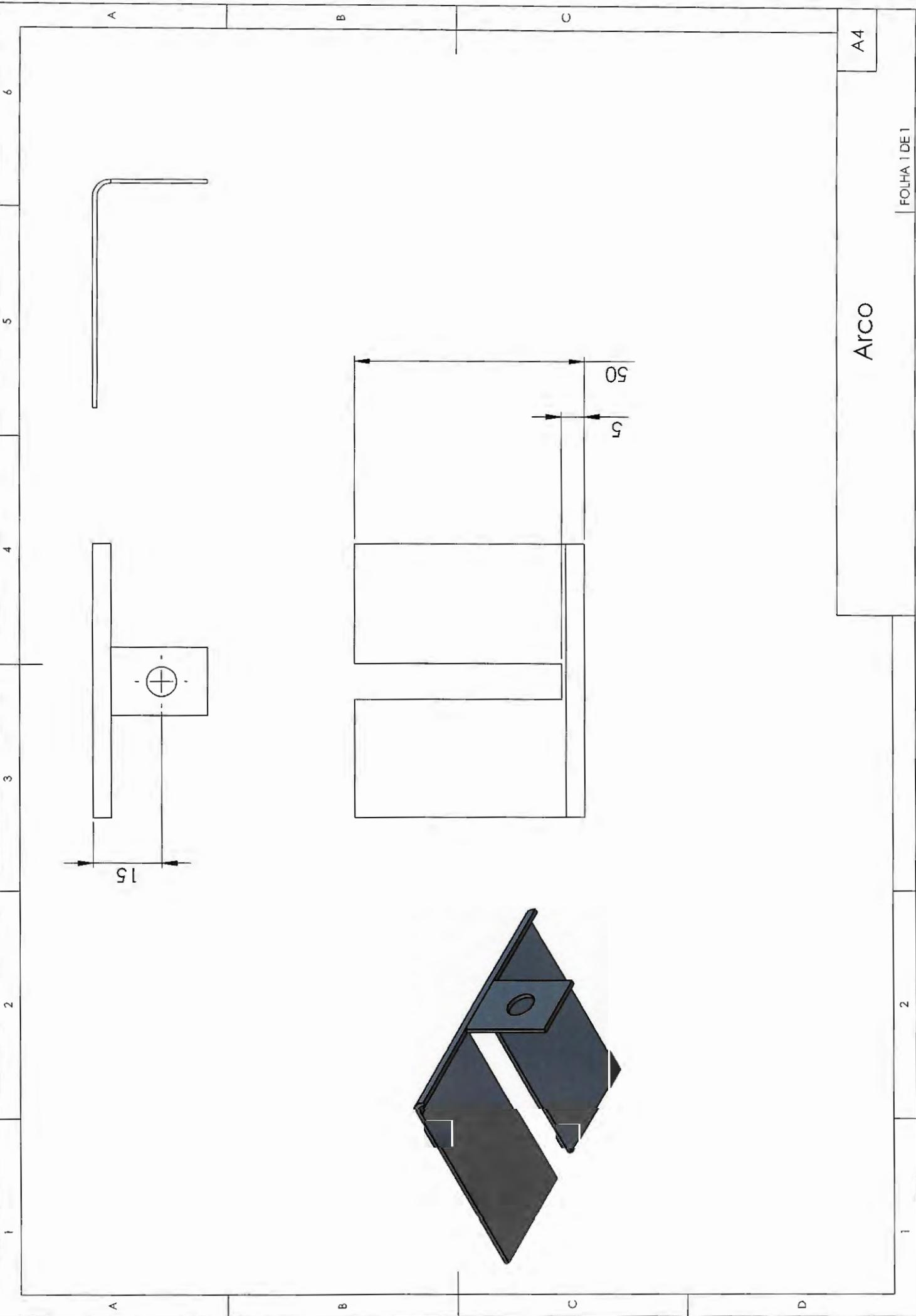
- **Projetos eletrônicos**
 - Esquema eletrônico da placa embarcada.
 - Esquema eletrônico do encoder angular.
- **Projetos mecânicos**
 - Arco
 - Base principal
 - Cantoneira
 - Dobra
 - Suporte do encoder
 - Inside
 - Lado
 - Suporte do motor
 - Trava Tampa
 - Tampa
 - Eixo das rodas
 - Eixo de união



Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date	28/05/2013	Sheet of
File	C:\Users\Encoder SchDoc	Drawn By:

