

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PLATAFORMA QUADRUPEDE**  
Uma nova estrutura para robô quadrúpede do LARA.

Jorge Henrique de Sousa Santos

Brasília, julho de 2016



**ENGENHARIA  
MECATRÔNICA**  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
**PLATAFORMA QUADRUPEDA**  
**Uma nova estrutura para robô quadrúpede do LARA.**

**Jorge Henrique de Sousa Santos**

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção  
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Geovany Araújo Borges, ENE/UnB

*Orientador*

\_\_\_\_\_

Alexandre Ricardo Soares Romariz, ENE/UnB

*Co-orientador*

\_\_\_\_\_

Ricardo Zelenovsky, ENE/UnB

*Examinador interno*

\_\_\_\_\_

Dianne Magalhães Viana, ENM/UnB

*Examinador interno*

\_\_\_\_\_

**Brasília, julho de 2016**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, J H S.

PLATAFORMA QUADRUPEDA: Uma nova estrutura para robô quadrúpede do LARA,  
[Distrito Federal] 2016.

x, 60p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2016). Trabalho de Graduação –  
Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1. Robótica

2.Quadrúpede

3. Reestruturação

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, JORGE HENRIQUE S., (2016). PLATAFORMA QUADRUPEDA: Uma nova estrutura para robô quadrúpede do LARA. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº015 – 2016, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 60p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jorge Henrique de Sousa Santos

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: PLATAFORMA QUADRUPEDA: Uma nova estrutura para robô quadrúpede do LARA.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Jorge Henrique de Sousa Santos

Qd.301, Al.Gravatá, Cj.12, Lt.8/10/12

Res.Carolina, Apt.604 - Águas Claras

71901-260 Brasília – DF – Brasil.

## **Dedicatória**

*Aos meus pais Jorge Henrique Santos Neto e Rosangela de Sousa Santos, a minha esposa  
Cynthia Dias e aos meus irmãos.*

*Jorge Henrique de Sousa Santos*

## Agradecimentos

*Em primeiro lugar agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e me proporcionaram a possibilidade de sair de Goiânia e vir estudar na UnB em 2003. Agradeço pelos puxões de orelha e pelo incentivo na volta a universidade depois de um hiato de três anos. A a minha esposa, Cyntia Dias, pela paciência (na maior parte do tempo), compreensão e amor. Ao prof. Britto, ex-coordenador do curso, que me recebeu de braços abertos na minha volta a UnB. Aos prof. Geovany Borges e prof. Alexandre Romariz pela oportunidade de aprendizado. Aos meus colegas de trabalho na AUTOTRAC e na DINAMO NETWORKS onde aprendi a engenharia na prática. Em especial ao meu chefe, Enilton pelo incentivo e compreensão. Ao Sr. Antônio, técnico responsável da InMetal Metalúrgica pela fabricação das peças do robô. A minha irmã Roberta e ao meu irmão Diego por tudo. Aos meus sobrinhos pelo carinho e momentos de alegria.*

*Jorge Henrique de Sousa Santos*

---

## **RESUMO**

Este trabalho aborda a reestruturação da plataforma quadrúpede do LARA na UnB. A reestruturação foi dividida da seguinte maneira: mecânica, eletrônica, arquitetura da plataforma e integração dos novos servos. Este trabalho documenta todo o processo desde projeto até integração final de todas as partes. Os testes foram realizados utilizando dados gerado por trabalhos anteriores.

---

## **ABSTRACT**

This work addresses the restructuring of quadruped platform LARA at UNB. The work includes the restructuring: mechanical engineering, electronics, platform architecture and integration of new servos. This works documents the entire process from design to final integration of all parties. The tests were performed using data generated by previous work.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	2
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	2
<b>2</b>	<b>HISTÓRICO DA PLATAFORMA QUADRÚPEDE</b>	<b>3</b>
2.1	INTRODUÇÃO	3
2.2	MODELAGEM	4
2.3	MECÂNICA	7
2.4	SERVOS	10
2.5	ELETRÔNICA	11
2.6	ARQUITETURA	15
2.6.1	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO	16
2.7	PLATAFORMA EMBARCADA	17
2.8	GERAÇÃO DE MOVIMENTOS E PROGRAMAS DESENVOLVIDOS	18
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>19</b>
3.1	INTRODUÇÃO	19
3.2	PROJETO MECÂNICO	19
3.2.1	CHASSIS	19
3.2.2	PATAS E INTEGRAÇÃO DOS SERVOS	20
3.2.3	INTEGRAÇÃO MECÂNICA	24
3.3	SERVOS	26
3.4	PROJETO ELETRÔNICO	28
3.5	PLATAFORMA EMBARCADA	30
3.6	NOVA ARQUITETURA DA PLATAFORMA QUADRÚPEDE	32
3.7	CÓDIGOS DESENVOLVIDOS	33
3.7.1	DYNAMIXELSDK 3.0	33
3.7.2	FUNÇÕES PARA CONTROLE E LEITURA DOS DADOS DOS SERVO	34
3.8	FUNÇÃO PARA LEITURA DA ENTRADA ANALÓGICA	37
3.9	PROGRAMA DE TESTE	38

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	40
4.2	TESTE COM O ROBÔ SUSPENSO .....	40
4.3	TESTE COM O ROBÔ SOBRE O SOLO .....	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>45</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>46</b>
<b>I</b>	<b>DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS</b> .....	<b>47</b>
<b>II</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD</b> .....	<b>48</b>



# LISTA DE FIGURAS

1.1	Robôs quadrúpedes - Boston Dynamics .....	2
2.1	Servo Digital Dynamixel RX-28 .....	4
2.2	Eixo de coordenadas das juntas das patas <sup>[1]</sup> .....	5
2.3	Eixo de coordenadas das juntas fixas das patas em relação ao centro do robô <sup>[1]</sup> .....	6
2.4	Convencões Adotadas <sup>[2]</sup> .....	6
2.5	Cão Robô - Aibo - SONY .....	7
2.6	Robô Quadrúpede - Primeira versão <sup>[1]</sup> .....	7
2.7	Robô quadrúpede ao final do trabalho de BATISTA e CARDOSO <sup>[3]</sup> .....	8
2.8	Soluções para aumento da Rigidez do chassis <sup>[4]</sup> .....	8
2.9	Robô quadrúpede ao final do trabalho de NOVAIS e TOSCANO <sup>[4]</sup> .....	9
2.10	Robô quadrúpede ao final do trabalho de PAIVA <sup>[5]</sup> .....	9
2.11	Servo HITEC HS-755B .....	10
2.12	Sinal PWM para controle de posição de Servo Analógico .....	11
2.13	Placas desenvolvidas por COTTA e NETO <sup>[1]</sup> .....	12
2.14	Circuitos desenvolvidos por NOVAIS e TOSCANO <sup>[4]</sup> .....	12
2.15	Sensor de contato da pata com solo <sup>[4]</sup> .....	13
2.16	IMU - <i>Inertial measurement unit</i> <sup>[4]</sup> .....	13
2.17	Placa de acionamento restruturada <sup>[6]</sup> .....	13
2.18	Sensor de força de contato da pata com o solo <sup>[6]</sup> .....	14
2.19	Arquitetura Inicial <sup>[7]</sup> .....	15
2.20	Primeira arquitetura implementada <sup>[1]</sup> .....	15
2.21	Arquitetura implementada por NOVAIS e TOSCANO <sup>[4]</sup> .....	16
2.22	Cabeçalho do protocolo proposto por CALMON, PINHEIRO e FERREIRA <sup>[7]</sup> .....	16
2.23	Formatação dos bytes de dados .....	17
2.24	Placa PCM-9375 da Advantech .....	17
3.1	Desenho do Chassis - Vista Isométrica .....	20
3.2	Chassis fabricado usando processo de corte e dobra .....	20
3.3	Peça da Pata fabricada a partir de perfil de alumínio .....	21
3.4	Desenho mecânico do Servo RX-28 .....	22
3.5	Perfil U - Pata .....	22
3.6	Perfil L - Pata .....	23
3.7	Desenho 3D da pata do robô quadrúpede .....	23

3.8	HN07-N1 - Servo <i>Horn</i> .....	24
3.9	Suporte para bateria .....	24
3.10	Vista Isométrica - Projeto Mecânico.....	25
3.11	Robô quadrúpede ao final deste trabalho.....	26
3.12	RX-28 ligados em série .....	29
3.13	Circuito de distribuição da alimentação e barramento RS485 para os servos .....	29
3.14	Placa de distribuição .....	29
3.15	Esquemático - Placa para leitura de sensores analógicos .....	30
3.16	Esquemático - Entrada da bateria e Alimentação 12V-5V .....	30
3.17	Raspberry Pi.....	31
3.18	GPIO - Pinout .....	32
3.19	Arquitetura da plataforma quadrúpede ao final deste projeto .....	33
3.20	Fluxograma - read_pos().....	34
3.21	Fluxograma - write_pos().....	35
3.22	<i>envia_angulosSync()</i> .....	36
3.23	Fluxograma - Calibração dos Servos.....	37
3.24	Fluxograma - Leitura de sensor Analógico .....	38
3.25	Fluxograma - Software de teste .....	39
4.1	Teste com o Robô Suspenso .....	40
4.2	Sequência de movimentação das patas .....	41
4.3	Robô sobre o solo.....	42

# LISTA DE TABELAS

2.1	Contribuições a plataforma quadrúpede .....	3
3.1	Comparação entre os servos RX-28 e HS755.....	27
3.2	Protocolo de comunicação com os servos .....	28
3.3	Comandos do Protocolo de comunicação com servos .....	28
3.4	Exemplo: Posicionar o servo 1 na posição central(150°).....	28
3.5	Raspberry Pi Model 2 B - Especificações .....	31
5.1	Diferenças nas características físicas da plataforma.....	43

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPG	Central Pattern Generator
GRAV	Grupo de Robótica, Automação e Visão Computacional
LARA	Laboratório de Robótica e Automação
PC	Personal Computer
PWM	Pulse width Modulation
RIA	Robot Institute of America
UnB	Universidade de Brasília
IMU	Inertial Measurement Unit
MCI	Modelo Cinemático Inverso
CC	Corrente Contínua
A/D	Analógico para digital
SSH	Secure Shell
EPROM	Erasable Programmable Read-only Memory

# Capítulo 1

## Introdução

O uso de robôs quadrúpede oferece varias vantagens quando comparamos a robôs movido por rodas. A locomoção sobre quatro patas é eficiente em todo tipo de terreno e tem uma capacidade maior de superação de obstáculos. Uma desvantagem é que o controle de um robô com quatro patas é mais complexo. No caso robô desenvolvido ao longo deste trabalho cada pata conta com três servos, totalizando 12 graus de liberdade.

Vários trabalhos foram desenvolvidos LARA(Laboratório de Robótica e Automação) sobre robôs quadrúpedes, tratando desde a concepção e modelagem até geração da marcha do robô. A plataforma quadrúpede é resultado e instrumento destes trabalhos.

### 1.1 Contextualização

A inspiração para o desenvolvimento dos robôs quadrúpedes vem da observação da natureza, os animais que andam sobre quatro patas se locomovem de maneira eficiente em terrenos dos mais variados, têm capacidade de transpor obstáculos e de se adaptarem rapidamente a novas condições.

Nos últimos anos houve um grande avanço no desenvolvimento de robôs quadrúpedes. O caso mais conhecido é o da Boston Dynamics, empresa do mesmo grupo do Google que conta com o patrocínio da DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency) e o apoio de várias universidade. A Figura 1.1 mostra vários modelos de robôs desenvolvidos pela empresa. O robô da esquerda é o SpotMini que foi lançado recentemente pesa cerca de 30Kg e autonomia de de 90 min.

Outra empresa que também pesquisa robôs quadrúpede é Disney que desenvolveu um robô quadrúpede que usa otimização concorrente do projeto mecânico(parâmetros mecânicos podem ser modificados com o robô em funcionamento) e controle da movimentação.<sup>[8]</sup>

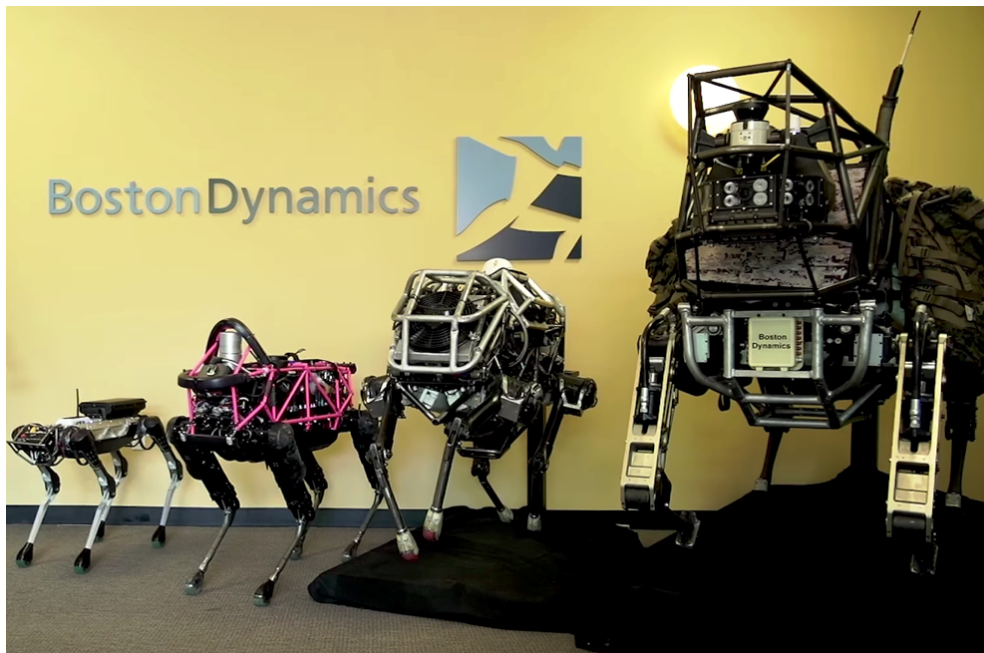


Figura 1.1: Robôs quadrupedes - Boston Dynamics

## 1.2 Definição do problema

A plataforma quadrúpede do LARA está fora de operação há alguns anos pois os servos não geram torque o suficiente para o movimentar o robô e o seu peso subiu muito desde a primeira versão. A intenção deste trabalho é reestruturar a toda plataforma identificando os pontos fracos da versão anterior para propor soluções e melhorias.

## 1.3 Objetivos do projeto

Ao final deste trabalho a plataforma quadrúpede estará disponível para a realização de novos estudos na área de robótica terrestre. Os principais objetivos são:

- Reestruturação mecânica e integração dos servos
- Criação de biblioteca para acionamento e leitura do Servos.

## 1.4 Apresentação do manuscrito

O capítulo 2 trata do histórico da plataforma e foi dividido maneira didática para fazer uma conexão entre os pontos fracos encontrados neste capítulo e as soluções propostas no capítulo seguinte. Em seguida, o capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do projeto e apresenta as soluções. No capítulo 4 são descritos os testes na plataforma e discutidos os resultados, seguido do capítulo 5. Os anexos contém material complementar.

## Capítulo 2

# Histórico da Plataforma Quadrúpede

### 2.1 Introdução

O projeto quadrúpede foi iniciado por volta do ano de 2005. A motivação foi a construção de uma plataforma para apoiar estudos na área de robótica terrestre e robótica comportamental. Ao longo do tempo vários alunos dos curso de engenharia mecatrônica e engenharia elétrica se envolveram no projeto seja como voluntários ou durante o trabalho de graduação. A tabela 2.1 mostra os trabalhos desenvolvidos sobre a plataforma e suas contribuições.

