

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE LOCOMOÇÃO DE UMA PLATAFORMA  
QUADRÚPEDE UTILIZANDO SENSORIAMENTO  
INERCIAL E GERAÇÃO DE PADRÕES  
DE MOVIMENTO**

**Neverton Alves de Novais**

**Rafael Alves Toscano**

**Brasília, dezembro de 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE LOCOMOÇÃO DE UMA PLATAFORMA  
QUADRÚPEDE UTILIZANDO SENSORIAMENTO  
INERCIAL E GERAÇÃO DE PADRÕES  
DE MOVIMENTO**

**Neverton Alves de Novais**

**Rafael Alves Toscano**

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro de Mecatrônica*

Banca Examinadora

Prof. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB

*Orientador*

\_\_\_\_\_

Prof. Alexandre Ricardo S. Romariz, ENE/UnB

*Examinador interno*

\_\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup>. Carla Maria Chagas e Cavalcante, CIC/UnB

*Examinador interno*

\_\_\_\_\_

## **Dedicatórias**

*À minha família, em especial aos meus pais.*

*Rafael Alves Toscano*

*À memória de minha mãe, Irene Gouvea..*

*Neverton Alves de Novais*

## Agradecimentos

*Ao meu pai, de quem herdei a paixão pelos números e agora a profissão de engenheiro. À minha mãe, que até o início do ano me apoiou de todas as formas possíveis para que eu pudesse realizar as minhas vontades e agora, ao lado de Deus, me ilumina. A ambos, que me propiciaram um ambiente familiar formidável por todos estes anos e a estrutura suficiente para que eu pudesse me dedicar integralmente aos estudos.*

*Às minhas irmãs e ao meu irmão que por mim se sacrificaram e suportaram meu humor nos momentos difíceis de minha graduação. Aos meus primos, amigos e todos aqueles que fizeram de Goiânia o melhor local para me restabelecer dos dias desgastantes de UnB. A todos os meus colegas de curso que com sua amizade e companheirismo me ajudaram a superar os desafios desta graduação.*

*À paciência e dedicação de nosso orientador Geovany Araújo Borges.*

*E de forma diferenciada ao meu grande amigo Rafael Toscano por sua constante preocupação e determinação em fazer deste projeto o melhor.*

*Neverton Alves de Novais*

*À minha mãe pela firmeza e esforço em fornecer toda espécie de apoio necessário acima de qualquer outra coisa. Ao meu pai pelo aprendizado e experiência de vida compartilhados. Aos meus irmãos pelos exemplos e suporte oferecidos, sem os quais eu não seria o que sou nem teria alcançado o que alcancei. Aos demais familiares que sempre acreditaram no meu potencial e me deram forças em muitos momentos pra continuar.*

*Aos meus amigos de verdade que puderam fazer de meus dias nessa batalha uma jornada prazerosa e evolutiva.*

*À universidade, sem a qual eu não teria alcançado a maturidade e discernimento hoje presentes. Ao nosso orientador Geovany Araújo Borges por ter acreditado em nosso potencial e pela paciência e entusiasmo sempre presentes no processo de ensino e aprendizado.*

*Por fim, ao companheiro Neverton Novais que possibilitou a concretização de uma meta, de uma amizade e de um laço que será lembrado sempre.*

*Rafael Alves Toscano*

---

## RESUMO

Este trabalho contempla um estudo realizado sobre uma plataforma quadrúpede que vem sendo aprimorada em trabalhos feitos no laboratório LARA da UnB. O estudo envolve uma etapa inicial de adequação e conclusão de uma arquitetura mecânica e eletrônica que possibilite o desenvolvimento de pesquisa futura sob o sistema em questão. Para tanto, é exposto o desenvolvimento e instalação de módulos de sensoriamento de contato nas extremidades das patas e uma unidade inercial dotada de um acelerômetro de três eixos e um girômetro de um eixo. Esse sistema deve permitir o monitoramento do contato das patas com o solo e a coleta de grandezas referentes à aceleração, inclinação e velocidade angular com finalidade futura de implementação de um controle de postura e locomoção. O documento ainda apresenta um modelo de gerador de padrões de locomoção usando autômatos de entrada/saída temporizados. Sua implementação viabiliza a utilização do aparato concebido na etapa de desenvolvimento sensorial. Foram implementados dois padrões de locomoção diferentes, caminhada e galope. Experimentos mostraram o uso e a necessidade de informação, a respeito do contato das patas com o solo, para a geração de movimento feita por meio de modelo baseado em autômatos. Observou-se também o cálculo de inclinação da plataforma feito por meio de acelerações mensuradas pelo acelerômetro e a medida de velocidade angular passada pelo girômetro.

---

## ABSTRACT

This work presents a study on a quadruped robot currently under development at LARA laboratory in UnB. This study concerns changes in mechanical and electronics structures making the platform ready for new developments. In order to do so, new sensors were included: touch sensors in the extremity of each leg and an inertial measurement unit composed of a three-axis accelerometer and a one axis gyro. This system allows detection leg contact with ground as well as robot inclination, acceleration and rotation speed. A model for walking pattern generation is also presented. Such a model employes input/output timed automata. Two walking patterns are modeled: slow walking and gallop. Experiments presented in this document illustrate the need of ground contact information for the walking pattern generator. Further results show the satisfactory performance of the inertial measurement unit.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUÇÃO	1
1.2	HISTÓRICO DO PROJETO	2
1.3	CONTRIBUIÇÕES PARA O PROJETO	4
1.3.1	ELETRÔNICA	4
1.3.2	<i>Software</i> SUPERVISÓRIO DO PC	5
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	7
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>8</b>
2.1	INTRODUÇÃO	8
2.2	ARQUITETURA ELETRÔNICA DE QUADRÚPEDES	8
2.3	LOCOMOÇÃO E ESTABILIDADE	9
2.4	AUTÔMATOS	12
2.4.1	AUTÔMATOS COM ENTRADAS E SAÍDAS	13
2.4.2	AUTÔMATOS TEMPORIZADOS	14
<b>3</b>	<b>ADEQUAÇÃO MECÂNICA E ELETRÔNICA</b>	<b>16</b>
3.1	REPAROS E AVANÇOS DE ESTRUTURA	16
3.1.1	ESTRUTURA MECÂNICA	16
3.1.2	ESTRUTURA ELÉTRICA	18
3.1.3	CONVERSOR RS232/RS485	19
3.2	SENSORIAMENTO DE CONTATO DAS PATAS	21
3.2.1	CONCEPÇÃO E ACOPLAMENTO	21
3.2.2	INTEGRAÇÃO E ELETRÔNICA	22
3.2.3	CONDICIONAMENTO DE SINAL	23
3.3	SENSORIAMENTO INERCIAL	24
3.3.1	ACELERÔMETRO	25
3.3.2	GIRÔMETRO	31
3.3.3	CENTRAL INERCIAL	34
3.3.4	ALGORITMOS	38
<b>4</b>	<b>GERAÇÃO DO MOVIMENTO</b>	<b>44</b>
4.1	MODELOS DE MARCHA	44
4.2	MODELO GEOMÉTRICO DA PATA	44
4.3	MODELO DE GERAÇÃO DE MOVIMENTO	48
4.3.1	CAMINHADA	49
4.3.2	GALOPE	51
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>55</b>
5.1	INTRODUÇÃO	55

5.2	SENSORIAMENTO DE CONTATO .....	55
5.3	SENSORIAMENTO INERCIAL.....	56
5.3.1	ACELERÔMETRO E INCLINÔMETRO .....	56
5.3.2	GIRÔMETRO .....	57
5.4	GERAÇÃO DE MOVIMENTO.....	58
5.4.1	CAMINHADA .....	59
5.4.2	GALOPE .....	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>67</b>
<b>I</b>	<b>DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS.....</b>	<b>68</b>
<b>II</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD.....</b>	<b>72</b>

# LISTA DE FIGURAS

1.1	(a) Modelo em ambiente CAD 3D da primeira versão do quadrúpede [1], (b) estado do quadrúpede logo após sua concepção [1], (c) camada de sensores e sua comunicação com o PC central [2] e (d) estado do quadrúpede após últimos trabalhos sob a plataforma [3].	3
1.2	Organização da arquitetura geral.	5
1.3	(a) Transmissão de dados prevista por [2] e (b) transmissão implementada.	6
1.4	Quadrúpede em seu estado atual com contribuições assinaladas em destaque. Em 1, observa-se a placa de sensoriamento inercial e em 2, há destaque para o sensor de contato instalado na extremidade da pata.	7
2.1	Configurações de juntas em tipo joelho e tipo cotovelo. Os círculos pretos indicam as juntas que tem participação direta na caracterização da configuração. Adaptado de [4].	10
2.2	Tipos de margens de estabilidade estática observados em um dado polígono de suporte.	11
2.3	Exemplo de autômato simples.	13
2.4	(a) Exemplo de autômato com eventos de cunho temporal e (b) seu respectivo <i>sample path</i> .	14
3.1	(a) Estrutura mecânica em simulação CAD 3D e (b) foto do resultado de implementação da reestruturação.	17
3.2	(a) Chapa de alumínio adicionada para minimizar flexão da estrutura e (b) parafuso passante com porcas.	18
3.3	Foto da plataforma enfatizando as barras de suporte da estrutura na parte superior.	18
3.4	Organização inicial de fios e placas.	19
3.5	(a) Placa de distribuição da alimentação e (b) localização de interruptor do acionamento e <i>plug</i> para conexão da fonte.	20
3.6	Funcionamento do conversor de padrões RS-232/RS-485.	21
3.7	Placa conversora de padrões RS232/RS485.	21
3.8	(a) <i>Push-button</i> e (b) pé de borracha utilizados na concepção dos sensores de contato (vista em perspectiva superior).	22
3.9	(a) Detalhe de encaixe das partes componentes e (b) aparato completo do sensor de contato das patas.	22
3.10	Esquemático do sensor de contato das patas.	23
3.11	Efeito <i>bounce</i> .	24
3.12	Um acelerômetro pode ser interpretado como sendo um sistema massa-mola.	25
3.13	Sistema de duplo capacitor. A placa central é livre para se deslocar entre as placas fixas das extremidades.	26
3.14	Sistema submetido a uma aceleração exemplificando a medição das capacitâncias.	27
3.15	Acelerômetro de três eixos LIS3LV02DQ usado nesse trabalho.	28
3.16	Diagrama simplificado da conexão entre o LIS3LV02DQ e o ATmega8.	29
3.17	Protocolo de comunicação SPI. Fonte [5].	29
3.18	Girômetro ADXRS401 utilizado nesse trabalho.	32
3.19	Aparato utilizado pelo ADXRS401 sensível à variação do deslocamento angular. Fonte [6].	32

3.20	Exemplo da disposição do aparato utilizado pelo ADXRS401 quando este girômetro é submetido a uma rotação angular. Fonte [6]. .....	33
3.21	Eixo de medição da velocidade angular e aspecto do sinal de saída do girômetro. Fonte [7].	33
3.22	Esquema da conexão entre o girômetro ADXRS401 e o ATmega8. ....	34
3.23	Diagrama de uma IMU convencional. ....	34
3.24	Disposição e orientação relativas do acelerômetro e girômetro. ....	35
3.25	Diagrama da central inercial implementada e seu sistema de comunicação. ....	35
3.26	Sistema de coordenadas adotado no projeto. Vista frontal em perspectiva. ....	36
3.27	IMU fixada às barras de suporte na parte superior da plataforma. ....	37
3.28	Faixa de valores considerada no fitro janela. ....	39
3.29	Fluxograma do programa implementado no ATmega8 para a IMU. ....	39
3.30	Fluxograma do programa <i>Observador</i> executado no PC para o teste da IMU. ....	41
3.31	Vista lateral do quadrúpede e ângulo de arfagem. ....	43
4.1	Modelo geométrico da pata vista pela lateral. ....	45
4.2	(a) Detalhamento da posição A e (b) posição B com seus respectivos ângulos de interesse. ..	47
4.3	(a) Detalhamento da posição C e (b) posição D com seus respectivos ângulos de interesse. ..	48
4.4	Eventos de tempo indicados na transição de um ponto a outro. ....	49
4.5	(a) Forma gráfica de indicação da seqüencia de patas e (b) organização das patas e suas nomeclaturas (vista superior). ....	50
4.6	Autômato de cada pata para implementação da Caminhada. ....	51
4.7	<i>Sample path</i> dos autômatos utilizados no método de marcha Caminhada. ....	52
4.8	Autômato de cada pata para implementação do Galope. ....	53
4.9	Comportamento associado às patas do quadrúpede no decorrer do Galope. Enquanto o par 1-2 avança, o par 0-3 recua e assim as patas da esquerda se afastam ao mesmo tempo que as patas da direita se aproximam. O raciocínio análogo pode ser feito para o avanço do par 0-3 e recuo do par 1-2. ....	54
4.10	<i>Sample path</i> dos autômatos utilizados no método Galope. ....	54
5.1	(a) Alteração do nível de sinal por pressão do sensor de contato e indicativo de execução da interrupção executada por essa pressão (escala de tempo igual a 10ms por divisão) e (b) alteração do nível de tensão por desativação do sensor de contato e indicativo de execução da interrupção executada por essa desativação (escala de 5ms por divisão). ....	56
5.2	(a) Resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de 0° a 90°, (b) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de 0° a 90°, (c) resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de 0° a -90° e (d) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de 0° a -90°. As curvas são referentes a medições sem filtragem digital. ....	57
5.3	(a) Resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de 0° a 90°, (b) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de 0° a 90°, (c) resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de 0° a -90° e (d) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de 0° a -90°. Todas as curvas apresentam efeito de um filtro digital passa-baixas conforme citado na seção 3.3.4. ....	58
5.4	Seqüência de movimentos usada no processo de experimentação do acelerômetro para inclinação de arfagem. ....	59

5.5	Sequência de movimentos usada no processo de experimentação do acelerômetro para inclinação de rolagem. ....	60
5.6	Sequência de movimentos usada no processo de experimentação do girômetro. ....	61
5.7	Resposta do girômetro a movimentações manuais de giro no sentido horário e anti-horário. .	61
5.8	Autômatos referentes Marcha que foram implementados em código. ....	62
5.9	(a) Avanço da pata 1, (b) pata 0, (c) pata 3 e (d) pata 2.....	63
I.1	Diagrama esquemático do circuito pertencente aos sensores de contato das patas. ....	69
I.2	Diagrama esquemático da placa de distribuição de alimentação da plataforma. ....	69
I.3	Diagrama esquemático do conversor de padrões RS232/RS485. ....	70
I.4	Diagrama esquemático da IMU completa. ....	71

# LISTA DE TABELAS

1.1	Trabalhos desenvolvidos sob o quadrúpede e suas principais contribuições. ....	4
2.1	Necessidades de um robô com rodas (diferencial) e de um robô quadrúpede (três juntas ativas por pata). Fonte [8] .....	8
3.1	Descrição dos pinos do LIS3LV02DQ utilizados na interface serial SPI. ....	28
3.2	Tabela do registrador 20h do acelerômetro LIS3LV02DQ. Adaptado de [5].....	30
3.3	Tabela do registrador 21h do acelerômetro LIS3LV02DQ. Adaptado de [5].....	31

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$f$	Força específica	$[N/Kg]$
$g$	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
$F$	Força	$[N]$
$F_c$	Força de Coriolis	$[N]$
$K$	Constante elástica	$[N/m]$
$x$	Deslocamento	$[m]$
$m$	Massa de um corpo	$[Kg]$
$C$	Capacitância	$[F]$
$M$	Margem de estabilidade	$[m]$
$a$	Falange superior da pata	$[m]$
$b$	Falange inferior da pata	$[m]$
$H$	Altura máxima da extremidade da pata	$[m]$
$L$	Comprimento do passo	$[m]$
$X$	Deslocamento vertical do ombro	$[m]$

## Símbolos Gregos

$\omega$	Velocidade angular	$[rad/s]$
$\theta$	Ângulo do modelo geométrico	$[rad]$
$\varphi$	Ângulo de posicionamento de junta para posicionamento da pata	$[rad]$
$\gamma$	Evento de chegada de pata ao solo	

## Grupos Adimensionais

$k$	Constante Dielétrica
-----	----------------------

## Subscritos

$ee$	Estabilidade estática
$eel$	Estabilidade estática longitudinal
$eele$	Estabilidade estática longitudinal crab
$k$	Referente à pata que chega ao solo
$g$	Referente à aceleração da gravidade local
$arfagem$	Referente à arfagem
$rolagem$	Referente à rolagem

## Siglas

CPG	<i>Central Pattern Generator</i>
GRAV	Grupo de Robótica, Automação e Visão Computacional
LARA	Laboratório de Robótica e Automação
PC	<i>Personal Computer</i>
PWM	<i>Pulse width Modulation</i>
RIA	<i>Robot Institute of America</i>
UnB	Universidade de Brasília
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
ISA	<i>Inertial Sensors Array</i>
MEMS	<i>MicroElectroMechanical System</i>
TS	Tempo de Subida
TD	Tempo de Descida
TRM	Tempo de Recuo Médio
TRT	Tempo de Recuo Total
CC	Corrente Contínua
AD	Analógico-digital

# 1 INTRODUÇÃO

*Este capítulo apresenta uma introdução e contextualização histórica do projeto e explicita o problema e os objetivos do atual trabalho. Por fim, há uma apresentação do documento.*

## 1.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros conceitos de robótica nos remetem aos primórdios da civilização. Há registros de que gregos, romanos e árabes já esboçavam mecanismos em figuras, muitas vezes dotados de sistemas de pesos, polias e bombas hidráulicas. Contudo, devido principalmente à baixa atividade econômica e produtiva da época nenhuma atividade exigia equipamentos tão sofisticados.

Uma contribuição importante na área foi dada por Leonardo da Vinci. Ao realizar estudos e mapear com alto grau de fidelidade as articulações humanas, o estudioso italiano impulsionou o desenvolvimento de sistemas mecânicos articulados que possibilitou inicialmente a construção de humanóides com liberdade de movimentação similar à dos humanos. Contudo, a imaginação de Leonardo da Vinci chocava-se com a limitada tecnologia da época que não lhe permitiu criar nada mais complexo do que o Leão Animado, Cavaleiro Mecânico e outros dispositivos para reprodução do vôo das aves.

O termo em inglês, *robot*, deriva da palavra "robota", que em tcheco significa "trabalho forçado", tendo sido pioneiramente utilizado por Karel Kapek na peça intitulada R.U.R. - Rossum's Universal Robots - onde robô se referia às máquinas que substituíam o trabalho humano. Já o termo "robótica" refere-se ao estudo e à utilização de robôs, tendo sido enunciado a primeira vez pelo cientista e escritor Isaac Asimov, em 1942, numa pequena história intitulada "Runaround". Asimov também publicou uma compilação de pequenas histórias, em 1950, intitulada "I Robot". Este autor propôs a existência de três leis aplicáveis à robótica, às quais acrescentou, mais tarde, a lei zero. As leis propostas são, atualmente, entendidas numa perspectiva puramente ficcional, pois no tempo em que foram escritas não se imaginava o desenvolvimento vertiginoso que iria ocorrer nesta área. A definição oficial foi mais tarde determinada pelo *Robot Institute of America* (RIA), onde robô é definido como um equipamento multifuncional e reprogramável projetado para movimentar materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados, por meio de movimentos variados e programados, para a execução de uma infinidade de tarefas. Diferentemente da automação convencional, os robôs são projetados para realizarem, dentro dos limites especificados, um número irrestrito de diferentes tarefas.

Desde então, ano após ano, é cada vez maior o número de pesquisas e investimentos em todas as vertentes da robótica. O desenvolvimento de tecnologias de comando numérico, controle industrial, teorias de servo-mecanismos, álgebra de Boole e lógica digital aliados à crescente capacidade de processamento computacional foram fundamentais para o continuado progresso da robótica e permitiram a concepção de novos rumos. Avanços significativos vêm sendo substancialmente alcançados nas áreas industriais, militares, e de entretenimento.

## 1.2 HISTÓRICO DO PROJETO

Em meados de 2005, iniciaram-se no GRAV, alguns esforços que buscaram a concepção e pesquisa envolvendo uma plataforma quadrúpede e comportamental. Fundamentalmente, tinha-se como motivação desenvolver duas linhas de pesquisa paralelas buscando fazer estudos acerca de locomoção e comportamento.

A inspiração para a construção de robôs quadrúpedes vem não somente da tentativa de imitar o caminhar de mamíferos, mas da necessidade de máquinas desta natureza em transpor terrenos irregulares e desconhecidos a priori. Esses fatores não impossibilitam, mas se mostram como um entrave maior à utilização de robôs que fazem uso de rodas.

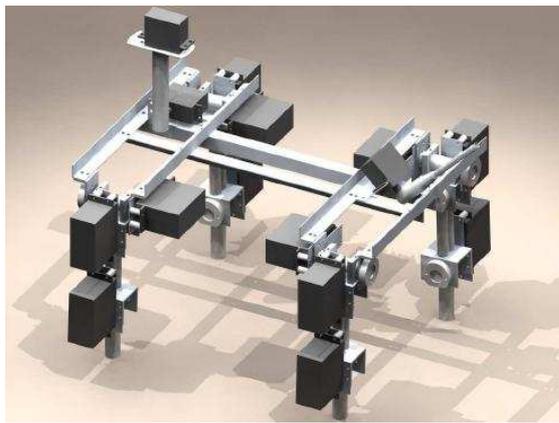
A locomoção por meio de patas se mostra mais vantajosa se comparada ao deslocamento por meio de sistemas com rodas ou sistemas de malha aberta, em casos de terreno acidentado. No caso menos vantajoso, o deslocamento se dá de maneira unívoca independentemente do terreno a ser transposto, caracterizando uma perda de acurácia em situações onde o posicionamento das patas no solo é de primeira importância para o sucesso do deslocamento [9].

O primeiro esforço foi investido na concepção de um plataforma quadrúpede baseada em alguns robôs já existentes como o JoinMax e o Aibo da Sony [1]. Preocupações específicas foram fundamentais para que se chegasse ao projeto da plataforma hoje utilizada. A estrutura mecânica deveria ser concebida de forma a suportar toda a eletrônica embarcada bem como deveria utilizar materiais leves e foi previamente desenvolvida em ambiente CAD 3D. Dessa forma, o quadrúpede foi concebido e fazia uso de três servos por pata, totalizando doze servos nas patas, dois na cabeça e apenas um no rabo como ilustrado na Figura 1.1(a).

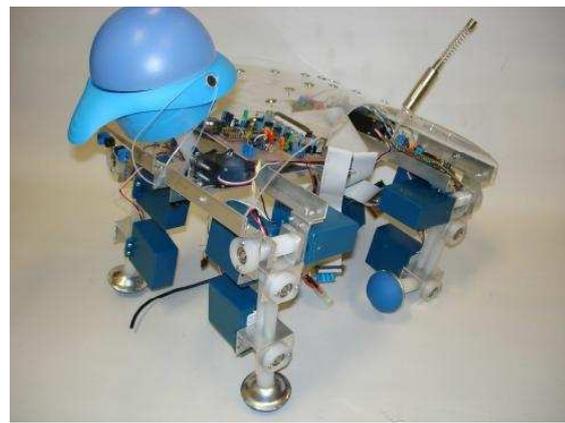
Verificou-se, com a conclusão do exposto acima, que os servos escolhidos não apresentavam o torque necessário para manter o robô de pé, tampouco possibilitar sua locomoção. Dessa forma, retrabalhou-se a plataforma de forma a receber novos servos, modelo HS-755HB da Hitec com torque maior que anteriormente, assegurando o bom funcionamento da plataforma. Para o acionamento dos servos manteve-se a idéia inicial de utilizar PWM gerado por microcontroladores AVR ATmega8 da Atmel. Cada pata faz uso de um microcontrolador que aciona seus três servos.

Simultaneamente à concepção da plataforma, foi desenvolvido um trabalho de sensoriamento e estudo comportamental do robô [2] que possibilitasse a interação sensorial do quadrúpede com o ambiente ao seu redor. Nessa etapa foi desenvolvido um protocolo de comunicação do barramento serial de forma que o PC central enviasse mensagens aos microcontroladores embarcados e estes pudessem enviar à ele informações advindas da percepção sensorial implementada. Foram de fato desenvolvidos os módulos de percepção tátil por meio de sensores de contato, detecção de obstáculos por meio de sensores ultrasônicos MaxSonar-EZ1 e percepção auditiva por meio de microfones instalados na cabeça do quadrúpede. Todos como parte de uma camada de sensores que se comunica com o PC de acordo com o esquema da Figura 1.1(c). Essa etapa previu também um estudo comportamental que possibilitasse a construção de um modelo de aprendizagem abordando tópicos como cadeias de Markov, aprendizagem por reforço e sua devida formulação matemática culminado na concretização de um modelo comportamental. A Figura 1.1(b) mostra a situação final do quadrúpede ao final desses primeiros trabalhos.

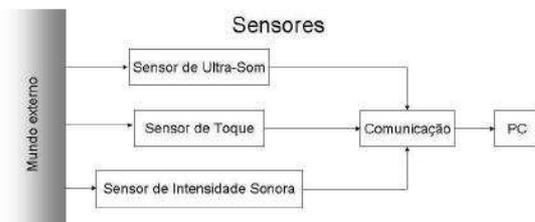
Ainda em 2006 iniciaram-se outras atividades que visavam a continuidade do desenvolvimento da pla-



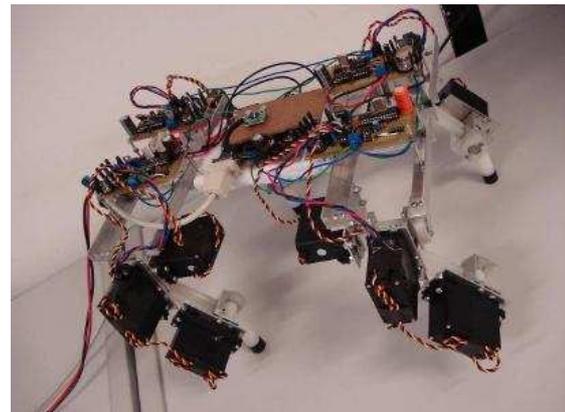
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1.1: (a) Modelo em ambiente CAD 3D da primeira versão do quadrúpede [1], (b) estado do quadrúpede logo após sua concepção [1], (c) camada de sensores e sua comunicação com o PC central [2] e (d) estado do quadrúpede após últimos trabalhos sob a plataforma [3].

taforma já concebida e em estudo. Dois trabalhos buscaram complementar o que já havia sido feito e agora visavam tanto a modelagem cinemática do robô e geração de seus movimentos usando filtragem estocástica [10], como a adequação de um sistema de locomoção para avaliação de algoritmos de aprendizagem [3].

Tratando-se da modelagem cinemática e da geração de movimentos usando filtragem estocástica, foi considerado que o robô nada mais era que um modelo de manipuladores paralelos em que cada pata é vista como um manipulador. Dessa forma, pode-se controlar a posição de cada junta de acordo com um sistema de coordenadas fixo. Ao lidar com a cinemática inversa, fez-se uso do filtro de Kalman estendido, aplicado como otimizador. Comumente aplicado na estimação de estados, o filtro faz, por meio de suas medições, a computação das variáveis articulares do robô. O modelo desenvolvido possibilitou a geração de trajetórias ponto-a-ponto e os resultados foram satisfatórios tanto em simulação quanto no robô real.

Por fim, [3] agregou ao projeto valores no sentido de permitir um início de pesquisa por meio de uma consolidação de fatores utilizados na locomoção. Foram corrigidos alguns problemas anteriores como a substituição dos servos por outros de maior torque e nessa mesma fase optou-se também pela não continuidade de estudos em relação a comportamento. Muita qualidade foi incorporada ao projeto com a criação de um sistema de calibração dos servos e adaptação da plataforma em geral para avaliação de seqüência de movimentos que possibilitassem a efetivação de algum método de marcha. Outro ponto de considerável

Tabela 1.1: Trabalhos desenvolvidos sob o quadrúpede e suas principais contribuições.

<b>Referência</b>	<b>Principais contribuições</b>
[1]	Concepção física da plataforma.
[2]	Criação do protocolo de comunicação, sensoriamento inicial e modelo comportamental.
[10]	Modelo cinemático e geração de movimentos.
[3]	Adequação da plataforma, calibração dos servos e modelo de aprendizado.

relevância foi a implantação de um acelerômetro de três eixos LIS3LV02Q utilizado para coleta de valores de aceleração e desempenho da função de explicitar informações a respeito de inclinação do robô. O trabalho abordou ainda algum esforço na aprendizagem por reforço fazendo uso dos tempos de ativação de cada pata, método denominado Passeio Aleatório Adaptativo. A Figura 1.1(d) mostra os estado da plataforma ao final dos últimos dois trabalhos feitos.

A integração dos resultado de [10] com [3] permitiu a consolidação de métodos de marcha por meio da interpretação de seqüências numéricas geradas com base no modelo cinemático. Os valores obtidos por observação empírica de locomoção quadrúpede eram interpretados nos microcontroladores de cada pata permitindo assim os primeiros passos do nosso objeto de estudo.