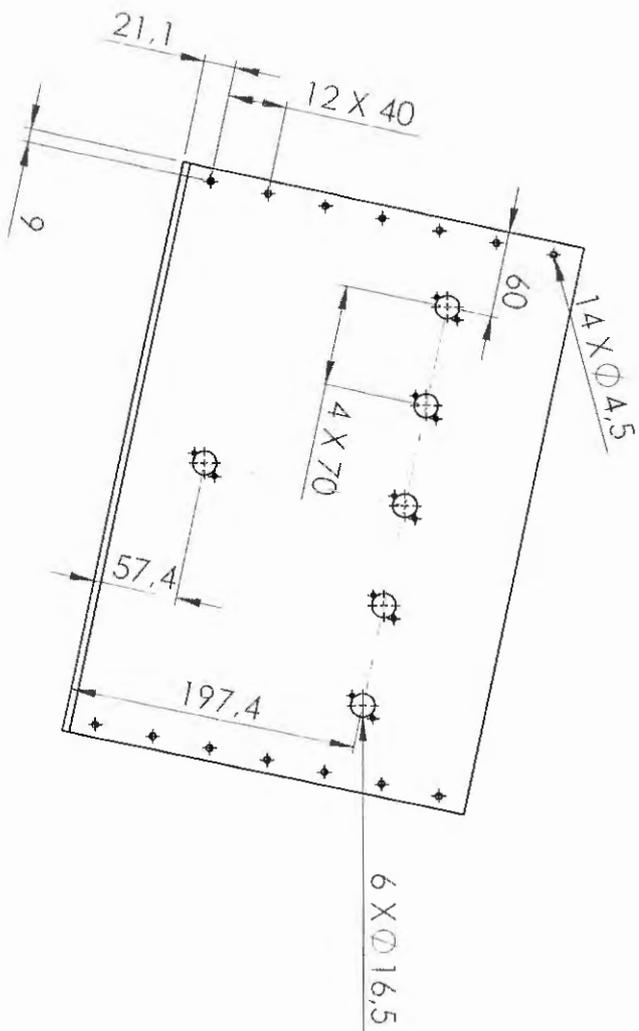


Size	A3	Number		Revision	
Date:	26/05/2013	Sheet	of		
File:	U:\Projetos\Driver Robot SchDoc	Drawn By:			