Tabela 2.1: Contribuições a plataforma quadrúpede

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>
COTTA, G. H.;NETO, L. R.	2006	Realização de uma plataforma para estudo de robótica comportamental baseada em quadrúpedes.
CALMON, A. du P.; PINHEIRO, N. C.; FERREIRA, R. U.	2006	Desenvolvimento de um robô-cachorro comportamental: percepção e modelagem comportamental
SOUTO, R. F.	2007	Modelagem cinemática de um robô quadrúpede e geração de seus movimentos usando filtragem estocástica.
BATISTA, G. F.;CARDOSO, I. F.	2007	Adequação de um sistema de locomoção de um robô quadrúpede para avaliação de algoritmos de aprendizagem
NOVAIS, N. A. de; TOSCANO, R. A.	2007	Estudo de locomoção de uma plataforma quadrúpede utilizando sensoriamento inercial e geração de padrões de movimento.
RAMOS, E.G.	2008	Desenvolvimento da plataforma quadrúpede geração de software e eletrônica
Daniel de Sousa Ramos	2012	Aluno voluntário
PAIVA, R.Cortes	2012	Osciladores neurais para comando de marcha de um robô quadrúpede e robô humanoide
Rodrigo	2015	Aluno voluntário

Em 2006 foram registradas as primeiras contribuições para a plataforma quadrúpede. COTTA e NETO<sup>[1]</sup> desenvolveram e validaram o modelo cinemático do robô utilizando ferramentas de simulação. Neste trabalho foi realizada a concepção mecânica inicial da plataforma e a confecção das placas de acionamento dos servos. No mesmo ano CALMON, PINHEIRO e FERREIRA<sup>[7]</sup> desenvolveram um trabalho focado na interação do robô com mundo. As principais contribuições foram: o modelo comportamental, o sistema de sensoriamento, a arquitetura do sistema e o protocolo de

comunicação.

No ano de 2007, o modelo cinemático foi melhorado por SOUTO<sup>[2]</sup> que também implementou um algoritmo para geração do movimento do robô usando filtragem estocástica. Em paralelo BATISTA e CARDOSO<sup>[3]</sup> realizaram algumas melhorias no robô: como a substituição dos servos, melhorias no protocolo de comunicação. Foi criado procedimento para calibração dos servos e implementado algoritmos de aprendizagem. No segundo semestre NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup> implementaram algumas melhorias na mecânica do robô e desenvolveram IMU (inertial measurement unit).

Em 2008, RAMOS<sup>[6]</sup> realizou uma reestruturação na plataforma, melhorando as placas de acionamentos dos servos e transcrevendo os códigos desenvolvidos nos trabalhos anteriores do MATLAB para linguagem C.

O aluno voluntário Daniel de Sousa Ramos implementou o sistema embarcado da plataforma que foi utilizado no trabalho de PAIVA<sup>[5]</sup>. Este foi o último trabalho desenvolvido na plataforma quadrúpede onde foi implementado algoritmos para geração de marcha utilizando osciladores neurais. Não foi possível testar os algoritmos com o robô sobre o solo pois o mesmo sofreu aumento de peso considerável devido à adição de novas placas e reforços estruturais nos trabalhos anteriores.

Como os servos da plataforma já não eram suficientes para fornecer torque necessário para geração de movimento, foram adquiridos 12 servos digitais DYNAMIXEL RX-28 como o da Figura 2.1



Figura 2.1: Servo Digital Dynamixel RX-28

## 2.2 Modelagem

A modelagem inicial foi realizada por COTTA e NETO<sup>[1]</sup>, onde cada uma das patas foi modelada como um manipulador robótico com 3 graus de liberdade. A Figura 2.2 mostra os eixos de coordenadas adotados no modelo. Uma simplificação adotada neste modelo foi considerar que o comprimento  $a_1$  como zero. As quatro patas utilizam o mesmo modelo. A coordenada da pata em relação ao eixo de coordenada do robô foi obtida pela translação de cada uma das pernas no eixo  $x$  e  $z$ . A Figura 2.3 mostra a posição das patas em relação ao centro do robô. A posição do robô



em relação a um sistema de coordenada externo é obtida através da translação do eixo do centro do robô em relação a origem do sistema de referência.

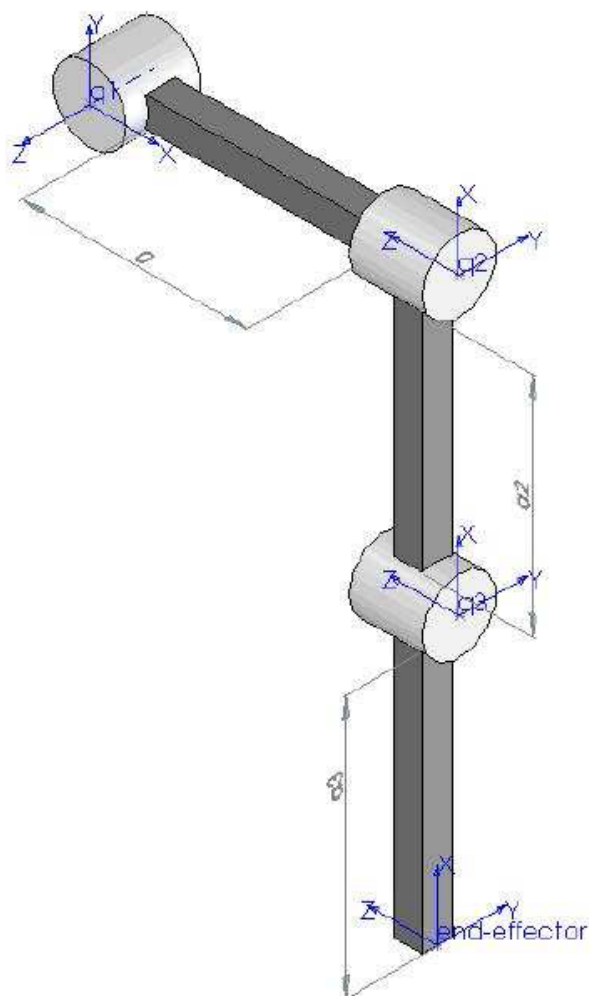


Figura 2.2: Eixo de coordenadas das juntas das patas <sup>[1]</sup>

SOUTO<sup>[2]</sup> desenvolveu um modelo mais completo. As patas foram modeladas conforme a Figura 2.2 porém todas as distâncias entre as juntas foram consideradas. Neste trabalho foi adotada uma série de convenções quanto ao posicionamento do robô e suas partes. Estas convenções foram utilizadas em todos os trabalhos seguintes inclusive neste. A Figura 2.4 mostra as convenções adotadas. Algumas observações devem ser feitas pois são importantes durante a implementação das funções que enviam comando para os servos. Os ângulos das juntas têm valor zero quando todos os segmentos estão perpendicular ao solo. Os sentidos positivo dos ângulos  $\theta_{n,2}$  e  $\theta_{n,3}$  correspondem a rotações de forma a movimentar a pata para frente conforme Figura 2.4.(c-d). Os ângulos  $\theta_{n,1}$  tem sentido positivo "para dentro do robô" nas patas da direita (patas 1 e 4). Nas patas da esquerda (patas 2 e 3) o sentido positivo é para fora do robô. Durante a implementação das rotinas de movimentação dos servos deve se ter atenção à esta convenção, pois a origem e os sentidos dos servos não são necessariamente coincidentes com modelo utilizado.

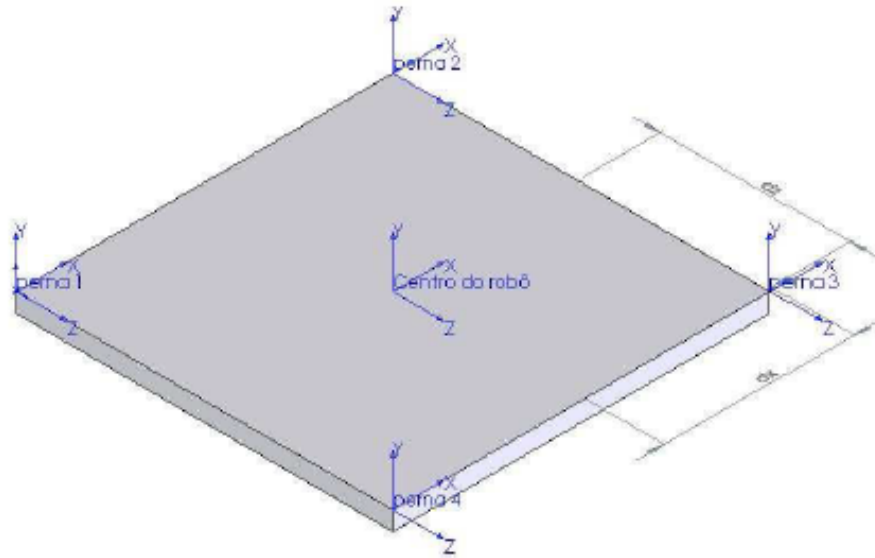


Figura 2.3: Eixo de coordenadas das juntas fixas das patas em relação ao centro do robô<sup>[1]</sup>

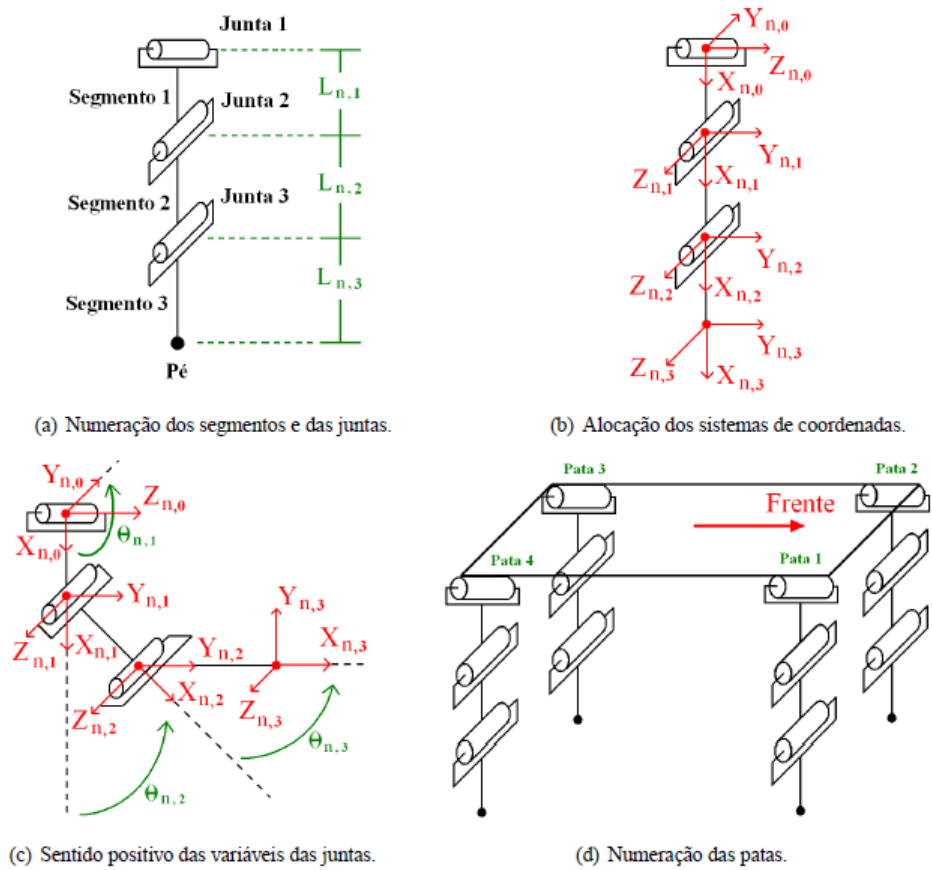


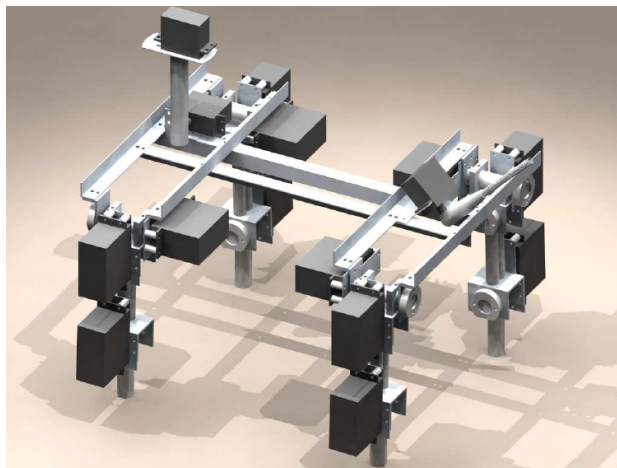
Figura 2.4: Convenções Adotadas<sup>[2]</sup>

## 2.3 Mecânica

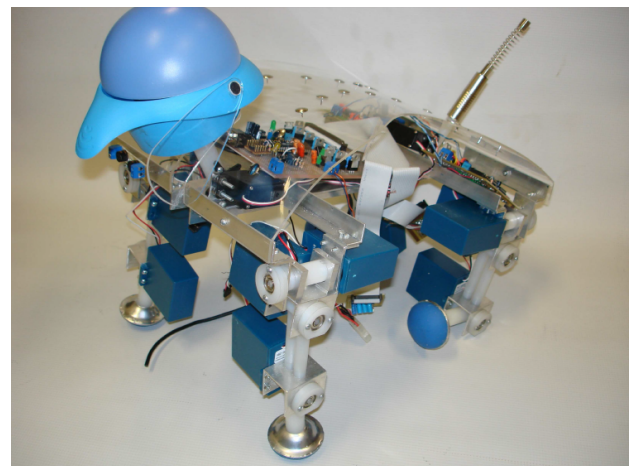
A concepção do projeto mecânico foi realizada por COTTA e NETO<sup>[1]</sup> tomando como exemplo alguns robôs existentes como o AIBO da Sony (Figura 2.5). Os graus de liberdade da plataforma foram inspirados nesses robôs. A escolha dos materiais levou em conta o peso e o custo. Foram utilizados perfis de alumínio de 2mm de espessura e peças usinadas em nylon. A Figura 2.6 mostra o projeto inicial e o robô concluído. Este robô não funcionou pois os servos não possuía torque suficiente.



Figura 2.5: Cão Robô - Aibo - SONY



(a) Projeto Mecânico

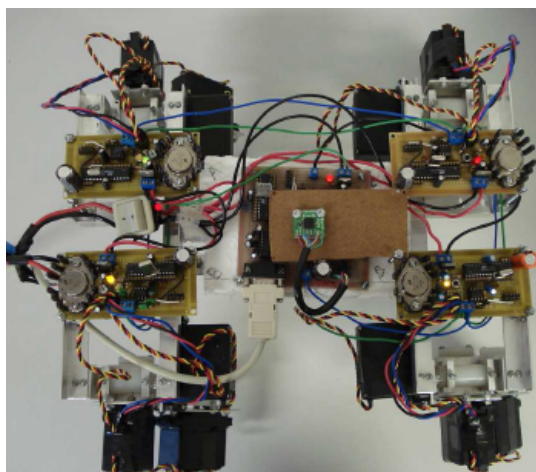


(b) Robô construído

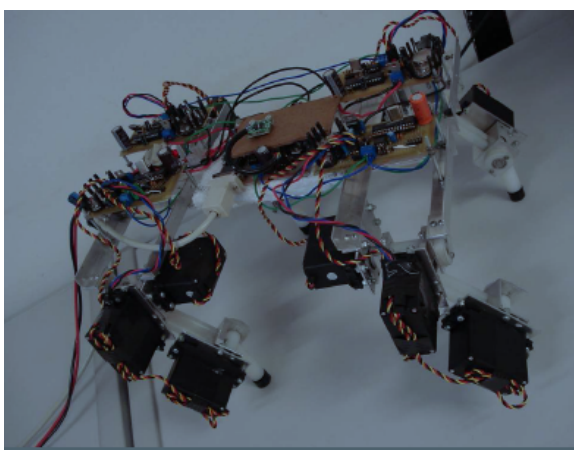
Figura 2.6: Robô Quadrúpede - Primeira versão<sup>[1]</sup>

BATISTA e CARDOSO<sup>[3]</sup> substituíram os servos do robô por um modelo de maior torque. Para integração dos novo servos na plataforma foram realizada algumas modificações como uma nova peça de *nylon* que liga o eixo do servo à junta das patas e o posicionamento dos motores foi alterado ficando do lado externo do robô. A Figura 2.7 mostra como ficou o robô ao final do projeto.

NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup> constataram que o chassi original do robô era demasiadamente flexível fazendo como que as juntas de desacoplassem do servo durante os teste. Para resolver este problema foram adicionados parafusos passantes ao longo da estrutura mantendo a distância entre as duas



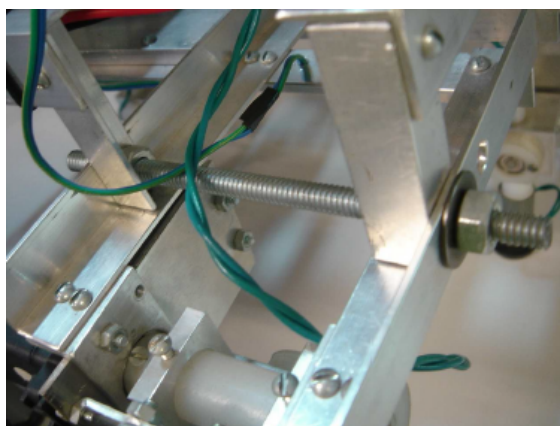
(a) Vista Superior



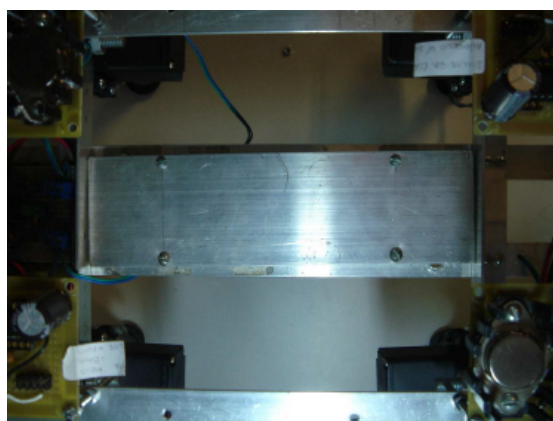
(b) Vista em perspectiva

Figura 2.7: Robô quadrúpede ao final do trabalho de BATISTA e CARDOSO<sup>[3]</sup>

barras fixas, como pode ser vista na Figura 2.8(a). Para minimizar a flexibilidade na parte central da estrutura foi adicionada uma chapa de alumínio conforme a Figura 2.8(b). A Figura 2.9 mostra o robô ao final do trabalho. As modificações no chassis aumentaram a rigidez da estrutura e o preço foi incremento no peso do robô.



(a) Parafuso Passante



(b) Chapa de Alumínio

Figura 2.8: Soluções para aumento da Rigidez do chassis<sup>[4]</sup>

A última modificação da estrutura mecânica foi adição de um apoio para plataforma embarcada realizada por Daniel de Sousa Ramos de forma voluntária. A Figura 2.10 mostra o robô ao final do trabalho de PAIVA<sup>[5]</sup> que utilizou a plataforma embarcada.

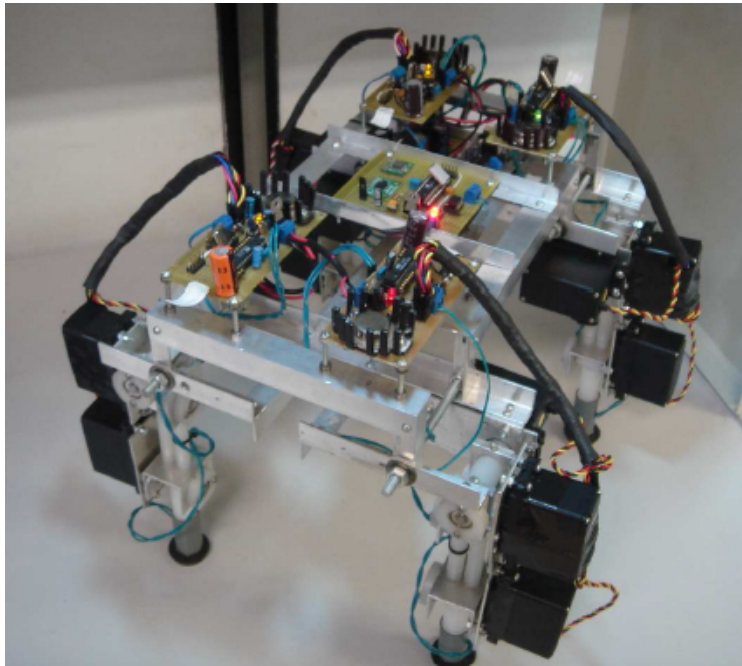


Figura 2.9: Robô quadrúpede ao final do trabalho de NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup>



Figura 2.10: Robô quadrúpede ao final do trabalho de PAIVA<sup>[5]</sup>

## 2.4 Servos

Toda movimentação do robô é realizada pela atuação dos servos. A primeira versão, desenvolvida por COTTA e NETO<sup>[1]</sup> usou servos baixo torque que foram substituídos no trabalho seguinte<sup>[3]</sup> pelo modelo HS-755HB como o da Figura 2.11.



Figura 2.11: Servo HITEC HS-755B

Os servos utilizados nos trabalhos anteriores são analógicos, comumente utilizados em auto-modelos e aeromodelos. Estes servos possuem três fios que são ligados em  $V_{cc}$ , GND e terceiro é ligado ao sinal de controle PWM. O servo HS-755B é controlado por um sinal com período entre 17 ms e 21 ms, sendo que o tempo que o sinal fica em nível lógico alto determina a posição do servo. A Figura 2.12<sup>1</sup> mostra a forma de onda do sinal para controle da posição do servo. Na plataforma quadrúpede o PWM para controle da posição é gerado na placa de acionamento das patas.

---

<sup>1</sup>Fonte:<[https://www.servocity.com/html/how\\_do\\_servos\\_work\\_.html](https://www.servocity.com/html/how_do_servos_work_.html)>

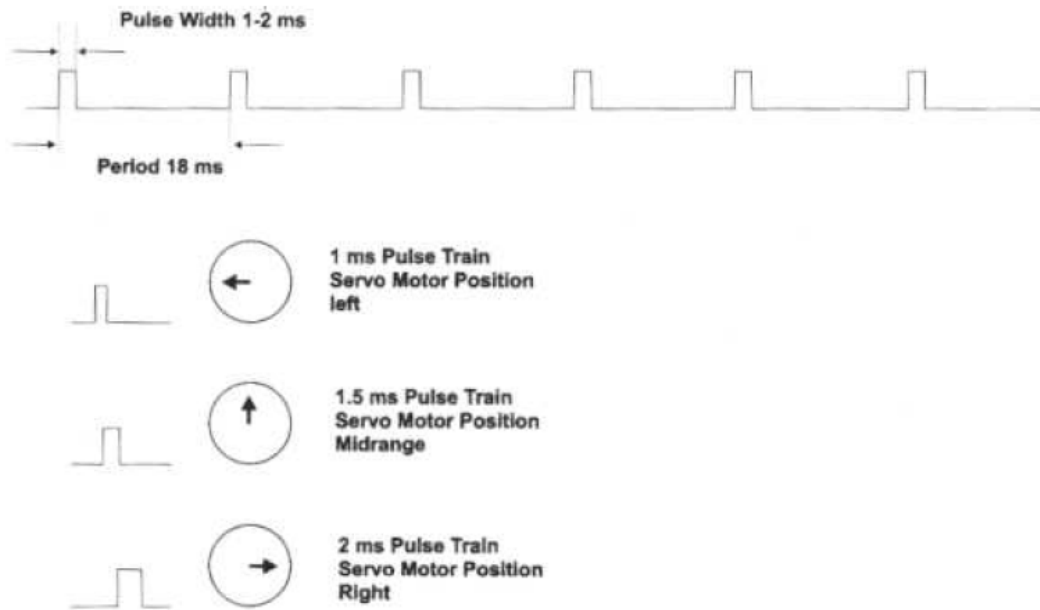


Figura 2.12: Sinal PWM para controle de posição de Servo Analógico

## 2.5 Eletrônica

Durante o desenvolvimento da plataforma foram criados vários circuitos como de alimentação, de acionamento dos motores, leitura dos sensores e interfaces para comunicação entre diversos dispositivos do robô.

Os primeiros circuitos foram projetados e construídos por COTTA e NETO<sup>[1]</sup>. Foram desenvolvidos circuito de alimentação dos servos (Converte de 12V para 6V), circuito de alimentação do microcontrolador (Converte de 12V para 5V) e circuitos lógicos que utilizam o microcontrolador ATmega8 e transceptores RS-232 e RS-485. Estes circuitos foram integrados em dois modelos de placa: o primeiro modelo é placa de acionamento das patas que tem três saídas PWM para os servos, circuito de alimentação 12V-6V, circuito de alimentação de 12V-5V e circuito de comunicação RS-485. O segundo modelo controla os servos responsáveis pelos movimentos da cabeça e rabo. Esta placa possui duas saídas PWM para os servos, circuito de alimentação 12V-5V, circuito de alimentação 12V-6V, circuito de comunicação RS232 e RS485. A Figura 2.13 mostra as placas desenvolvidas<sup>[1]</sup>.

BATISTA e CARDOSO<sup>[3]</sup> desenvolveram circuitos de sensoriamento utilizando acelerômetros. Foram utilizados o acelerômetro MMA7260Q (saída analógica que é lida através dos conversores AD do microcontrolador) e o LIS3LV02Q (envia dados para microcontrolador através SPI).

Visando melhorar a organização dos cabos, NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup> criaram uma placa para distribuição de alimentação (Figura 2.14.(a)). Também foi desenvolvido um conversor RS232-RS485 que pode ser vista na Figura 2.14.(b). Este conversor substitui a placa principal, que acionava os servos da cabeça e do rabo e servia como interface entre o PC e a rede 485.

Na parte de sensoriamento foi realizada uma modificação na placa de acionamento das patas

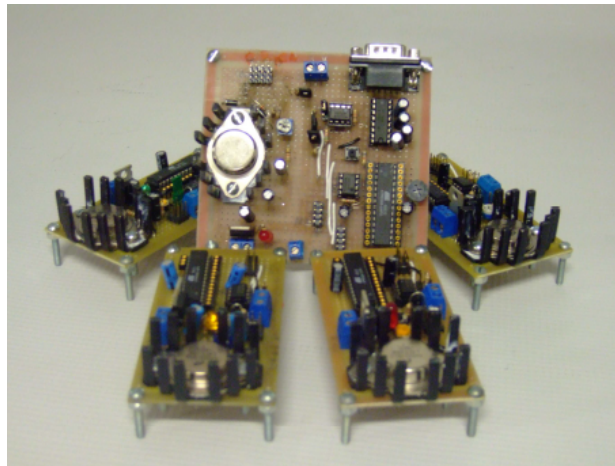
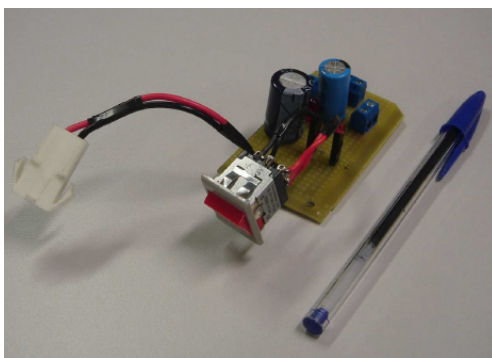
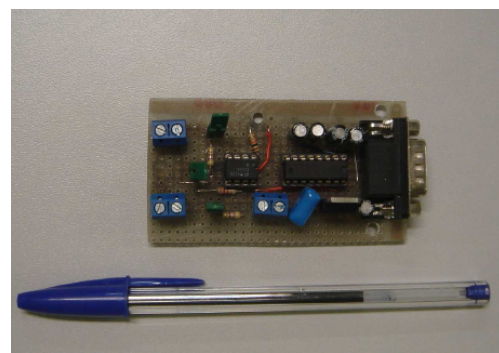


Figura 2.13: Placas desenvolvidas por COTTA e NETO<sup>[1]</sup>



(a) Placa de distribuição da alimentação



(b) Conversor RS-485

Figura 2.14: Circuitos desenvolvidos por NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup>

para permitir a leitura do sensor contato entre a pata e o solo. Um circuito para o condicionamento de sinal é ligado a entrada de interrupção do microcontrolador. A Figura 2.15 mostra os elementos responsáveis pelo sensoriamento do contato da pata com o solo.

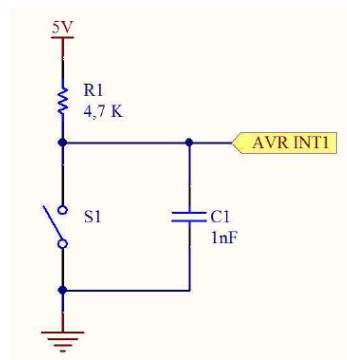
A principal contribuição de NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup> foi o desenvolvimento de IMU, que é a unidade de medidas inerciais, composta por um microcontrolador, um acelerômetro de três eixos e um girômetro. A IMU pode ser vista na Figura 2.16.

No trabalho de RAMOS<sup>[6]</sup> as placas de acionamento das patas foram refeitas, pois como a versão produzida anteriormente<sup>[1]</sup> começou a apresentar mau contato e oxidação. A Figura 2.17 mostra a placa restruturada. Foi adicionada a placa uma entrada para sensor de força *Flexforce* como visto na Figura 2.18.(a). Trata-se de um sensor analógico que varia sua resistência de acordo com a força aplicada. Um circuito de condicionamento de sinal foi elaborado (Figura 2.18.(b)) e a saída é conectada a uma das entradas AD do microcontrolador.





(a) Sensor



(b) Condicionamento do Sinal

Figura 2.15: Sensor de contato da pata com solo<sup>[4]</sup>

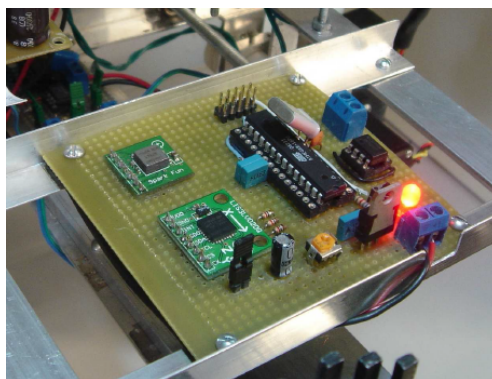


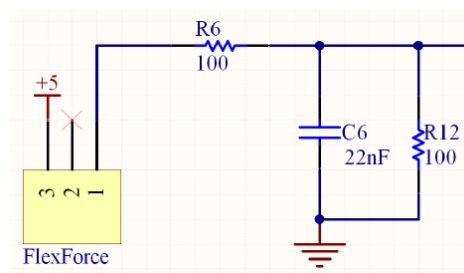
Figura 2.16: IMU - *Inertial measurement unit*<sup>[4]</sup>



Figura 2.17: Placa de acionamento reestruturada<sup>[6]</sup>



(a) Sensor de força *Flexforce*



(b) Circuito de condicionamento do sensor

Figura 2.18: Sensor de força de contato da pata com o solo<sup>[6]</sup>

## 2.6 Arquitetura

A arquitetura do robô quadrúpede foi concebida no início do projeto por CALMON, PINHEIRO e FERREIRA<sup>[7]</sup>. A Figura 2.19 mostra como os módulos são organizados e que se comunicam através de um barramento RS485. Na Figura temos um módulo que atua como *master* (PC ou processador ARM) e vários módulos *slaves*.