Resumidamente, a Tabela 1.1 explicita cada um dos trabalhos já efetuados sob a plataforma quadrúpede tratada e suas principais contribuições ao projeto como um todo.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES PARA O PROJETO

O sistema, como um todo, é dotado de um PC central e uma plataforma quadrúpede propriamente dita. A função do PC é objetivamente abordada na explanação da seção 1.3.2. O restante da arquitetura, que diz respeito à arquitetura eletrônica do sistema, será abordado no tópico 1.3.1. De forma geral, a organização da arquitetura presente considera a existência de um PC que se comunica com a plataforma via comunicação serial enviando e recebendo dados da mesma. A Figura 1.2 evidencia melhor a topologia existente na comunicação entre o PC e a plataforma e ilustra a organização eletrônica existente dentro da plataforma.

#### 1.3.1 Eletrônica

A plataforma dispõe de três servos por pata, totalizando uma quantidade de doze servos presentes no robô. Para cada pata, o sistema possui uma placa de acionamento dos motores dotada de um microcontrolador ATmega8 da Atmel. Essa placa recebe uma alimentação de 12 V proveniente de uma fonte externa e regula esse nível de tensão em 5V e 6V para alimentação do microcontrolador e dos servos, respectivamente. Por sua vez, a movimentação dos servos é reponsabilidade do ATmega8 que faz uso de PWM para

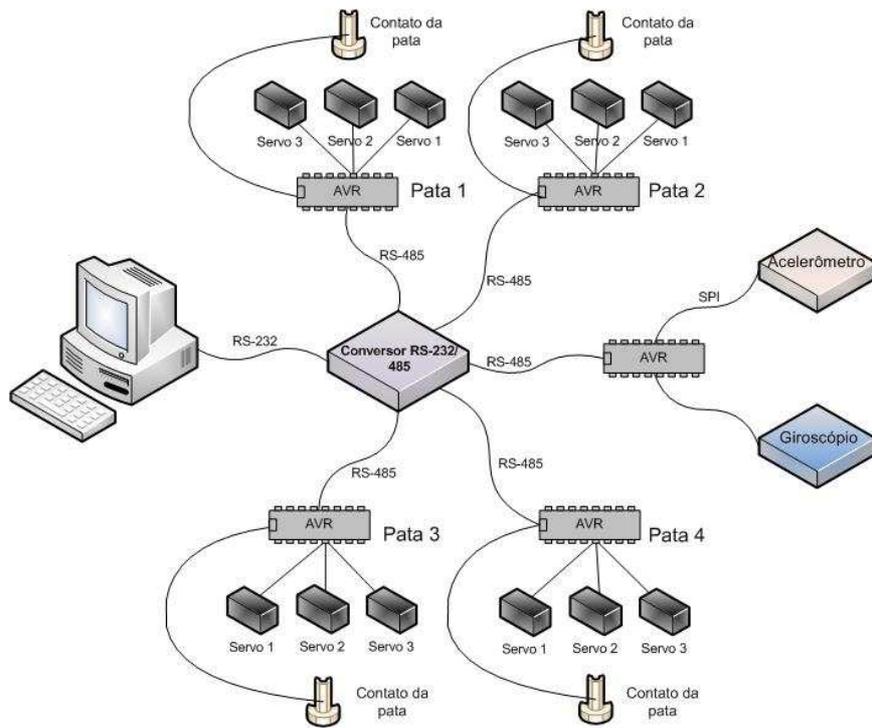


Figura 1.2: Organização da arquitetura geral.

esse intuito. Por meio desse trabalho aqui apresentado incorporou-se, ao sistema de cada pata, o circuito responsável pelo sinal dos sensores de contato nas extremidades das patas.

Um módulo de sensoriamento inercial foi implementado em uma nova placa localizada ao centro da plataforma e faz uso de um microcontrolador dedicado à essa tarefa. Esse aparato recebe também uma alimentação de 12V que é regulada para 5V no intuito de suprir a tensão necessária ao funcionamento dos sensores e circuitos ali presentes. A estimativa de grandezas inerciais acontece por meio de dados mensurados por um acelerômetro de três eixos e um girômetro em  $z$ .

Por fim, a plataforma conta com mais uma placa de distribuição de alimentação e uma placa de conversão do padrão serial RS232 para RS485. A comunicação contempla o padrão RS232 desde o PC até sua chegada à plataforma, na qual é convertida ao padrão RS485. O barramento do padrão RS485 é o aparato ao qual os microcontroladores estão atrelados permitindo o envio e o recebimento de mensagens advindas do PC.

### 1.3.2 Software supervisor do PC

No quesito de organização de *software* o sistema dispõe de um escalonador que coordena funções de coleta de dados dos sensores, de envio de informação sobre movimentação dos servos e de fusão dessas informações aplicando-as à geração do movimento. Dessa forma, recorre-se a módulos denominados *sensors*, *actuators*, *motion* e *quadrupede*. Procurou-se construí-los de forma mais padronizada possível e dessa forma cada parte citada conta com funções de inicialização, atualização e encerramento. Vale ressaltar que essa organização de *software* é observada exclusivamente dentro do que é de responsabilidade de processamento do PC.

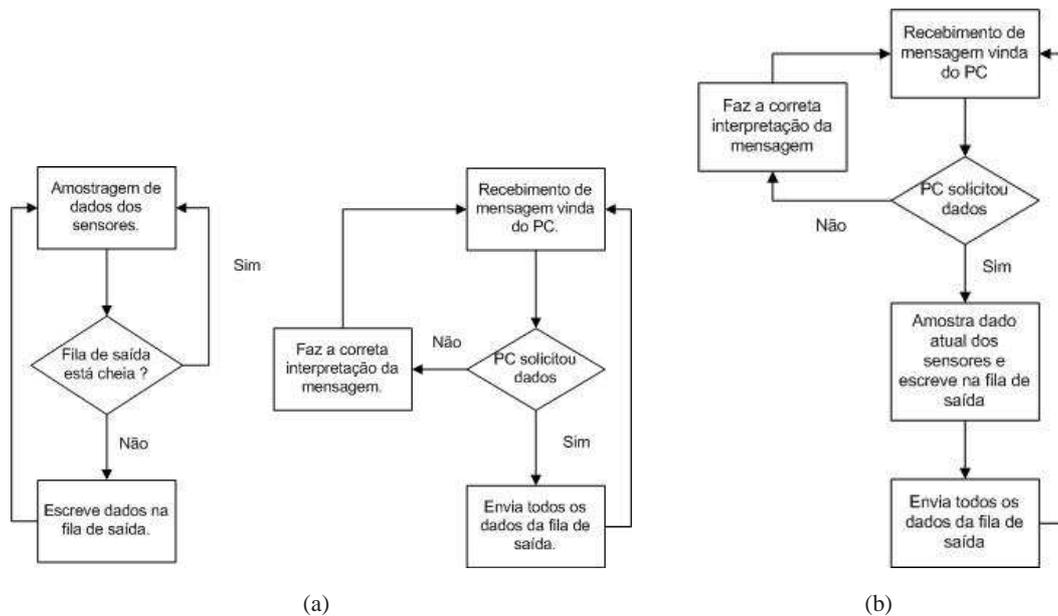


Figura 1.3: (a) Transmissão de dados prevista por [2] e (b) transmissão implementada.

O módulo de nome *sensors* tem o papel de requisitar os resultados de medições feitas pelos sensores embarcados no robô. Assim, adequa-se uma mensagem de requisição de dados ao protocolo de comunicação implementado por [2] possibilitando ao ATmega8 solicitado, o envio de dados atuais ao PC. No escopo de *actuators* observa-se funções como configuração de posição dos servos e envio dessa informação à pata para posicionamento do servo no ponto configurado. No sentido de agregar ao sistema a possibilidade de receber da plataforma os dados mensurados pelos sensores, algumas modificações foram feitas em relação ao previsto por [2]. *A priori*, a transmissão de dados pelos microcontroladores seria feita em etapas ilustradas por meio da Figura 1.3(a) e previa a amostragem contínua de dados dos sensores. No entanto, com o intuito de permitir um melhor desempenho ao sistema de tráfego de dados decidiu-se por implementar uma transmissão, como exibido na Figura 1.3(b), que se baseia na amostragem de dados dos sensores apenas no momento em que a requisição de dados pelo PC foi recebida no microcontrolador.

Com todo o respaldo dos módulos e ferramental até então enumerados, *motion* tem a função de utilizar a informação obtida gerando o sequenciamento e movimentação de patas que caracterizam um dos métodos de marcha abordados no capítulo 4.

O escalonador existente em *quadrupede* chama cada módulo em intervalos de tempo definidos e promove assim a atualização do retorno dos sensores, configuração de posição dos servos e sequenciamento das patas gerando a movimentação.

Em resumo, o projeto teve como meta buscar uma arquitetura definitiva que englobasse as partes mecânica, eletrônica e de organização modular de *software* evitando prejuízos a desenvolvimentos futuros em relação a suporte, rigidez e estabilidade mecânica, confiabilidade e recursos eletrônicos ou de *software*. Propõe-se munir a plataforma de recursos sensíveis necessários à geração de movimentos sob restrição de contato das patas com o solo e estimação de aceleração, velocidade e inclinação. Por fim, faz-se uso da informação decorrente do contato das patas com o solo para gerar a movimentação baseado em um modelo de autômatos de entrada/saída temporizados fazendo uso de uma central geradora de padrões (CPG). A plataforma contendo as contribuições apresentadas pela seção presente pode ser observada na Figura 1.4.

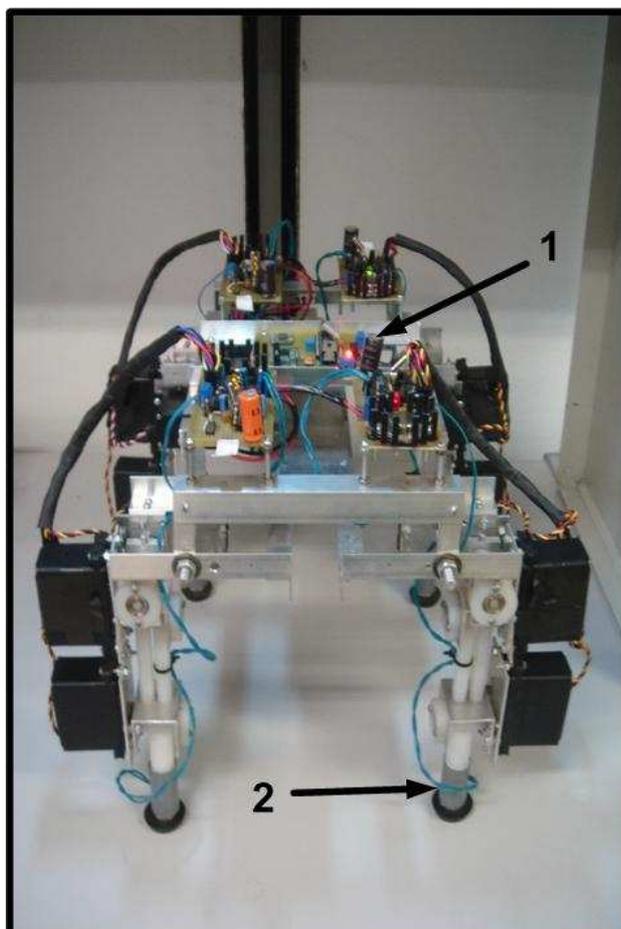


Figura 1.4: Quadrúpede em seu estado atual com contribuições assinaladas em destaque. Em 1, observa-se a placa de sensoriamento inercial e em 2, há destaque para o sensor de contato instalado na extremidade da pata.

## 1.4 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO

O capítulo 2 busca fazer um apanhado acerca de assuntos pertinentes à robótica quadrúpede e à fundamentação teórica necessária ao entendimento do desenvolvimento apresentado em capítulos posteriores. Dando continuidade, os capítulos 3 e 4 apresentam o desenvolvimento do projeto detalhando cada tópico de implementação de sensores utilizados, *hardware* e teoria desenvolvida em torno da geração de movimento por restrição de contato com o solo. Por fim, os resultados experimentais são explicitados no capítulo 5 mostrando por meio de procedimentos utilizados na coleta de resultados, alguns dos esforços alcançados com o projeto. Há ainda, o capítulo 6 que foi destinado a explicitar as informações e resultados atingidos com o desenvolvimento e experimentos propostos buscando também expor perspectivas de trabalhos futuros. Diagramas esquemáticos se encontram ilustrados ao final desse documento e demais anexos em CD complementar.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

*Este capítulo aborda alguns dos principais conceitos e teorias aplicáveis à robótica quadrúpede.*

### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo vislumbra os principais conceitos aplicados à robótica quadrúpede e formas de implementação estrutural encontradas em uma revisão bibliográfica realizada anteriormente ao início do desenvolvimento desse trabalho. Noções de locomoção associadas a elementos dotados de patas, casos de estabilidade e principais recursos utilizados nessa espécie de implementação serão abordados neste escopo. Por fim, há uma fundamentação teórica com foco no instrumento utilizado para a geração de movimentação aqui proposta, autômatos com entradas e saídas temporizados.

### 2.2 ARQUITETURA ELETRÔNICA DE QUADRÚPEDES

A questão de arquitetura eletrônica é algo de grande preocupação e forte influência no sucesso de uma plataforma dotada de patas. *A priori*, um robô que possua várias patas, cada uma disposta de vários graus de liberdade, possui vários atuadores e por consequência uma eletrônica de acionamento associada a cada um deles. Somando-se a esse fato, as juntas devem ser controladas e portanto, requerem o uso de sensores com esse propósito. Em suma, robôs com patas, necessitam de maior aparato sensorial quando comparados a veículos tradicionais [8].

Tradicionalmente, ao contrário de robôs com rodas, os robôs de duas ou mais patas necessitam de informação a respeito de toque de cada pata no solo. Essa informação é imprescindível ao controle desse tipo de implementação que faz uso de algoritmos complexos. A Tabela 2.1, ilustra as diferentes necessidades de algumas ferramentas padrão em desenvolvimento de robôs com rodas e com patas, validando o exposto nos dois primeiros parágrafos dessa seção.

Tabela 2.1: Necessidades de um robô com rodas (diferencial) e de um robô quadrúpede (três juntas ativas por pata). Fonte [8]

<b>Itens</b>	<b>Robô com rodas (unidades)</b>	<b>Robô quadrúpede (unidades)</b>
Atuadores	2	12
<i>Drivers</i>	2	12
Controladores	2	12
Sensores de junta	2	12
Sensores nas rodas/patas	0	4
Computadores	1	1

Cabe de acordo com a finalidade de aplicação, decidir qual tipo de aparato eletrônico ou sensorial o sistema deverá utilizar. No entanto, alguns tipos fazem-se mais interessantes e são portanto mais largamente implantados em construções dessa natureza. Em utilizações mais elaboradas, o simples sensor de contato da pata com o solo pode ser também um indicativo da intensidade com que a pata empurra o solo, recorrendo para tanto, à transdutores de pressão ou força.

Com grande importância, talvez a mais aplicada a esse tipo de implementação, estão os sensores que possibilitem a análise inercial do sistema. Grandezas como, aceleração, velocidade linear e de rotação em torno de um eixo e inclinação podem agregar muito ao controle e estudo da plataforma alvo. A questão de manter a plataforma sempre paralela ao solo e o mais estável possível, pode ser mensurada e configurada por meio da resposta e manipulação de dados de acelerômetros e giroscópios.

Com uma frequência muito menor que os diversos tipos de sensoriamento supracitados, observa-se algum uso de transdutores ultrasônicos com o intuito de detectar obstáculos ao redor. Sistemas de visão ainda são tópicos com pouca gama de exploração quando aplicados a sistemas quadrúpedes, possivelmente devido à dificuldade de tratamento das imagens na situação em que é apresentado um considerável balanço em sua locomoção.

Um quesito importante de arquitetura eletrônica nesse tipo de desenvolvimento diz respeito ao uso de PC embarcado, dando completa autonomia à máquina. Essa espécie de implementação pode ser tanto onerosa como complexa, e portanto, é comum encontrar na maioria dos casos, um PC que se liga ao robô via cabo e envia a ele os dados resultantes da geração de movimentos feita com base no *feedback* de sensores instalados na plataforma ou até mesmo em malha aberta como foi implementado na integração já citada dos resultados de [10, 3].

## 2.3 LOCOMOÇÃO E ESTABILIDADE

A locomoção por patas, mais frequentemente observada na forma de robôs quadrúpedes e hexápodes, tem sido um campo de pesquisa com grande expansão. Esse fato é consequência do desafio intelectual oferecido nesse tipo de implementação e devido às necessidades de se superar obstáculos, cantos, projeções e outras eventuais dificuldades de difícil contorno por métodos de locomoção já comumente adotados.

Assim como a maioria das soluções encontradas para resolução de problemas, a locomoção quadrúpede assume o compromisso de satisfazer vários pontos com suas vantagens e ao mesmo tempo mostra-se desvantajosa em relação a outros aspectos. Dentre as vantagens, é mais claro e perceptível que essa espécie de locomoção é vantajosa quanto à versatilidade na mobilidade, eficiência energética no deslocamento em terreno irregular, sucesso na exploração de terrenos naturais, melhor relação entre deslize e pressão ao solo, menor impacto danoso ao ambiente devido ao contato e desgaste menos frequentes com o solo e melhor velocidade em terrenos singulares. No campo das desvantagens, perde-se qualidade devido a fatos como a complexidade física da máquina, complexidade de sensores, acionamentos e eletrônica em geral, complexidade dos algoritmos de geração do caminhar e de controle, baixa velocidade máxima atingível em terrenos regulares e por fim, custo proporcional à complexidade do sistema [8].

Ainda abordando a questão de locomoção, pode-se fazer uma abordagem tão técnica quanto empírica. A literatura revista sobre locomoção quadrúpede e hexápode apresenta a definição de diversos métodos de

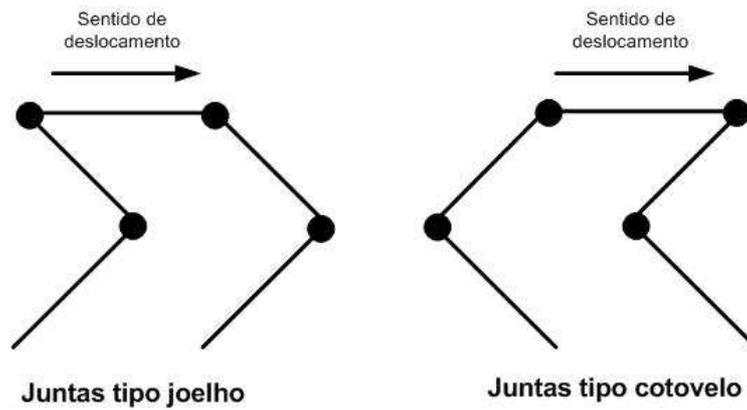


Figura 2.1: Configurações de juntas em tipo joelho e tipo cotovelo. Os círculos pretos indicam as juntas que tem participação direta na caracterização da configuração. Adaptado de [4].

marcha. Para cada método há um modo de locomoção definido e que possibilita saber o modo de operação no qual a lógica de marcha será aplicada. Em [11] faz-se a definição de três modos de movimentação nomeados: Normal (representando o movimento natural de vários animais no eixo longitudinal de deslocamento), Crab (definindo uma movimentação lateral para esquerda e direita) e Rotacionar (correspondendo à movimentação angular em relação ao eixo  $z$ ). A escolha de um modo de locomoção é fundamental para aplicação de um determinado método de marcha.

Definido o modo de locomoção, pode-se tratar a questão do método de marcha que será adotado. Marcha é um conceito que está diretamente associado com o número de patas em contato com a superfície, com a sequência de movimentação das mesmas e com a fase relativa entre elas. Esses fatores determinam, em conjunto, o desempenho do robô quanto à velocidade de deslocamento, estabilidade da movimentação e capacidade de carga do robô [11].

Outro fator que pode ser de fundamental importância no desempenho da marcha é o tipo de configuração de junta adotado. Num robô com três graus de liberdade por pata, como no caso desse projeto, há sempre a possibilidade de configurar as articulações de uma pata de forma que ela possa se adequar aos tipos evidenciados em [4], tipo joelho e tipo cotovelo. Animais quadrúpedes apresentam patas articuladas como tipo joelho, mas em aplicações robóticas as configurações do tipo cotovelo servem bem como base na análise de desempenho comparado. A Figura 2.1 deixa mais clara a diferenciação desses dois tipos de juntas que são nomeadas tendo como referência o sentido do deslocamento e a real liberdade de movimentação de um joelho ou cotovelo.

O emprego de diferentes tipos de marcha pode ter impacto direto na estabilidade da plataforma durante a movimentação. Conceitualmente, essa estabilidade pode ser caracterizada por estabilidade estática e dinâmica. Estabilidade estática se apresenta, no decorrer da locomoção, durante o período que o centro de gravidade do robô se projeta no solo e se encontra dentro do polígono formado pelas patas em contato com o mesmo. Para quantificar esse tipo de estabilidade existem algumas margens de estabilidade definidas. De acordo com [8], margem de estabilidade estática ( $M_{ee}$ ) foi definida como sendo a menor distância entre o centro de gravidade e os limites do polígono formado pelo contato das patas com o solo. Em 1989, Zhang e Song propuseram uma margem de estabilidade estática longitudinal ( $M_{eel}$ ) definida como sendo a menor das distâncias entre a projeção do centro de gravidade no solo e os limites frontal e traseiro do polígono de

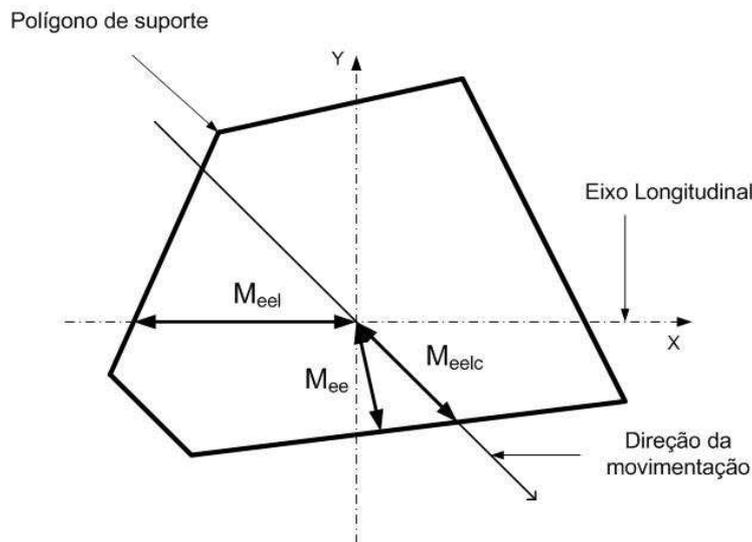


Figura 2.2: Tipos de margens de estabilidade estática observados em um dado polígono de suporte.

suporte, que é formado pelo contato das patas com o terreno, ao longo do eixo longitudinal da máquina. Levando em consideração imperfeições de construção do robô e os efeitos inerciais que surgem durante a aceleração, Zhang e Song propuseram em 1990 o uso de uma margem nomeada margem de estabilidade estática longitudinal crab ( $M_{eelc}$ ) e que definia essa grandeza como sendo a  $M_{eel}$  ao longo do eixo de movimentação da plataforma. Considerando um dado polígono de suporte, a Figura 2.2 evidencia os tipos de margens expostos acima.

A questão de estabilidade dinâmica é um tanto mais complexa que a estática. Basicamente, diz-se que um robô tem estabilidade dinâmica se, durante o caminhar, seu centro de gravidade se deslocar periodicamente para fora do polígono de suporte e mesmo assim ele conseguir uma locomoção de forma controlada. Percebe-se intuitivamente que esse tipo de estabilidade é muito mais difícil de ser alcançada, pois exige um modelo da dinâmica e uso da inércia [12].

Diversos trabalhos já foram feitos no sentido de tentar buscar uma maneira de locomoção dinamicamente estável. Advindas desses esforços, existem, na literatura correlata, algumas condições propostas como instrumento necessário à essa estabilidade. Existem seis condições físicas para que se obtenha estabilidade durante o caminhar sobre terreno irregular [13]:

1. O período do ciclo de caminhada deve ser suficientemente menor que seu limite superior;
2. As patas que avançam devem estar desimpedidas para executar seu avanço;
3. As patas que avançam devem chegar ao solo de forma confiável;
4. A velocidade angular das patas de suporte, em relação ao solo, deve ser mantida constante durante a movimentação de arfagem ou rolagem em torno dos pontos de contato no momento que deixam ou chegam ao solo;
5. A diferença de fase, entre a movimentação de rolagem do corpo e arfagem das patas, deve ser mantida independentemente de perturbação advinda de terreno irregular;

6. As diferenças de fase entre as patas devem ser mantidas independentemente de atraso na movimentação de arfagem de uma pata sofrendo perturbação advinda de terreno irregular.

## 2.4 AUTÔMATOS

Para o o correto entendimento da teoria de autômatos são necessários alguns conceitos e formalismos, que permitirão a plena compreensão desse fundamento teórico de grande poder na modelagem de sistemas. A priori, lida com uma sequência de estados e eventos que, por sua vez, causam a transição entre os estados e não se preocupa em explicitar o tempo que os sistema permanece em cada estado.

Uma sequência de eventos determina a ordem com que os mesmos acontecem no tempo mas não provê nenhuma informação sobre o instante de tempo em que eles ocorrem. Dessa forma, lida-se com um nível de abstração atemporal e lógico.

Dentro dos formalismos inerentes à teoria de autômatos, entende-se como primordial a definição de um grupo de eventos  $E$ , denominado alfabeto. Esse grupo possibilita o estabelecimento de um grupo de sequências de tamanho finito formado por elementos do alfabeto que recebe o nome de linguagem.

Considerando a introdução de conceitos supracitada, define-se autômato como sendo um dispositivo capaz de representar uma linguagem de acordo com regras bem definidas. Os próximos parágrafos fazem a definição formal e preocupam-se em interconectar linguagens a autômatos.

Um autômato determinístico nomeado  $G$ , é uma sêxtupla

$$G = (X, E, f, \Gamma, x_0, X_m) \quad (2.1)$$

Em que:

$X$  é o grupo de estados.

$E$  é o grupo finito de eventos associado às transições em  $G$ .

$f: X \times E \rightarrow X$  é a função de transição.

$\Gamma: X \rightarrow 2^E$  é a função de evento ativo.  $\Gamma(x)$  é o grupo de todos os eventos  $e$  para os quais  $f(x, e)$  é definida e é chamado de grupo de eventos ativos de  $G$  em  $x$ .

$x_0$  é o estado inicial.

$X_m \subseteq X$  é o grupo de estados marcados.

Graficamente, um autômato se refere a um modelo de sistemas a eventos discretos formado por arcos e círculos. Os arcos representam eventos e os estados são representados por círculos. Dessa forma, um arco sempre estará conectando círculos. A única exceção a esse padrão é o arco que indica o estado inicial, pois ele não tem origem em estado algum e seu destino sempre será o estado inicial. A Figura 2.3 ilustra um autômato simples em que o grupo de estados é dados por,  $X = \{S0, S1, S2\}$  e no qual o estado inicial é  $x_0 = \{S0\}$ . O grupo finito de estados associados às transições é  $E = \{a, b, c\}$ . A função de transição do modelo é graficamente representada pelos arcos, denotando as seguintes relações:

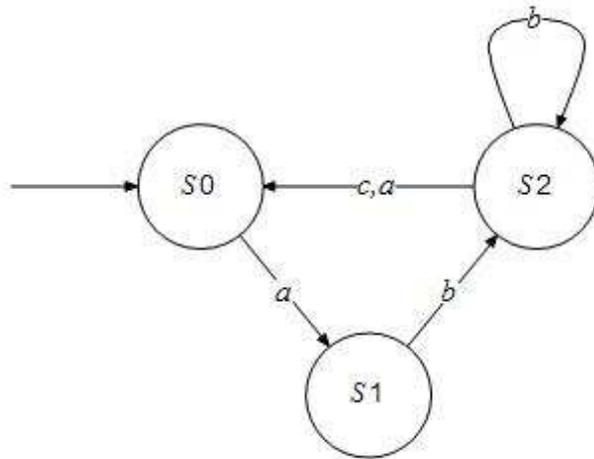


Figura 2.3: Exemplo de autômato simples.

$$f(S0, a) = S1 ; f(S1, b) = S2 ; f(S2, a) = S0 ; f(S2, b) = S2 ; f(S2, c) = S0$$

#### 2.4.1 Autômatos com entradas e saídas

Existem algumas variações na definição de autômatos em relação à introdução feita previamente que são de grande relevância à modelagem de sistemas. Autômato ou máquina de Moore e autômato ou máquina de Mealy, diferenciam-se da definição já feita, pela presença de entradas ou saídas dependendo do modelo adotado.