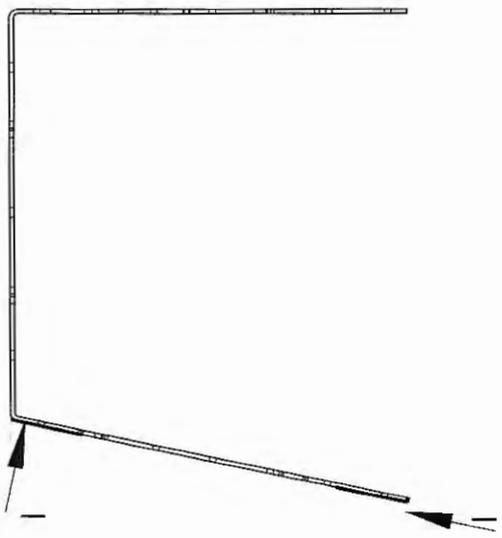


ARCO

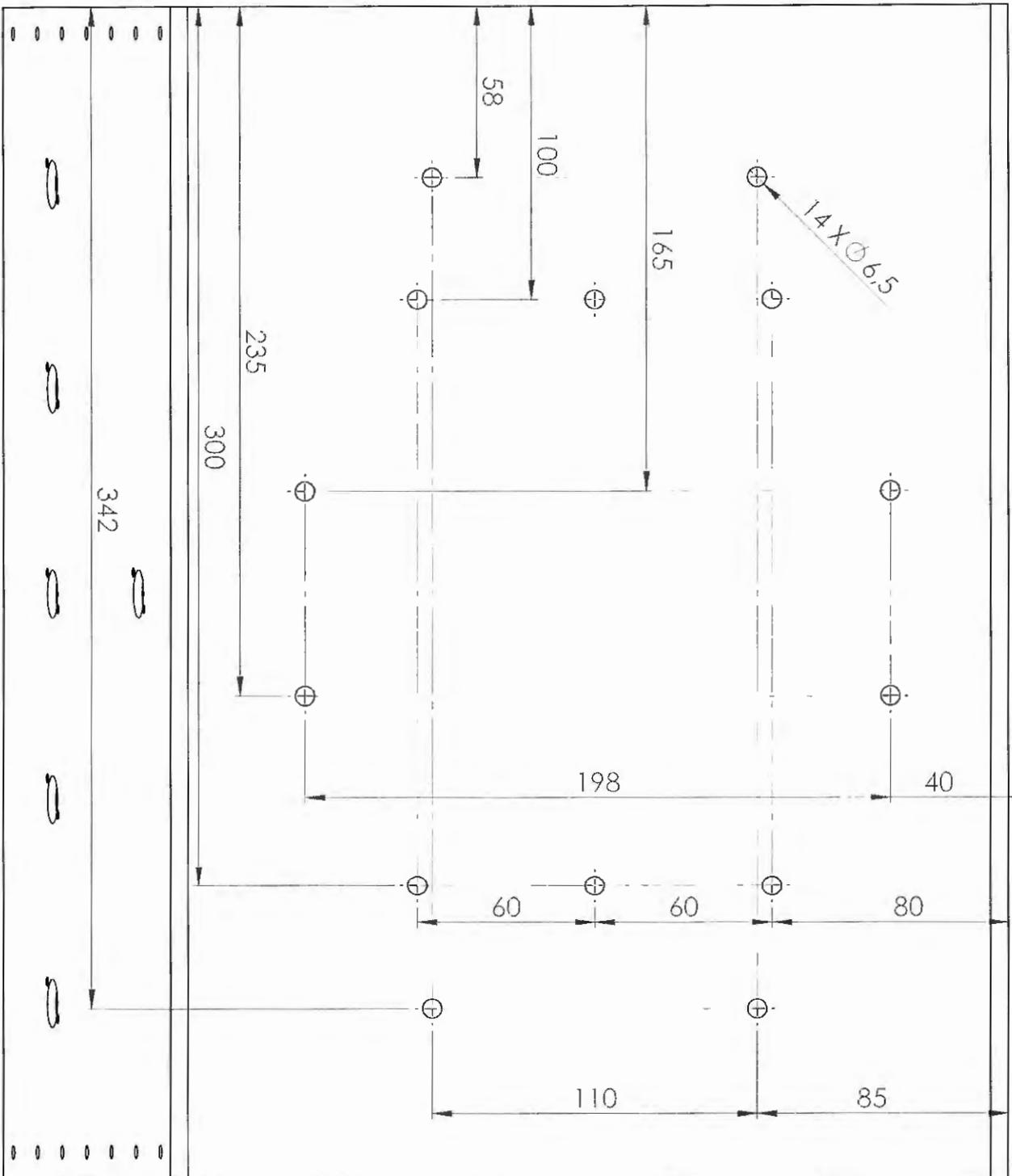
A4



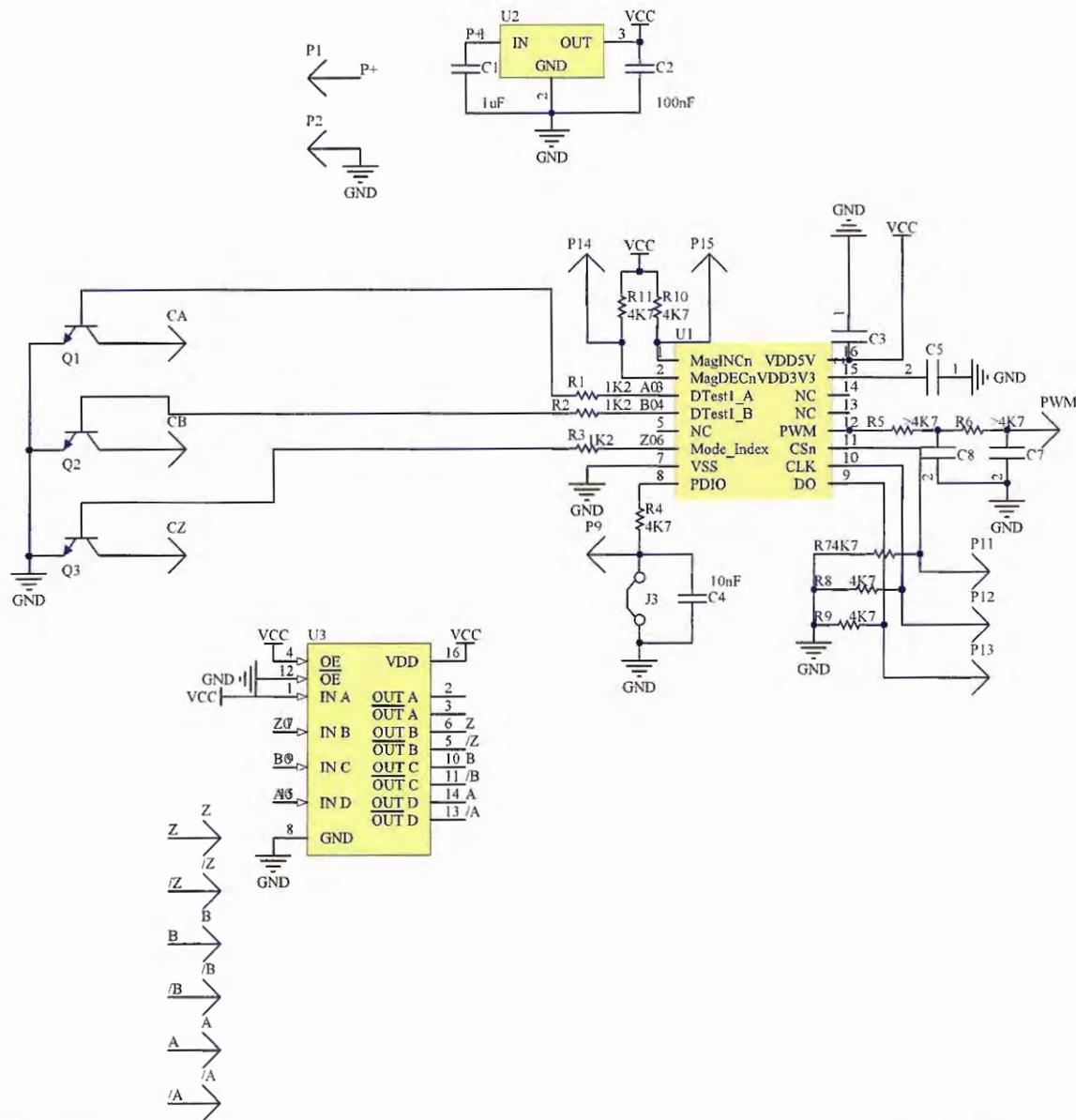
SEÇÃO II
 ESCALA 1 : 5



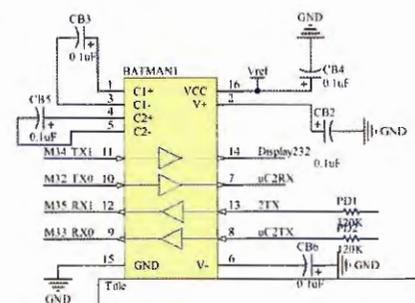
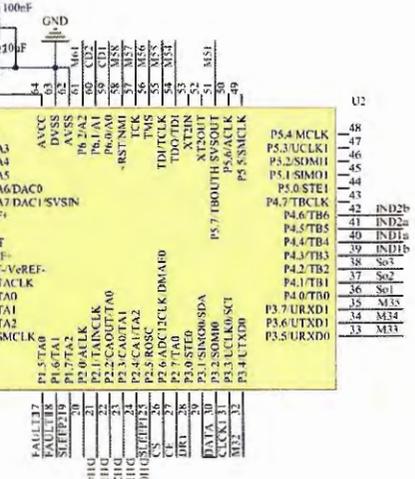
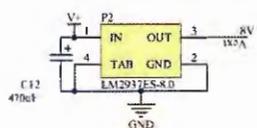
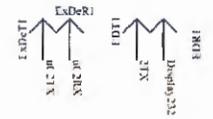
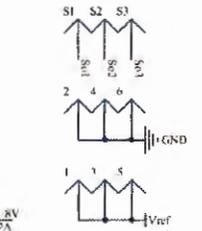
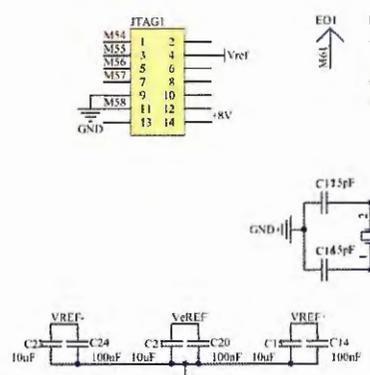
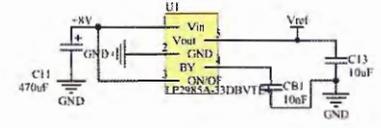