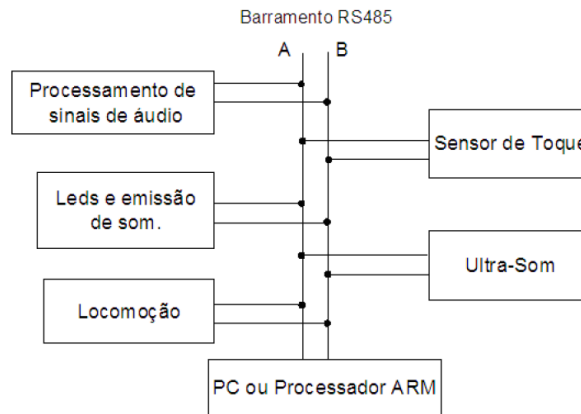


Figura 2.19: Arquitetura Inicial<sup>[7]</sup>

A primeira implementação dessa arquitetura foi realizada por COTTA e NETO<sup>[1]</sup> com uma mudança: o módulo *master* deixa de ser o PC e passa a ser placa de acionamento dos servos da cabeça e do rabo sendo que este módulo se comunica com o PC através de uma interface serial RS232. A Figura 2.20 mostra a arquitetura.

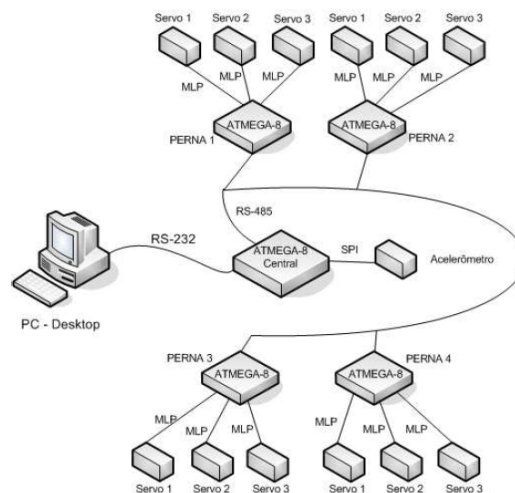


Figura 2.20: Primeira arquitetura implementada<sup>[1]</sup>

NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup> Realizaram mudança na arquitetura (Figura 2.21) com a introdução do conversor RS232-RS485 que substituiu o módulo principal, fazendo que o PC passe a atuar como **mestre** na comunicação através do barramento RS485. Dessa maneira a arquitetura ficou mais próxima da proposta original(Figura 2.19).

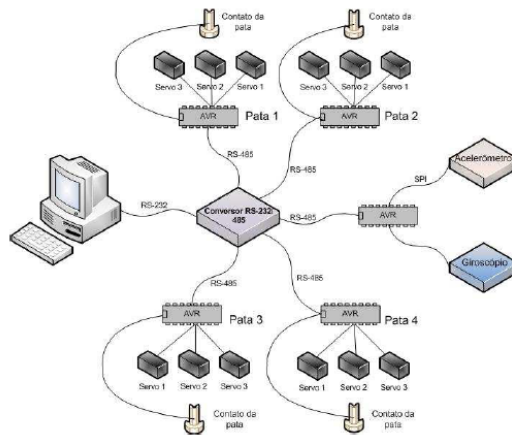


Figura 2.21: Arquitetura implementada por NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup>

### 2.6.1 Protocolo de Comunicação

A comunicação entre os módulos que compõem o robô é realizada através do barramento RS485. A comunicação deve ser feita em idioma comum que é o protocolo de comunicação definido por CALMON, PINHEIRO e FERREIRA<sup>[7]</sup>. O protocolo proposto é composto por dois bytes de cabeçalho, seguidos pelos bytes de dados. A Figura 2.22 mostra o significado de cada um dos bits do cabeçalho.

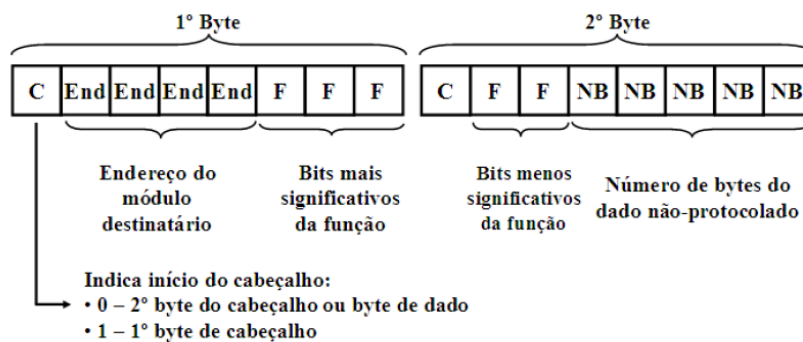


Figura 2.22: Cabeçalho do protocolo proposto por CALMON, PINHEIRO e FERREIRA<sup>[7]</sup>

Seguido aos dois bytes do cabeçalho, os bytes de dados devem ser formatados de maneira que o primeiro bit de cada byte seja zero. A Figura 2.23 mostra um exemplo onde dois bytes de dados são formatados, resultando em três bytes com a formatação definida no protocolo.

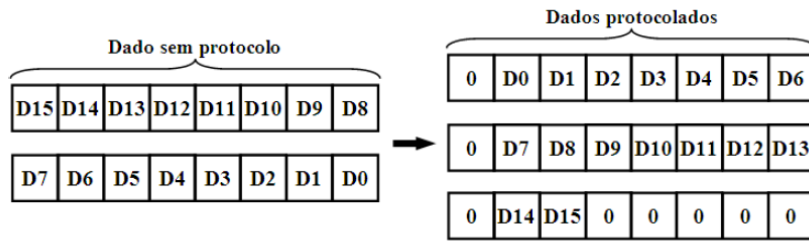


Figura 2.23: Formatação dos bytes de dados

## 2.7 Plataforma embarcada

Nos trabalhos desenvolvidos até 2008 <sup>[1-4, 6, 7]</sup> todos os comandos para o robô partiam de um PC através de um cabo serial.

A principal desvantagem da falta de uma plataforma embarcada é impossibilidade de o robô ser autônomo pois o mesmo sempre deve estar ligado ao PC à distância máxima que o robô pode ficar do computador é limitada pelo comprimento do cabo serial.

Com isso em mente foi implementado por Daniel de Sousa Ramos o sistema embarcado. Foi utilizada a placa PCM-9375 da Advantech, baseada no processador Geode LX800(x86) da AMD rodando a 500 MHz, com 1GB de memória RAM e com 2GB de armazenamento usando cartão *CompactFlash*. Foi conectado à porta USB da placa mãe um adaptador wi-fi para permitir o acesso remoto a máquina utilizando SSH. O sistema operacional instalado foi Debian 5.0 com a extensão de tempo real Xenomai.

A plataforma embarcada foi utilizada apenas no trabalho de PAIVA<sup>[5]</sup>, porém como o robô estava muito pesado e as vantagens de utilizar um sistema embarcado não foram aproveitadas.

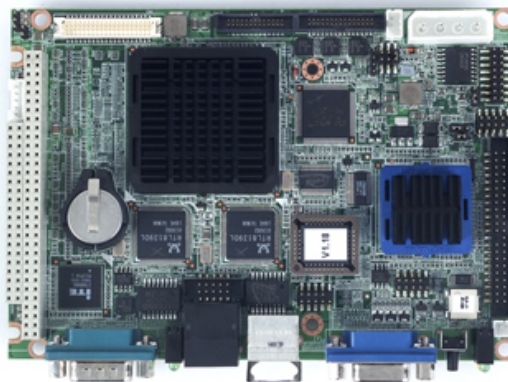


Figura 2.24: Placa PCM-9375 da Advantech

## 2.8 Geração de movimentos e programas desenvolvidos

Os programas desenvolvidos por COTTA e NETO<sup>[1]</sup> foram escritos no MATLAB. O principal software deste trabalho foi a rotina para cálculo dos ângulos das juntas do robô usando o modelo cinemático inverso. Como a plataforma não estava concluída ao final do trabalho foram executadas apenas simulações.

CALMON, PINHEIRO e FERREIRA<sup>[7]</sup> escreveram a função (na linguagem C) que envia e recebe dados utilizando o protocolo apresentado na seção 2.6.1. Uma série de programas com foco na área de robótica comportamental foram implementados e fogem ao escopo da plataforma quadrúpede atualmente.

SOUTO<sup>[2]</sup> desenvolveu vários programas utilizando MATLAB. Foi implementado o modelo cinemático inverso mais completo e otimizado do que o modelo inicial em <sup>[1]</sup>. Outra contribuição foi o algoritmo de geração da marcha do robô usando o filtro de Kalman como otimizador da trajetória das patas do robô.

BATISTA e CARDOSO<sup>[3]</sup> criaram um programa para calibração dos servos. Este programa que grava a posição inicial dos servos na EPROM das placas de comandos dos servos. Esse procedimento melhora a resposta do robô. Para testar o robô foi código utilizado lê um arquivo texto com as sequências de movimentos geradas nos trabalhos anteriores e envia os comandos para movimentação para das patas. Também foi desenvolvido algoritmo de treinamento baseado em Passeio Aleatório adaptativo.

Diferente dos trabalhos anteriores, NOVAIS e TOSCANO<sup>[4]</sup> optaram por não utilizar o modelo cinemático inverso desenvolvido nos trabalhos anteriores<sup>[1, 2]</sup>. A geração do movimento foi baseada no modelo geométrico da pata e em autômatos. Foi criada biblioteca para leitura dos sensores.

RAMOS<sup>[6]</sup> converteu código as rotinas para cálculo do MCI desenvolvidas por SOUTO<sup>[2]</sup> para a linguagem C e escreveu programa para leitura dos dados proveniente dos sensores de pressão.

Finalmente no trabalho de PAIVA<sup>[5]</sup> o programa que gera a marcha do robô utilizando osciladores neurais foi escrito. Outra particularidade é que este programa é um software em tempo real implementado com a extensão Xenomai<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>O Xenomai está disponível para download em <<https://xenomai.org/>>. Até esta data o *cobalt patch* para o Raspberry Pi 2B e Raspberry Pi 3 não estavam disponíveis.

## Capítulo 3

# Desenvolvimento

### 3.1 Introdução

Como pôde ser visto no capítulo 2 o projeto existente até então não é capaz de caminhar sobre o solo devido ao aumento do peso da plataforma. Os servos HS-755 já não fornecem o torque necessário para a movimentação das patas. Por este motivo foram adquiridos 12 servos digitais de alto torque para serem integrados à plataforma quadrúpede.

Como o último trabalho na plataforma quadrúpede foi realizado em 2012 a plataforma ficou desatualizada. Várias soluções surgiram nesse período e se tornaram mais acessíveis.

Aproveitando a oportunidade para integração dos novos servos, a plataforma quadrúpede foi totalmente remodelada neste trabalho. No capítulo 2 foi identificado alguns problemas na plataforma e partir disso foram desenvolvidas soluções e melhorias.

### 3.2 Projeto Mecânico

O projeto mecânico foi dividido em três partes: projeto do chassi do robô, projeto da pata e integração dos servos e integração mecânica das partes. Todas as peças, montagens e desenhos mecânicos foram projetados utilizando Solidworks 2014 e estão disponíveis no CD em anexo.

Na versão anterior da plataforma quadrúpede as peças foram construídas na UnB utilizando perfis de alumínio de diversos tamanhos e unidos por parafusos. Nesta nova versão as peças foram produzidas em chapa de alumínio de 2mm utilizando processo de corte e dobra em uma metalúrgica o que proporcionou um melhor acabamento e peças mais precisas.

#### 3.2.1 Chassis

O objetivo principal do projeto do chassi do robô foi uma estrutura rígida associada a um baixo peso. A solução encontrada foi desenvolver o chassi em uma única peça reforçada por várias dobras.

As dobras aumentam consideravelmente a rigidez e a estabilidade de uma estrutura metálica. A peça projetada tem doze dobras e tem peso estimado de 0,518 Kg. A peça utilizada anteriormente com aproximadamente as mesmas dimensões tinha peso estimado de 0,625 Kg sem levar em conta o peso dos parafusos para união dos perfis e as peças de reforço mostradas na figura 2.8.

A figura 3.1 mostra o desenho 3D do chassis desenvolvido para o robô. A figura seguinte mostra o chassis construído.

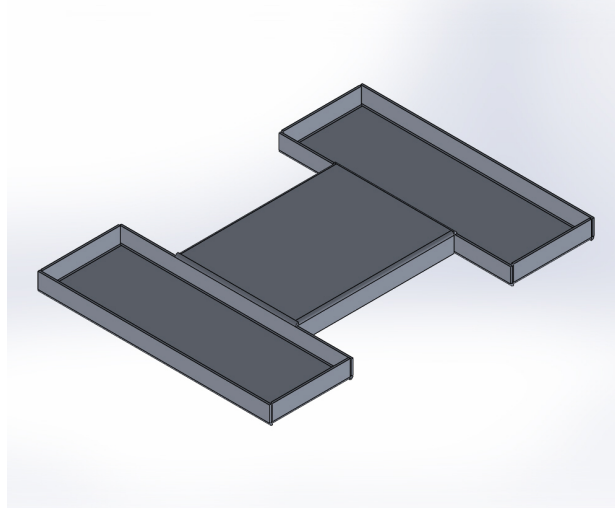


Figura 3.1: Desenho do Chassis - Vista Isométrica

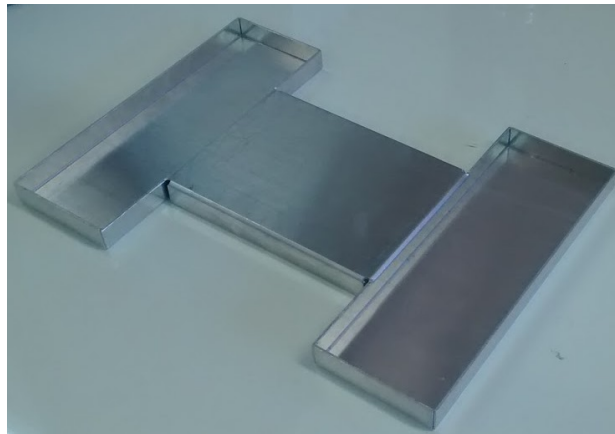


Figura 3.2: Chassis fabricado usando processo de corte e dobra

### 3.2.2 Patas e integração dos servos

O desenho das novas patas foi iniciado pelo aluno voluntário Rodrigo. A inspiração para as peças partiu do projeto inicial de COTTA e NETO<sup>[1]</sup>. Para as patas foram projetadas peças em alumínio e em nylon. A primeira versão das peças de metal foram construídas utilizando perfis de alumínio porém o resultado não foi satisfatório conforme a Figura 3.3. Notar que os furos se sobrepõem pois não foi possível utilizar a precisão necessária durante a furação e não houve repetibilidade já que todas as peças apresentaram uma grande variação dimensional.



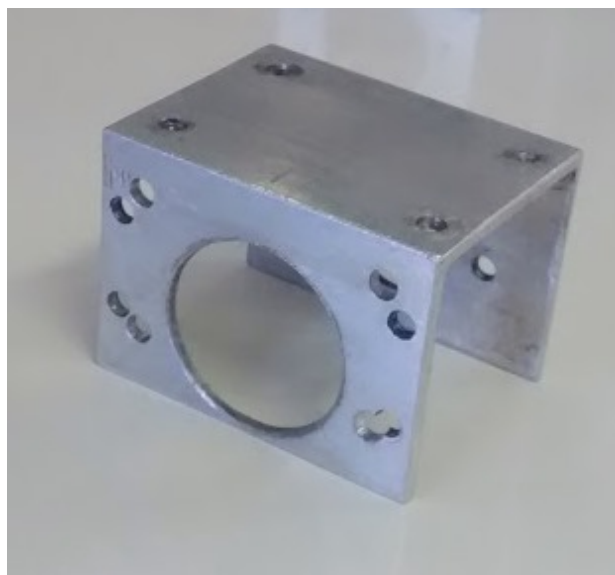


Figura 3.3: Peça da Pata fabricada a partir de perfil de alumínio

A primeira peça projetada foi o perfil U onde os servos são fixados. No manual do RX-28<sup>1</sup> é encontrada figura 3.4 com todas dimensões do servo. A figura 3.5.(a) mostra a peça projetada. Notar que os furos onde os servos serão fixados estão escareados para permitir a movimentação do eixo de nylon. Na figura 3.5.(b) é possível ver a peça fabricada.