A máquina de Moore é definida como sendo um autômato com saídas associadas aos estados. Essa saída é de fato gerada quando o autômato atinge o estado em questão. Dessa forma, a saída depende exclusivamente do estado atual da máquina. Já a máquina de Mealy, baseia-se em eventos que assumem a forma de entradas ou saídas. Dessa forma, uma transição  $e_i/e_o$  de um estado  $x$  para um estado  $y$  acontece de forma que o autômato receba um evento de entrada  $e_i$  e faça a transição para o estado  $y$ , sendo que nesse processo é emitido um evento de saída  $e_o$  [14].

É notável a utilização desse tipo de modelo para a representação de sistemas que lidam com componentes eletromecânicos (sistemas de manufatura e montagem, sistemas de controle de processos e unidades de aquecimento e condicionamento de ar, dentre outros). Essa espécie de sistema, comumente faz uso de uma série de sensores responsáveis por avaliar o estado físico do objeto da modelagem. Estendendo esse raciocínio, o modelo de Moore se mostra bem aplicado ao utilizar na saída de um estado, o grupo de medições dos sensores quando o sistema atinge esse determinado estado. Já o modelo de Mealy se mostra conveniente desde que as noções de entrada e saída sejam centrais no sistema e na teoria de controle [14].

Os dois tipos de máquinas com entradas ou saídas supracitados estabelecem determinada equivalência. Com exceção do caso em que temos entrada vazia, os eventos de saída da máquina de Mealy são os eventos de saída dos estados, pela mesma transição, quando aplicados ao modelo de Moore. No caso excepcional, a máquina de Moore gera uma palavra correspondente ao estado inicial mas a de Mealy, não gera qualquer saída devido ao fato de não ter executado transição alguma.

Nos sistemas modelados por máquina de Moore, as saídas dos estados são graficamente indicadas em

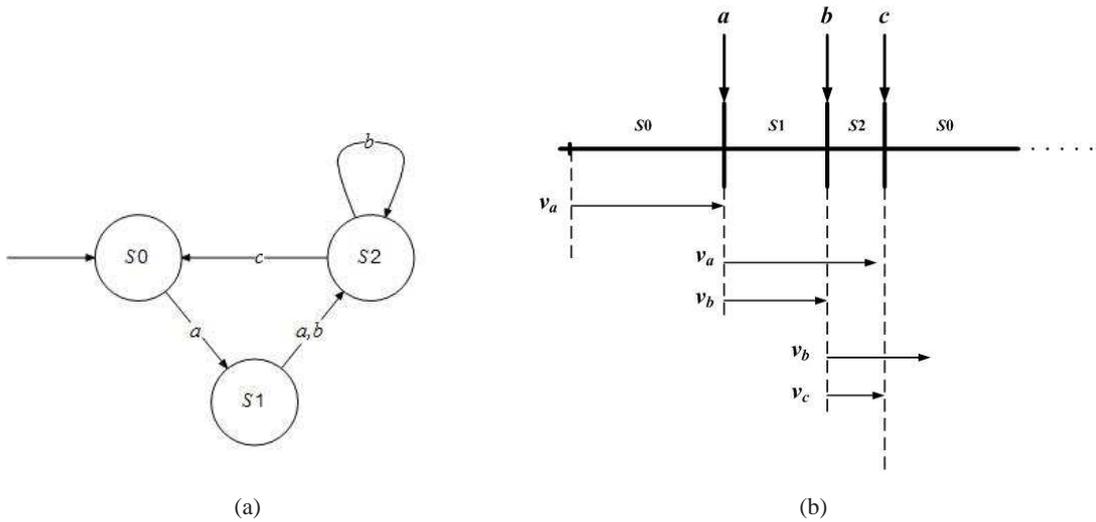


Figura 2.4: (a) Exemplo de autômato com eventos de cunho temporal e (b) seu respectivo *sample path*.

negrito ao lado do estado em questão.

### 2.4.2 Autômatos temporizados

Um autômato temporizado difere-se dos tipos já expostos nesse tópico pelo caráter temporal de seus eventos. Um evento nesse tipo de autômato ocorre quando é atingido seu tempo de vida que nesse caso é o tempo associado a ele. Até que ele ocorra, costuma-se dizer que é mantido ativo e portanto há diferença entre um evento estar ativo e ocorrendo. No caso de autômatos com mais de um evento de cunho temporal, afirma-se que o evento está ativo quando ele pode ocorrer levando em conta o estado atual do sistema e conclui-se que ele de fato ocorre quando seu tempo de vida é contado de forma decrescente atingindo o valor 0.

A definição formal de um autômato temporizado incorpora à definição exposta pela definição 2.1, uma série de eventos denominados, tempos de vida. Em outras palavras, faz-se necessária a criação de uma estrutura de temporização associada ao grupo de eventos já existente. Essa estrutura tem a forma do grupo

$$V = \{v_i : i \in E\}$$

de seqüências de tempos de vida  $v_i = \{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots\}, i \in E, v_{i,k} \in \mathbb{R}^+, k = 1, 2, \dots$

Nos casos em que se tem vários eventos de tempo ativos, assume-se que ocorrerá primeiro aquele de menor tempo de vida. Essa lógica se aplica no decorrer das transições entre estados sempre observando os estados que podem ser considerados ativos para uma determinada situação ou estado presente. A análise das considerações feitas para um autômato com eventos baseados em tempo pode ser feita para o autômato apresentado na Figura 2.4(a).

No caso em consideração,  $E = \{a, b, c\}$  e dessa forma temos o conjunto de tempos de vida para esse sistema sendo  $v_c < v_b < v_a$ . Como o sistema se inicia no estado  $S_0$ , a transição para o estado  $S_1$  acontece quando o intervalo de tempo referente a  $v_a$  se completa, pois esse é o único evento ativo nesse momento. Assim que se completa  $v_a$  o sistema passa para o estado  $S_1$  e nesse instante tem como ativos os eventos  $a$  e  $b$ , com tempos de vida respectivos  $v_a$  e  $v_b$ . Por  $v_b < v_a$ , o sistema passará ao estado  $S_2$  assim que

se completar o tempo referente a  $v_b$ . Por fim o sistema voltará ao estado inicial assim que se completar o tempo referente a  $v_c$  pois dentre os eventos ativos no estado  $S2$ , o evento  $c$  é o de menor tempo de vida,  $v_c$ . Resumidamente, esse comportamento pode ser observado pelo *sample path* ilustrado na Figura 2.4(b).

## 3 ADEQUAÇÃO MECÂNICA E ELETRÔNICA

*O capítulo busca expor ao leitor as implementações de cunho mecânico e eletrônico. São abordados tópicos referentes à estrutura física e ao sensoriamento desenvolvidos.*

### 3.1 REPAROS E AVANÇOS DE ESTRUTURA

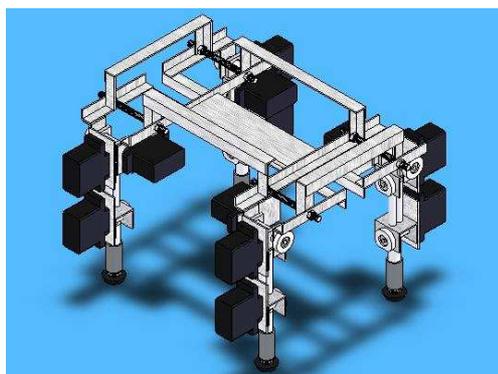
#### 3.1.1 Estrutura mecânica

No início desse trabalho foi encontrada uma estrutura mecânica inalterada por projetos anteriores, preservando fielmente as características originalmente idealizadas em [1] por Cotta e Neto, os pioneiros do projeto. Apesar de ter sido muito bem trabalhada, fornecendo o suporte necessário a todos os componentes eletromecânicos necessários ao bom funcionamento do sistema, pôde-se verificar que a armação estrutural original em si não conferia rigidez suficiente para uma fixação eficiente dos servos motores, uma vez que foi verificado, de forma esporádica e para apenas alguns tipos de marcha, que durante o caminhar do quadrúpede as juntas dos ombros se abriam, desacoplando os servos de seus respectivos eixos culminando na queda do quadrúpede e comprometendo sua locomoção. A precisa averiguação dos fatores e esforços que levaram as juntas a se comportarem de tal maneira foge do escopo deste trabalho e, portanto, de forma um tanto quanto paliativa foram adotadas medidas que inibissem o desacoplamento dos servos, não comprometendo seu funcionamento, sem atentar-se, precisamente, às conseqüências mecânicas das atitudes tomadas.

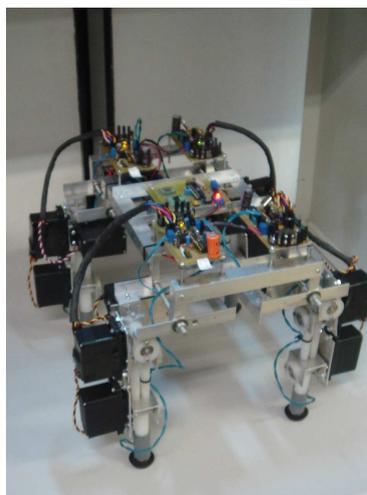
Outro fator de relevante importância na adaptação da estrutura foi o fato de que a estrutura original, por conseqüência de suas características construtivas, se apresentou excessivamente flexível em resposta aos esforços gerados durante o caminhar do quadrúpede. Tal particularidade tem impacto direto na análise qualitativa e na estimativa dos erros de direção e trajetória, uma vez que interfere na medição das grandezas de interesse realizada pelos sensores. Para reforçar o fato desta flexibilidade ser uma característica indesejável, deve-se ainda mencionar que todo o modelamento matemático realizado por [10] visando a obtenção de uma seqüência de passos para o deslocamento da plataforma, foi realizado considerando que todo o corpo fosse uma estrutura essencialmente rígida, onde os movimentos seriam restritos às articulações das patas.

Como terceira motivação para a reestruturação mecânica da plataforma, deve-se citar a intenção de que futuramente seja adicionada uma espécie de cabeça ao quadrúpede. Esta adição seria, na verdade, composta por uma câmera destinada à aquisição de imagens do meio e um sistema de ultra-som para a determinação da distância de objetos situados à frente do robô. Ambos teriam o intuito de fornecer informações para a elaboração de algoritmos de controle de trajetória e que, juntamente com a central inercial, seriam capazes de conferir ao quadrúpede um alto potencial de aprendizado e adaptação a mudanças do meio externo.

A utilização do software SolidWorks 2006 foi crucial neste ponto do projeto, uma vez que foi possível simular e avaliar diversas mudanças estruturais de antemão, sem que nenhuma modificação fosse realizada à estrutura física. A Figura 3.1(a) exhibe o resultado da simulação que julgou-se atender de forma mais ade-



(a)



(b)

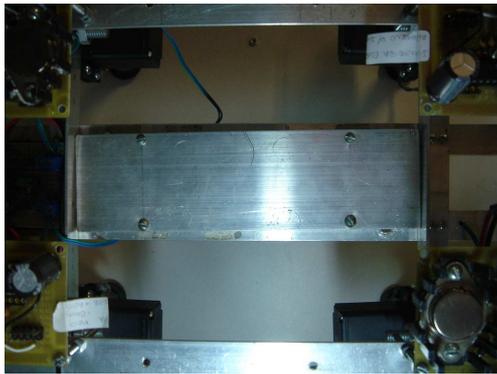
Figura 3.1: (a) Estrutura mecânica em simulação CAD 3D e (b) foto do resultado de implementação da reestruturação.

quada às exigências acima exaltadas. Já a Figura 3.1(b) mostra o resultado da aplicação das modificações simuladas na estrutura física propriamente dita.

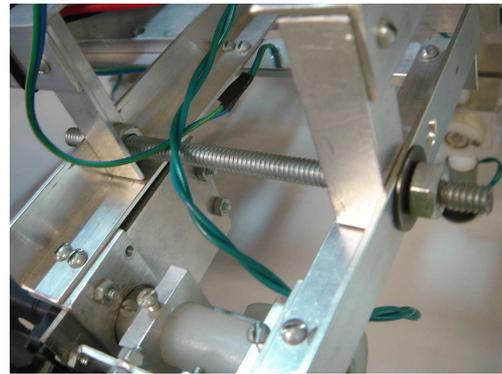
Todo o corpo estrutural do robô é composto por chapas de alumínio, material de baixa densidade e rigidez satisfatória, que confere ao robô a robustez necessária sem o ônus das altas massas de estruturas feitas, por exemplo, de aço. Contudo, conforme já mencionado em parágrafos anteriores, alguns fatores levaram a crer que modificações deveriam ser realizadas à plataforma com o intuito de que a mesma se adaptasse à nova realidade do projeto. Como a massa a ser deslocada durante o movimento do robô é um fator limitado pelo torque máximo dos servos, é indesejável que toda a estrutura tenha um acréscimo de massa significativo. Para tanto, optou-se novamente pelo alumínio como o material mais conveniente para que esta readaptação fosse realizada.

Na tentativa de solucionar os problemas já elucidados, foram adicionadas ao robô chapas de alumínio que foram fixadas à estrutura utilizando parafusos e porcas também de alumínio. Especificamente, com o intuito de minimizar a flexão da estrutura foi afixada ao tronco do quadrúpede uma chapa de alumínio de 175x51x6mm, conforme em destaque na Figura 3.2(a). Já para o problema verificado nos ombros que eventualmente culminava no desacoplamento dos servos com o eixo, foram inseridos, à altura dos ombros, parafusos passantes com porcas, em destaque na Figura 3.2(b), que permitem a regulação da distância entre as barras dos ombros, ajustando de forma ideal a distância entre elas conforme a necessidade verificada empiricamente.

À plataforma foram acopladas ainda, barras estruturais que têm por objetivo prover um suporte mais adequado à fixação dos diversos componentes eletrônicos já existentes e a outros que possam, por ventura, vir a ser adicionados ao robô futuramente. Como exemplos destes dispositivos temos as placas de controle dos servos das patas, a placa de conversão RS232/RS485, câmera, ultra-som, unidade inercial, dentre outros. As barras podem ser vistas em destaque na Figura 3.3.



(a)



(b)

Figura 3.2: (a) Chapa de alumínio adicionada para minimizar flexão da estrutura e (b) parafuso passante com porcas.

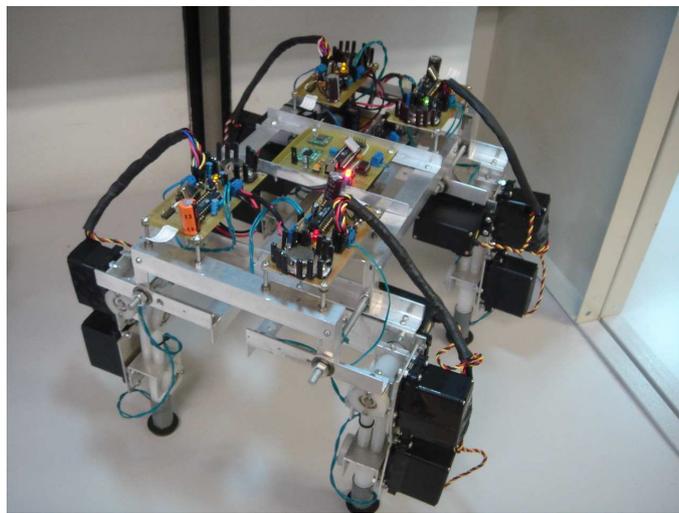


Figura 3.3: Foto da plataforma enfatizando as barras de suporte da estrutura na parte superior.

### 3.1.2 Estrutura elétrica

O sistema de alimentação elétrica encontrado no início do trabalho era bastante simples, sendo composto basicamente de uma fonte de 450W de potência, comumente utilizada na alimentação de computadores, e fios para conexão. O principal problema encontrado e que motivou a reestruturação elétrica do robô foi a disposição dos fios condutores de energia. Estes fios encontravam-se em completa desorganização, com ramificações e emendas realizadas em diversos pontos, o que eventualmente resultava em mau contato nas placas. Além disso, os fios livres atrapalhavam o deslocamento do quadrúpede por eventualmente se prenderem a dispositivos móveis, sem mencionar que também dificultavam o acesso manual a outros componentes, bem como o transporte da estrutura. A Figura 3.4 mostra a disposição dos fios no início deste projeto.

Na tentativa de minimizar estes problemas foi confeccionada uma placa para a distribuição da energia elétrica, com um interruptor liga/desliga geral, capacitores de desacoplamento e três conectores para a conexão com os dispositivos. Os fios foram ainda afixados à estrutura de modo a não ficarem livres, liberando o acesso a vários pontos da estrutura e impedindo que os mesmos se prendessem às partes móveis,

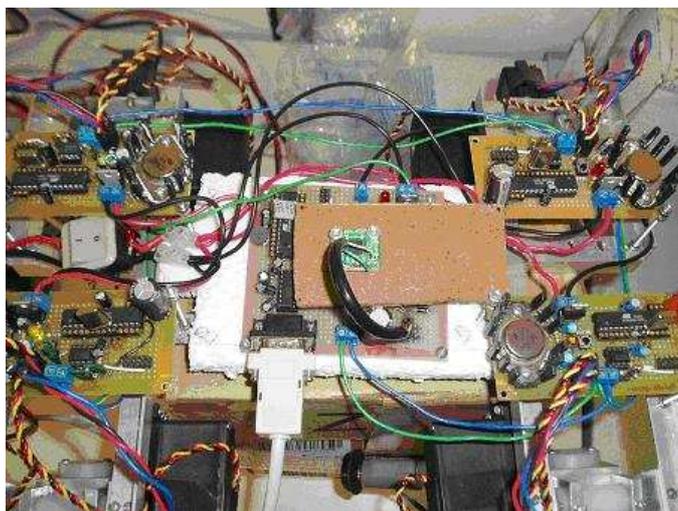


Figura 3.4: Organização inicial de fios e placas.

atrapalhando o deslocamento da plataforma. As Figuras 3.5(a) e (b) mostram a placa confeccionada e em detalhes a afixação dos fios, a disposição do interruptor de acionamento e o *plug* para a conexão externa, respectivamente.

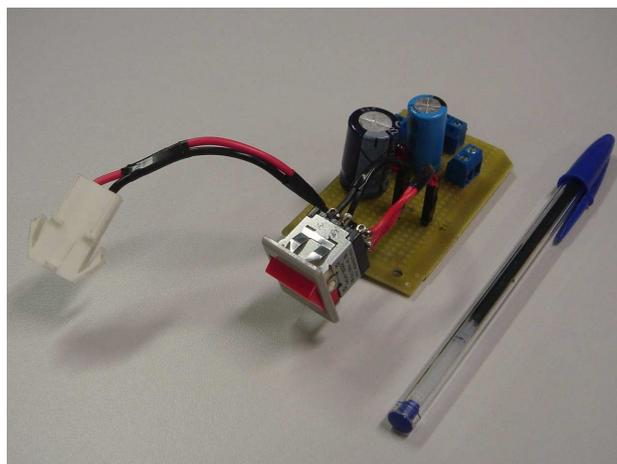
Outro fator de importante relevância refere-se à escolha do local onde a placa foi inserida na estrutura. A parte posterior do quadrúpede foi propositadamente escolhida, de forma que os fios de alimentação provenientes da fonte, em momento algum, se encontrassem na trajetória de quaisquer das patas e dessa forma o interruptor geral de liga/desliga também teria posição privilegiada, estando em um local de fácil visualização e rápido acesso.

É interessante notar que este circuito de distribuição não faz nenhum tipo de regulação da tensão de entrada, já que isto é realizado de forma individual para cada placa e de acordo com os componentes nela presente. E assim sendo, a placa de alimentação deve receber 12V CC como tensão de entrada, fornecendo o mesmo valor nos terminais de saída.

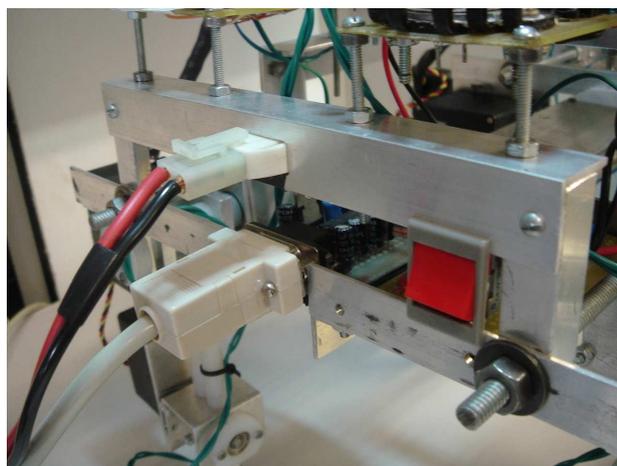
### 3.1.3 Conversor RS232/RS485

A plataforma quadrúpede abordada neste projeto, conforme explicitado anteriormente, já foi objeto de estudo e esforços em projetos de graduação anteriores a este. Alguns destes projetos, a exemplo deste, se dedicaram à robótica móvel desenvolvendo tanto a estrutura física em si [1, 3], quanto o modelamento matemático e o sequenciamento de marcha empírico [10] para um caminhar bem sucedido. Contudo, de forma exclusiva, um outro projeto [2], explorando a vertente comportamental, buscou desenvolver sobre esta mesma plataforma elementos que lhe conferissem a habilidade de interagir com as pessoas e o ambiente ao seu redor, emulando, por exemplo, sentimentos de raiva, tristeza e sono, além de emitir e identificar sons e posicionar tronco, cabeça, cauda e membros em resposta ao tratamento e condições existentes no ambiente.

A plataforma, em curto prazo, não mais servirá como base para o desenvolvimento da robótica comportamental da forma como descrita anteriormente e, portanto, os módulos e circuitos eletrônicos desenvolvidos no projeto anteriormente mencionado que ainda estão presentes na estrutura encontram-se sem



(a)



(b)

Figura 3.5: (a) Placa de distribuição da alimentação e (b) localização de interruptor do acionamento e *plug* para conexão da fonte.

utilidade, podendo ser removidos sem ônus para a continuidade do seu desenvolvimento.

A placa central que abrigava o microcontrolador responsável pelo comando dos servos da cabeça e da cauda, além de englobar ainda os circuitos de conversão de padrões RS232/RS485, era o único componente remanescente na estrutura que era de uso da robótica comportamental. Assim sendo, tendo em vista as observações mencionadas e com a intenção de conferir uma maior modularidade ao sistema, optou-se pela eliminação da placa central, confeccionando uma nova exclusivamente para a conversão dos padrões RS232/RS485.

No contexto desse trabalho e de acordo com as particularidades de cada padrão discutidas em [15], a Figura 3.6 ilustra o funcionamento do circuito de conversão. É possível notar que na camada física entre o computador e o conversor, o padrão adotado é o RS232. Já entre o conversor e os dispositivos (microcontroladores) o padrão é o RS485.

A placa confeccionada pode ser vista na Figura 3.7. Pode-se notar que assim como foi pensado para a placa de alimentação, este circuito de comunicação foi estrategicamente disposto na estrutura, uma vez que o ponto para a conexão do cabo serial proveniente do PC fora posicionado na parte posterior da estrutura.

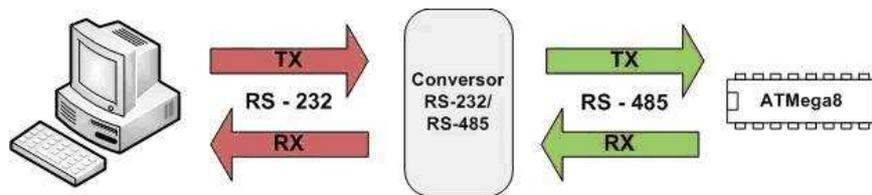


Figura 3.6: Funcionamento do conversor de padrões RS-232/RS-485.

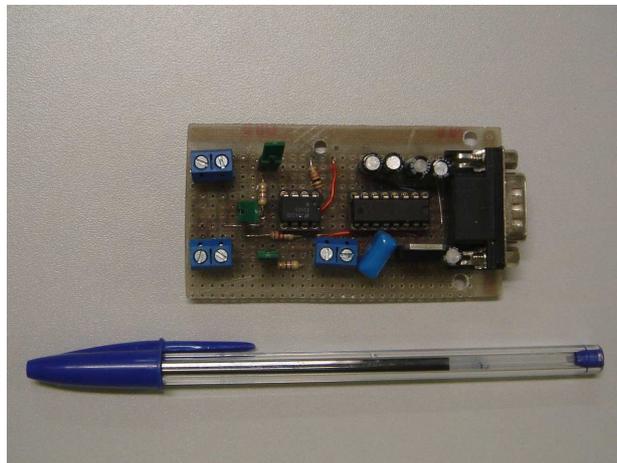


Figura 3.7: Placa conversora de padrões RS232/RS485.

E este cabo, quando conectado, nos remete a uma espécie de cauda; cauda esta formada agora pelos cabos de comunicação e alimentação.

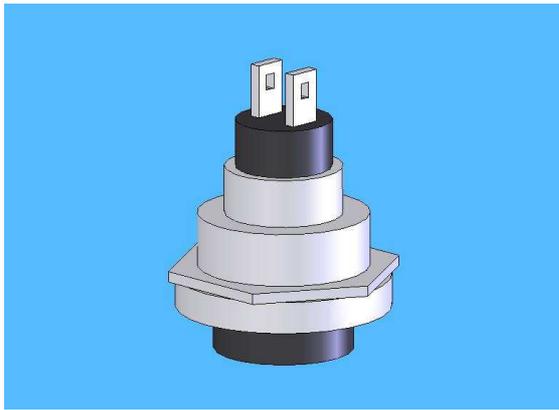
## 3.2 SENSORIAMENTO DE CONTATO DAS PATAS

### 3.2.1 Concepção e acoplamento

O contato das patas com o solo, previsto em [10] para geração de movimentação foi de fato implementado possibilitando a avaliação da condição da pata como estando no solo ou suspensa. Ao decidir como seria feita a concepção, optou-se por utilizar materiais que não provocassem grandes alterações na massa das patas mantendo a preocupação de obter uma estrutura o mais leve possível. O efeito do sensor de contato se deve ao uso de um *push-button* ilustrado na figura 3.8(a). Quando pressionado, o botão fecha o contato entre os terminais e conseqüentemente os abre quando não pressionado, ou seja, classifica-se como um botão ou chave normalmente aberta.

Com o intuito de proporcionar mais estabilidade ao robô e tentar obter uma locomoção de maior qualidade, buscou-se um aumento da área de contato da pata com o solo. Essa área foi estendida por meio de pés de borracha fixados à extremidade do botão como mostrado na Figura 3.8(b). A fixação foi feita por meio de adesivo instantâneo universal, popularmente conhecido como, "super bonder".

Por fim, foi proposta uma maneira de fazer a conexão do aparato até então desenvolvido, com a pata propriamente dita. Para tanto, foi utilizado um tubo de PVC de diâmetro interno usinado, de forma a ter



(a)



(b)

Figura 3.8: (a) *Push-button* e (b) pé de borracha utilizados na concepção dos sensores de contato (vista em perspectiva superior).



(a)



(b)

Figura 3.9: (a) Detalhe de encaixe das partes componentes e (b) aparato completo do sensor de contato das patas.

o mesmo diâmetro da pata. A junção do tubo com a pata foi assegurada por interferência mecânica e uso de fita veda rosca garantindo a robustez dessa fixação e possível remoção em caso de reparos. O tubo foi perfurado de forma a permitir a passagem da fiação de sua interface elétrica com o sistema. A Figura 3.9 deixa clara a forma de encaixe das partes e mostra a forma final do sensor como foi acoplado à pata, respectivamente.

### 3.2.2 Integração e eletrônica

O sensor de contato é responsável por informar ao microcontrolador da pata em que está inserido se a extremidade da mesma está ou não tocando o solo. Com o propósito de realizar essa tarefa, fez-se uso de um pino responsável por detecção de interrupções externas do ATmega8, denominado INT1. Dessa forma, configurou-se por meio de registradores internos, que qualquer alteração no nível lógico de entrada do pino INT1 deveria gerar um interrupção no microcontrolador.

O *push-button* por si só não passa a informação de alteração de nível lógico, mas é o instrumento

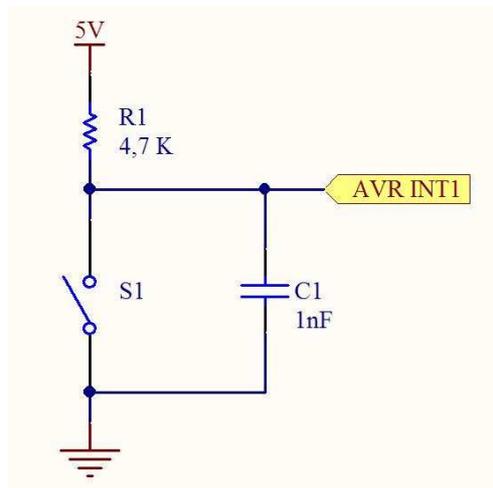


Figura 3.10: Esquemático do sensor de contato das patas.

utilizado na configuração proposta para que aconteça essa alteração. O esquemático da Figura 3.10 ilustra melhor a montagem que baseia-se no uso de um resistor de *pull-up* forçando uma tensão de 5V em INT1 sempre que o contato do botão estiver aberto ou não pressionado. Ao ser pressionado, o botão fecha contato alterando o nível lógico de 5V para 0V ativando a interrupção do microcontrolador. Essa mesma interrupção acontece sempre que o botão deixar de ser pressionado devido à alteração do nível de 0V para 5V.