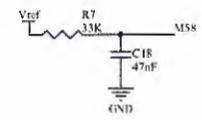
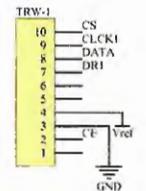
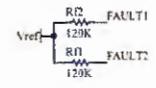
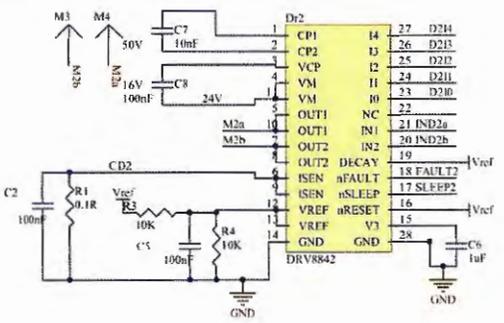
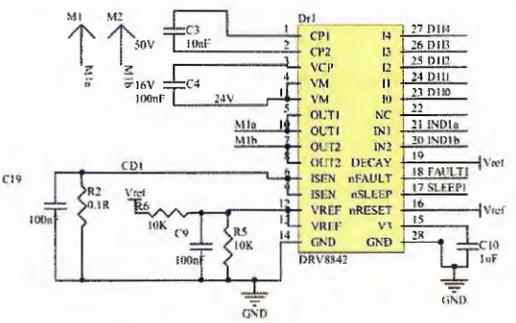
Base Principal



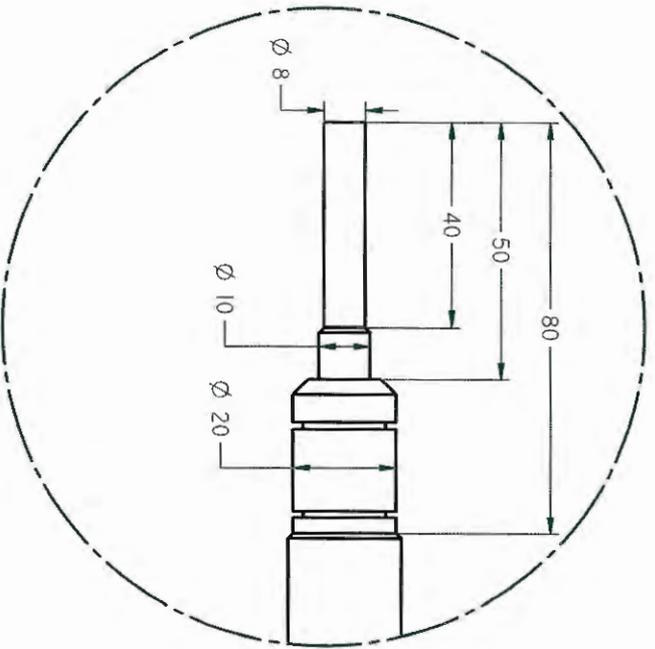
Base Principal



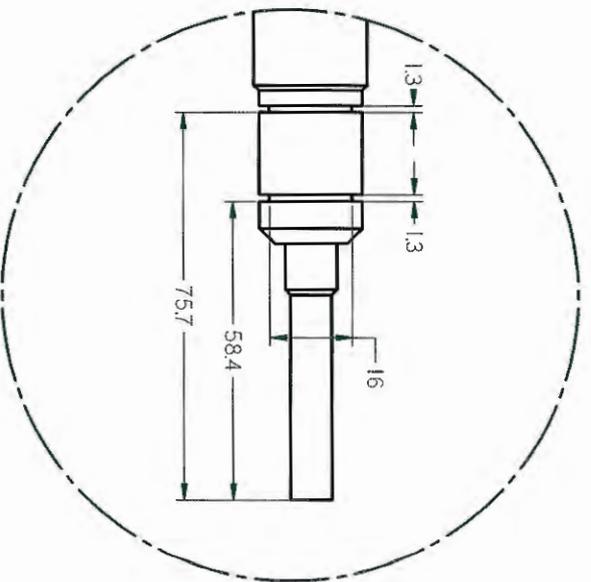
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	28/05/2013	Sheet of
File	C:\Users\...Encoder SchDoc	Drawn By:



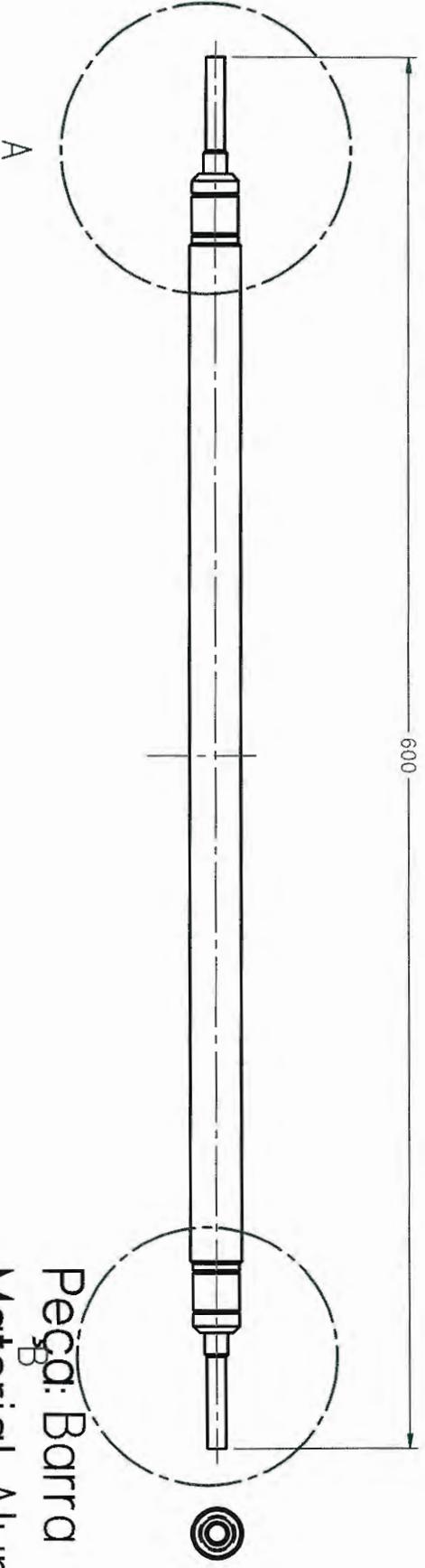
Size	Number	Revision
A3		
Date:	26.05.2013	Sheet of
File:	I:\Projects\...Driver Robot SchDoc	Drawn By



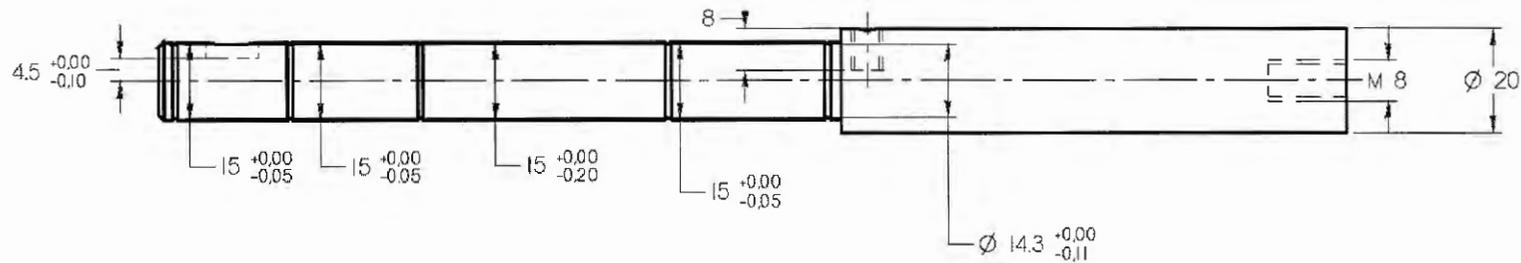
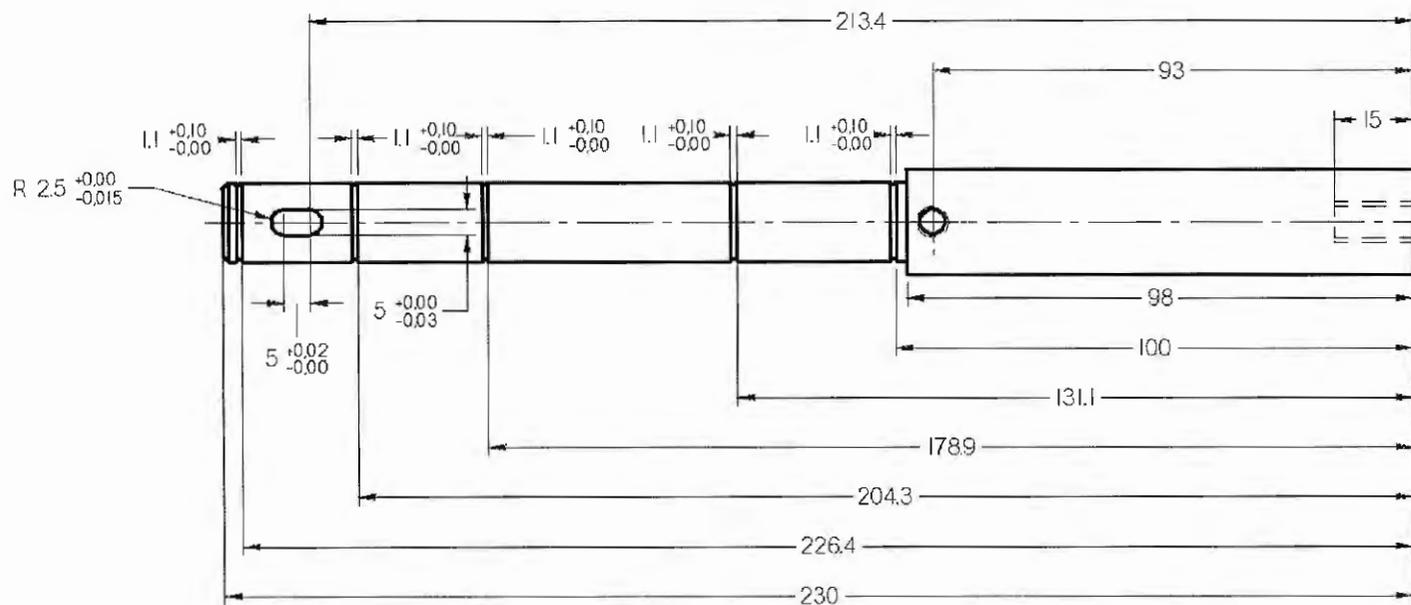
DETALHE A