A figura 3.5.(a) mostra a peça projetada. Notar que os furos onde os servos serão fixados estão escareados para permitir a movimentação do eixo de nylon. Na figura 3.5.(b) é possível ver a peça fabricada.

Outra peça produzida foi o perfil L, onde o servo que movimenta a primeira junta da pata do robô é fixado.. Na figura 3.6 é possível ver o desenho 3D da peça e o aspecto da mesma após a fabricação.

A Figura 3.7 mostra o desenho da pata com todas suas partes e servos integrados. Notar que no desenho aparecem peças que não foram projetadas neste trabalho, como as peças usinadas em Nylon e o mancal para eixo do servo da primeira junta que foi aproveitado da plataforma antiga.

---

<sup>1</sup>Manual disponível em: <[http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/rx\\_series/rx-28.htm](http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/rx_series/rx-28.htm)>

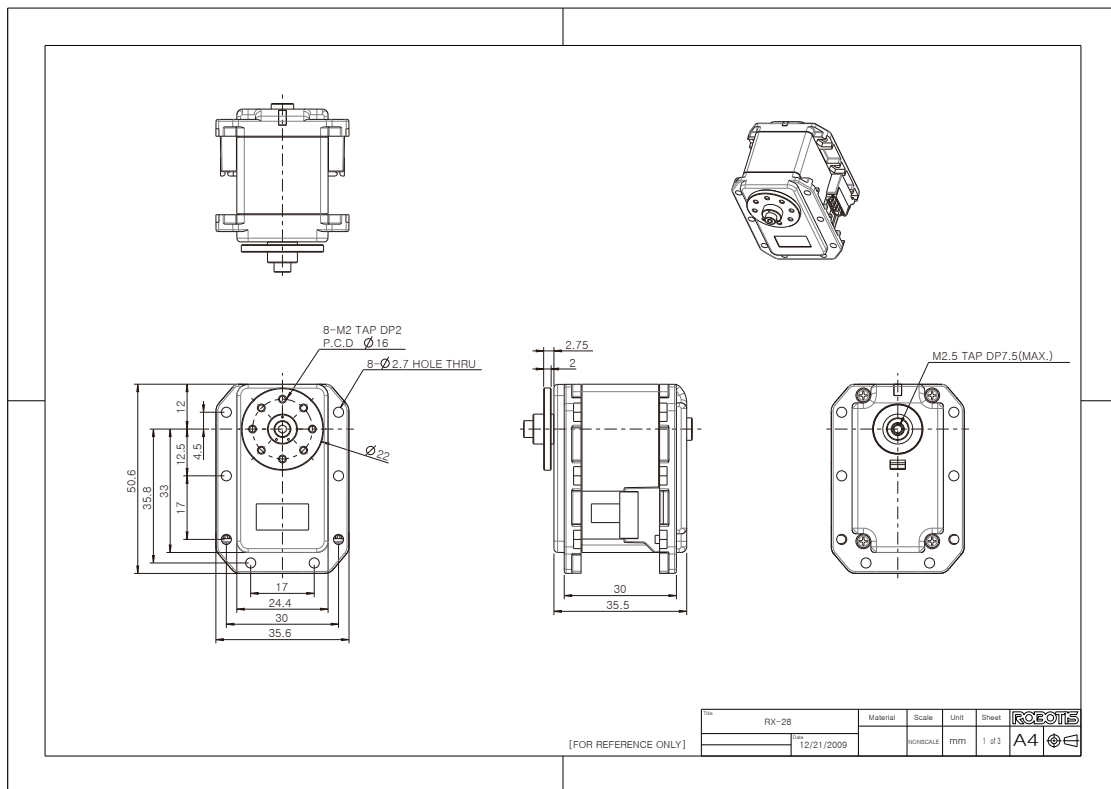
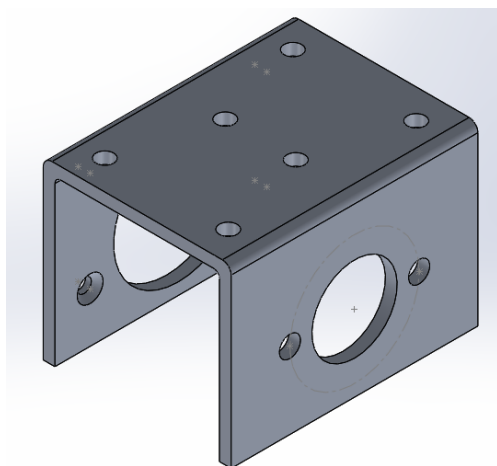
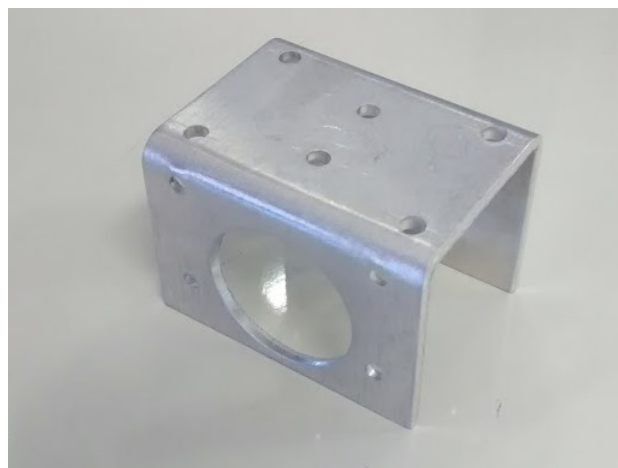


Figura 3.4: Desenho mecânico do Servo RX-28

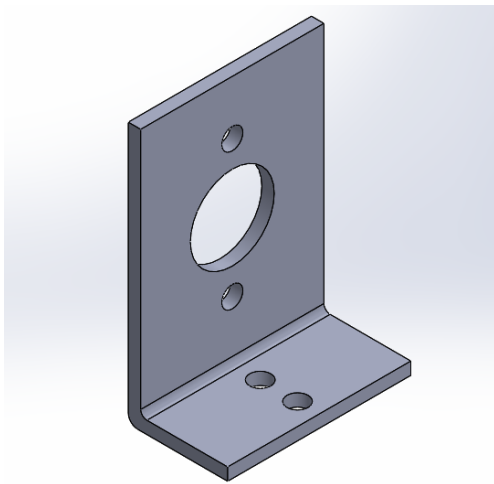


(a) Desenho Mecânico

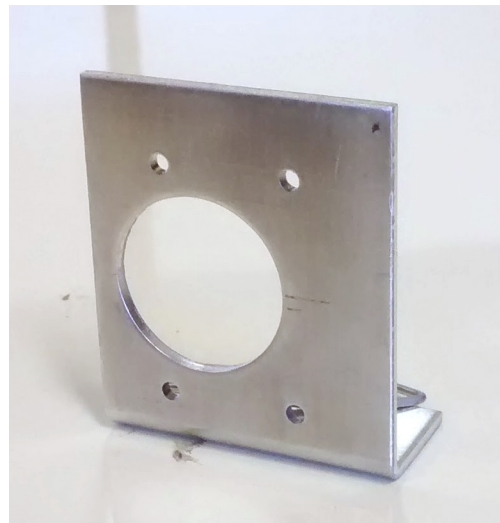


(b) Peça fabricada

Figura 3.5: Perfil U - Pata

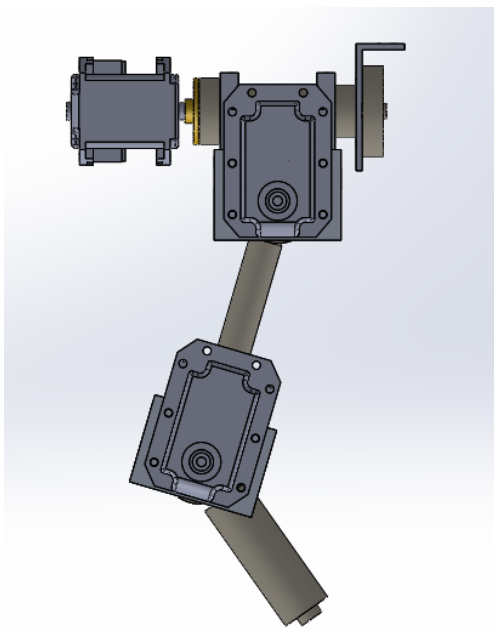


(a) Desenho Mecânico

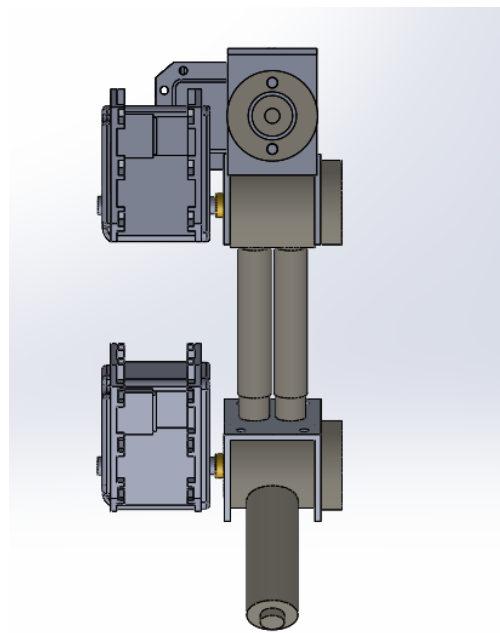


(b) Peça fabricada

Figura 3.6: Perfil L - Pata



(a) Vista lateral



(b) Vista posterior

Figura 3.7: Desenho 3D da pata do robô quadrúpede

### 3.2.3 Integração Mecânica

Esta seção mostra como foi realizada a integração das diversas partes do robô. As patas foram fixadas ao chassis através de parafusos M3, os servos fixados aos suportes usando parafusos e porcas M2.5. A transmissão do movimento do servo para eixo de nylon é realizada usando a peça HN07 (figura 3.8) que foi fixada ao eixo usando os parafusos que vieram com os servos. Durante os primeiros testes na plataforma verificou-se que os parafusos eram curtos fazendo com que o HN07 se soltasse do eixo. Os parafusos originais foram substituídos por parafuso M2 de 8mm de comprimento encontrados no comércio.



Figura 3.8: HN07-N1 - Servo *Horn*

Um ponto de atenção durante a montagem é que a posição central do servo deve ser ajustada na direção oposta ao suporte de maneira que o ângulo central do servo coincida com o ângulo  $0^\circ$  conforme o modelo em desenvolvido por SOUTO<sup>[2]</sup>.

Também será integrado à plataforma uma bateria de 12V. Para isso foi desenvolvido o suporte da figura 3.9. O suporte é preso à parte de baixo do chassis utilizando parafusos. As baterias são presas ao suporte com fita dupla-face VHB da 3M que suporta a temperatura e a vibração da região.

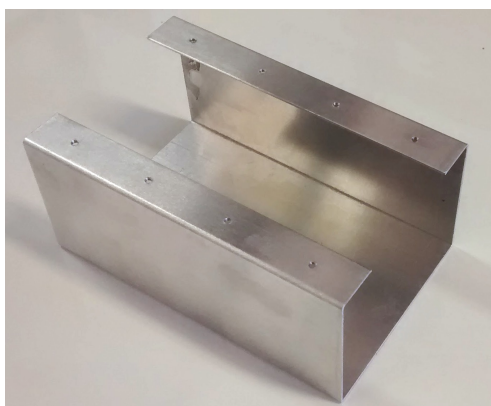


Figura 3.9: Suporte para bateria

As placas desenvolvidas foram fixadas na parte superior do chassis usando um suporte de borracha e fita dupla-face.

O Raspberry Pi, que é a plataforma embarcada, fica dentro de um case de acrílico preso ao chassis usando fita dupla-face.

A Figura 3.10 mostra a vista isométrica do projeto mecânico e na Figura 3.11 é possível ver o estado do robô ao final deste trabalho.

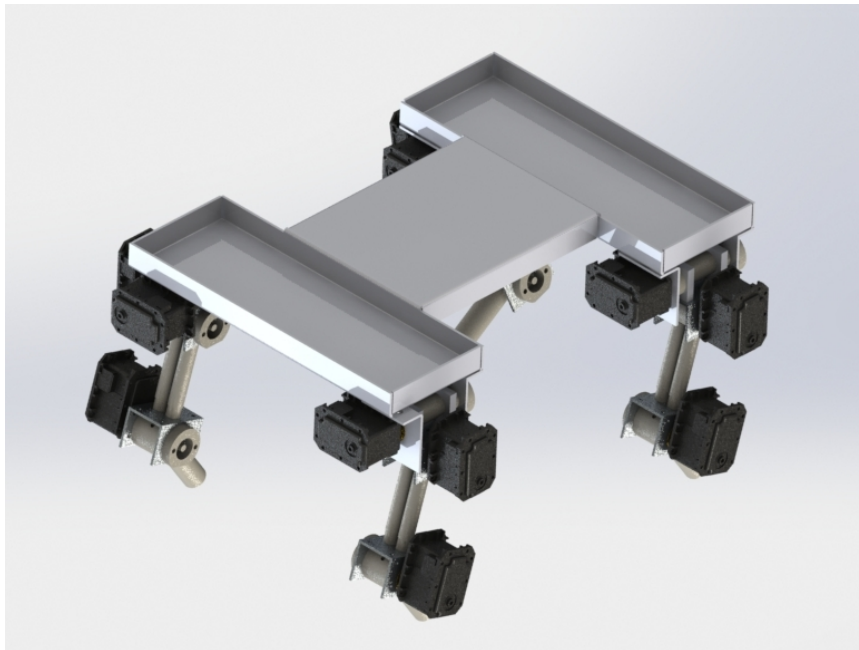


Figura 3.10: Vista Isométrica - Projeto Mecânico

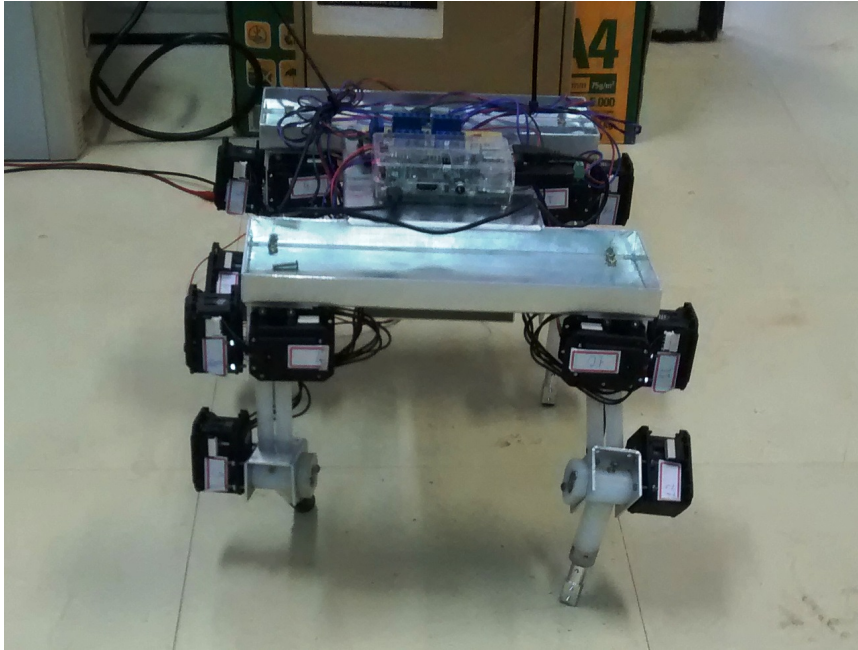


Figura 3.11: Robô quadrúpede ao final deste trabalho.