Outro ponto importante de integração diz respeito à comunicação do robô com o PC central possibilitando o envio de atualizações dos dados dos sensores caso haja solicitação do sistema central. Esse processo é feito por meio do protocolo utilizado no projeto para troca de mensagens. Como os microcontroladores de cada pata recebem todas as mensagens colocadas no barramento, cabe ao protocolo informar à pata certa que a mensagem deve ser desprotocolada. No caso dos sensores de contato, o valor atual é amostrado sempre que houver mudança no nível lógico e esse valor é armazenado até que haja outra modificação. Quando o PC solicita essa informação, o microcontrolador apenas envia o estado atual do sensor.

### 3.2.3 Condicionamento de sinal

Por se tratar de um sensor mecânico, pode ser que exista um pequeno salto no sinal elétrico devido às pequenas oscilações que o sistema venha a sofrer. Dessa forma, foi necessário tratar o sinal dos sensores de forma a não permitir que essa oscilação viesse a interferir nas medições feitas.

Duas abordagens foram propostas para alcançar o resultado desejado no condicionamento de sinal. A solução poderia ser feita via *hardware* ou ainda por meio do *software* vinculado ao microcontrolador. A primeira das soluções exigia o projeto e desenvolvimento de algo que ainda deveria ser incorporado à placa contendo o microcontrolador. Por simplicidade e bom senso na escolha, foi decidido que essa não seria a estratégia adotada mesmo porque as placas citadas já se encontram quase que completamente ocupadas. A segunda proposta mostrou-se mais atrativa já que não exigia que o sistema incorporasse mais nenhum recurso físico.

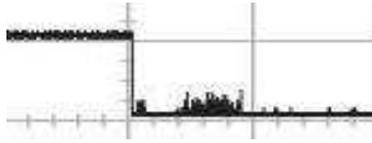


Figura 3.11: Efeito *bounce*.

Nesse sentido, buscou-se estimar o tempo de duração dessa oscilação ou *bounce* para então poder tratar o sinal. O *bounce* mostrou-se, em geral, presente por um tempo de aproximadamente 20ms e esse deveria portanto ser o intervalo ignorado até que o sinal se estabilizasse permitindo assim uma medição confiável do nível lógico presente.

Esse efeito denominado *bounce* pode ser observado na Figura 3.11. A solução implementada faz com que, a cada interrupção gerada, a rotina chamada aguarde 20ms para então tomar o valor presente como sendo a medição feita naquele momento.

### 3.3 SENSORIAMENTO INERCIAL

Os princípios dos sistemas de navegação inercial ou *Inertial Navigation Systems* (INS) residem em uma relação matemática conhecida como a equação fundamental da Geodésia Cinemática [16], a qual relaciona grandezas definidas em um sistema de coordenadas inercial. A relação pode ser expressa na forma vetorial por:

$$\vec{a} = \vec{f} + \vec{g}$$

Em que:

$a$  é a aceleração de um corpo;

$f$  é a força específica medida por sensores;

$g$  é a aceleração da gravidade local.

Tais grandezas podem ser de tal forma relacionadas por terem o respaldo do Princípio da Equivalência de Einstein [16], que afirma que os efeitos em decorrência de forças inerciais e de campos gravitacionais são indistinguíveis. Dessa forma, um INS mede a força  $f$  à qual um corpo de massa conhecida é submetido, sendo esta a combinação das acelerações  $a$  e  $g$ . O sistema ainda deve ter informações a respeito de  $a$  ou  $g$  independentemente de  $f$ . Em sistemas nos quais são utilizados modelos para a gravidade  $g$  pode-se determinar  $a$  e em sistemas cuja aceleração pode ser medida, a aceleração da gravidade pode ser determinada. O primeiro caso trata de um problema de posicionamento, ao passo que o segundo é um caso de determinação gravimétrica.

Por sua vez, a aceleração  $a$  pode ser integrada numericamente em relação ao tempo para a obtenção de valores de velocidade. Em seguida, a integração desta velocidade em relação ao tempo fornecerá a informação de deslocamento do sistema de navegação. Ao mesmo tempo, as medições de velocidade angular do sistema de navegação também podem ser integradas em relação ao tempo para a obtenção da orientação no espaço. Este é o princípio básico da navegação inercial e do posicionamento relativo, denominado *deduced* ou *dead reckoning*, onde são considerados valores de velocidade, de deslocamento, de tempo e de direção relacionados a um corpo [16]. Evidentemente, essa técnica de navegação necessita o

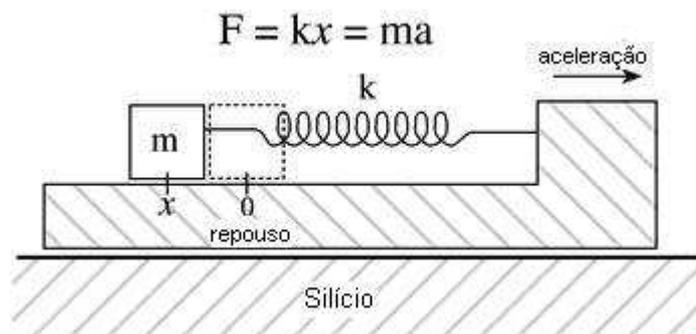


Figura 3.12: Um acelerômetro pode ser interpretado como sendo um sistema massa-mola.

conhecimento dos valores iniciais de tais grandezas e de um ponto de partida com coordenadas conhecidas, uma vez que sem estes valores os chamados erros de deriva cresceriam de forma imprevisível com o transcorrer do tempo, devido à não determinação das constantes de integração. Para que os parâmetros observados possam ser manipulados, a modelagem da integração dos dois sistemas deve considerar os diferentes referenciais adotados e estabelecer modelos de gravidade, além de sincronismo de observações espacial e temporal.

Assim, um INS utiliza-se de unidades de medição inercial (IMU) que contenham arranjos de sensores inerciais (ISA) para a obtenção dos parâmetros desejados, como será discutido nas próximas seções.

É oportuno mencionar o fato de que este trabalho não tem por objetivo conferir ao quadrúpede a capacidade de navegação inercial. Embora esteja utilizando uma central inercial e técnicas de navegação inercial, desejamos apenas obter informações que nos forneçam de forma contínua a atitude da plataforma no desenrolar de seu caminhar, e não o seu posicionamento absoluto no espaço, conforme pressupõe a navegação inercial.

### 3.3.1 Acelerômetro

Um acelerômetro mede a força inercial sofrida por um determinado corpo quando este sofre uma mudança de velocidade (aceleração ou frenagem). Utilizou-se, para a concepção da unidade de medição inercial proposta neste projeto, o acelerômetro modelo LIS3LV02DQ. Trata-se de um dispositivo capaz de mensurar as acelerações por ele experimentadas em três eixos ortogonais e fornecer, de forma digital e linear para o mundo externo, os sinais de aceleração medidos através de duas interfaces seriais à escolha do usuário: I<sup>2</sup>C e SPI.

O princípio de funcionamento básico dos acelerômetros pode ser melhor entendido como o de uma micro-máquina consistindo de um sistema massa-mola, afixada a uma camada de substrato de silício, conforme ilustrado na Figura 3.12.

Este sistema atuando dentro de sua região linear tem seu comportamento governado por um princípio físico descrito pela Lei de Hooke. A Lei de Hooke estabelece que a deformação sofrida por um corpo material é linearmente proporcional à força causadora da deformação. Os materiais, para os quais a Lei de Hooke é uma aproximação aplicável, são conhecidos como materiais elásticos lineares. Para sistemas que

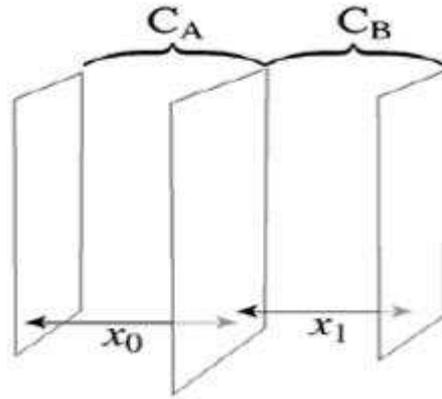


Figura 3.13: Sistema de duplo capacitor. A placa central é livre para se deslocar entre as placas fixas das extremidades.

obedecem a esta lei, a deformação produzida é proporcional à força aplicada, ou seja,

$$\vec{F} = K\vec{x}$$

em que  $K$  é a constante de proporcionalidade entre o deslocamento  $x$  e a força  $F$ .

Outro princípio físico de fundamental importância neste contexto é ditado pela segunda Lei de Newton, que estabelece que um corpo de massa  $m$  experimentando uma aceleração  $a$  estará submetido a uma força de magnitude  $F$ . Vetorialmente, temos:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Assim, adotando uma abordagem simplificada, pode-se relacionar as duas equações anteriormente apresentadas para obter que  $ma = Kx$ , uma vez que a força experimentada pelo corpo deve ser a mesma submetida à mola. Como  $K$  e  $m$  são constantes, a razão aceleração-deformação também o será. De tal maneira, dobrando-se o deslocamento  $x$ , por exemplo, dobrar-se-á a aceleração, o que indica que a aceleração e o deslocamento são diretamente proporcionais.

O acelerômetro de três eixos LIS3LV02DQ é um exemplo de dispositivo que obedece ao sistema apresentado. Este sistema somente responde a acelerações ao longo do eixo da mola, sendo chamado de acelerômetro unidirecional. Com o objetivo de medir múltiplos eixos de aceleração o sistema pode ser repetido ao longo de cada eixo desejado.

Visto desta maneira, o problema de medição da aceleração é transformado em um processo de medição do deslocamento da massa conectada à mola. A avaliação do deslocamento da massa é feita utilizando um sistema capacitivo. Este acelerômetro, especificamente, já tem incorporado o sistema de condicionamento de sinal, de fornecimento de energia, além do sensor propriamente dito, e ao invés de usar um capacitor simples adotou-se um sistema de duplo capacitor, como mostra a Figura 3.13. A parte central é a massa e, presas a ela, existem lamínulas que se projetam entre lâminas a partir das quais se obtém as capacitâncias. Este conjunto está apoiado em um substrato de silício e possui aspecto similar ao apresentado na Figura 3.14.

Desta forma, estando o sensor em repouso, as capacitâncias relativas a ambos os capacitores terão

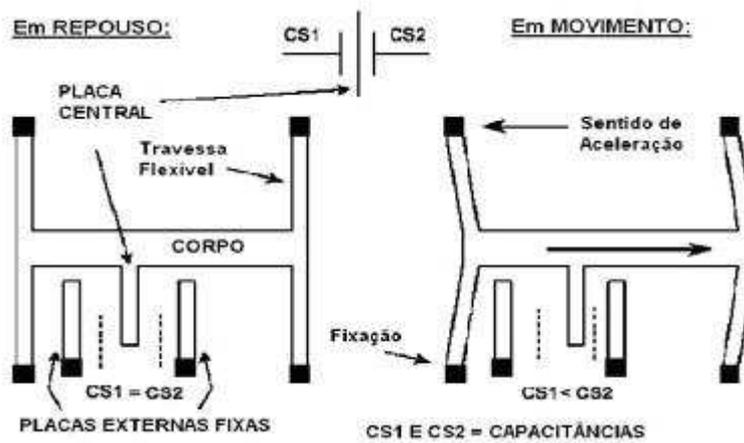


Figura 3.14: Sistema submetido a uma aceleração exemplificando a medição das capacitâncias.

valores dados por:

$$C_A = \frac{k}{x_0 + x} \quad C_A = C \frac{x_0}{x_0 + x}$$

$$C_B = \frac{k}{x_0 - x} \quad C_B = C \frac{x_0}{x_0 - x}$$

onde  $x$  é a distancia entre as placas que formam os capacitores e  $k$  é a constante dielétrica do material colocado entre as placas.

Com a movimentação da massa, uma capacitância aumentará com a aproximação a uma das placas e a outra diminuirá, devido ao distanciamento simultâneo. Este acelerômetro mede a diferença entre as capacitâncias, dada pela equação

$$\Delta C = C_A - C_B = Cx_0 \left[ \frac{1}{x_0 + x} - \frac{1}{x_0 - x} \right] = \frac{-2x}{x^2 - x_0^2}$$

e que para pequenas distâncias a fórmula pode ser aproximada para

$$\Delta C \approx \frac{-2}{x_0^2}$$

A diferença entre capacitâncias é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Um processo integrativo pode fornecer a velocidade e o deslocamento. Disto é que se valem alguns sistemas inerciais que permitem o cálculo da posição.

Deve ser lembrado que todo corpo nas mediações de um corpo celeste está sujeito a uma força de atração gravitacional. Portanto, presume-se que na superfície da terra a força da gravidade tenha influência na medição das acelerações em pelo menos um dos eixos de um acelerômetro tri-axial. Em alguns casos, a detecção da projeção da aceleração gravitacional - parcela da aceleração medida que é decorrente da aceleração da gravidade - em cada um dos eixos do sensor é um fato desejável (aplicações como o inclinômetro, por exemplo), sendo indesejável em outros tantos (como, por exemplo, é para o caso da medição da aceleração instantânea em relação a um sistema de coordenadas), devendo ser desprezada. E é com este intuito de extrair dos valores medidos a informação desejada que as manipulações algébricas dos valores mensurados, como as rotinas de calibração, são de fundamental importância, conforme abordado na seção 3.3.4.



Figura 3.15: Acelerômetro de três eixos LIS3LV02DQ usado nesse trabalho.

Tabela 3.1: Descrição dos pinos do LIS3LV02DQ utilizados na interface serial SPI.

Pino Acelerômetro	Descrição	Pino AVR
CS	<i>Serial Port Enable</i> - Pino de habilitação da comunicação serial	17
SCL	<i>Serial Port Clock</i> - pino que recebe o sinal de temporização para a recepção/transmissão de informações entre o microcontrolador e o acelerômetro	16
SDI	<i>Serial Data Input</i> - pino por onde são recebidos os dados enviados pelo AVR	15
SDO	<i>Serial Data Output</i> - pino por onde são enviados os dados ao AVR	14

O acelerômetro utilizado neste projeto é o modelo LIS3LV02DQ, fabricado pela ST Micro e adaptado pela SparkFun Electronics, conforme exibido na Figura 3.15.

Dentre as inúmeras funcionalidades disponibilizadas por este dispositivo, algumas foram plenamente utilizadas neste projeto e, portanto, merecem destaque.

A comunicação entre microcontrolador e acelerômetro é realizada através do padrão SPI. Fisicamente a conexão é realizada a quatro fios: os pinos CS, SCL e SDA do LIS3LV02DQ são conectados, através de resistores de proteção de  $1K\Omega$ , respectivamente aos pinos 17 (PB3), 16 (PB2) e 15 (PB1) do AVR, que são definidos como saídas e o pino SDO do acelerômetro é diretamente conectado ao pino 14 (PB0) do AVR, definido como entrada. A Tabela 3.1 explicita esta conexão entre os pinos mencionados e ainda faz uma breve descrição funcional dos mesmos. Já a Figura 3.16 exhibe o diagrama do circuito implementado para a conexão entre o LIS3LV02DQ e o ATmega8.

Estabelecido o contato físico entre microcontrolador e acelerômetro, ainda é necessária uma padronização dos dados enviados para que os mesmos possam ser corretamente interpretados por ambos os dispositivos. Esta padronização é estabelecida pelo protocolo imposto pelo fabricante e exibido na Figura 3.17.

Conforme pode ser visto na figura, no início da transmissão o pino CS é colocado em nível baixo, retornando ao nível alto quando a transmissão é finalizada. Enquanto não houver transmissão, o pino SCL é mantido em nível alto e no período em que uma comunicação está em curso a transição de nível alto

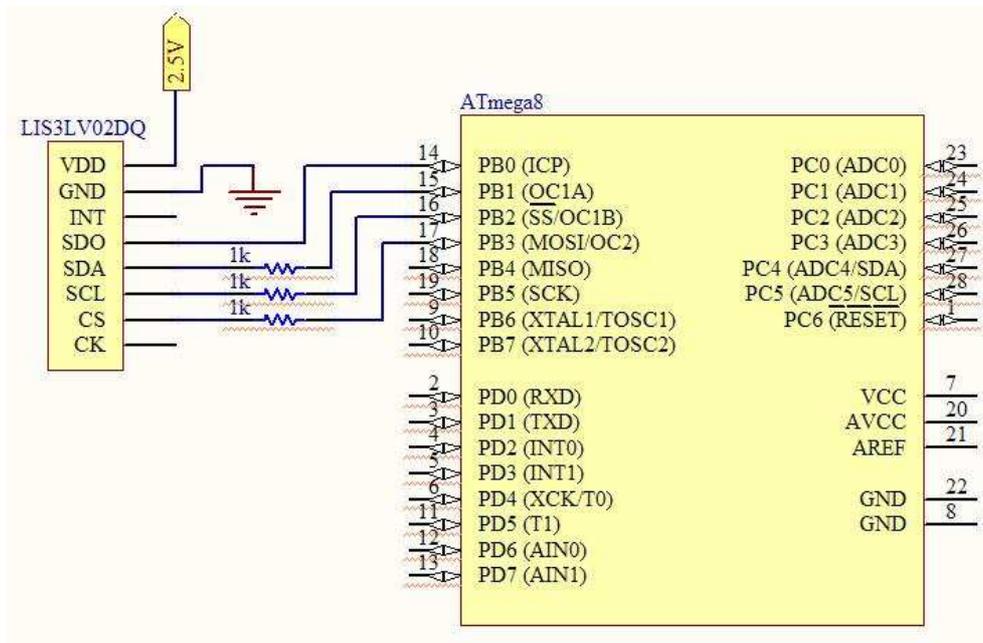


Figura 3.16: Diagrama simplificado da conexão entre o LIS3LV02DQ e o ATmega8.

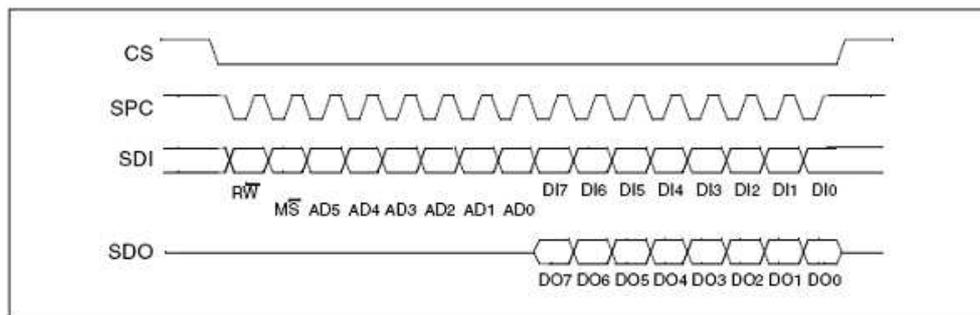


Figura 3.17: Protocolo de comunicação SPI. Fonte [5].

para nível baixo deste pino rege o envio de um bit em SDO (envio pelo acelerômetro e recepção pelo AVR) ou SDI (envio pelo AVR e recepção pelo acelerômetro) e a transição de nível baixo para alto rege o recebimento de um bit nos mesmos canais.

Na comunicação entre estes dois dispositivos apenas duas situações são possíveis: a escrita ou a leitura de um registrador do LIS3LV02DQ. As funções de escrita e leitura de registradores são ambas concluídas em dezesseis ciclos de relógio, correspondendo a dezesseis bits por transmissão. Em ambos os casos o microcontrolador envia uma mensagem ao acelerômetro solicitando o envio ou a atualização do valor de um de seus registradores. Desta forma, o protocolo é composto por dezesseis bits assim configurados:

- Bit 0: Bit de RW. Quando em 0, indica escrita e o conteúdo presente nos bits 8 a 15 é escrito no acelerômetro. Quando em 1, indica leitura e o conteúdo lido é armazenado nos bits de 8 a 15. O LIS3LV02DQ ao receber uma mensagem de leitura, faz a verificação do dado solicitado e no momento da leitura do oitavo bit da mensagem enviada pelo AVR, por questões de sincronização, inicia o envio do conteúdo solicitado, ou seja, a partir deste instante e até o término da transmissão haverá informação trafegando nos dois sentidos, tanto pelo canal de escrita quanto pelo canal de

Tabela 3.2: Tabela do registrador 20h do acelerômetro LIS3LV02DQ. Adaptado de [5].

PD1, PD0	Power Down Control (00: Modo desligado, 01, 10, 11: Ligado)
DF1, DF0	Declination Factor Control (00: Divisão por 512, 01: Divisão por 128, 10: Divisão por 32, 11: Divisão por 8)
ST	Self Test Enable (0: Modo Normal, 1: Self Test ativo)
Zen	Z-axis Enable (0: Eixo desligado, 1: Eixo ligado)
Yen	Y-axis Enable (0: Eixo desligado, 1: Eixo ligado)
Xen	X-axis Enable (0: Eixo desligado, 1: Eixo ligado)

leitura.

- Bit 1: Utilizado para leitura/escrita de múltiplos registradores. Quando em 0, o endereço se mantém inalterado, quando em 1 o endereço é automaticamente incrementado.
- Bits 2-7: Contêm o endereço do registrador onde será realizada a leitura ou escrita.
- Bits 8-15: São bits de dado, contêm o valor a ser escrito ou lido dos registradores. É importante ressaltar que os dados a serem escritos e os dados lidos transitam por canais diferentes. No processo de escrita, toda a mensagem de escrita é enviada do AVR para o acelerômetro pelo pino SDI, ao passo que no processo de leitura o microcontrolador envia ao acelerômetro uma mensagem requisitando o valor de um determinado registrador pelo pino SDI (neste caso toda a informação relevante está contida no primeiro byte e, portanto, o segundo byte pode ser desprezado) e este último retorna, via pino SDO, o valor solicitado (é retornado apenas um byte pelo pino SDO, que por questões de compatibilidade e sincronização tem seus bits referenciados pelos números de 8 a 15).

O fato do LIS3LV02DQ prover comunicação serial digital simplifica substancialmente a coleta dos dados medidos, ao passo que elimina algumas etapas de manipulação dos dados, tais como a filtragem e a conversão AD. As informações são armazenadas em formato digital no interior do acelerômetro por meio dos registradores. Os registradores podem conter dados operacionais do acelerômetro ou dados referentes às acelerações medidas, o que justifica a possibilidade tanto de leitura quanto de escrita destes registradores. Neste projeto, fez-se necessário o acesso a 8 registradores, sendo que os demais permanecem ajustados com os valores de fábrica. Os registradores 20h e 21h são oportunamente descritos no que se segue e nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente.

No registrador 21h apenas o bit BOOT foi setado, o que indica a escolha de um fundo de escala de  $\pm 2g$ , com atualização contínua dos registradores de resultado com doze bits de resolução e justificados à direita, com interrupção de dado desabilitada e seleção de comunicação SPI a quatro fios. Já no registrador 20h foi escrito o valor 0xB7 (em notação hexadecimal) que assim configurado faz com que o dispositivo seja ligado, seleciona 2560 Hz como frequência de amostragem para a aceleração, desabilita a função de self test em regime permanente e habilita a realização de medições para os três eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Tabela 3.3: Tabela do registrador 21h do acelerômetro LIS3LV02DQ. Adaptado de [5].

FS	Full Scale Selection (0: $\pm 2g$ , 1: $\pm 6g$ )
BDU	Block Data Update (0: Atualização contínua, 1: Registradores de saída não atualizados até leitura de MSB e LSB.)
BLE	Big/Little Endian Session (0: Little Endian, 1: Big Endian)
BOOT	Reboot Memory Content
IEN	Interrupt Enable (0: Dado pronto em RDY, 1: Int Req em RDY)
DRDY	Enable Data-Ready Generation
SIM	SPI Serial Interface Mode Selection (0: 4 fios, 1: 3 fios)
DAS	Data Alignment Selection (0: 12 bits justificado à direita, 1: 16 bits justificado à esquerda)

Os outros 6 registradores utilizados foram: 28h (OUTX\_L) e 29h (OUTX\_H) contendo os bytes menos e mais significativos, respectivamente, da aceleração medida no eixo  $x$ ; 2Ah (OUTY\_L) e 2Bh (OUTY\_H) contendo os bytes menos e mais significativos, respectivamente, da aceleração medida no eixo  $y$ ; e 2Ch (OUTZ\_L) e 2Dh (OUTZ\_H) contendo os bytes menos e mais significativos, respectivamente, da aceleração medida no eixo  $z$ .

Dessa forma, fica evidente que, por conta da resolução das medições fornecidas, o processo de obtenção do valor amostrado deve envolver a leitura de dois registradores diferentes para cada eixo.

### 3.3.2 Girômetro

Os girômetros, também conhecidos simplesmente como giros, são instrumentos de fundamental importância para a robótica móvel por serem capazes de fornecer medidas de orientação espacial, tais como o ângulo de rotação (*displacement gyroscopes*) ou mais comumente, a taxa de variação do ângulo de rotação ou velocidade angular (*rate gyroscopes*).

Os girômetros *MicroElectroMechanical System* (MEMS) são projetados de modo a medir a força de Coriolis, que é experimentada por qualquer corpo em rotação na superfície terrestre. Mais precisamente, a força de Coriolis é verificada como decorrência da translação linear de um corpo em um sistema de coordenadas que gira com relação a um sistema de referência inercial [17]. Um corpo em um referencial em rotação observa uma força:

$$F_c = 2m(v \times \omega)$$

em que  $m$  é a massa do corpo,  $v$  é o vetor velocidade e  $\omega$  é o vetor velocidade angular do sistema.

Neste projeto, optamos pela utilização do girômetro ADXRS401 da Analog Devices e adaptado pela SparkFun Electronics, que é caracterizado por fornecer como saída a taxa de variação angular, ou velocidade angular, a qual é submetido se enquadrando como um girômetro do tipo *tuning-fork*. A Figura 3.18 mostra o sensor em questão.

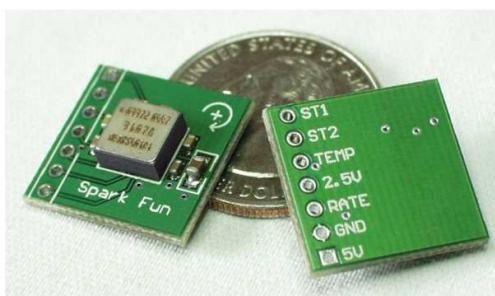


Figura 3.18: Girômetro ADXR401 utilizado nesse trabalho.

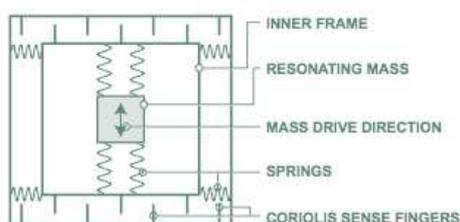


Figura 3.19: Aparato utilizado pelo ADXR401 sensível à variação do deslocamento angular. Fonte [6].

Girômetros *tuning-fork* contêm um par de massas que podem ser levadas a oscilar com mesma amplitude, mas em direções opostas. Especificamente, os girômetros da família ADXR possuem uma massa central conectada por elementos elásticos a uma segunda massa que a envolve em uma espécie de armação, sendo esta última também conectada ao substrato por meio de elementos elásticos, conforme ilustra a Figura 3.19. Quando estas massas são rotacionadas, a força de Coriolis cria uma vibração ortogonal fazendo com que as massas vibrem para fora do plano e, de modo semelhante ao acelerômetro, este movimento é percebido devido à variação capacitiva dos elementos da estrutura, podendo ser mensurado. O sinal medido é então manipulado, passando através de diversos estágios de amplificação, demodulação e calibração proprietários para então ser disponibilizado como um sinal de tensão na saída do girômetro. Uma estrutura simplificada para detecção deste tipo de movimento, apresentada em repouso na Figura 3.19, quando submetida a uma determinada velocidade angular exhibe o comportamento ilustrado na Figura 3.20.

O girômetro, por fornecer em sua saída um sinal analógico proporcional à velocidade à qual é submetido, tem funcionamento mais simples quando comparado ao acelerômetro, uma vez que não necessita de comunicação com processos de leitura/escrita de registradores. Porém, o dado fornecido necessita de um tratamento mais refinado, podendo passar por processos de filtragem (uma vez que sinais analógicos são mais susceptíveis a interferências de natureza eletromagnética que os sinais digitais) e conversão AD. Neste projeto apenas a etapa da conversão AD é realizada e as possíveis interferências sofridas pelo sinal analógico são desprezadas, uma vez que o caminho percorrido pelo sinal desde o sensor até o microcontrolador é bastante curto e o local onde estes dispositivos operam é suposto ter baixa exposição a campos eletromagnéticos.