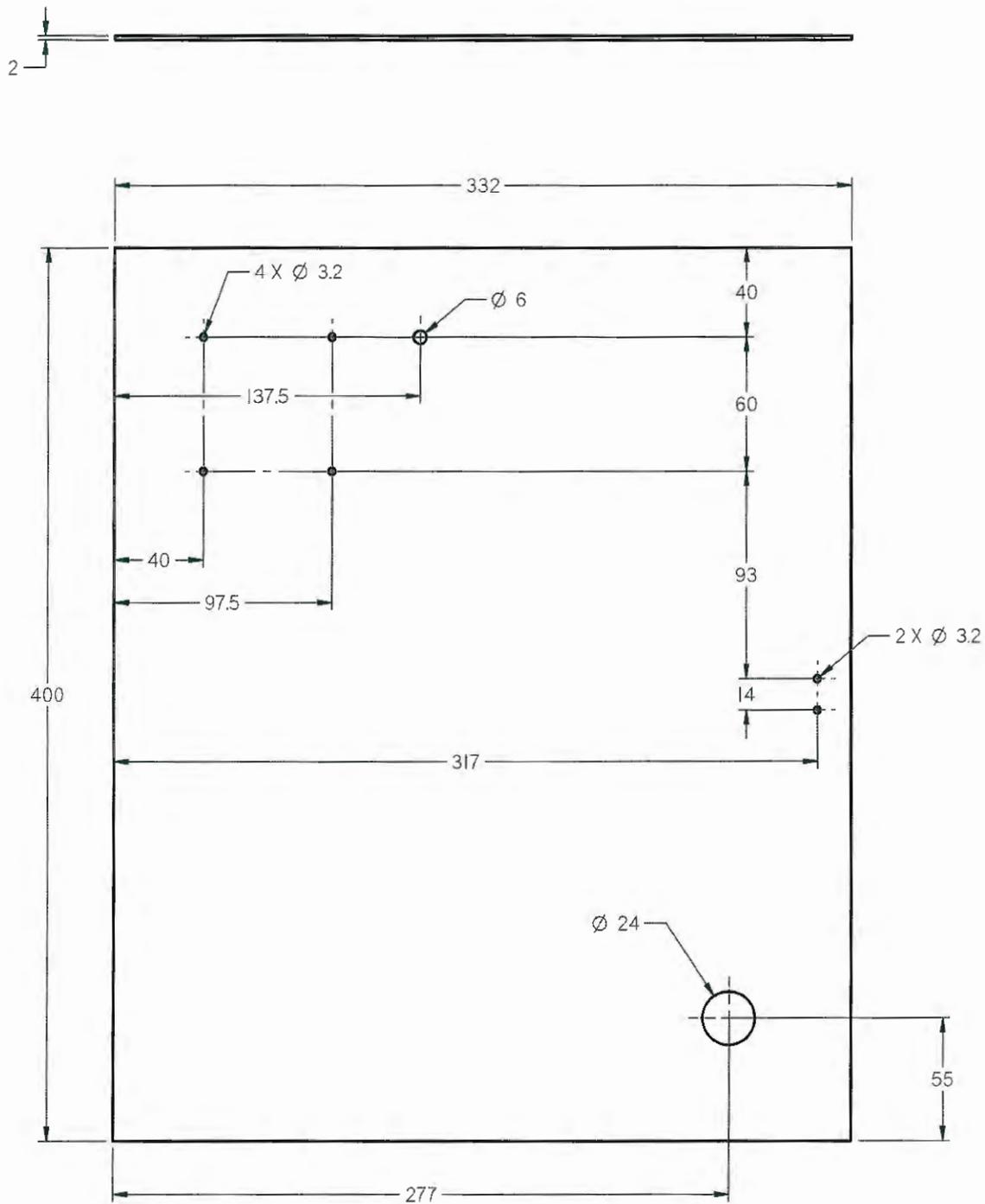
DETALHE B



Peça: Barra
 Material: Alumínio
 Desenho: I/I
 Quantidade: 1 und.
 Escala: 1:2



Peça: Eixo
 Material: SAE 1045
 Desenho: I/I
 Quantidade: 4 und.
 Escala: 4:1

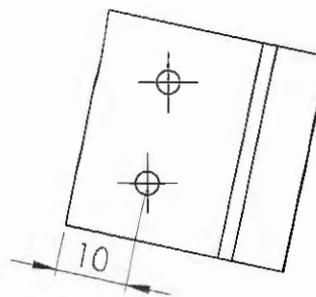


Peça: Tampa
 Material: Alumínio
 Desenho: I/I
 Quantidade: 2 und.
 Escala: 1:2

1 2 3 4 5 6