### 3.3 Servos

Como dito anteriormente a principal motivação deste trabalho foi a integração dos novos servos na plataforma. Os servos utilizados são do modelo Dynamixel RX-28 da Robotis.

A tabela 3.1 compara os novos servos a aos utilizados nos trabalhos anteriores.

O servo integrado a nova plataforma(RX-28) tem várias vantagens sobre os utilizados anteriormente: o torque fornecido é maior, não existe a necessidade de circuitos para geração de sinal de controle, pode ser alimentado diretamente em 12V, é mais leve, as engrenagens são mais resistentes, o ângulo de ação é maior e existe a possibilidade de realimentação dos sistema com os dados fornecidos pelo servo.

O envio de comandos para o servo é realizado através do barramento RS485 utilizando o protocolo desenvolvido pelo fabricante<sup>2</sup>. A tabela 3.2 mostra o formato das mensagens. Toda mensagem é iniciada em com dois bytes  $0xFF$ , seguidos pelo endereço do destinatário da mensagem, pela quantidade de bytes do pacote, pela instrução, pelos bytes dos parâmetros e finalmente por um byte para checar a integridade da mensagem.

O protocolo tem cinco instruções conforme a tabela 3.3 sendo as mais utilizadas a `READ_DATA` e `WRITE_DATA`.

O servo executa uma ação quando um dado é escrito em sua tabela de controle. A tabela completa do RX-28 disponível no manual do RX-28. Cada posição da tabela tem um significado, exemplo: a posição  $0x1E$  é o byte mais significativo da `GOALPOSITION`(posição destino do

---

<sup>2</sup>A descrição detalhada do protocolo está disponível em <[http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/communication/dxl\\_packet.htm](http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/communication/dxl_packet.htm)> acessado em 01/06/2016

Tabela 3.1: Comparação entre os servos RX-28 e HS755

	 RX-28	 HS-755HB
Torque máximo	3,7 N.m	1,3 N.m
Peso	72g	110g
Material das engrenagens	Aço	Karbonite
Comando	Via RS485	PWM
Resolução	0,29°	Analógico
Ângulo de Operação	300°	180°
Tensão de Alimentação	4.8V - 6.0V	12V - 18.5V
Corrente máxima	1.9 A @ 18,5V	1.8A @ 6.0V
Corrente em standby	50 mA	8mA
Feedback	Posição, carga, $V_{in}$	X

Tabela 3.2: Protocolo de comunicação com os servos

<b>0xFF</b>	<b>0xFF</b>	<b>ID</b>	<b>LEN.</b>	<b>INSTR.</b>	<b>PARAM. 1</b>	<b>...</b>	<b>PARAM. N</b>	<b>CRC</b>
-------------	-------------	-----------	-------------	---------------	-----------------	------------	-----------------	------------

Tabela 3.3: Comandos do Protocolo de comunicação com servos

<b>Valor</b>	<b>Nome</b>	<b>N.º de parâmetros</b>
0x01	PING	0
0x02	READ_DATA	2
0x03	WRITE_DATA	$\geq 2$
0x04	REG_WRITE	$\geq 2$
0x05	ACTION	0
0x06	RESET	0
0x83	SYNC_WRITE	$\geq 4$

servo).

A tabela 3.4 mostra uma mensagem para posicionar o servo de endereço 0x01 na posição central.

Tabela 3.4: Exemplo: Posicionar o servo 1 na posição central(150°)

<b>0xFF</b>	<b>0xFF</b>	<b>0x01</b>	<b>0x03</b>	<b>0x04</b>	<b>0x1E</b>	<b>0x00</b>	<b>0xFF</b>	<b>CRC</b>
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	------------

Neste trabalho os comandos para os servos foram enviados utilizando **DYNAMIXEL SDK** que é a API fornecida pelo fabricante<sup>3</sup>. Na seção 3.7 trata das rotinas que foram desenvolvidas para o controle dos servos.

### 3.4 Projeto Eletrônico

Como a plataforma foi totalmente remodelada foi necessário o desenvolvimento de alguns circuitos. Todos os esquemáticos e *layouts* foram criados com o software Eagle 7.5 e estão no CD em anexo. O primeiro circuito desenvolvido foi para a distribuição do sinal RS-485 e da alimentação para os servos. Normalmente os servos RX-28 são ligados uns aos outros usando uma topologia *Daisy Chain* conforme a figura 3.12 porém no caso robô quadrúpede isso não é possível.

No robô desenvolvido neste projeto, os servos de cada pata são ligados em série e então servo da primeiras junta é ligado à placa de distribuição. A figura 3.13 mostra o circuito desenvolvido que é muito simples e para as versões futuras pode ser substituído por chicotes elétricos dando um acabamento mais profissional. O circuito foi montado sobre uma placa de fenolite perfurada como visto na figura 3.14.

Como não existem entradas analógicas no Raspberry Pi foi desenvolvida uma placa para entrada de sensores analógicos. O circuito utiliza o conversor AD PCF8591<sup>[9]</sup>, da NXP (anteriormente Philips) de 8 bits, que tem quatro entradas analógicas e é conectado ao Raspberry Pi através do

<sup>3</sup>DYNAMIXEL SDK está disponível em <<https://github.com/ROBOTIS-GIT/DynamixelSDK>>.



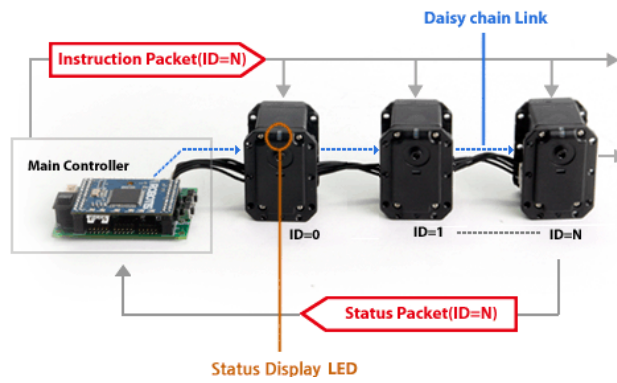


Figura 3.12: RX-28 ligados em série

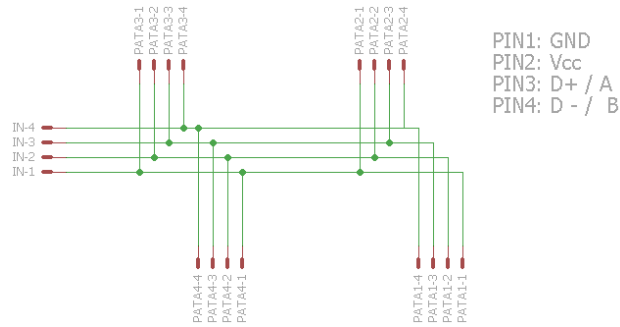


Figura 3.13: Circuito de distribuição da alimentação e barramento RS485 para os servos

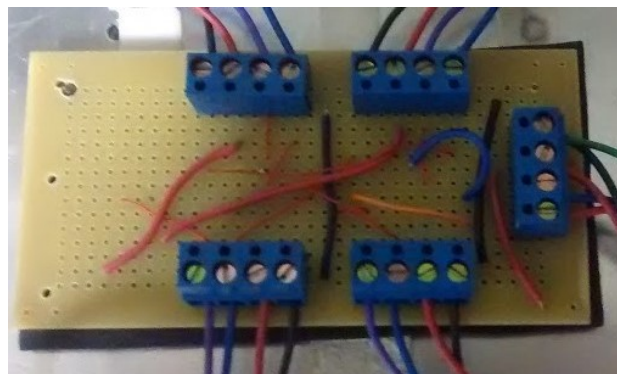


Figura 3.14: Placa de distribuição

barramento I2C. A alimentação também é fornecida pela plataforma embarcada.

A figura 3.15 mostra o circuito para leitura de sensores digital. Como nenhum sensor foi implementado neste trabalho, os testes foram realizados utilizando um potenciômetro.

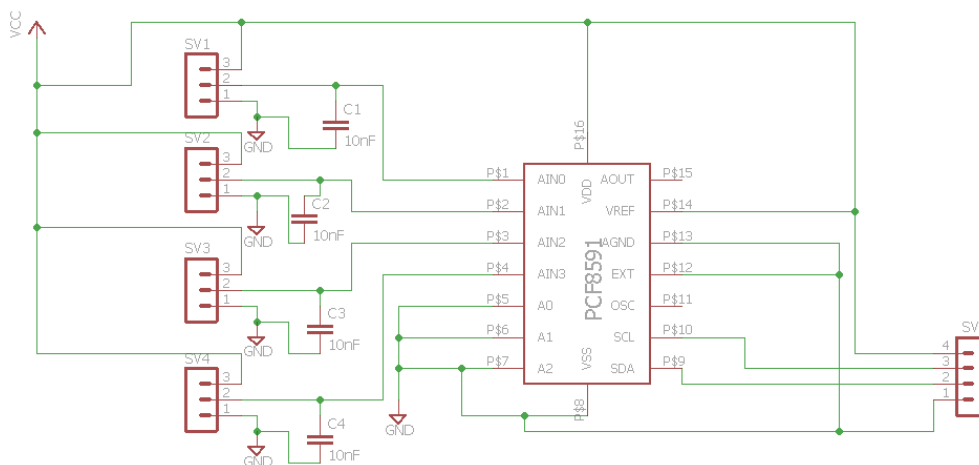


Figura 3.15: Esquemático - Placa para leitura de sensores analógicos

Uma outra placa foi elaborada para converter a tensão da bateria(12V) para 5V para alimentar o RaspberryPi. A placa conta com conectores Molex KK para conexão de interruptores independentes de energia dos servos e do Raspberry Pi. Outra função da placa é evitar que haja retorno de corrente.A figura 3.16 mostra o esquemático da placa.

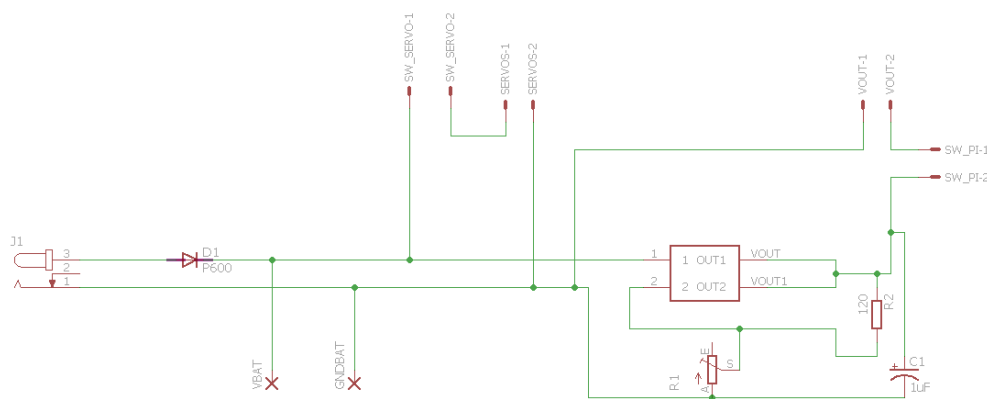


Figura 3.16: Esquemático - Entrada da bateria e Alimentação 12V-5V

### 3.5 Plataforma embarcada

O Raspberry Pi foi escolhido para ser o "cérebro" do robô quadrúpede. Trata-se de um computador do tamanho de um cartão de crédito, baixo custo(U\$ 25,00) e grande capacidade de processamento que conta com um processador quad-core ARM Cortex-A7 que roda a 900Mhz e 1GB de RAM. A Tabela 3.5 mostra alguma das especificações do sistema.

Tabela 3.5: Raspberry Pi Model 2 B - Especificações

<b>Chip</b>	Broadcom BCM2836 SoC
<b>Arquitetura do processador</b>	Quad-core ARM Cortex-A7
<b>CPU</b>	900 Mhz
<b>RAM</b>	1 GB
<b>Dimensões</b>	85 x 56 x 17mm
<b>Alimentação</b>	Micro USB socket 5V, 2A
<b>Ethernet</b>	10/100 Mbps
<b>Video</b>	HDMI
<b>Memória não volátil</b>	Slot micro -SD

O primeiro passo foi a instalação do sistema operacional. Neste caso o Raspbian, que é um versão modificada do Debian para raspberry Pi. Como o raspberry Pi é utilizado em uma série de projetos, a versão tradicional do sistema vem com vários programas que não são necessários para a aplicação, optou-se pela versão lite dos sistema<sup>4</sup> que não possui interface gráfica e é mais enxuta. A versão utilizada foi a Jessie.

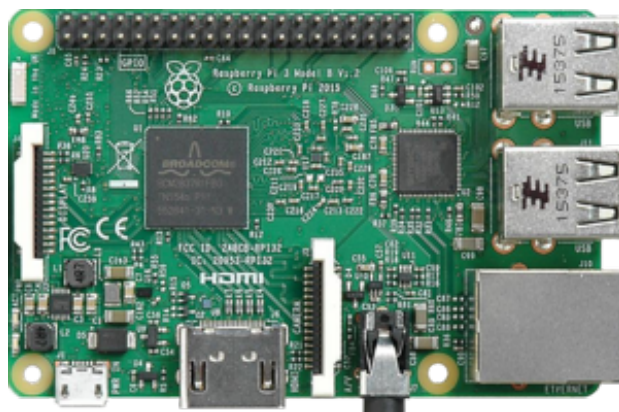


Figura 3.17: Raspberry Pi

A segunda etapa foi a instalação de vários programas como o compilador GCC, um editor mais completo como o VIM. Foram configuradas também as contas dos usuários.

O raspberry Pi é uma placa muito popular e é possível de se encontrar diversas aplicações rodando nestes pequenos computadores. Desde experimentos científicos na Estação Espacial Internacional à central de entretenimento. Mais uma vantagem dessa popularidade é que existem milhares de pessoas usando a plataforma e dispostas a compartilhar conhecimento e responder todo tipo de dúvida o que foi bem útil no inicio desse projeto.

Outra vantagem do Raspberry Pi é a presença dos pinos GPIO (General Purpose Input/Output) que ficam localizados na borda da placa. Esses pinos foram utilizados para comunicação entra Raspberry Pi e a placa dos sensores. A figura 3.18 mostra a numeração dos pinos e a função de

<sup>4</sup>Disponível em <<https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>>

cada um.<sup>5</sup>

Pin#	NAME		NAME	Pin#
01	3.3v DC Power	Red	DC Power 5v	02
03	GPIO02 (SDA1 , I <sup>2</sup> C)	Blue	DC Power 5v	04
05	GPIO03 (SCL1 , I <sup>2</sup> C)	Black	Ground	06
07	GPIO04 (GPIO_GCLK)	Green	(TXD0) GPIO14	08
09	Ground	Black	(RXD0) GPIO15	10
11	GPIO17 (GPIO_GEN0)	Green	(GPIO_GEN1) GPIO18	12
13	GPIO27 (GPIO_GEN2)	Black	Ground	14
15	GPIO22 (GPIO_GEN3)	Green	(GPIO_GEN4) GPIO23	16
17	3.3v DC Power	Red	(GPIO_GEN5) GPIO24	18
19	GPIO10 (SPI_MOSI)	Purple	Ground	20
21	GPIO09 (SPI_MISO)	Purple	(GPIO_GEN6) GPIO25	22
23	GPIO11 (SPI_CLK)	Purple	(SPI_CE0_N) GPIO08	24
25	Ground	Black	(SPI_CE1_N) GPIO07	26
27	ID_SD (I <sup>2</sup> C ID EEPROM)	Yellow	(I <sup>2</sup> C ID EEPROM) ID_SC	28
29	GPIO05	Green	Ground	30
31	GPIO06	Green	GPIO12	32
33	GPIO13	Black	Ground	34
35	GPIO19	Green	GPIO16	36
37	GPIO26	Green	GPIO20	38
39	Ground	Black	GPIO21	40

Rev. 1  
29/01/2014

<http://www.element14.com>

Figura 3.18: GPIO - Pinout

Como a placa que não conta com wi-fi foi utilizado um adaptador na porta USB. As primeiras configurações foram realizadas diretamente no Raspberry Pi, ligando à porta HDMI um conversor VGA e um teclado na porta USB. A partir daí todo o acesso foi realizado utilizando SSH.