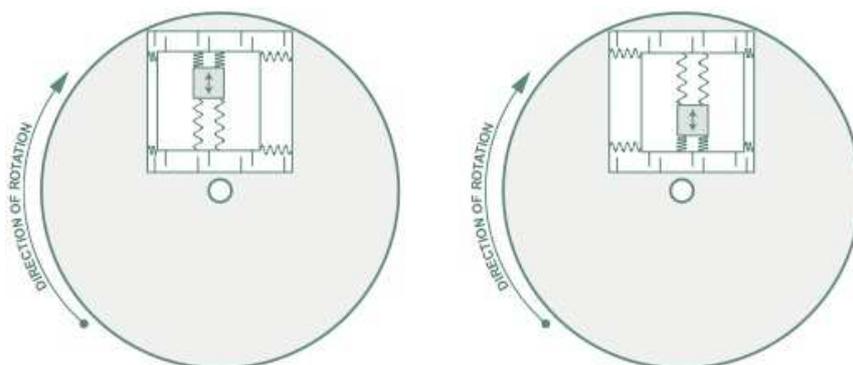


Figura 3.20: Exemplo da disposição do aparato utilizado pelo ADXRS401 quando este girômetro é submetido a uma rotação angular. Fonte [6].

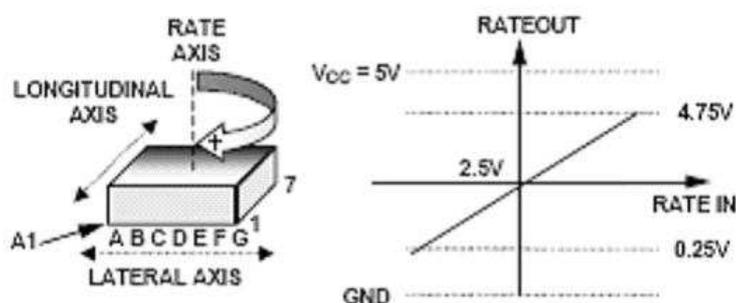


Figura 3.21: Eixo de medição da velocidade angular e aspecto do sinal de saída do girômetro. Fonte [7].

O ADXRS401 é capaz de mensurar velocidades angulares de até  $\pm 75^\circ/s$ , com sensibilidade nominal de  $15mV/(^\circ/s)$ . A velocidade é medida em torno do eixo  $z$ , com valores positivos fornecidos para velocidades no sentido horário e negativos para velocidades medidas no sentido anti-horário, conforme mostra a Figura 3.21. A Figura 3.21 exibe ainda o comportamento do sinal de saída, que notadamente varia linearmente desde  $0,25V$  ( $-75^\circ/s$ ) até  $4,75V$  ( $+75^\circ/s$ ). Conforme indicado pelo gráfico, para velocidades no sentido horário a saída fornecerá valores superiores a  $2,5V$  e para velocidades no sentido anti-horário valores inferiores a  $2,5V$  devem ser dispostos como sinal de saída do girômetro. Nestas condições, é esperado que uma saída de exatamente  $2,5V$  corresponda a uma situação onde uma velocidade nula é experimentada pelo girômetro.

A Figura 3.22 mostra como foi realizada a conexão entre ATmega8 e o girômetro ADXRS401.

Para que o sinal fornecido pelo girômetro pudesse ser digitalizado, o conversor AD do ATmega8 precisou ser devidamente configurado. Tal configuração foi realizada com a escrita dos valores  $0x40$  e  $0xD7$  (valores em notação hexadecimal) nos registradores ADMUX (ADC *Multiplexer Selection Register*) e ADCSRA (ADC *Control and Status Register A*), respectivamente. De forma resumida <sup>1</sup>, o conversor assim configurado opera no modo de conversões contínuas (*free running mode*), recebendo a entrada analógica no pino PC0 (pino 23 do AVR), com tensão de referência externa fornecida pelo pino AVCC (pino 20 do AVR diretamente conectado a 5V), fornecendo o valor digitalizado nos registradores ADCH e ADCL com dez bits de resolução ajustados à direita. Segundo dados do fabricante, o intervalo entre duas conversões sucessivas é de treze ciclos de relógio, o que corresponde a um intervalo de tempo de aproximadamente

<sup>1</sup>Para maiores informações a respeito do microcontrolador ATmega8 da Atmel, consultar [18].

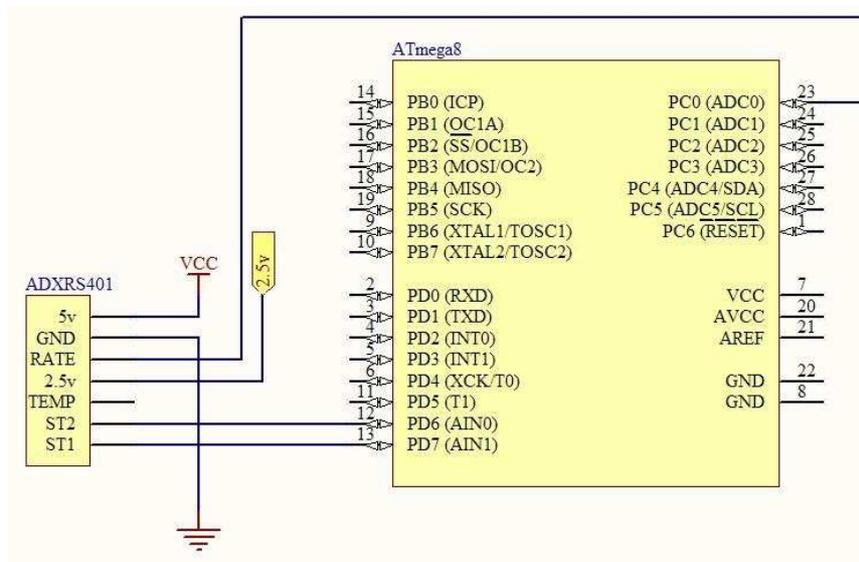


Figura 3.22: Esquema da conexão entre o girômetro ADXRS401 e o ATmega8.

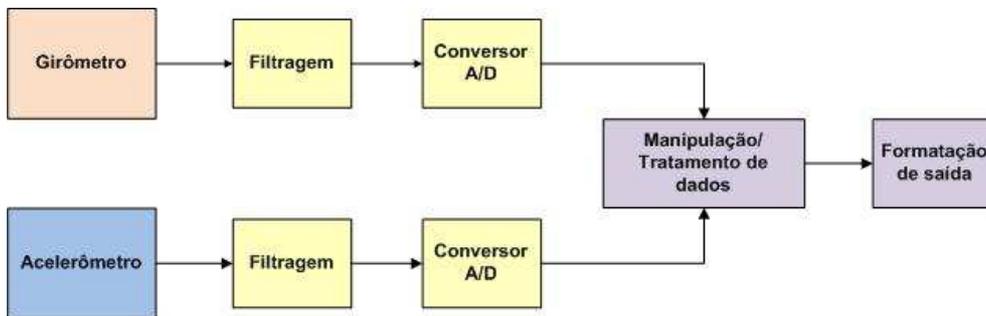


Figura 3.23: Diagrama de uma IMU convencional.

15ms e consecutivamente a uma frequência de amostragem de aproximadamente 6650 Hz, já considerando o *prescaler* selecionado de 128 em relação à frequência do cristal que é de 11,0592 MHz.

### 3.3.3 Central inercial

Uma central inercial é composta por uma combinação de acelerômetros e girômetros, elementos de filtragem do sinal advindo dos sensores e uma unidade de processamento deste sinal. A Figura 3.23 exhibe um diagrama de uma IMU genérica, contendo estes elementos básicos.

A Figura 3.24 ilustra a disposição dos sensores normalmente encontrados em uma central inercial e a orientação de seus respectivos eixos. Para que os dados sejam fornecidos com o máximo de precisão é imprescindível que os sensores estejam dispostos corretamente. Os acelerômetros devem ser posicionados ortogonalmente entre si, dois a dois e o mesmo deve ocorrer com os girômetros. Os acelerômetros e girômetros que possuem a mesma orientação, ou seja, que realizam medidas em um mesmo eixo, devem ainda ser posicionados em planos paralelos. É sabido que a perfeita disposição dos sensores conforme mencionado, devido aos processos de fabricação, é tarefa impossível, assim sendo, um erro de natureza aleatória deve ser associado a tal imperfeição, uma vez que não é possível discernir precisamente a influência deste erro no sinal de saída do sensor.

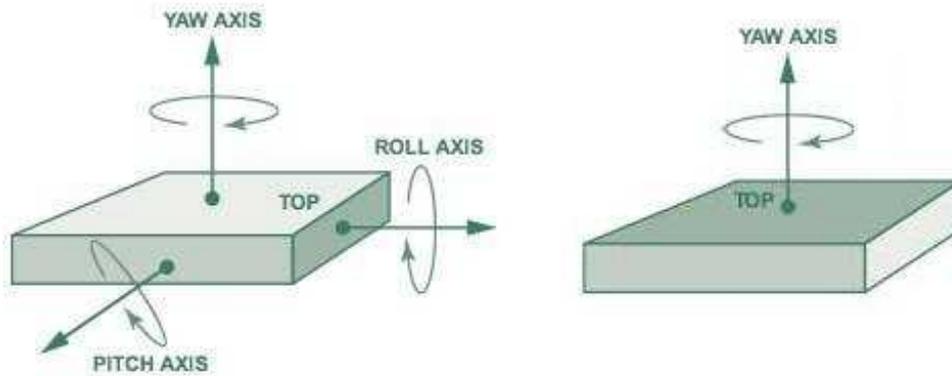


Figura 3.24: Disposição e orientação relativas do acelerômetro e girômetro.

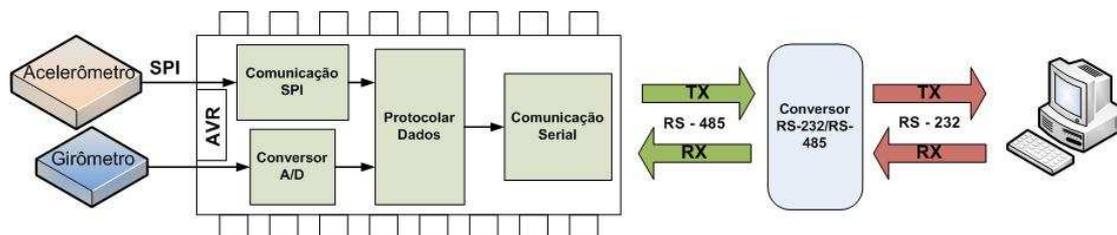


Figura 3.25: Diagrama da central inercial implementada e seu sistema de comunicação.

As centrais inerciais podem ser divididas em duas categorias básicas: *gimballed platforms* (plataformas estabilizadas) e *strapdown platforms* (plataformas analíticas). As plataformas estabilizadas procuram manter sempre a direção dos eixos dos sensores estáveis em relação ao espaço inercial, não acompanhando o movimento em relação a um sistema de coordenadas fixado na plataforma. Por outro lado, nas plataformas analíticas os eixos dos sensores acompanham o movimento da estrutura que os suporta. Plataformas analíticas normalmente requerem esforços computacionais mais elevados se comparadas aos sistemas estabilizados principalmente no que se refere ao cálculo do movimento relativo ao espaço inercial e transformações de eixos de coordenadas, em contra partida, as plataformas estabilizadas possuem custo muito mais elevado, pois exigem estruturas mecânicas mais complexas.

A Figura 3.25 exibe um diagrama simplificado da central inercial implementada neste projeto. Note que a IMU aqui realizada contém os elementos básicos constituintes de uma central inercial, exceto os filtros de sinal. A filtragem do sinal é realizada em duas etapas. A primeira realizada nos circuitos proprietários dos próprios sensores e uma segunda realizada via software e de forma individual para cada sensor, o girômetro e o acelerômetro.

Os dados de cada sensor são entregues ao AVR de modos diferentes - conforme já descrito nas seções referentes ao acelerômetro e girômetro, respectivamente 3.3.1 e 3.3.2 - e em seguida são manipulados, seja passando por processos de filtragem ou sendo adequados ao protocolo para o envio ao PC. Tanto para o acelerômetro quanto para o girômetro o único processo de filtragem que é realizado pelo AVR é o de calibração.

O sistema de coordenadas adotado para o quadrúpede é exibido na Figura 3.26. O posicionamento da origem deste sistema coordenado em conjunto com o ponto onde supõe-se estar localizado o centro

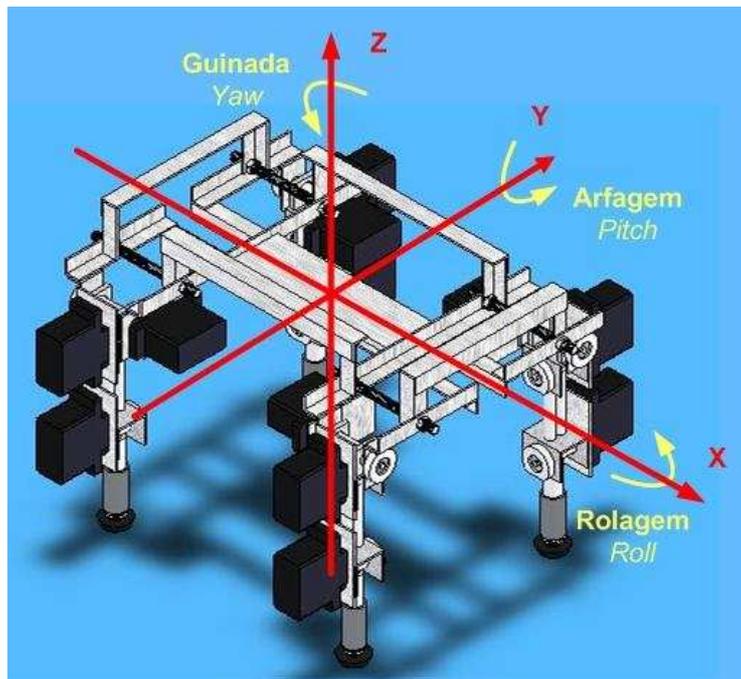


Figura 3.26: Sistema de coordenadas adotado no projeto. Vista frontal em perspectiva.

de massas da estrutura <sup>1</sup> foi o fator determinante para o posicionamento da central inercial. Buscou-se afixar a central inercial na parte superior da estrutura, aproximadamente no centro geométrico do plano e projetada sobre o centro de gravidade do robô para que os sensores pudessem mensurar da forma mais abrangente e representativa possível os movimentos da plataforma. Ter a central inercial posicionada exatamente na origem do sistema de referências é algo desejável, uma vez que simplifica consideravelmente a manipulação dos resultados obtidos por não se fazer necessária a conversão para um outro sistema de referência.

Para a confecção da placa fez-se necessária a utilização de um regulador de tensão LM7805, um transceptor DS485, um microcontrolador ATmega8 da Atmel, um acelerômetro LIS3LV02DQ, um girômetro ADXRS401, um potenciômetros de  $1K\Omega$ , além de resistores e capacitores de diversos valores, pinos, soquetes e fios para conexão. Para maiores informações a respeito do circuito da IMU, ver o diagrama esquemático da IMU ao final desse documento no campo destinado aos diagramas esquemáticos.

A Figura 3.27 exibe uma foto da IMU implementada neste projeto, onde pode ser observada a disposição dos sensores e os detalhes de sua fixação à plataforma. Analisando a figura é possível inferir que a IMU proposta é do tipo analítica, conclusão que poderia ser feita também a partir do propósito fundamental da mesma, que é fornecer dados em tempo real a respeito da postura da plataforma e não sua absoluta localização no espaço.

As principais fontes de ruído que denigrem a precisão das medições realizadas por unidades de medição inercial são as imperfeições dos sensores e erros em decorrência de distúrbios de natureza aleatória. Os erros causados por imperfeições dos sensores podem ser determinados com boa precisão e de acordo

---

<sup>1</sup>A precisa determinação do centro de massas do quadrúpede foge do escopo deste projeto e como seu conhecimento fez-se necessário para auxiliar na afixação da IMU, foi feita a suposição de que o mesmo se encontra em algum ponto sobre a parte negativa do eixo  $z$ , conforme referencial descrito pela Figura 3.26. Tal suposição foi feita com base na informação de o quadrúpede ser praticamente simétrico, tanto transversal quanto longitudinalmente.

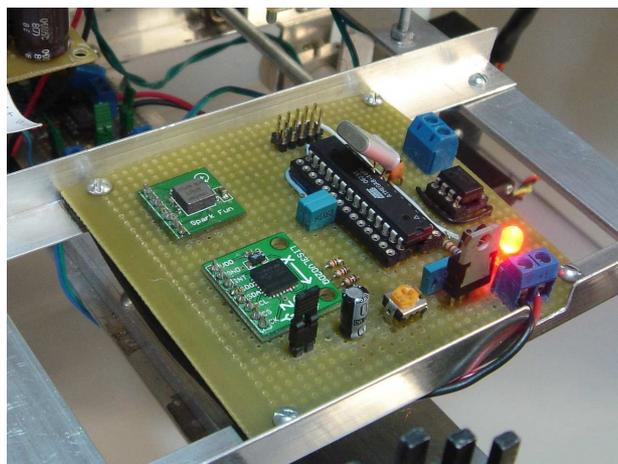


Figura 3.27: IMU fixada às barras de suporte na parte superior da plataforma.

com as condições momentâneas através de processos de calibração, sendo classificados como erros determinísticos, ou seja, podem ser caracterizados por equações matemáticas bem determinadas. O mesmo não ocorre para erros de natureza aleatória, podendo apenas ser descritos pela teoria de processos estocásticos<sup>1</sup>.

A seguir são apresentadas algumas das principais fontes de erros que podem ser encontradas em unidades de medição inercial [19]:

- *Bias*: também chamado de erro de polarização, pode ser interpretado como um nível de sinal constante ou que varia muito lentamente, independentemente do sinal de entrada. Um sinal de *bias*, mesmo sendo constante, pode variar de acordo com algumas condições como, por exemplo, ao se religar o equipamento.
- Fator de escala: é um erro proporcional ao valor do sinal medido, ou mais precisamente, é o erro de determinação do coeficiente angular da equação de primeiro grau resultante do modelamento do processo. Muitos processos embora modelados como lineares, possuem algum grau de não-linearidade.
- Erro de quantização: os sinais medidos dos acelerômetros e do girômetro são amostrados em intervalos discretos de tempo e associados a valores inteiros, o que produz erros de aproximação.
- Deriva térmica ou *drift*: outros erros são também chamados de deriva, contudo, a deriva térmica é referente à sensibilidade dos sensores à temperatura. Este erro pode ser compensado eletronicamente, mas como tal compensação nunca é perfeita, a deriva térmica deve ser modelada como um processo aleatório.
- Desalinhamento: neste contexto refere-se ao desalinhamento mecânico entre os eixos dos sensores, uma vez que tais sensores, idealmente, devem ser dispostos ortogonalmente e alinhados conforme a orientação da plataforma.

---

<sup>1</sup>Processo estocástico é o nome dado aos processos onde as variáveis são aleatórias ou incertas durante o intervalo de tempo em que são medidas ou observadas. Fonte [19]

Além dos erros acima mencionados deve-se notar que a própria manipulação dos dados coletados pode ser uma fonte de erros, nos quais, dentre muitos, podemos citar os erros de deriva de um parâmetro obtidos a partir de uma ou mais integrações matemáticas do valor medido, que se distancia cada vez mais do valor real com o passar do tempo. Tal fenômeno deve-se, sobretudo, à impossibilidade de determinação da constante de integração implícita no processo.

### 3.3.4 Algoritmos

Com o intuito de minimizar os efeitos decorrentes da existência das fontes de erros acima mencionadas foram desenvolvidos algoritmos com o objetivo de filtrar o sinal proveniente dos sensores.

O processo de calibração dos sensores pode ser considerado um processo de filtragem. Nesse projeto a calibração dos sensores é realizada no momento em que o microcontrolador é ligado ou a cada vez que é solicitado um *reset*. A única condição necessária para que a calibração seja corretamente realizada é que no momento de sua realização o quadrúpede esteja completamente imóvel e deve-se ressaltar também que para o correto funcionamento do inclinômetro proposto neste projeto, a calibração também deve, necessariamente, ser realizada com a plataforma perpendicularmente alinhada ao plano de atuação da gravidade com a maior precisão possível. O algoritmo de calibração coleta e armazena, no próprio ATmega8, mil e vinte e quatro amostras do valor medido por cada sensor e realiza a média aritmética destes valores coletados. Estas médias podem ser interpretadas como erros de polarização e, portanto, devem ser subtraídas de cada nova medição realizada.

O filtro passa-baixas foi o primeiro filtro desenvolvido e juntamente com a calibração são os únicos processos de filtragem executados ainda no microcontrolador. Este filtro coleta e armazena 64 diferentes medições dos sensores, retornando o valor da média aritmética destas observações. Devido à alta frequência de amostragem dos sensores, este valor pode ser interpretado como o valor instantâneo da grandeza medida, diminuindo consideravelmente o efeito de valores espúrios que eventualmente podem ser fornecidos como saída dos sensores.

Após a calibração, é observado que mesmo estando o quadrúpede em completo repouso e na posição de calibração, os sensores fornecem, muitas vezes, valores diferentes de zero, comumente chamados de ruídos. Tais valores, apesar de serem relativamente pequenos, são indesejáveis e indicam inconsistência das medições, já que naturalmente é de se esperar que um corpo completamente imóvel esteja submetido a velocidades angulares e a acelerações nulas, exceto, talvez, pela influência gravitacional <sup>1</sup>. Na tentativa de ajustar estes valores foi implementado um filtro, denominado filtro janela, que desconsidera um determinado intervalo de medições atribuindo às medições que se encontram neste intervalo o valor zero. A Figura 3.28 ilustra o princípio de funcionamento deste filtro.

Os microcontroladores são largamente utilizados por possuírem, entre outras características, a fácil possibilidade de reprogramação, podendo ter seu comportamento completamente modificado quando submetido a condições idênticas. Tais modificações ficam a cargo do programador e sobre este também recaem as responsabilidades acerca do bom funcionamento do projeto, como consequência de sua programação.

Não obstante a tal peculiaridade, o microcontrolador utilizado na implementação da central inercial necessitou da elaboração de um programa, que quando executado pelo ATmega8 realiza as funções ne-

---

<sup>1</sup>Os efeitos da aceleração da gravidade neste caso já são eliminados pelo processo de calibração.

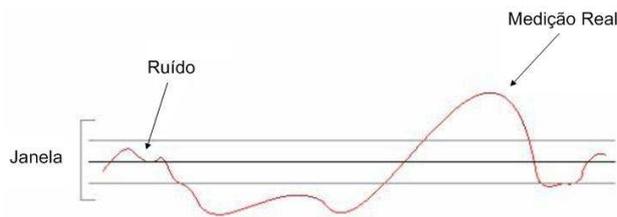


Figura 3.28: Faixa de valores considerada no fitro janela.

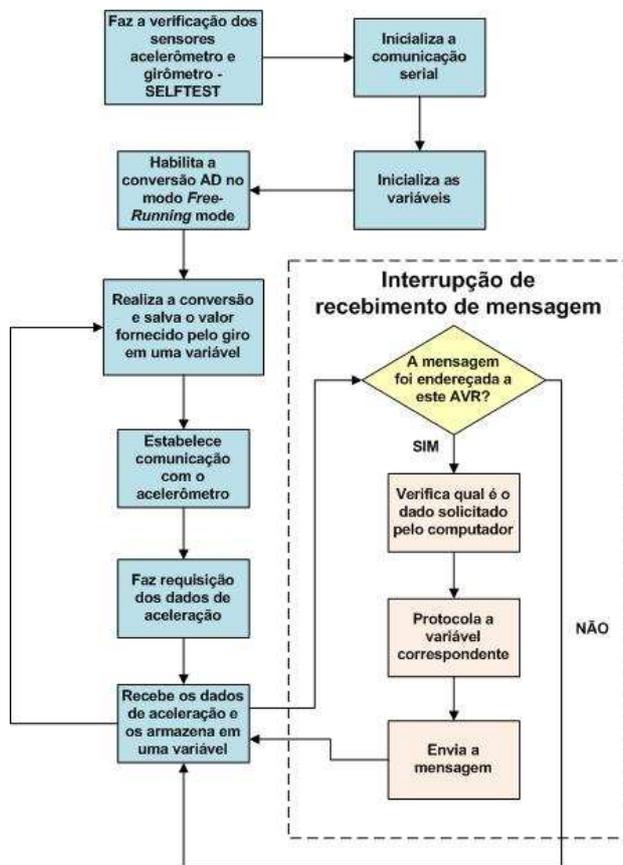


Figura 3.29: Fluxograma do programa implementado no ATmega8 para a IMU.

cessárias para que os dados dos sensores sejam corretamente coletados, processados ou transmitidos. O desenvolvimento de todo o programa inserido no AVR se deu em ambiente Linux, utilizando a linguagem de programação C, o editor de texto Kedit e o compilador gcc.

O programa em si tem por objetivo iniciar os sensores, verificar se os mesmos continuam operantes e armazenar na memória do próprio microcontrolador, segundo uma determinada taxa de amostragem, os valores fornecidos pelos sensores. A Figura 3.29 mostra o fluxograma correspondente ao código implementado. Algumas particularidades do programa que não puderam ser contempladas pela figura devem ser esclarecidas. Ao ser iniciado, o primeiro procedimento do programa é fazer a verificação da funcionalidade dos sensores, através das funções de *self test* disponibilizadas pelos fabricantes. E caso algum problema seja identificado um pino do AVR é ativado, possibilitando, por exemplo, o acendimento de um led indicativo que sugere a existência de problemas com pelo menos um dos sensores, impossibilitando o perfeito funcionamento do programa que tem então sua execução interrompida.

Feita a verificação dos sensores e comprovado o bom funcionamento dos mesmos, o programa habilita a comunicação serial, que permite a troca de informações entre dispositivos, e inicializa as variáveis que armazenarão os valores de interesse, para só então proceder com a coleta dos dados provenientes dos sensores. Esta coleta tem início no momento em que o conversor AD do ATmega8 é posto em funcionamento no *free running mode*<sup>1</sup> digitalizando o valor de tensão fornecido pelo girômetro e armazenando-o em uma variável. Na sequência é estabelecida a comunicação com o acelerômetro, via padrão SPI, e feita uma nova requisição de acelerações. Ao serem retornadas pelo sensor, estas informações são armazenadas nas respectivas variáveis. As variáveis de velocidade angular e aceleração são constantemente atualizadas, pois este ciclo de coleta dos valores dos sensores se repete indefinidamente enquanto a IMU estiver operante.

É interessante notar que a qualquer momento da execução deste programa pelo AVR, o PC pode enviar uma mensagem solicitando o envio, por parte do microcontrolador, de alguma informação. O PC manda a mensagem pelo barramento, via padrão RS232, que chega à rede que interconecta os microcontroladores após ter sido convertida para o padrão RS485. A rede que conecta os dispositivos é do tipo *broadcast*, onde todos têm acesso a todas as mensagens que trafegam no barramento e, portanto, todas as mensagens devem conter informações a respeito do endereço de destino, conforme dita o protocolo utilizado, desenvolvido em [2]. O recebimento de uma mensagem gera uma interrupção no AVR, que tem uma subrotina associada (em destaque no fluxograma da Figura 3.29) que é imediatamente executada, interrompendo a execução do programa principal, independentemente do ponto em que este se encontrava. Nesta interrupção o ATmega8 checa se é o destinatário da mensagem e em caso afirmativo procede com o envio do dado solicitado ao PC para então retornar à execução normal do programa principal no ponto imediatamente anterior ao da interrupção. Em caso negativo este retorno ao programa principal é realizado de imediato.

Devido à limitação da memória do AVR buscou-se diminuir o tamanho dos programas por ele executados e para tanto, a maior parte da manipulação dos dados fornecidos pelos sensores é realizada no PC. Já o programa do PC, chamado de *Observador* foi apropriadamente desenvolvido para coletar periodicamente os dados oriundos dos sensores da IMU e gravar estas informações em disco para uma posterior análise. A Figura 3.30 ilustra a ordem das ações executadas neste programa. Do fluxograma pode-se observar que o PC solicita, através do envio de mensagens aos respectivos dispositivos, o retorno das informações requisitadas. Estas informações são armazenadas em uma estrutura e uma fila é formada considerando a ordem cronológica da coleta dos dados. A cada nova inserção, é feita a verificação do tamanho da fila, que ao atingir um valor estipulado pelo usuário é gravada em disco. A execução do programa segue até que a quantidade de dados previamente definida pelo usuário seja devidamente coletada e gravada em disco.

Especificamente para este caso, os dados coletados são armazenados em um arquivo texto que é salvo em uma pasta criada no mesmo diretório onde o programa é originalmente executado. É oportuno mencionar também que uma grande quantidade de fontes de erro foi identificada no momento da criação dos códigos, sendo os mesmos elaborados para que na ocorrência de cada um dos casos identificados, a execução do programa seja interrompida e uma mensagem de alerta seja exibida ao usuário. Tais erros invariavelmente indicam a ocorrência de falhas ou mal funcionamento de um dos componentes do sistema físico, já que até o presente momento não foi reportada nenhuma falha (*bug*) do software desenvolvido.

Como o propósito central da central inercial é fornecer parâmetros para o pleno estabelecimento da postura do quadrúpede em um determinado instante, deve-se utilizar os dados por ela fornecidos para

---

<sup>1</sup>Modo em que sucessivas conversões AD são realizadas ininterruptamente sem a necessidade de uma nova requisição.