A

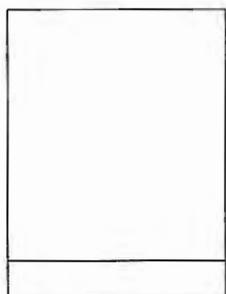
A



EXIBIR A
ESCALA 1 : 1

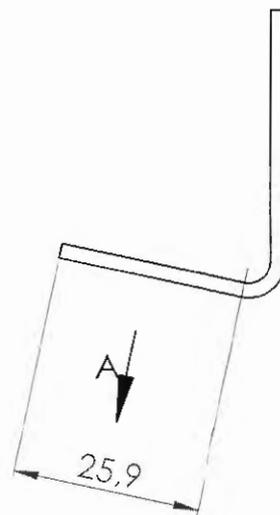
B

B



C

C



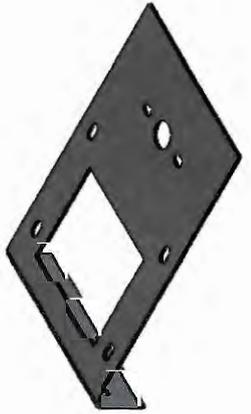
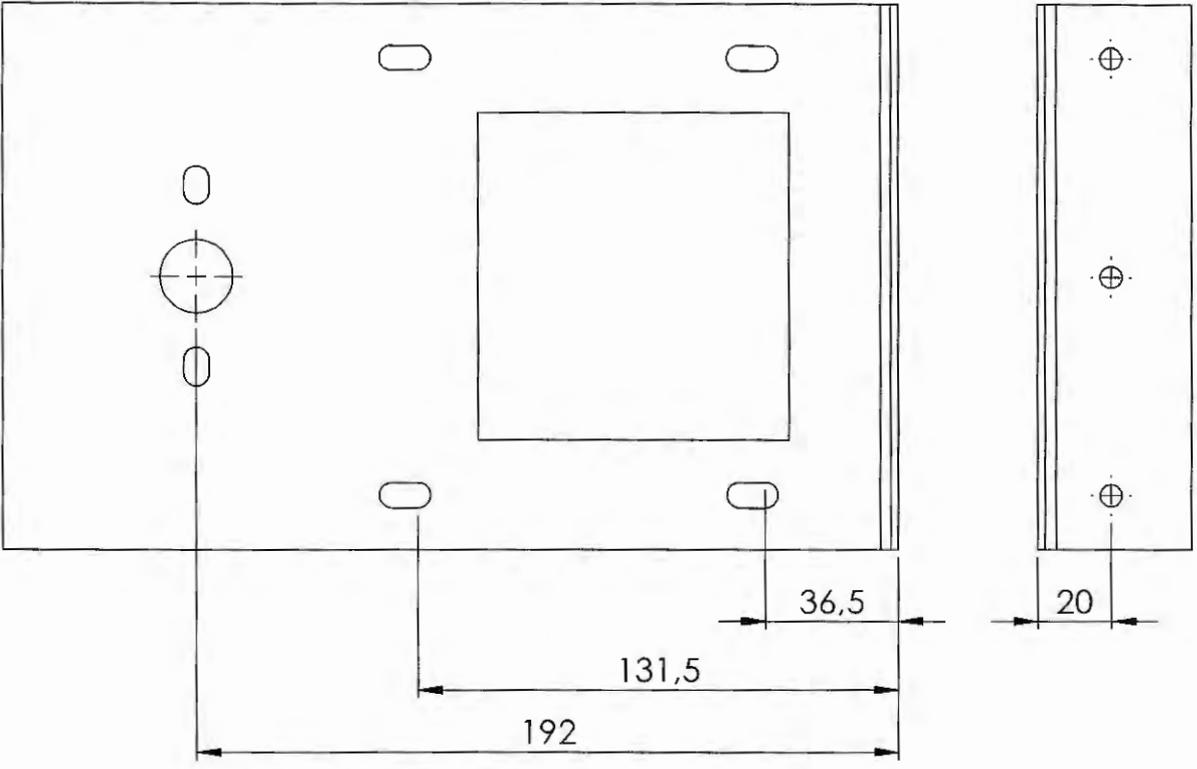
D

D

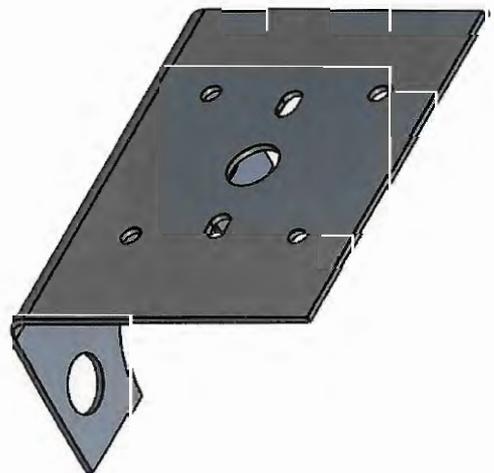
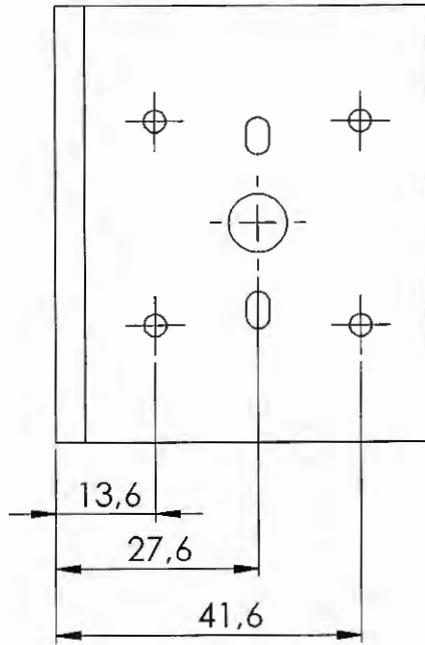
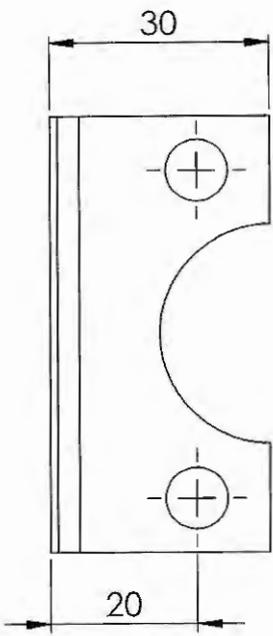
TravaTampa