### 3.6 Nova Arquitetura da plataforma Quadrúpede

No capítulo 2 foi possível ver como a arquitetura da plataforma quadrúpede evoluiu ao longo do tempo. Neste trabalho a arquitetura foi refeita, agora os servos são acionados diretamente pela rede RS485 utilizando o protocolo definido pelo fabricante eliminando a necessidade de um protocolo próprio. Um desafio adicionado foi a correção dos ângulos dos servos que anteriormente eram corrigidas nas placas de acionamento de cada pata e agora devem fazer parte do código na plataforma.

No futuro poderão ser adicionados vários módulos seja no barramento RS-485 ou ligados diretamente ao Raspberry Pi que conta com várias interfaces.

A figura 3.19 mostra o estado da arquitetura ao final deste trabalho.

<sup>5</sup>No site <<http://pinout.xyz>> é possível encontrar um diagrama interativo da "pinagem" da GPIO

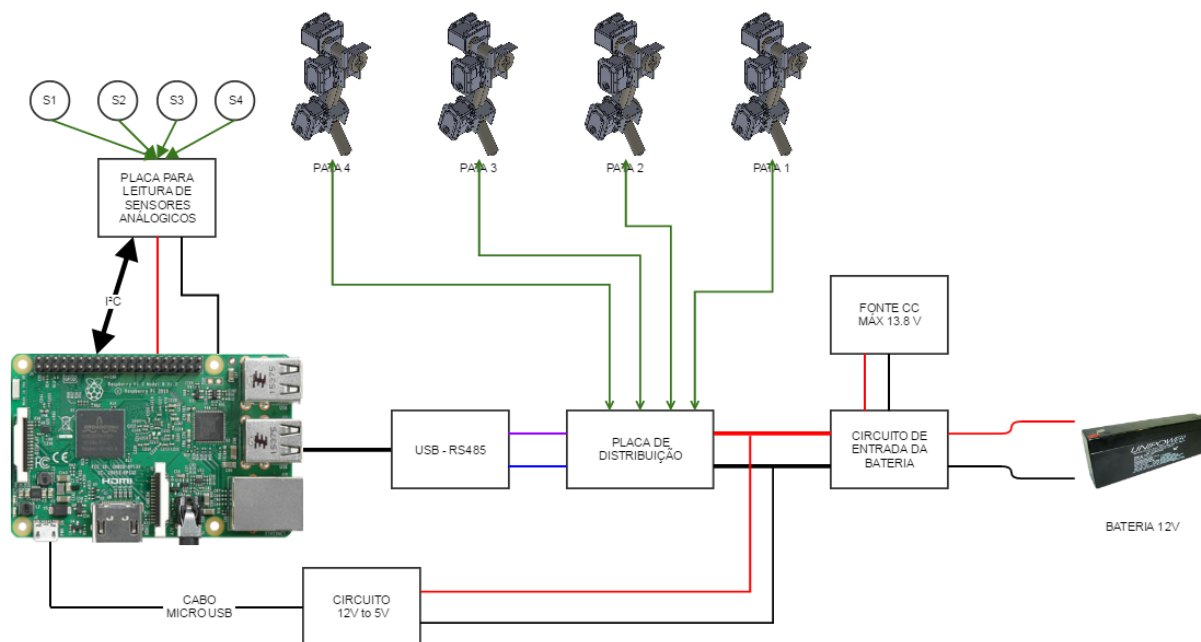


Figura 3.19: Arquitetura da plataforma quadrúpede ao final deste projeto

## 3.7 Códigos desenvolvidos

Nesta seção serão apresentadas as rotinas desenvolvidas ao longo deste trabalho. Todos os programas deste trabalho estão codificados em C e estão disponíveis no CD em anexo e em um repositório privado no GitHub<sup>6</sup>. Um dos produtos deste trabalho é o conjunto de funções para envio e leitura de comandos para os servos que poderão ser utilizadas nos próximos trabalhos.

No desenvolvimento das rotinas de controle dos servos foram utilizadas as bibliotecas fornecidas pelo fabricante. No início do trabalho foi utilizada a versão 2.0 da biblioteca que estava com alguns *bugs* e inicialmente não compilava na arquitetura ARM. Depois de algumas adaptações a biblioteca foi compilada porém algumas vezes o resultado era diferente do esperado. Durante o desenvolvimento deste trabalho foi lançada a versão 3.0 do SDK e em virtude dos problemas com a versão anterior optamos por usar a nova versão que conta com a possibilidade de enviar dados para vários servos em um único pacote de instrução. (Apesar de prevista esta função não disponível na versão 2.0<sup>7</sup>

### 3.7.1 DynamixelSDK 3.0

A nova versão do SDK é bem mais completa e melhor documentada do que as versões anteriores e está disponível em duas versões C e C++.

Para utilizar a biblioteca o primeiro passo é baixar DynamixelSDK do repositório no Github, e

<sup>6</sup>Caso necessite de acesso entre em contato com o autor

<sup>7</sup>O manual da versão anterior da biblioteca esta disponível em: <<http://support.robotis.com/en/software/dynamixelSDK.htm>> acessado em 04/07/2016

depois basta seguir os passos do manual Dynamixel SDK<sup>8</sup>. A arquitetura ARM não é oficialmente suportada pela biblioteca porém pequenas modificações no programa MAKEFILE<sup>9</sup> e no arquivo de definições de tipo de dados do SDK são o suficiente para compilar a biblioteca no RaspberryPi.

### 3.7.2 Funções para controle e leitura dos dados dos servo

Nessa etapa foram desenvolvidas códigos para realizar as seguintes tarefas:

- Lê Posição de um servo
- Envia a posição para um servo
- Envia a posição para todos os servos (usa um único pacote)
- Rotina de calibração

A função `read_pos()` lê a posição atual de um servo. A função tem como entrada o endereço do servo e retorna a posição posição atual ou um código de erro. A Figura 3.20 mostra o fluxograma da função

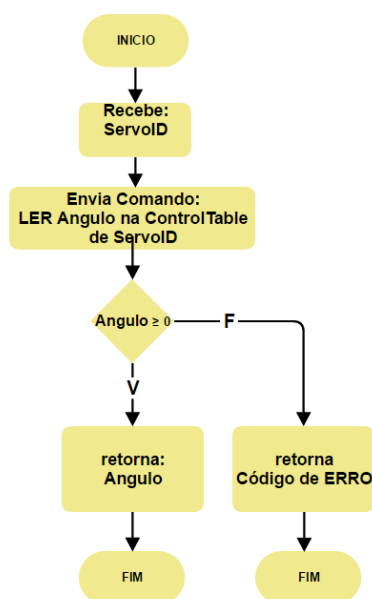


Figura 3.20: Fluxograma - `read_pos()`

Para enviar a posição para o servo é utilizada a função `write_pos()` que tem como parâmetros o endereço do servo e a posição desejada. Em caso de sucesso a função retorna 1 e em caso de falha retorna o código do erro<sup>10</sup>. A Figura 3.21 mostra Fluxograma desta função.

<sup>8</sup>O manual da DynamixelSDK está disponível em <<https://github.com/ROBOTIS-GIT/DynamixelSDK/wiki>> acessado em 01/07/2016

<sup>9</sup>Caso não seja possível compilar, altere o arquivo MAKEFILE removendo o comando "-m32".(Comando utilizado em plataforma x64 forçar a compilação em 32bits).

<sup>10</sup>Os códigos de erro estão disponíveis no manual do servo.

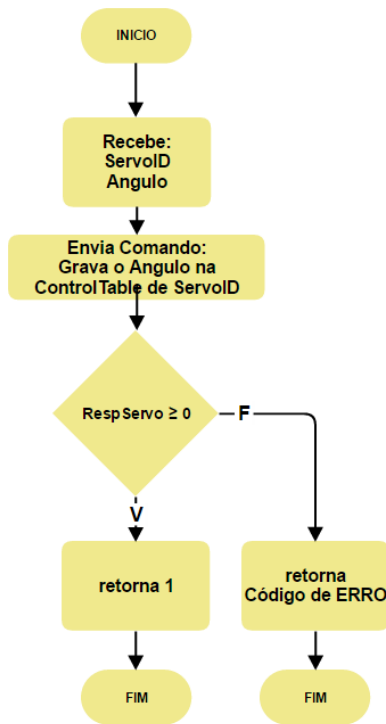


Figura 3.21: Fluxograma - write\_pos()

É possível enviar a posição para todos os servos em um único pacote utilizando a função *envia\_angulosSync()*. A entrada da função é um ponteiro que aponta para o vetor com as posições que serão enviadas para os servos. A grande vantagem de se usar essa função para enviar os ângulos dos servos é diminuição da latência. Como o sentido da rotação de alguns dos servos é contrário ao sentido estabelecido no modelo desenvolvido por SOUTO<sup>[2]</sup> o ângulo deve ser corrigido antes de ser enviado. A Figura 3.22 mostra o fluxograma da função.

O fluxograma da Figura 3.23 mostra a função desenvolvida para calibração. Essa função lê o valor da posição de todos os servos quando o robô tem todas as suas patas em posições centrais. As posições centrais são utilizadas na correção dos valores dos ângulos a serem enviados para os servos.

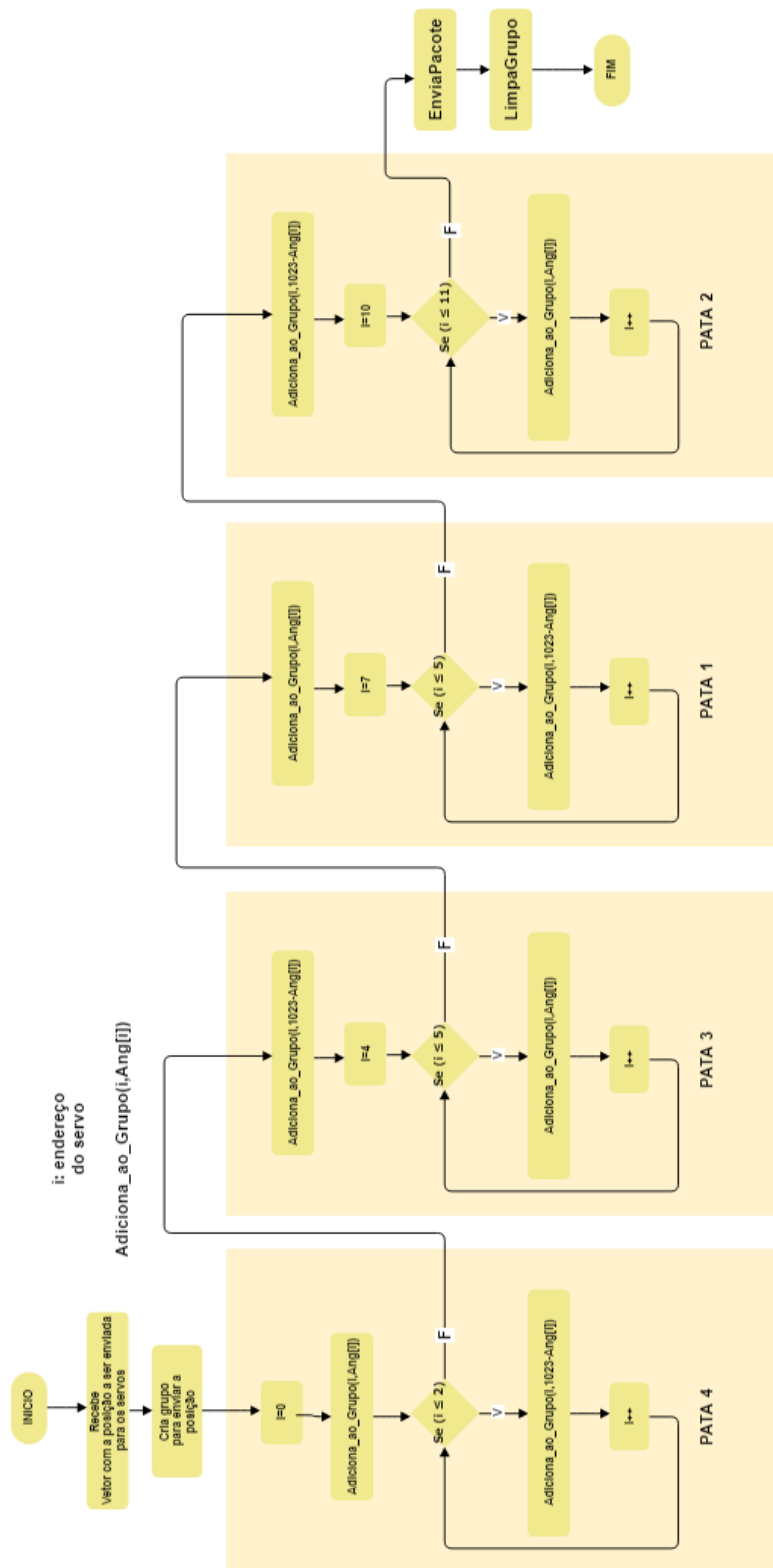


Figura 3.22: *envia\_angulosSync()*



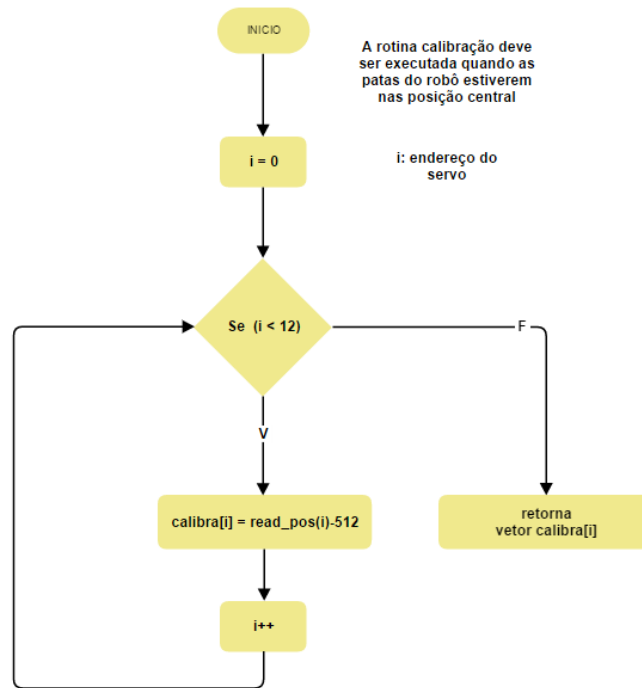


Figura 3.23: Fluxograma - Calibração dos Servos

### 3.8 Função para leitura da Entrada Analógica

A leitura das entradas analógicas do PCF8591 é realizada utilizando a função `read_sensor()` que foi desenvolvida usando a biblioteca WiringPi.<sup>11</sup> A plataforma quadrúpede tem quatro entradas analógicas, numeradas de 0 até 3.

<sup>11</sup>Biblioteca para acesso a GPIO do Raspberry PI disponível para *download* em <<http://wiringpi.com/>>

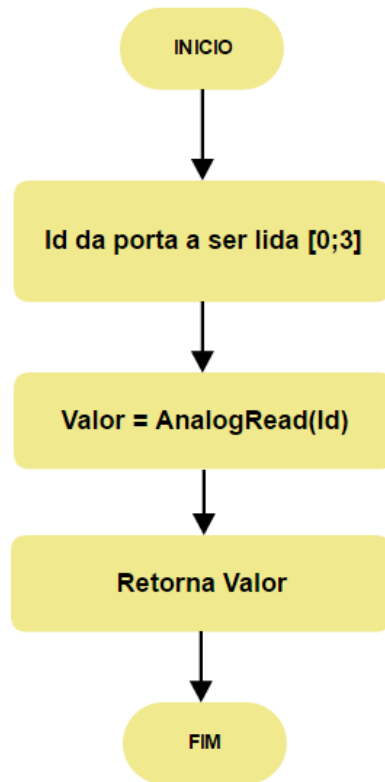


Figura 3.24: Fluxograma - Leitura de sensor Analógico

### 3.9 Programa de teste

Para o teste da plataforma, foi desenvolvido um software, utilizando as funções apresentadas neste capítulo. O fluxograma da Figura 3.25 detalha o algoritmo de teste. Notar que os dados da marcha do robô são lidos de um arquivo, ajustados e enviados ao servos. Para os testes da plataforma, o arquivo de entrada foi gerado no trabalho de PAIVA<sup>[5]</sup>.