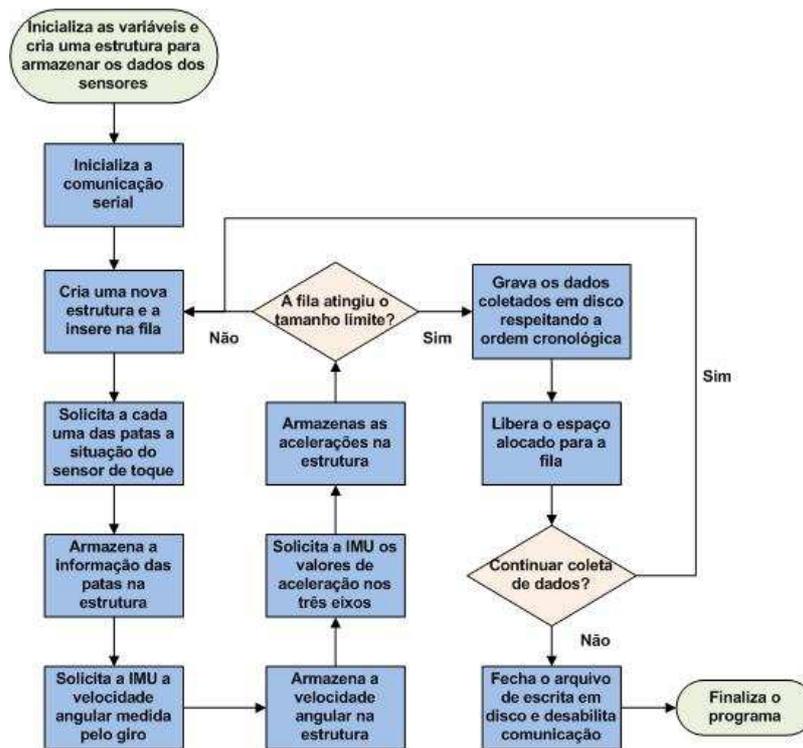


Figura 3.30: Fluxograma do programa *Observador* executado no PC para o teste da IMU.

determinação, entre outras grandezas, da inclinação instantânea da plataforma.

Assim, utilizando o fato da aceleração da gravidade local ser determinada pelo processo de calibração (daí a necessidade da plataforma ser calibrada perpendicularmente ao plano de atuação da gravidade) é possível a partir dos valores instantâneos das acelerações em  $x$  e em  $y$  a determinação dos ângulos de inclinação da plataforma, em torno dos eixos  $x$  e  $y$ , comumente denominados ângulos de rolagem e arfagem, respectivamente. Tais convenções fazem referência ao sistema de coordenadas adotado para o quadrúpede que pode ser visualizado na Figura 3.26.

A Figura 3.31(a) exibe os eixos  $y$  e  $z$  de medição do acelerômetro (em preto) e a direção de atuação da gravidade juntamente com a direção  $y'$  na qual o acelerômetro do eixo  $y$  fora calibrado. Pode-se perceber que o ângulo formado entre a direção de atuação da gravidade e o eixo  $z$  é igual ao ângulo de arfagem, pode-se também notar que a projeção da gravidade sobre o eixo  $y$ , que é medida pelo acelerômetro do eixo  $y$ , é diretamente relacionada com o ângulo de arfagem por:

$$g_y = g \sin(\theta_g) = g \sin(\theta_{rolagem})$$

e portanto,

$$\theta_{rolagem} = \arcsin\left(\frac{g_y}{g}\right)$$

em que  $g_y$  é a aceleração instantânea medida pelo acelerômetro em  $y$  e  $g$  é o valor da gravidade local, obtido como o valor de calibração para a aceleração medida no eixo  $z$ .

A Figura 3.31(a) exibe uma vista lateral do quadrúpede, onde os eixos de medição  $x$  e  $z$  do acelerômetro são destacados (em preto), além da direção de atuação da gravidade  $g$ , do eixo onde o acelerômetro em  $x$

fora calibrado. Com um raciocínio análogo àquele despendido na obtenção do ângulo de rolagem, pode-se notar a equivalência entre os ângulos  $\theta_g$  e  $\theta_{arfagem}$  que pela projeção da gravidade do eixo  $x$  nos conduz a:

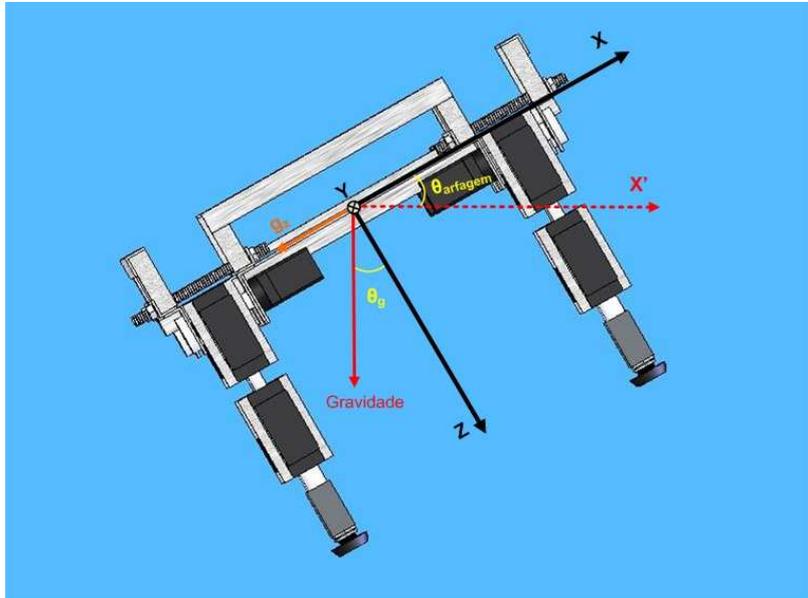
$$g_x = g \sin(\theta_g) = g \sin(\theta_{arfagem})$$

assim,

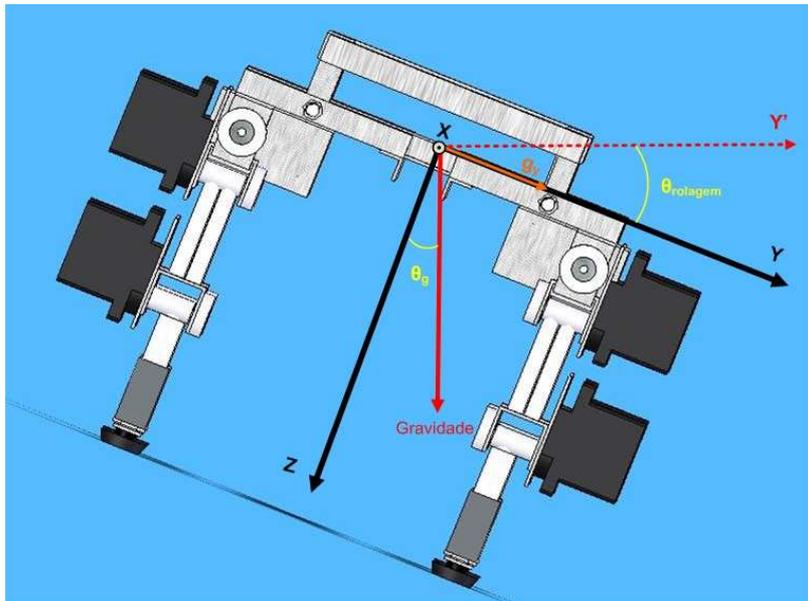
$$\theta_{arfagem} = \arcsin\left(\frac{g_x}{g}\right)$$

em que  $g_x$  é a aceleração instantânea medida pelo acelerômetro em  $x$  e  $g$  é o valor da gravidade local, obtido como o valor de calibração para a aceleração medida no eixo  $z$ .

Convém lembrar que o sistema de inclinometria como o aqui proposto não permite a determinação do ângulo de guinada. Para tanto, a utilização de um outro sensor, tal como o magnetômetro - capaz de medir o campo magnético terrestre -, se faz necessária.



(a)



(b)

Figura 3.31: Vista lateral do quadrúpede e ângulo de arfagem.

# 4 GERAÇÃO DO MOVIMENTO

## 4.1 MODELOS DE MARCHA

Quadrúpedes em geral, podem locomover-se de diversas maneiras diferentes implicando em uma escolha que depende do objetivo da locomoção. A estratégia de movimentação adotada pode e deve muitas vezes ser escolhida com cautela. No escopo da geração de movimentos apresentada nesse tópico, optou-se por desenvolver dois modelos de marcha diferentes. O primeiro deles parte do princípio de que cada pata faz seu avanço exclusivo, enquanto as outras permanecem em suas devidas posições. Ao final do avanço de todas, há um recuo sincronizado permitindo assim o deslocamento do corpo do quadrúpede. A segunda abordagem mostra-se um pouco mais complexa do ponto de vista de estabilidade e de dinâmica de sequenciamento e prevê o deslocamento do robô alternando-se a movimentação de pares de patas diagonalmente opostas.

A construção e desenvolvimento dos métodos expostos tem motivação empírica e foram concebidos de acordo com o bom senso dos autores e observação desse tipo de locomoção na natureza. Para tanto, a geração leva em contato as restrições de contato das patas com o solo, um modelo geométrico desenvolvido para as patas e que prevê o posicionamento das juntas e um sistema de autômatos para cada pata funcionando de forma sincronizada e guiando o sequenciamento da movimentação.

Por fim, é interessante ressaltar que os métodos de locomoção aqui contemplados buscam obter uma locomoção para a frente no eixo longitudinal do robô. No caso de tentativa de locomoção para trás no mesmo eixo citado, seria interessante inverter a sequência de pontos de posicionamento da pata e talvez rever alguns posicionamentos de juntas. No entanto, essa abordagem não foi foco de esforços desse trabalho e portanto, mostra-se como uma forma de estudo posterior.

## 4.2 MODELO GEOMÉTRICO DA PATA

Para a criação de um modelo geométrico para as patas, que permitisse o posicionamento desejado das juntas, foram feitas algumas considerações e evidenciadas algumas preocupações. A locomoção previamente implementada pela união de resultados de [10] e [3] não previa a condição de chegada de uma dada pata ao solo. Dessa forma observou-se uma espécie de tropeço do robô que muitas vezes fazia com que a locomoção não tivesse sua completa eficácia observada. O modelo desenvolvido, mostrado na Figura 4.1, buscou fazer com que as posições de chegada e partida do solo fossem perpendiculares ao mesmo. Essa consideração preocupa-se também com o fato de existirem agora os sensores de contato nas extremidades das patas e com o seu correto acionamento, fundamental para a geração da movimentação.

A trajetória da pata foi dividida em quatro pontos sequenciais permitindo uma rota de avanço com altura  $H$  em relação ao solo. Por sua vez, essa altura é resultado de outros parâmetros intrínsecos ao sistema. Por simplicidade de definição a pata foi dividida em duas falanges  $a$  e  $b$ , correspondendo às porções supe-

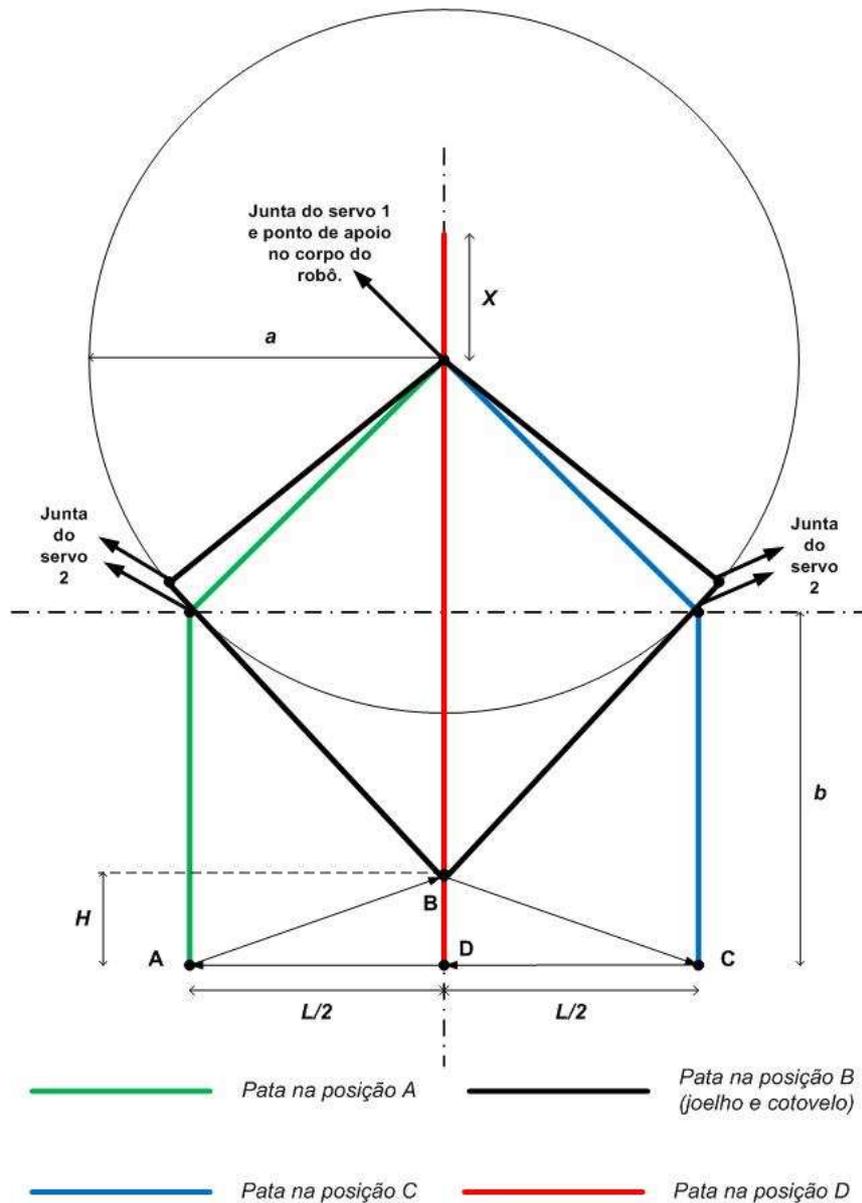


Figura 4.1: Modelo geométrico da pata vista pela lateral.

rior e inferior, respectivamente. Outro parâmetro fundamental é o deslocamento  $X$  do ombro (ponto mais alto da pata) da pata em análise. Ele desloca-se de  $X$ , na direção vertical, quando a pata transita de C para D ou de D para A e portanto, atua diretamente no cálculo do comprimento máximo do passo, nomeada por  $L$  nesse modelo. A consideração de um deslocamento do ombro de cada pata faz-se necessária, no modelo em estudo, pelo fato de a plataforma ser uma estrutura rígida. Em animais quadrúpedes esse deslocamento também existe, mas não proporciona deslocamento direto do corpo justamente pela mobilidade de articulações e musculatura com as quais não se pode contar no modelo robótico de quatro patas.

Para cada posição da pata foram determinados os ângulos dos servos de forma que essa posição pudesse ser obtida com a configuração dos servos na angulação correta. Todos os valores foram deduzidos por meio de relações trigonométricas especialmente relações de triângulos. Para finalidade de entendimento do que é exposto em relação à nomenclatura dos servos de cada pata, convencionou-se que o servo que promove a movimentação perpendicular à direção longitudinal do robô seria o servo 0. Os servos 1 e 2 se referem

aos que promovem a movimentação da falange superior e inferior, respectivamente. Em decorrência da proposta de locomoção feita, o servo 0 de todas as patas será fixado em seu valor intermediário de forma a não gerar qualquer deslocamento para fora do eixo longitudinal da plataforma. No caso de marcha com rotação de guinada, a fixação do servo 0 deve ser repensada.

Nos parágrafos seguintes é feita a dedução dos valores angulares dos servos 1 e 2 para o posicionamento da pata nas posições designadas por A, B, C e D. O ângulo do servo é dado por  $\varphi_1$  para o servo 1, junta do servo 1 indicada na Figura 4.1, e  $\varphi_2$  para o servo 2 conforme indicação da junta do servo 2 também na Figura 4.1. No caso do ponto B, pode-se posicionar a pata nesse ponto por meio de configuração joelho ou cotovelo e nesse caso os ângulos de ambas configurações serão devidamente indicados.

Os valores assumidos pelos servos de forma que a pata seja posicionada no ponto A são deduzidos com base na Figura 4.2(a), de onde derivam as relações expostas abaixo.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \arcsin\left(\frac{L}{2a}\right); & \theta_2 &= \arccos\left(\frac{L}{2a}\right); & \theta_3 &= \left(\frac{\pi}{2}\right) - \theta_2; & \theta_4 &= \left(\frac{\pi}{2}\right) + \theta_3 \\ \varphi_1 &= \left(\frac{\pi}{2}\right) - \arcsin\left(\frac{L}{2a}\right) \\ \varphi_2 &= \pi - \arccos\left(\frac{L}{2a}\right)\end{aligned}$$

A Figura 4.2(b) mostra distâncias e ângulos pertinentes aos cálculos seguintes, que fornecem os dados de configuração dos servos responsáveis por posicionar a pata no ponto B. Nesse ponto existem dois tipos de configuração de juntas possíveis e por esse motivo são apresentados os passos e medidas necessários à estimação da configuração de ângulos para juntas do tipo joelho e cotovelo.

$$\begin{aligned}z &= (a^2 + b^2)^{1/2}; & m &= \frac{b^2}{z}; & n &= \frac{a^2}{z}; & q &= (mn)^{1/2}; & \theta_9 &= \arcsin\left(\frac{q}{a}\right) \\ \varphi_1(\text{cotovelo}) &= \left(\frac{\pi}{2}\right) - \arcsin\left(\frac{q}{a}\right) \\ \varphi_2(\text{cotovelo}) &= \pi \\ \varphi_1(\text{joelho}) &= \left(\frac{\pi}{2}\right) + \arcsin\left(\frac{q}{a}\right) \\ \varphi_2(\text{joelho}) &= 0\end{aligned}$$

A dedução de valores angulares de posicionamento para o ponto C assemelha-se muito ao que foi abordado nos cálculos pertinentes ao ponto A. No entanto, ainda existem algumas diferenças fundamentais ao levantamento de ângulos que levam a pata a ser posicionada em C. Os passos e grandezas utilizados para esse objetivo são ilustrados na Figura 4.3(a) e nas equações a seguir descritas.

$$\begin{aligned}\theta_5 &= \arcsin\left(\frac{L}{2a}\right); & \theta_6 &= \arccos\left(\frac{L}{2a}\right); & \theta_7 &= \left(\frac{\pi}{2}\right) - \theta_6; & \theta_8 &= \left(\frac{\pi}{2}\right) - \theta_7 \\ \varphi_1 &= \left(\frac{\pi}{2}\right) + \arcsin\left(\frac{L}{2a}\right) \\ \varphi_2 &= \arccos\left(\frac{L}{2a}\right)\end{aligned}$$

De todos os possíveis pontos de posicionamento de uma pata, o ponto D faz-se o mais trivial e simples. Como a pata deve estar completamente ereta para que obtenha-se esse posicionamento é rápida a dedução

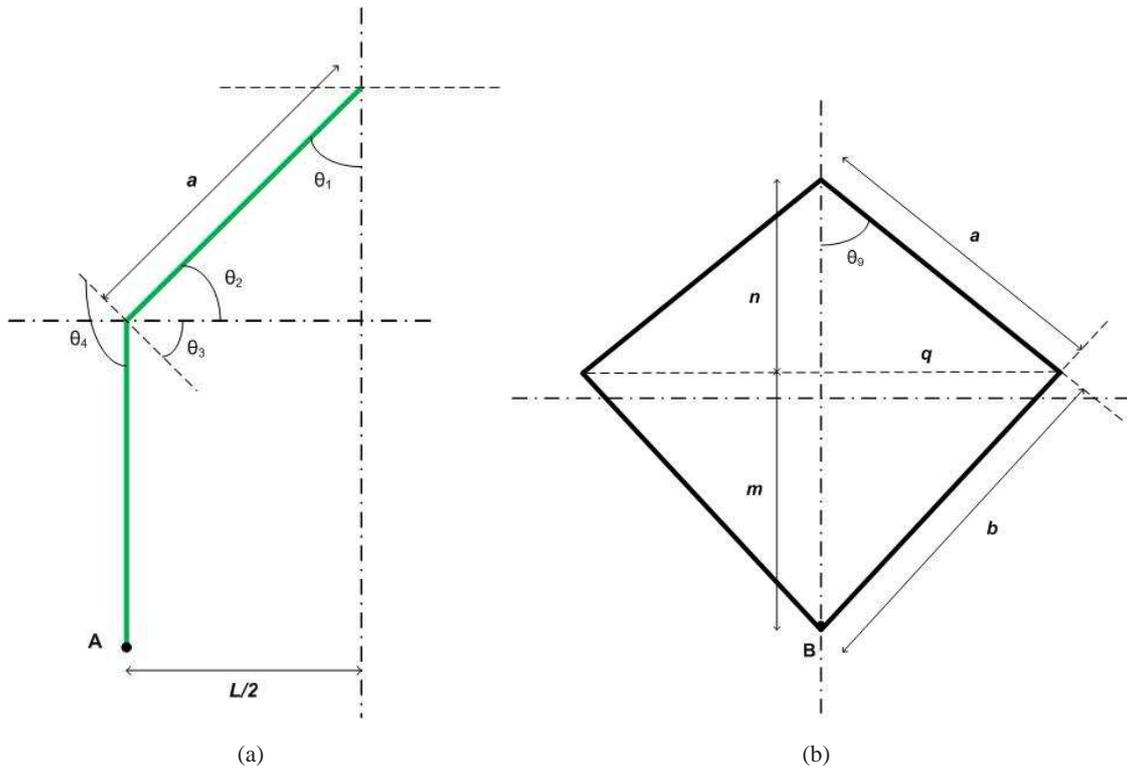


Figura 4.2: (a) Detalhamento da posição A e (b) posição B com seus respectivos ângulos de interesse.

dos ângulos necessários aos servos. A Figura 4.3(b) mostra a condição da pata nesse ponto e as equações a seguir explicitam valores desejados para que se consiga o correto posicionamento.

$$\varphi_1 = \left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\varphi_2 = \left(\frac{\pi}{2}\right)$$

Ainda tratando-se de grandezas fundamentais para a definição de posicionamento das juntas, faz-se necessário o cálculo da largura máxima do passo. Para tanto, recorre-se às medidas  $a$  e  $X$  e dá-se por meio da relação

$$a^2 = (a - X)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2$$

$$L = (8aX - 4X^2)^{1/2}$$

Por fim, pode-se determinar a altura  $H$  máxima da pata durante a trajetória de avanço. Essa altura corresponde à posição da extremidade da pata enquanto ela se encontra no ponto B e pode ser calculada por meio da dedução

$$H = (Y + b) - (m + n)$$

onde  $Y = (a - X)$ .

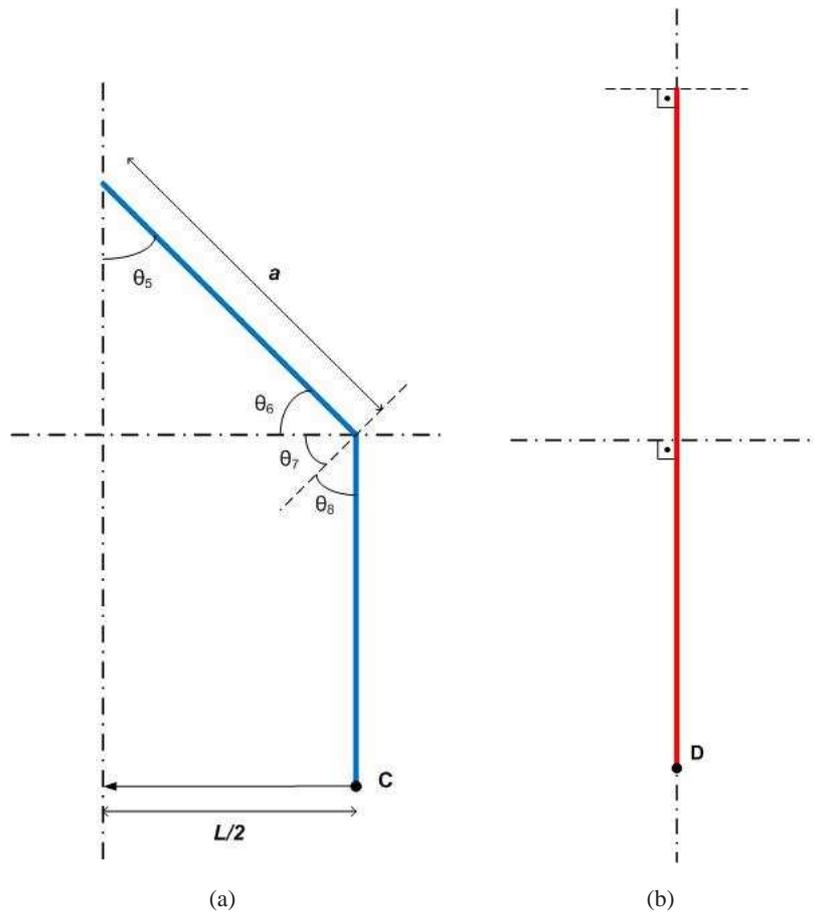


Figura 4.3: (a) Detalhamento da posição C e (b) posição D com seus respectivos ângulos de interesse.

### 4.3 MODELO DE GERAÇÃO DE MOVIMENTO

A proposta de locomoção abordada nesse trabalho faz uso de um modelamento por meio de autômatos de entradas/saídas temporizados. Assim, adotou-se a concepção de um autômato para cada pata e a evolução de suas respectivas transições acontece em paralelo e de forma sincronizada. As ações responsáveis pela possibilidade de locomoção são, no modelo aqui introduzido, saídas que são geradas pelos estados no momento em que o sistema concretiza a chegada a esse elemento. Por tratar-se de um modelo com certa complexidade, faz-se necessária a definição e explicitação de alguns formalismos e padrões adotados.

Dentre os passos necessários à obtenção do modelo desejado foram nomeados cinco estados, eventos discretos, eventos temporais e saídas possíveis de serem geradas. Os eventos discretos possíveis, compreendem a chegada de uma dada pata ao solo indicando a transição dessa pata do ponto B para o ponto C, conforme as transições já relatadas no modelo geométrico. Os eventos temporais são baseados no tempo desejado entre a transição de um ponto a outro e são nomeados de forma a indicar a finalidade desse período, conforme a Figura 4.4. A nomenclatura adotada assume  $TS$  como sendo o tempo de subida,  $TD$  é o tempo de descida,  $TRM$  é o tempo de recuo médio e  $TRT$  é o tempo de recuo total. As saídas geradas são construídas com base no modelo geométrico introduzido na seção 4.2 e promovem a transição da pata até um dos pontos que constituem a trajetória da sua extremidade. Por fim, os estados recebem as denominações  $AB$ ,  $BC$ ,  $SINC$ ,  $CD$  e  $DA$ , sendo o estado  $SINC$  um estado presente no autômato de alguma patas com a finalidade de promover a sincronização das quatro patas antes do recuo conjunto, simultâneo

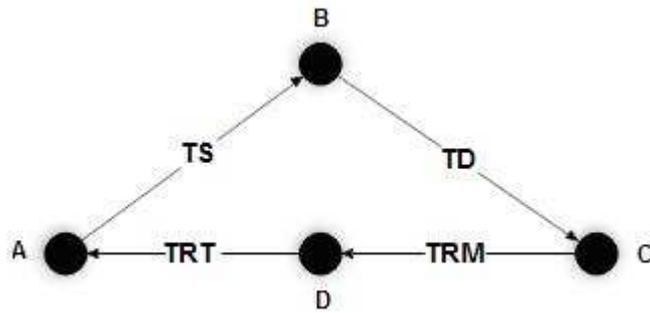


Figura 4.4: Eventos de tempo indicados na transição de um ponto a outro.

e sincronizado.

De forma a permitir o disparo de funcionamento das transições nos autômatos fez-se necessária a indicação dos estados iniciais referentes a cada um deles. Assim, pode-se esperar que a evolução da marcha tenha sucesso caso nenhum problema de origem externa venha a impedir o sucesso dessa abordagem. Nesse caso aqui abordado, não há preocupação em tratar a exceção em que a pata chega ao final de seu movimento e ainda assim não atinge o objeto alvo, mais explicitamente o solo. Como o sistema trabalha em malha aberta não há outra solução para estimar a chegada da pata ao ponto de destino senão por temporização.

A abordagem adotada prevê a geração de movimento por restrição de contato das patas com o solo caracterizando dois tipos diferentes de marcha, ambos fazendo uso de autômatos. A primeira marcha, nomeada Caminhada, considera o avanço exclusivo de uma pata até que ela toque o solo. Assim todas as patas avançam e de forma unívoca, após o avanço de todas, fazem o recuo sincronizado e ocasionam o deslocamento do corpo do robô para a frente. Já a segunda abordagem de marcha, nomeada Galope, considera o avanço de patas em pares diagonalmente opostos. Por esse raciocínio, enquanto um par de patas faz o avanço, o outro par, diagonalmente oposto, está recuando e de forma cíclica essa seqüência se repete e promove o deslocamento da pataforma para a frente.