A4

1 2

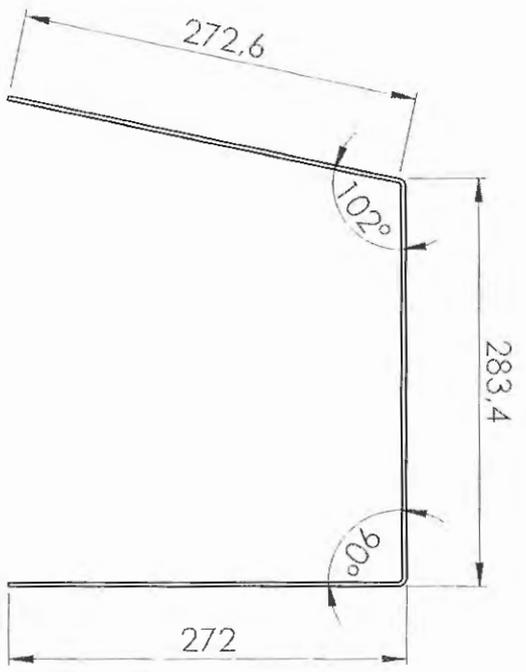
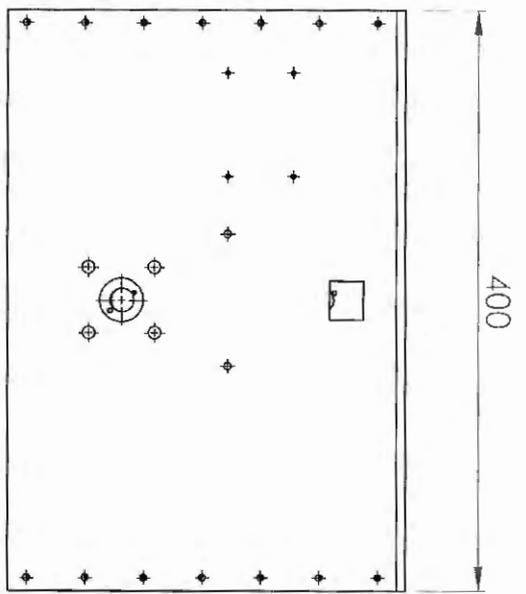


Inside



Encoder

1 2 3 4 5 6



D

C

B

A

1 2

Dobra

FOLHA 1 DE 1

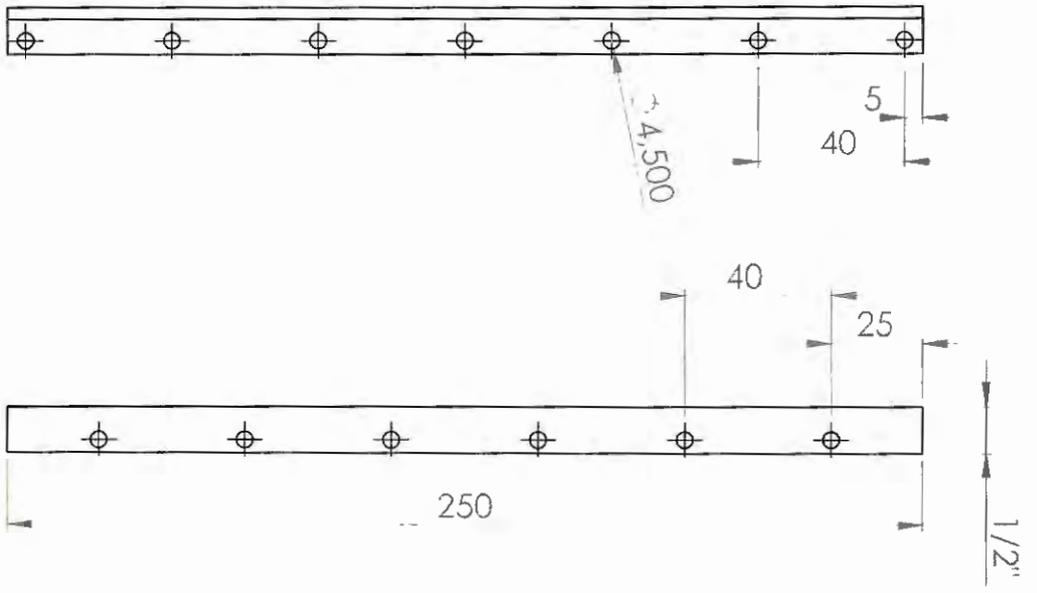
A4

C

B

A

1 2 3 4 5 6



D

C

B

A

C

B

A

Cantoneira

A4

1 2

FOLHA 1 DE 1