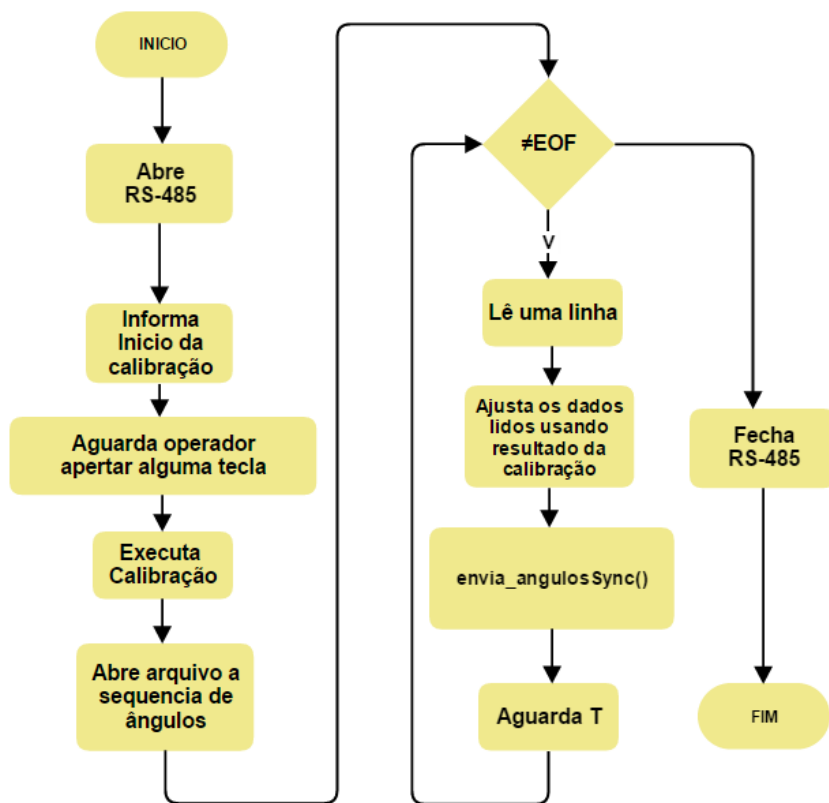


Figura 3.25: Fluxograma - Software de teste

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Introdução

Nesta seção vamos apresentar os testes realizados na plataforma e suas partes. Os primeiros testes foram realizados com o robô sobre uma caixa de maneira que as patas não tocassem solo. Não foram colhido dados durante a movimentação do robô sendo que avaliação foi realizada de maneira qualitativa.

### 4.2 Teste com o Robô suspenso

Para os testes realizados nesta etapa foram utilizados os ângulos gerados no trabalho de PAIVA<sup>[5]</sup> usando taxa de amostragem de 0.02s. A Figura4.1 mostra o robô posicionado durante os testes. No vídeo<sup>1</sup> do experimento é possível a movimentação das patas.

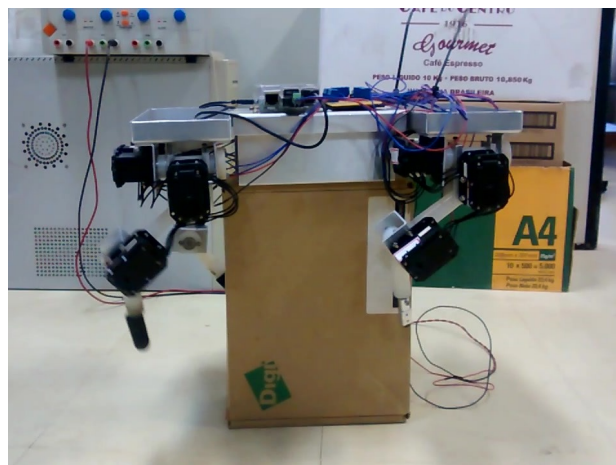


Figura 4.1: Teste com o Robô Suspenso

A Figura 4.2 mostra a sequência de movimentação das patas. Os resultados destes testes foram

---

<sup>1</sup>O vídeo também esta disponível no em: <[https://youtu.be/y\\_otodp8Bws](https://youtu.be/y_otodp8Bws)>

satisfatórios. Ao avaliar a movimentação a marcha parece fazer sentido. Como os resultados desta etapa foram satisfatórios usamos os mesmos parâmetros para os testes sobre o solo.

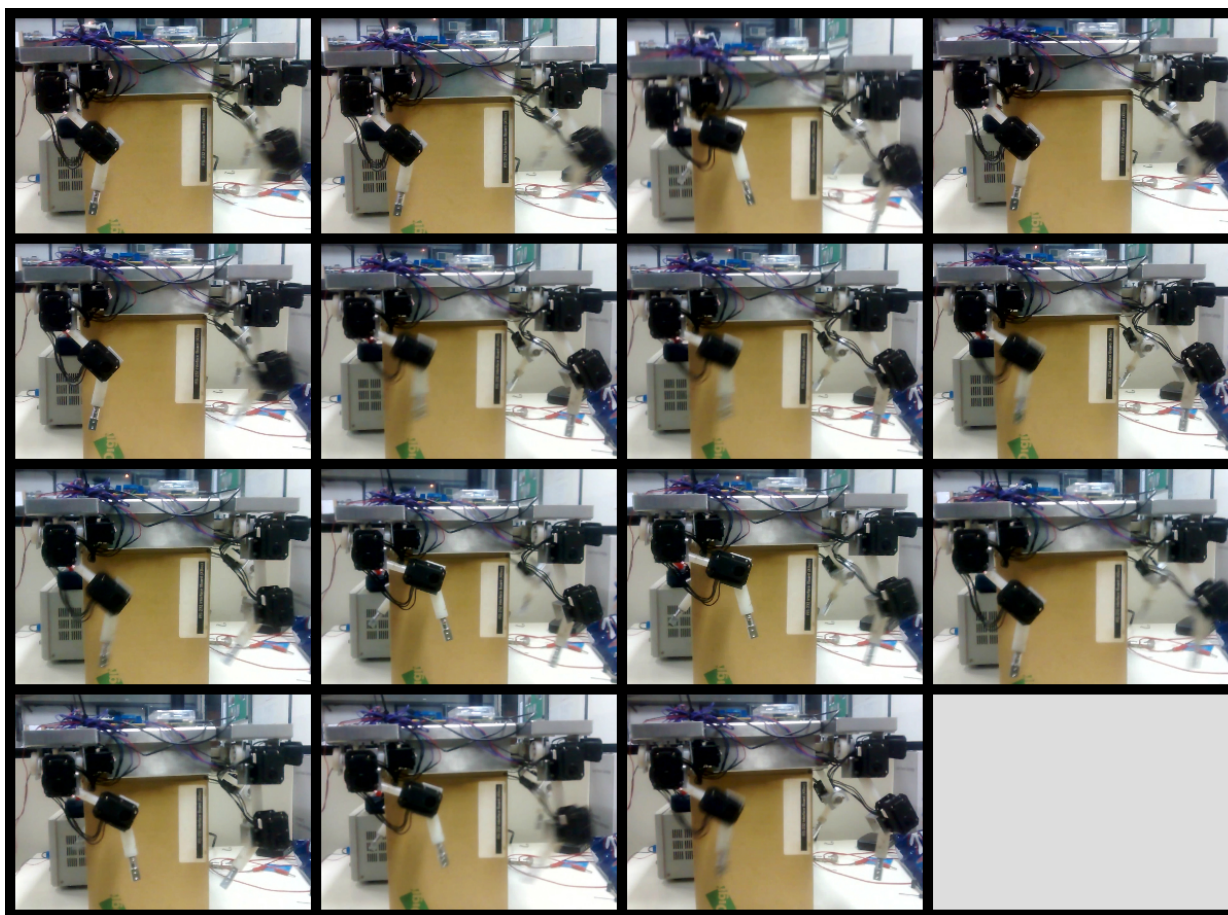


Figura 4.2: Sequência de movimentação das patas

### 4.3 Teste com o robô sobre o solo

A primeira avaliação foi da capacidade de o robô se manter estável sobre o solo. Para isso o robô foi colocado na posição inicial da marcha onde todos os pontos de apoio tocam o chão conforme a Figura 4.3. O vídeo<sup>2</sup> deste teste mostra (notar o som emitido pelos servos) que os motores estão atuando todo o tempo para manter o robô estável sobre o solo.

A segunda etapa foi geração da marcha sobre o solo. O resultado não foi satisfatório. Em algumas tentativas o robô não era capaz de manter o equilíbrio e caía de lado, em outras foram encontrados problemas mecânicos nas peças de nylon que se soltavam da engrenagem do motor. (Isso foi resolvido utilizando parafusos de maior comprimento). Outro problema identificado é que a pata não tinha atrito o suficiente para se movimentar e foi possível perceber que as patas escorregavam sobre o solo. É possível que com ajuste nos parâmetros do algoritmo desenvolvido por PAIVA<sup>[5]</sup> a marcha gerada seja melhor.

<sup>2</sup>Disponível em: <<https://youtu.be/KVacRoRdZd0>>.

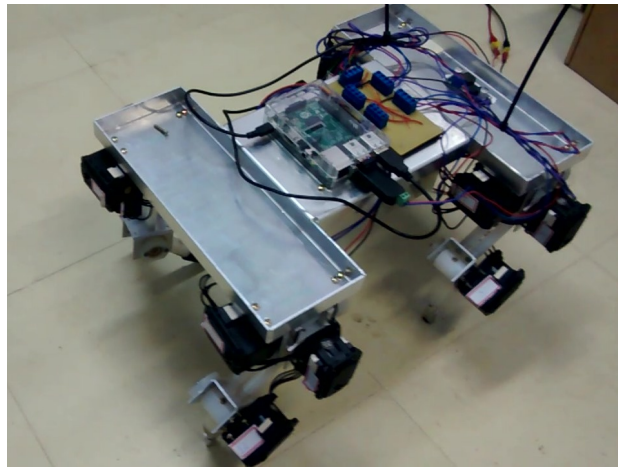


Figura 4.3: Robô sobre o solo

# Capítulo 5

## Conclusões

Neste trabalho a plataforma quadrúpede foi totalmente reestruturada. Após avaliação da plataforma anterior foram desenvolvidas as soluções visando obter a plataforma mais robusta que pudesse servir como base para desenvolvimento de novos trabalhos. O projeto mecânico alcançou seus objetivos. Os servos foram integrados a plataforma que é mais leve e tem uma maior rigidez quando comparada a versão anterior. As peças foram fabricadas através de processos industriais garantindo uma maior precisão e repetibilidade. Todas as peças foram construídas em quantidade maior que a necessária para eventuais substituições e até mesmo para construção de uma segunda unidade. A Tabela 5.1 mostra as diferenças físicas entre plataforma reestruturada e a plataforma anterior.

Tabela 5.1: Diferenças nas características físicas da plataforma

	<b>Plataforma Anterior</b>	<b>Plataforma Reestruturada</b>
<b>Peso (Kg)</b>	3,876	2,557
<b>Largura (mm)</b>	225	250
<b>Comprimento (mm)</b>	275	350
<b>Altura Máxima (mm)</b>	370	273
<b>L<sub>1</sub> (mm)</b>	30	30
<b>L<sub>2</sub> (mm)</b>	85	90
<b>L<sub>3</sub> (mm)</b>	10	10

Na parte eletrônica foram desenvolvidos circuitos para leitura de dados analógicos, para distribuição dos sinais e alimentação. O circuito de distribuição foi feito sobre uma placa de fenolite perfurada, já os circuitos de alimentação e leitura de dados analógicos foram feitas sobre placa de fenolite virgem. Os testes do circuito de alimentação e de leitura de dados analógicos foram realizados apenas na protoboard pois as placas construídas em fenolite não funcionaram devido a falhas no processo de fabricação.

Uma nova arquitetura para plataforma quadrúpede foi proposta neste trabalho. Os sensores digitais são ligados diretamente no Raspberry Pi através da GPIO e os sensores analógicos ligados a placa de leitura baseada no PCF8591. A comunicação com os servos é realizada utilizando o

protocolo do fabricante através da rede RS-485.

Uma das principais contribuições deste trabalho foi a elaboração da rotina para controle dos servo. O código implementado minimiza o envio de pacotes de dados através da interface RS 485, já que o envio dos das posições para os doze servos e feito utilizando um único pacote diminuindo os efeitos provocado pelo tempo de latência no acesso ao barramento RS-485.

Os objetivos propostos no começo do projeto foram atingidos: Os servos foram integrados a plataforma, foi construída uma nova estrutura mecânica, uma nova plataforma embarcada foi implementada utilizando o Raspberry Pi e foi criada as de leitura e controle dos servos.



# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 COTTA, G.; NETO, L. Realização de uma plataforma para estudo de robótica comportamental baseada em quadrúpede. Relatório de Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2006.
- 2 SOUTO, R. Modelagem cinemática de um robô quadrúpede e geração de seus movimentos usando filtragem estocástica. Relatório de Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2007.
- 3 BATISTA, G. F.; CARDOSO, I. F. Adequação de um sistema de locomoção de um robô quadrúpede para avaliação de algoritmos de aprendizagem. Relatório de Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2007.
- 4 NOVAIS, N. A. d.; TOSCANO, R. A. Estudo de locomoção de uma plataforma quadrúpede utilizando sensoriamento inercial e geração de padrões de movimento. Relatório de Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2007.
- 5 PAIVA, R. Osciladores neurais para comando marcha de um robô quadrúpede e robô humanoide. Relatório de Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2012.
- 6 RAMOS, E. Desenvolvimento da plataforma quadrúpede: Geração de software e eletrônica. Relatório de Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2008.
- 7 CALMON, A. d. P.; PINHEIRO, N. C.; FERREIRA, R. U. Desenvolvimento de um robô-cachorro comportamental: percepção e modelagem comportamental. Relatório de Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2006.
- 8 DIGUMARTI, C.; GEHRING, C.; COROS, S. Concurrent optimization of mechanical design and locomotion control of a legged robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Disney Research, 2014.
- 9 DATASHEET PCF 8591. <[http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/PCF8591.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCF8591.pdf)>. Acessado em 04/07/2016.

# ANEXOS

# I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

## II. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

O CD é composto pelas seguintes pastas:

- Relatório
- Apresentação
- Vídeos
- Mecânica
- Eletrônica
- TG\_SW
- Bibliografia

Na pasta relatório, conta com arquivo TG\_jorge.pdf que contém este relatório em sua versão final. Na pasta LATEX conta com todos arquivos usados para confecção do relatório.

Na pasta apresentação esta o arquivo TG\_jorge.ppt com os slides utilizados na defesa do projeto.

A pasta vídeos, conta com as filmagens dos experimentos realizados no projeto.

Na pasta mecânica conta com todos os desenhos desenvolvidos ao longo desse projeto.

Na pasta eletrônica conta com os projetos do circuitos desenvolvidos nestes trabalho. Esquemáticos e *layout* desenvolvidos no Eagle. Todos os datasheets utilizados estão na sub pasta *datasheet*.

Na TG\_SW temos todos os arquivos desenvolvidos no curso desse projeto. Em várias versões.

A pasta Bibliografia conta com todos os trabalhos e artigos citados ao longo deste projeto.