### 4.3.1 Caminhada

No escopo da implementação da Caminhada é interessante ressaltar as decisões e escolhas cabíveis. Antes de mais nada, esse padrão necessita de uma seqüência de patas que será a ordem com que elas avançarão no decorrer da locomoção. Essa ordem será responsável, primordialmente, por indicar a pata que iniciará a movimentação, ou seja, a pata que fará o disparo da locomoção e que terá estado inicial diferente de todas as outras. O diagrama da Figura 4.5(a) indica a forma gráfica de elucidação da seqüência das patas 0, 1, 2 e 3 nessa ordem. Para o melhor entendimento, a Figura 4.5(b) explicita a alocação de patas no corpo do robô bem como suas respectivas denominações.

O eventos de contato da pata com o solo, em um modelo genérico, são expressos por  $\gamma_k$  onde  $k$  é a  $k$ -ésima pata a se locomover de acordo com o padrão de sequenciamento desejado com  $k \in Z$  e  $k = \{1, 2, 3, 4\}$ . Esses valores de  $k$ , em casos de atribuição de um sequenciamento que referencie uma data pata do robô, devem ser expressos como a nomenclatura dada à devida pata. A Figura 4.6 ilustra graficamente os autômatos para o caso genérico expondo os eventos de transição nos arcos que ligam os

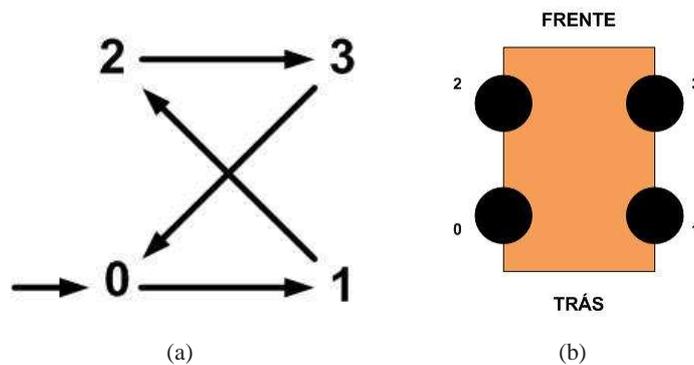


Figura 4.5: (a) Forma gráfica de indicação da seqüência de patas e (b) organização das patas e suas nomenclaturas (vista superior).

estados e as saídas em negrito junto ao estado referente.

O estado *SINC*, de sincronismo, presente no autômato das 3 primeiras patas do sequenciamento, tem o papel de aguardar o final do avanço de todas as patas sem gerar saída alguma no momento em que a pata atingir tal estado. Assim promove-se de fato o deslocamento do robô pois para que isso aconteça todas as patas devem recuar simultaneamente e em sincronia. Após o recuo das patas e consequente avanço do corpo, o ciclo volta se repetir com a ocorrência do evento temporal *TEMPO INICIAL* iniciando o autômato da primeira pata, disparadora do sequenciamento de marcha.

Resumidamente, a locomoção pela abordagem Caminhada segue cíclicamente um raciocínio padrão. Primeiramente, a primeira pata da seqüência adotada assume o estado *AB* e movimentada-se para a posição B conforme a saída atribuída a esse estado. Paralelamente a essa atitude, todas as outras patas fazem o recuo até a posição A devido à saída de seus respectivos estados iniciais, o estado *DA*. Essa primeira etapa da locomoção realiza o disparo da evolução dos autômatos das 4 patas pois a partir daí, o padrão de movimentação se repete indefinidamente até a recepção do comando de encerramento da movimentação proveniente do PC central por solicitação do usuário.

A transição da primeira pata para o estado *BC* acontece pela ocorrência do evento temporal *TD*, correspondente ao tempo de descida de uma pata e nesse intervalo todas as outras patas permanecem em suas respectivas situações, pois elas aguardam, nesse momento, por um evento discreto de chegada de pata ao solo. Assim que essa pata chega ao solo ela promove a sua própria transição até o estado *SINC* e permite a transição da segunda pata para o estado *AB*, que de forma análoga à primeira, faz seu avanço e continua o encadeamento do avanço das patas. As patas que alçam o estado *SINC* permanecem ali até que se conclua o avanço de todas as patas devido à necessidade de um movimento unívoco e sincronizado para deslocamento do corpo do quadrúpede. Dessa forma, o evento de chegada da quarta pata ao solo é o elemento que promove o sincronismo da ação de recuo das patas. Nesse momento, o autômato da quarta pata atinge o estado *CD* e as outras patas deixam o estado *SINC* para também alcançarem o estado *CD*. Por meio dessas evoluções, todas as patas geram a saída de movimentação até o ponto D e concluem o recuo logo em seguida devido a ocorrência do evento temporal *TRT*. O ciclo padrão de movimentação do método Caminhada se completa com a ocorrência do evento temporal *TEMPO INICIAL* que faz com que o autômato da primeira pata retorne a sua condição inicial da mesma forma que as outras três patas já o fizeram após a ocorrência de *TRT*.

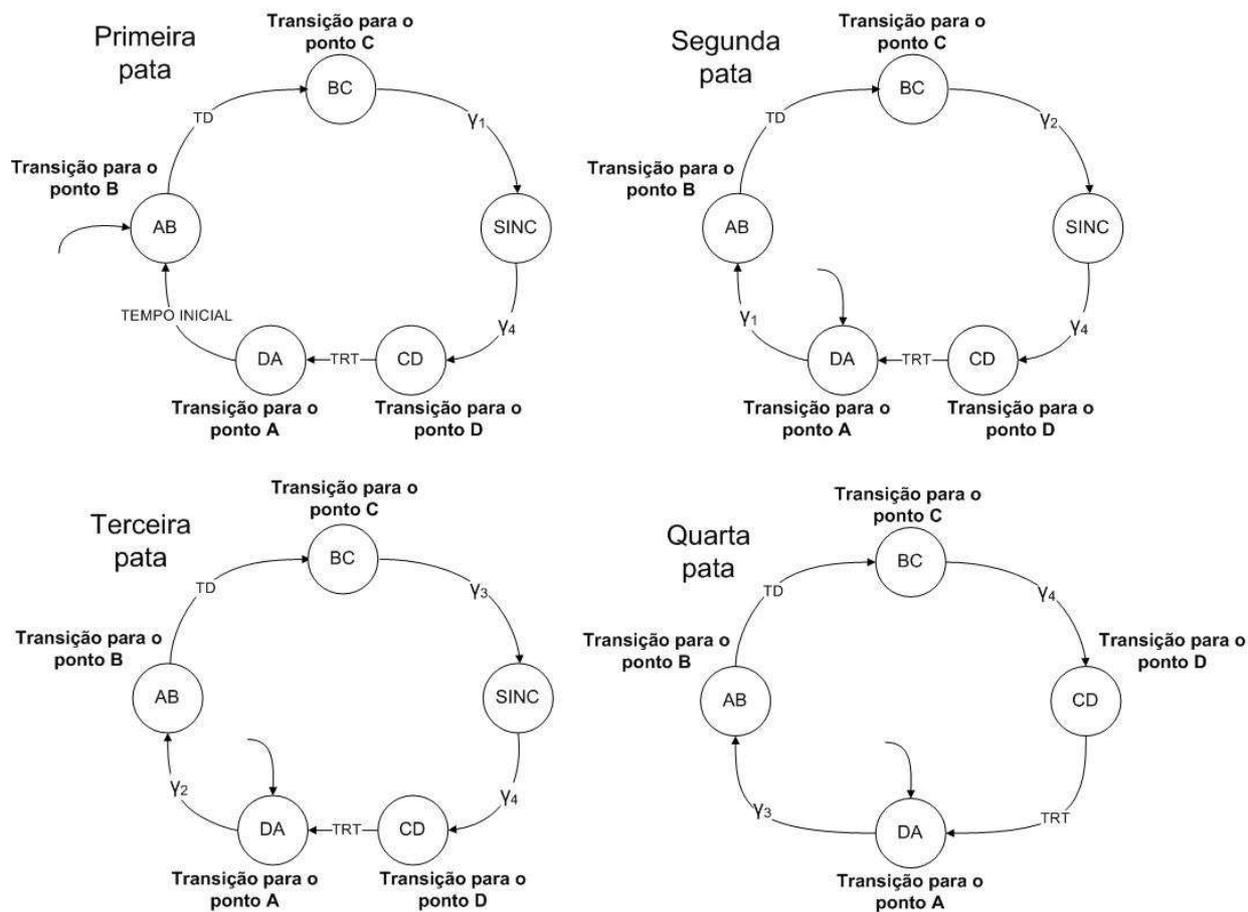


Figura 4.6: Autômato de cada pata para implementação da Caminhada.

O *sample path* que descreve o comportamento de cada um dos autômatos durante sua evolução é apresentado na Figura 4.7.

### 4.3.2 Galope

A construção dos autômatos para o modelamento do Galope assemelha-se muito ao raciocínio exigido para as questões relativas à Caminhada. Essa segunda abordagem mostra-se um tanto mais simples que a primeira em alguns pontos específicos. Como exemplo, pode-se citar o fato da ausência de estados *SINC* devido à sincronia natural da movimentação das patas a partir de um estado inicial. De fato, os estados iniciais irão disparar a movimentação que por sua vez é regulada ou sincronizada por meio de eventos de cunho temporal, *TEMPO* e *TEMPO1*.

Assume-se também nesse modelo de caminhar, que não haverá interferência externa evitando a chegada da pata ao solo de forma satisfatória. Assim, basta uma definição de estados iniciais para que o autômato possa ser executado com sucesso. Diferentemente do caso da Caminhada, aqui não há definição de sequenciamento e apenas cabe a decisão de qual par de patas diagonalmente opostas, 1-2 ou 0-3, irá iniciar a locomoção no estado *AB*, ou seja, avançando.

O raciocínio resume-se em ter duas patas avançando, enquanto outras duas estão em recuo simultâneo. A Figura 4.8 mostra os autômatos de cada uma das patas para execução da marcha aqui apresentada e con-

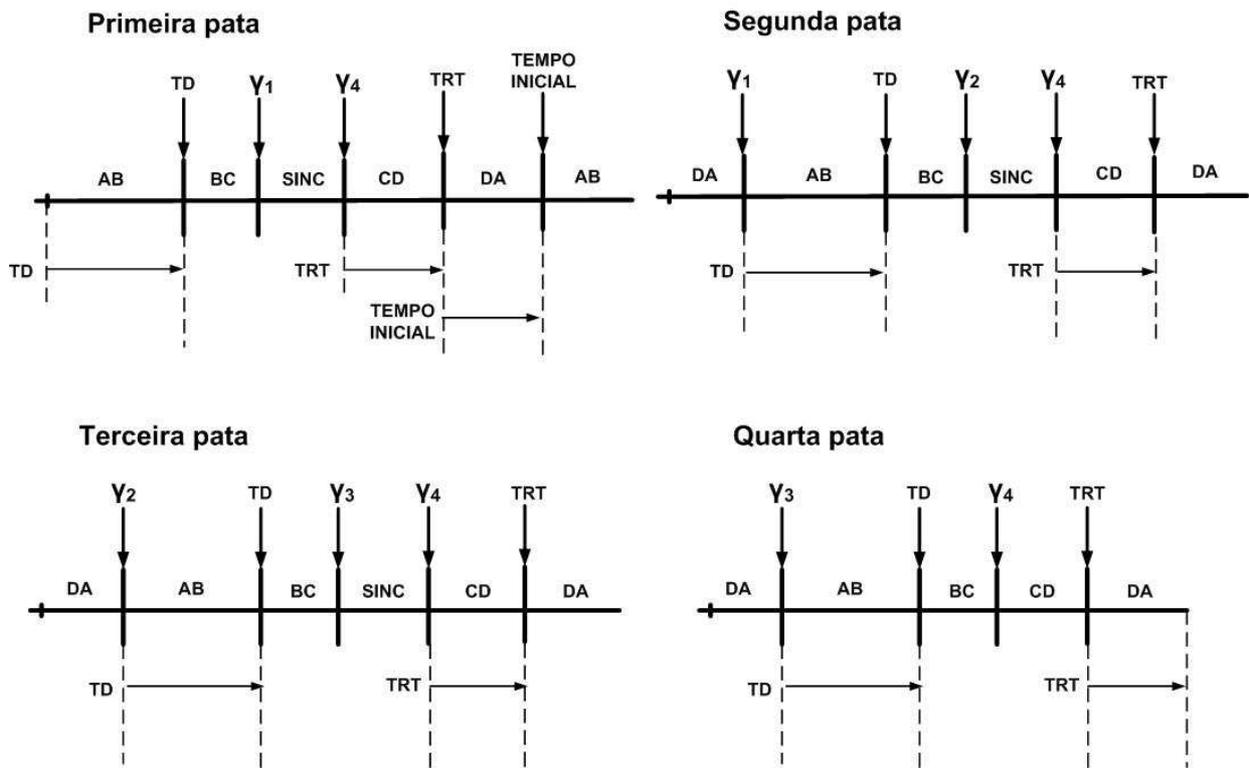


Figura 4.7: *Sample path* dos autômatos utilizados no método de marcha Caminhada.

sidera os pares das patas 1-2 avançando inicialmente e das patas 0-3 recuando inicialmente. É interessante notar que essa segunda abordagem leva em conta eventos discretos  $\gamma_k$  com  $k$  referente ao nome da pata que provoca o evento. Como exemplo, o evento  $\gamma_0$  indica a chegada ao solo da pata 0.

Já apresentadas as devidas considerações de execução do modelo Galope para a geração de movimento, pode-se então discutir a evolução dos autômatos em questão. Inicialmente, as patas 1 e 2 se encontram no estado *AB* e portanto, são levadas à posição B por efeito da saída gerada nesse estado. Simultaneamente, as patas 0 e 3 são levadas ao ponto D como resultado da saída gerada pelo estado *CD* em que as mesmas se encontram. A continuidade da movimentação e do sincronismo acontece por meio de eventos temporais presentes nessa abordagem. Com a ocorrência do evento *TEMPO* as patas 1 e 2 avançam em direção ao ponto C por terem alcançado o estado BC e as patas 0 e 3 completam seu recuo até o ponto A em consequência de terem atingido o estado DA. A sequência do movimento só é alcançada com a chegada de todas as patas ao solo pois os eventos  $\gamma_0$  e  $\gamma_3$  são requisito necessário para que o autômato das patas 0 e 3 avance ao estado *CD* promovendo seus respectivos deslocamentos até o ponto D e para que o autômato das patas 1 e 2 avance ao estado *AB* resultando nos seus deslocamentos até o ponto B. De forma análoga, os eventos  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  fazem as patas 0 e 3 alcançarem o estado AB e serem deslocadas até o ponto B iniciando seus respectivos avanços enquanto as patas 1 e 2 iniciam o recuo por terem atingido o estado *CD* e serem deslocadas até o ponto D. A conclusão de avanço das patas 0 e 3 e de recuo das patas 1 e 2 acontece por ocorrência do evento temporal *TEMPO1* que proporciona às patas 0 e 3 o avanço ao estado BC e ao ponto C por consequência de saída gerada e às patas 1 e 2 o avanço ao estado DA ocasionando o deslocamento até o ponto A. Por fim, o ciclo se conclui com a chegada das patas 0 e 3 ao solo levando o autômato das patas 0 e 3 de volta ao seu estado inicial, o estado *CD*. As patas 1 e 2, com ocorrência de  $\gamma_0$  e  $\gamma_3$  fazem a transição ao estado *AB* e assim contemplam a execução de um ciclo completo culminando no seu deslocamento até

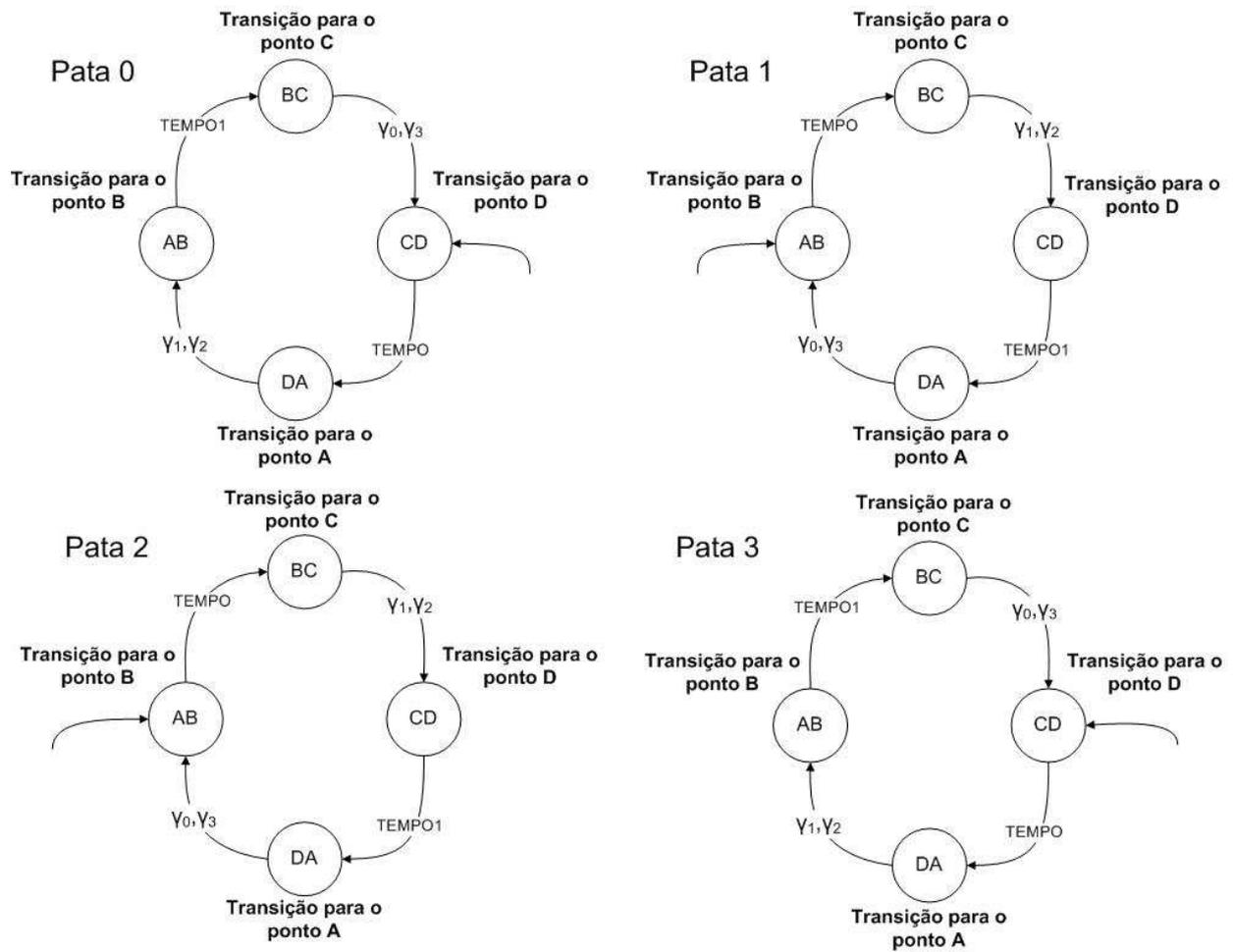


Figura 4.8: Autômato de cada pata para implementação do Galope.

o ponto B.

Pelo exposto acima na descrição da execução do método fica claro que ao locomover-se o quadrúpede tem as patas do lado direito se aproximando e se afastando periodicamente. O mesmo acontece com as patas do lado esquerdo e essa idéia é ilustrada na Figura 4.9.

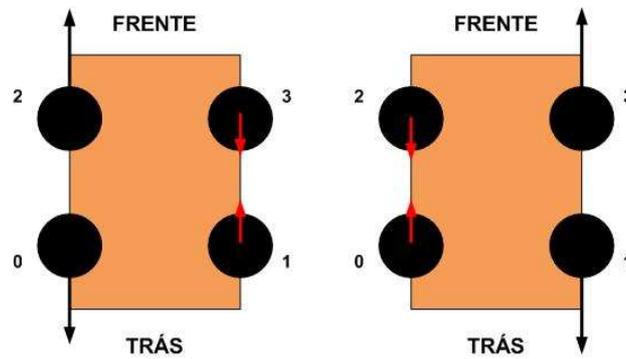


Figura 4.9: Comportamento associado às patas do quadrúpede no decorrer do Galope. Enquanto o par 1-2 avança, o par 0-3 recua e assim as patas da esquerda se afastam ao mesmo tempo que as patas da direita se aproximam. O raciocínio análogo pode ser feito para o avanço do par 0-3 e recuo do par 1-2.

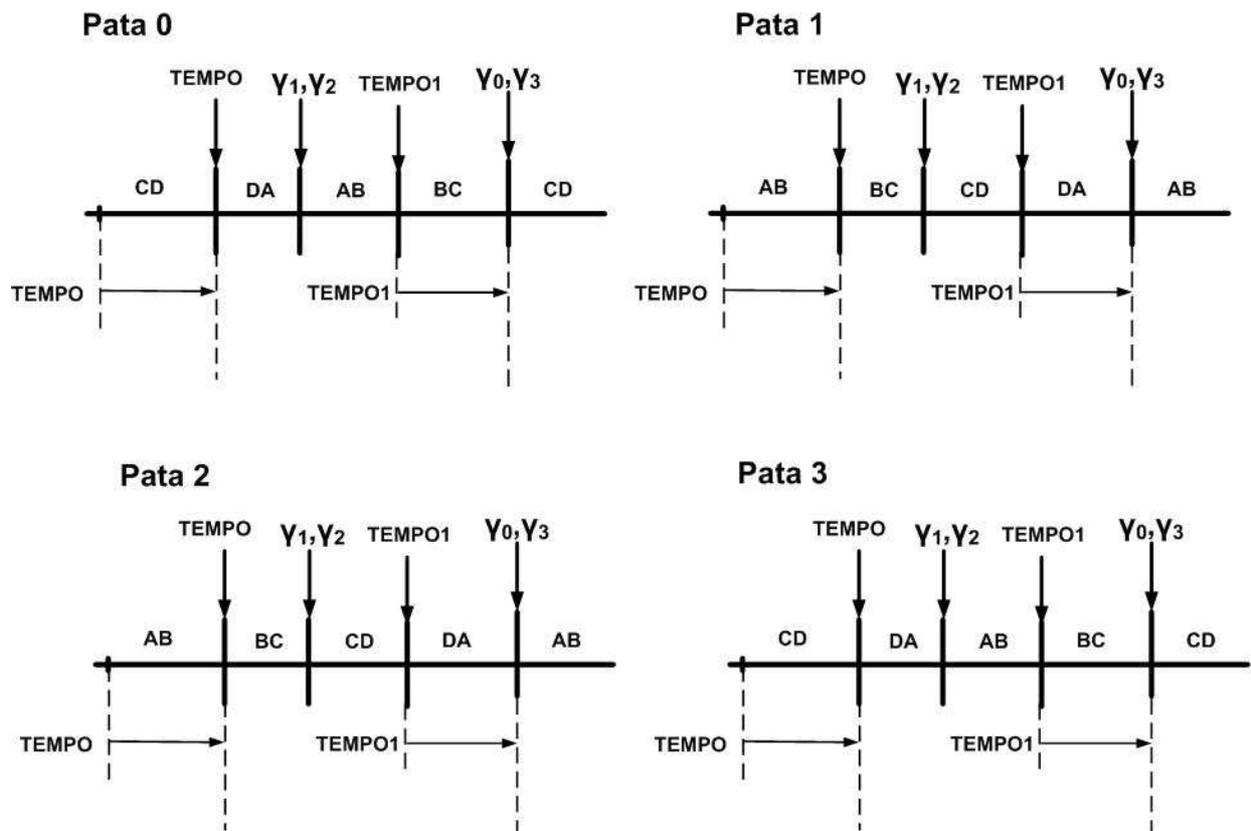


Figura 4.10: *Sample path* dos autômatos utilizados no método Galope.

# 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

*"Um gênio é 1% de inspiração e 99% de transpiração." Thomas Alva Edison*

## 5.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo tem o intuito de expor curvas e resultados de implementações já citados no corpo desse documento. A exposição dessa espécie de informação tem como finalidade principal, comprovar a validade ou comportamento dos resultados alcançados. Serão apresentadas algumas curvas sobre o sensoriamento de contato das patas indicando os problemas existentes e efeito do desenvolvimento em torno desse aparato. Em seguida, há uma série de experimentos de teor validativo para exemplificar os resultados alcançados nas medições feitas pelos sensores inerciais. Por fim, o capítulo aborda a implementação de uma sequência específica para a Caminhada que foi de fato implementada na plataforma.

## 5.2 SENSORIAMENTO DE CONTATO

Conforme citado na seção 3.2, os botões de pressão utilizados no aparato dos sensores de contato apresentavam um *bounce* que deveria ser desconsiderado no momento de atualização desses mesmos sensores. De maneira geral, observou-se a duração máxima dessa oscilação por 20ms em média. A solução implementada para o *debounce* previa uma espera de 20ms até que o sinal se estabilizasse podendo então coletá-lo com a segurança de que o valor de fato seria confiável.

A Figura 5.1(a) mostra duas curvas coletadas no momento que o sensor foi pressionado. A curva mais acima ilustra o sinal de saída do sensor que é ligado à entrada de interrupção externa do microcontrolador. É interessante observar o *bounce* que surge no momento de alteração do nível lógico de 5V para 0V. A curva inferior diz respeito às instruções inclusas dentro do escopo de interrupção externa. No momento que essa interrupção é ativada, existe uma rotina que altera o nível lógico de um pino de saída do ATmega8 para 5V e nesse mesmo escopo a rotina volta a configurar o mesmo pino em baixo logo antes do encerramento de sua execução. Conclui-se então, que o valor da medição do sensor será aquele correspondente ao nível lógico da curva superior no momento que a curva inferior retorna ao nível lógico de 0V.

De maneira análoga, o sistema de interrupção responde da mesma forma o caso em que a pata deixa o solo, ou seja, o botão deixa de ser pressionado. Assim, o nível lógico de saída do sensor passa de 0V para 5V e essa transição também invoca uma interrupção externa pois a mesma foi configurada para ser sensibilizada com qualquer alteração de nível lógico do sinal em sua entrada, ou seja, o sinal de saída do sensor de contato. Essa dinâmica de funcionamento é explicitada na Figura 5.1(b) cuja curva superior refere-se ao sinal de saída do sensor e a curva inferior à execução da rotina de interrupção.

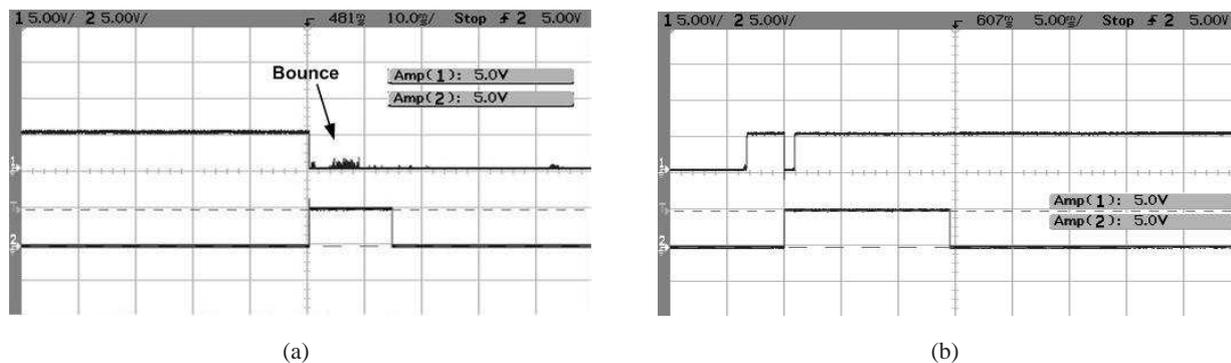


Figura 5.1: (a) Alteração do nível de sinal por pressão do sensor de contato e indicativo de execução da interrupção executada por essa pressão (escala de tempo igual a 10ms por divisão) e (b) alteração do nível de tensão por desativação do sensor de contato e indicativo de execução da interrupção executada por essa desativação (escala de 5ms por divisão).

### 5.3 SENSORIAMENTO INERCIAL

A implementação de um sistema de sensoriamento inercial contemplou a possibilidade de coleta de medições feitas por um acelerômetro de três eixos e um girômetro em  $z$ , conforme a seção 3.3.3. Dessa forma buscou-se a viabilidade de concretização de um inclinômetro indicando a inclinação de arfagem e rolagem por meio dos dados coletados de aceleração nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Essa seção abordará resultados experimentais obtidas pela central inercial desenvolvida.

#### 5.3.1 Acelerômetro e inclinômetro

Para validar as medições realizadas nos três eixos do acelerômetro e a implementação em código das relações deduzidas no cálculo de inclinação foi proposta uma experimentação de inclinação da plataforma, onde são coletados 100 medidas de aceleração originando o mesmo número de informações de inclinação a uma frequência de amostragem de aproximadamente 30 Hz. Este processo foi dividido em duas etapas de medições distintas, a primeira envolvendo medições sem filtragem e na segunda fez-se o uso do filtro passa-baixas já descrito na seção 3.3.4. Procurou-se movimentar a plataforma, em arfagem, indo de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  e posteriormente varrendo valores de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$ . Procedimento análogo foi realizado para o aferimento de ângulos de rolagem. A Figura 5.4 e a Figura 5.5 ilustram, respectivamente, as seqüências de movimentos desenvolvidas para as experimentações das inclinações de arfagem e rolagem. Procurou-se desenvolver a mesma seqüência nas duas etapas (com e sem a utilização do filtro).

A Figura 5.2 e a Figura 5.3 exibem as curvas construídas com o auxílio do programa MATLAB para as situações de medição sem e com filtragem, respectivamente. É oportuno notar que as curvas apresentam o comportamento esperado em cada caso exibindo variações angulares coerentes com os movimentos realizados. Todas as curvas coletadas, com exceção das Figura 5.2(b), apresentam um patamar plano, seja em inclinação igual a  $90^\circ$  ou  $-90^\circ$ . Isso se deve à implementação em código do inclinômetro para os eixos analisados. Nesses casos faz-se uso das relações  $\theta_{rolagem} = \arcsin\left(\frac{g_y}{g}\right)$  e  $\theta_{arfagem} = \arcsin\left(\frac{g_x}{g}\right)$  já deduzidas na seção 3.3.4. Essas relações pressupõem um valor de argumento que se encontre no intervalo entre -1 e 1. Portanto, nos casos em que é impressa uma aceleração em  $x$  ou  $y$  com valor maior que o anteriormente

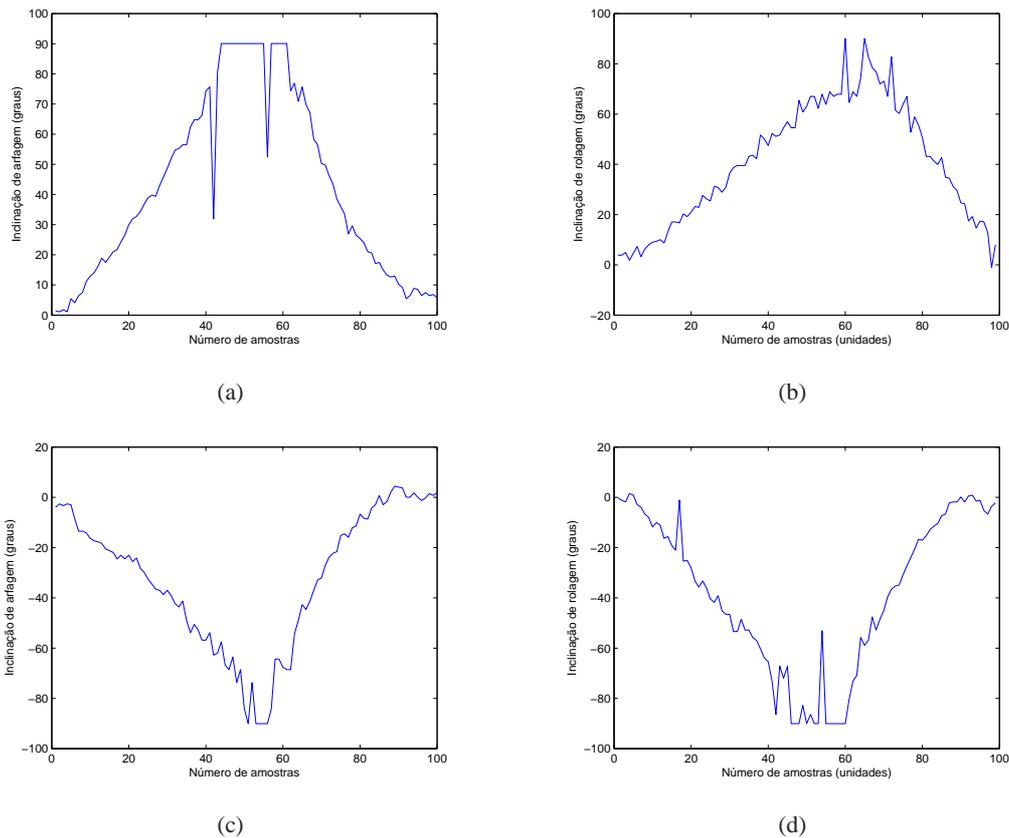


Figura 5.2: (a) Resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , (b) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , (c) resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$  e (d) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$ . As curvas são referentes a medições sem filtragem digital.

calibrado para  $g$ , satura-se o valor dessa aceleração em  $g$  para fins de cálculo da inclinação.

Todas as curvas de experimentação do acelerômetro e como será visto posteriormente, do girômetro, apresentam pequenas oscilações originadas por um conjunto de perturbações impossíveis de serem quantificados no erro apresentado. A influência conjunta de todas essas imperfeições resulta na presença de ruídos que ocasionam pequenos desvios em torno do valor real. Ainda observando as figuras é possível verificar que o filtro minimiza o efeito destes ruídos, diminuindo a influência destes no resultado observado, tornando-o mais próximo do valor real da medição.

### 5.3.2 Girômetro

As medições de velocidade angular feitas pelo girômetro utilizado assumem como sendo positivas as velocidades no sentido horário e negativas as velocidades no sentido anti-horário. Com base nestas considerações, propôs-se uma situação para a comprovação da correta funcionalidade das mesmas. Na situação proposta procurou-se rotacionar a plataforma manualmente, em torno de seu eixo  $z$ , aproximadamente em velocidade constante primeiramente um quarto de volta em sentido anti-horário, seguido de meia volta no sentido horário e finalizando na posição inicial submetendo-a novamente a um giro de  $90^\circ$  em sentido anti-horário. As imagens da Figura 5.6 descrevem este processo de rotação enquanto a curva na Figura 5.7

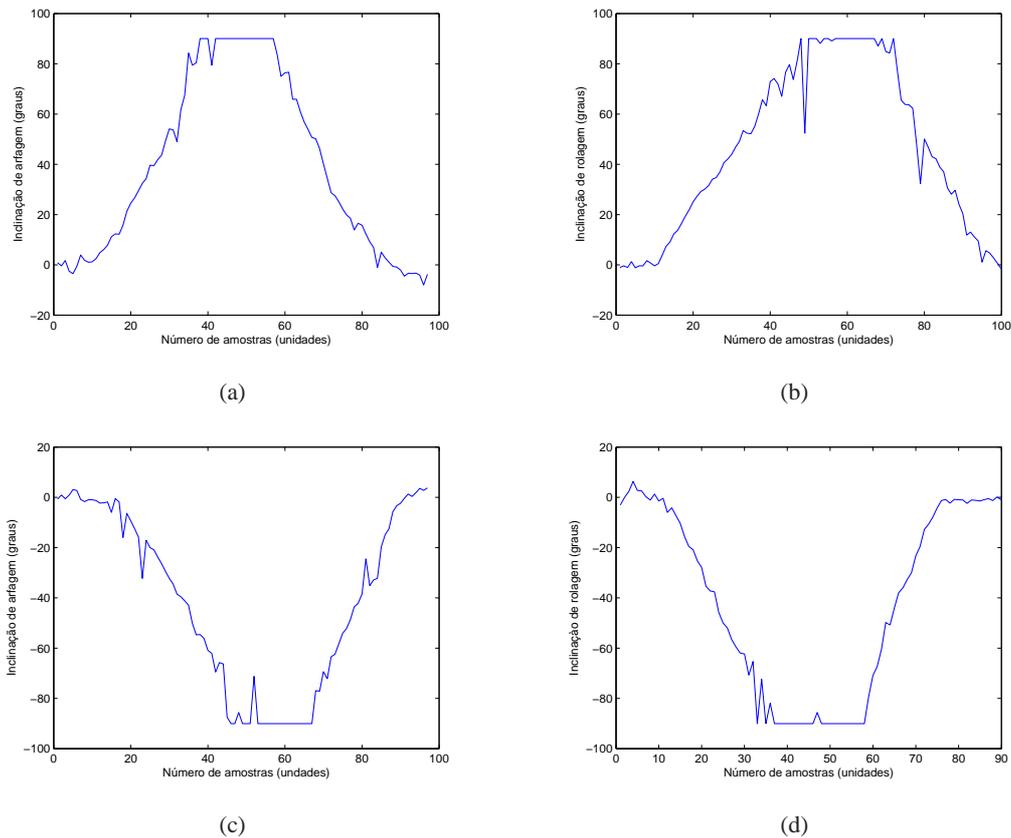


Figura 5.3: (a) Resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , (b) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , (c) resposta do inclinômetro para movimentação de arfagem de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$  e (d) resposta do inclinômetro para movimentação de rolagem de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$ . Todas as curvas apresentam efeito de um filtro digital passa-baixas conforme citado na seção 3.3.4.

contempla os valores obtidos com o experimento proposto.

Como não há a disponibilidade de um padrão para a verificação da precisão das medidas de velocidades angulares realizadas é possível apenas a análise qualitativa dos valores. Pela simples observação da curva é possível deduzir que a mesma se comporta da maneira esperada, apresentando valores positivos e negativos precisamente nos intervalos onde foram realizadas as rotações nos sentidos horário e anti-horário, respectivamente.

## 5.4 GERAÇÃO DE MOVIMENTO

Os resultados experimentais, que dizem respeito à geração de movimentos, foram obtidos pela implementação em linguagem C do autômato de cada pata. Ambos métodos de marcha, Caminhada e Galope, foram de fato implementados e terão seus resultados discutidos em seções seguintes.

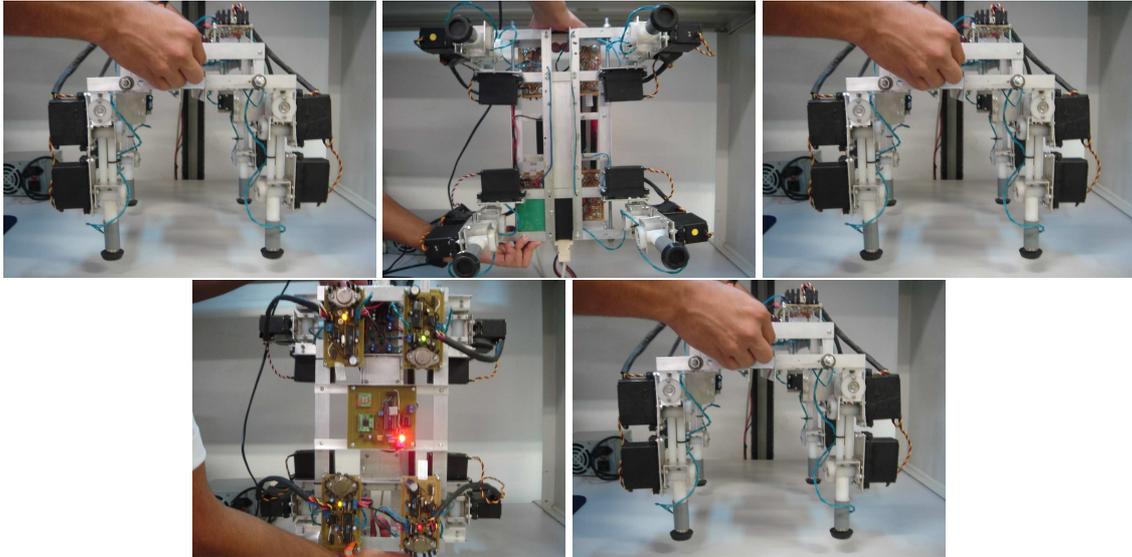


Figura 5.4: Sequência de movimentos usada no processo de experimentação do acelerômetro para inclinação de arfagem.

#### 5.4.1 Caminhada

Primeiramente, optou-se por uma sequência de patas para construção dos autômatos seguindo a teoria já exposta nesse trabalho. Optou-se por iniciar a movimentação com a pata 1 seguida das patas 0, 3 e 2, respectivamente. Por motivos meramente experimentais com finalidade de observar a real validade dos autômatos desenvolvidos, não houve preocupação em deixar essa movimentação dinamicamente estável, ou seja, os tempos  $TD$ ,  $TRT$ , e  $TEMPO INICIAL$  foram configurados em valores elevados.

Os autômatos construídos são explicitados na Figura 5.8. O sistema comportou-se da forma desejada e pôde-se observar a evolução dos autômatos de forma satisfatória. Em alguns momentos, as patas não chegaram ao solo de forma ideal fazendo com que o sensor de contato não fosse acionado. De qualquer forma, esse fato não tem origem na implementação do autômato mas sim na boa calibração dos servos das patas. Para que esse problema não aconteça é necessário realizar uma calibração simétrica de forma que a posição central do servo corresponda ao valor intermediário de instrução de movimentação do motor.

A Figura 5.9 mostra as posições de avanço das patas observadas durante a evolução do autômato. Por não ter existido preocupação com a dinâmica do movimento, o robô apresentou em alguns momentos uma margem de estabilidade estática muito pequena, ou seja, o sistema estava prestes a se tornar instável estaticamente. No entanto, esse fato não desmerece o propósito do experimento que era validar a eficiência da implementação de autômatos como forma de geração de movimento por restrição de contato com o solo.

#### 5.4.2 Galope

O método Galope foi implementado em linguagem C na forma com que foi apresentado na Figura 4.8. No entanto, não foi possível validá-lo da forma com que foi feito com o método Caminhada. A locomoção proposta pelo Galope requer estabilidade dinâmica e uso da inércia para um caminhar bem sucedido e a estimação de parâmetros temporais para que isso ocorra é algo empírico e difícil de se alcançar. O tempo

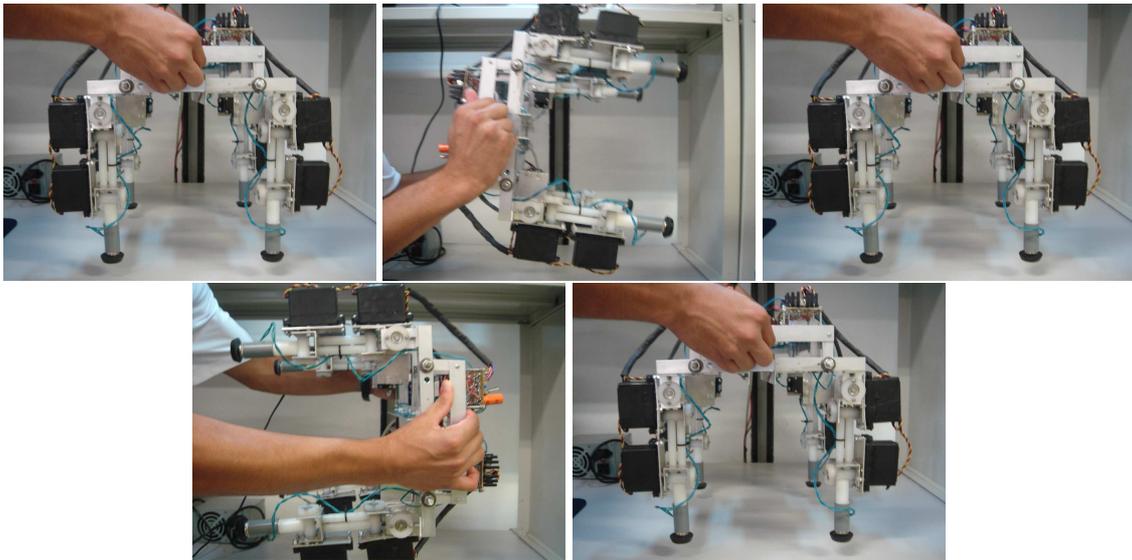


Figura 5.5: Sequência de movimentos usada no processo de experimentação do acelerômetro para inclinação de rolagem.

disponível para desenvolvimento e testes não permitiu que fosse possível alcançar tais parâmetros ótimos.

Sendo assim, não há dados experimentais pertinentes à esse experimento mas trata-se da busca de valores eficazes para os eventos temporais de forma que a plataforma consiga a locomoção pelo método em questão.

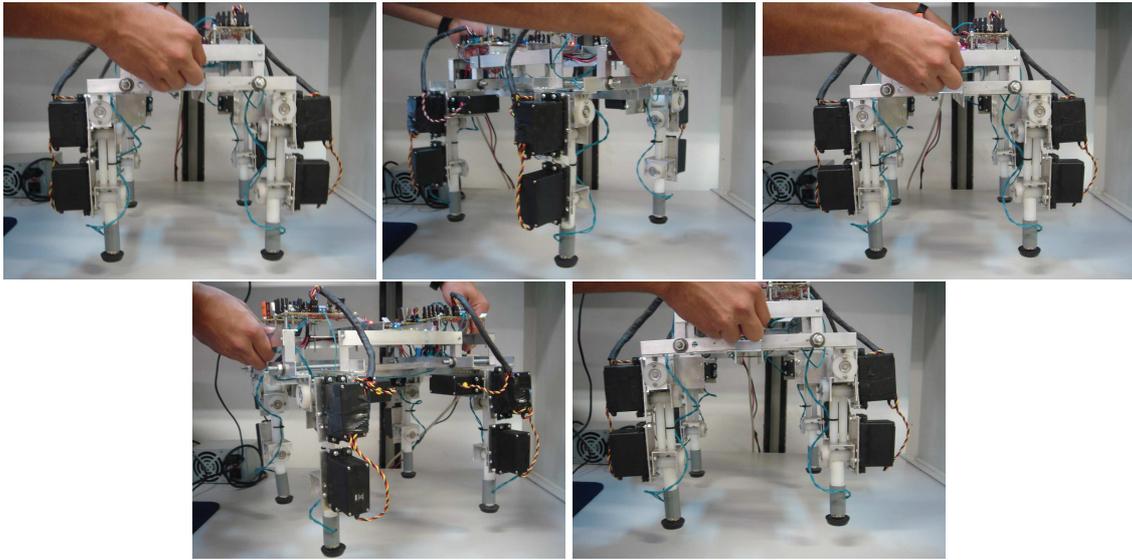


Figura 5.6: Sequência de movimentos usada no processo de experimentação do girômetro.

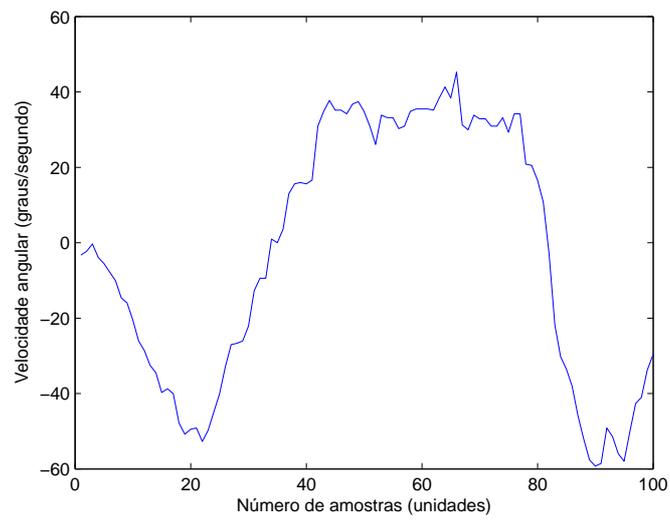


Figura 5.7: Resposta do girômetro a movimentações manuais de giro no sentido horário e anti-horário.

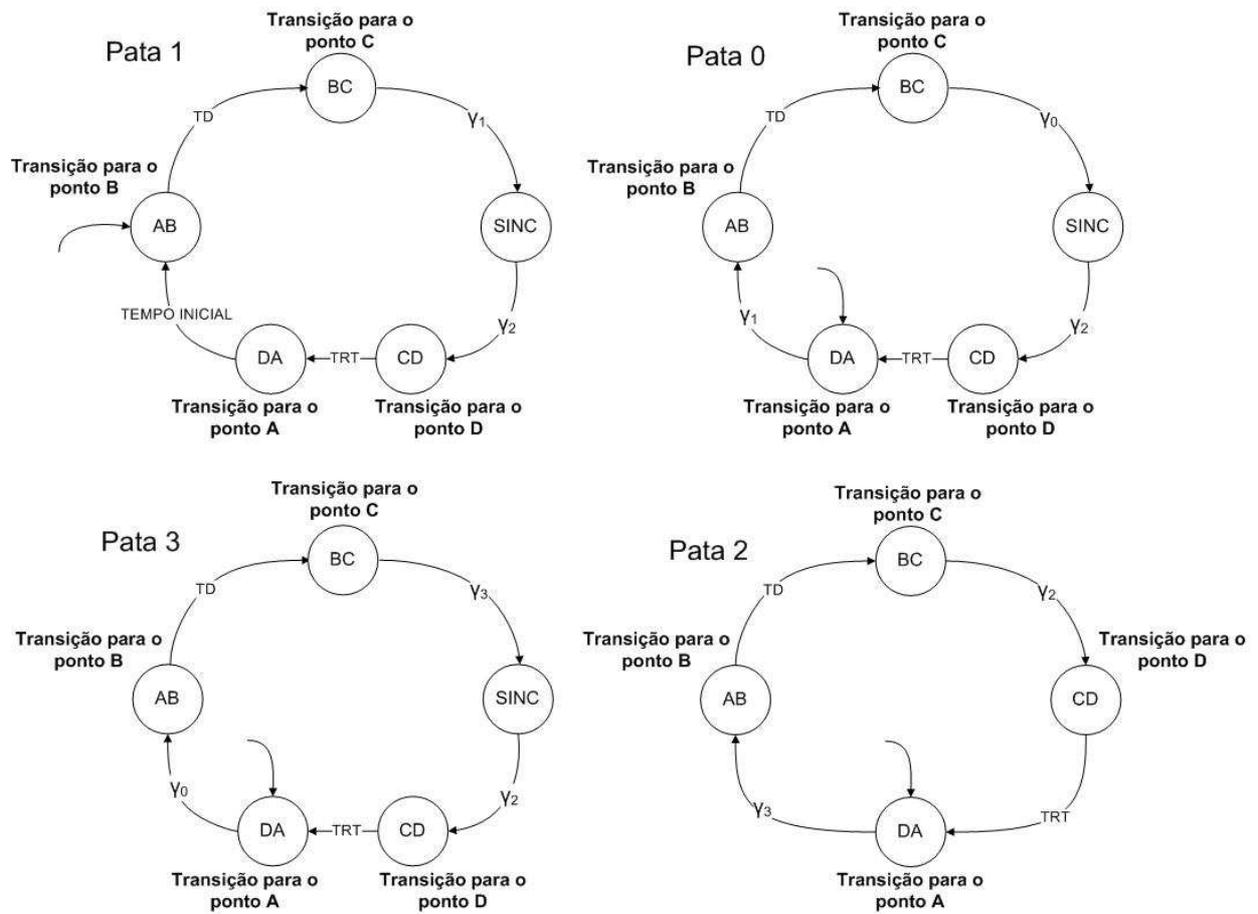
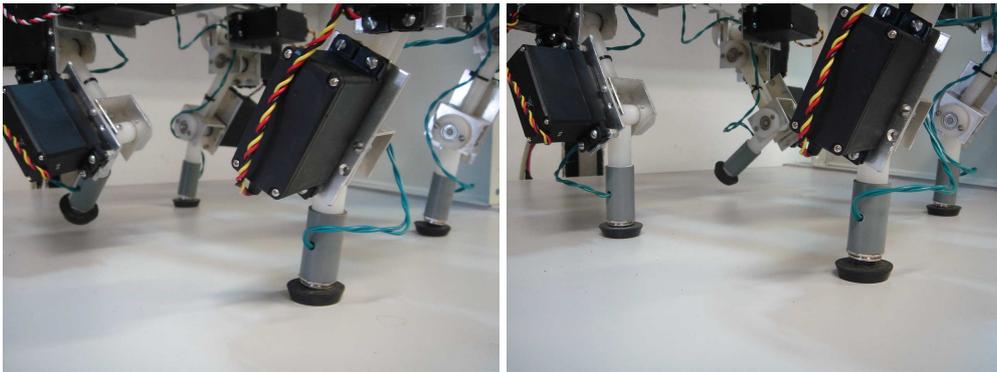
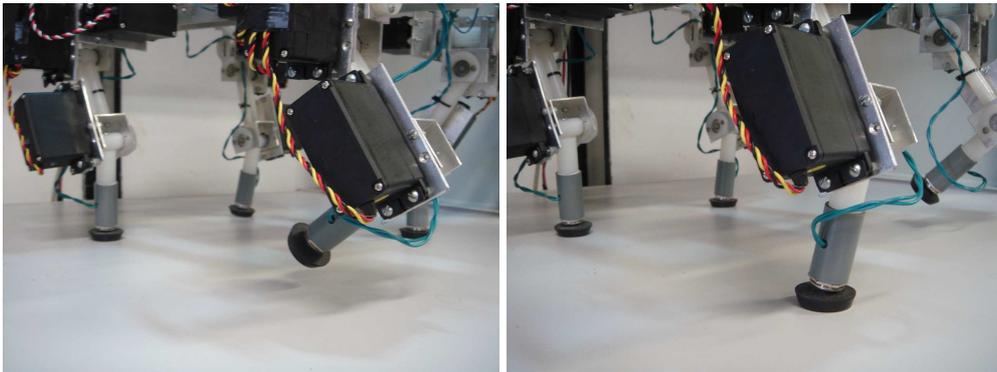


Figura 5.8: Autômatos referentes Marcha que foram implementados em código.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 5.9: (a) Avanço da pata 1, (b) pata 0, (c) pata 3 e (d) pata 2.

## 6 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, a estrutura física do quadrúpede foi remodelada, ganhando componentes e expandindo para melhor acomodar e servir de suporte para os diversos componentes necessários ao funcionamento do quadrúpede e outros tantos que ainda hão de ser instalados. Uma central inercial foi desenvolvida com o intuito de fornecer dados a respeito da postura da plataforma no desenrolar de seu movimento, sendo esta capaz de medir acelerações nas três dimensões do espaço além da velocidade angular de guinada. Para que tais dados pudessem ser utilizados com máxima correteude, fez-se necessária a implementação de filtros de sinal e outras manipulações matemáticas que deram origem a por exemplo, o inclinômetro. De tal forma trabalhados, os resultados fornecidos por esta unidade de medição foram satisfatórios, estando em concordância com aqueles esperados nos experimentos propostos. Fato esse que não exclui a possibilidade de implementação futura de um condicionamento mais refinado nas medições por meio de recursos não abordados no escopo desse documento.

A proposta inicial de geração de movimentos por restrição de contato com o solo pôde ter sua validade testada com o ferramental desenvolvido. Primeiramente, os sensores de contato desenvolvidos e acoplados à plataforma mostraram-se um recurso confiável e necessário ao conjunto de informações a respeito do *status* do robô. Há também uma ponderação de que o tipo de sensor adotado (*push-button*) talvez não seja o mais adequado a esse tipo de aplicação. Para uma locomoção mais confiável e satisfatória seria interessante contar com um aparato de sensoriamento de contato que fosse robusto às diversas maneiras de aproximação da pata em relação ao solo. No caso com o qual lidou esse trabalho, percebe-se alguma vez certa dificuldade de sensibilização do recurso sensorial pois foi observado nos procedimentos experimentais que é comum o fato de que a pata não consiga ativar o sensor na chegada do solo devido à angulação em relação ao solo ser bastante diferente de  $90^\circ$ .

Em trabalhos subseqüentes é esperado o acréscimo de novos dispositivos de sensoriamento à plataforma, tais como sensores de ultra-som e uma câmera para aquisição de imagens. O uso de métodos de fusão sensorial como o Filtro de Kalman, também devem ser empregados. Estas ferramentas se somam aos dados já fornecidos pelos sensores de contato com o solo e a central inercial, devendo ser utilizados de forma integrada, formando a base de informações a ser utilizada na geração do movimento auto-adaptável e controle de movimentação, fazendo com que o caminhar do quadrúpede se desenvolva em malha fechada e não mais em malha aberta, a exemplo do que ocorre atualmente.

Por fim, deve-se enaltecer a importância de todo o trabalho aqui descrito em todos os níveis. Para os alunos participantes foi fundamental para o contato, compreensão e prática de diversos aspectos de cunho acadêmico, técnico e institucional relativos à engenharia. Para o desenvolvimento do projeto em si, julga-se ter tido colaboração fundamental na adaptação da estrutura e módulos eletrônicos para que os próximos trabalhos possam concentrar esforços na elaboração de rotinas autônomas de aprendizado e aperfeiçoamento de marcha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. H. Cotta and L. Raulino Neto. Realização de uma plataforma para estudo de robótica comportamental baseada em quadrúpede. Technical report, UnB.
- [2] A. du Pin Calmon, N. C. Pinheiro, and R. U. Ferreira. Desenvolvimento de um robô-cachorro comportamental: percepção e modelagem comportamental. Technical report, UnB.
- [3] G. F. Batista and I. F. Cardoso. Adequação de um sistema de locomoção de um robô quadrúpede para avaliação de algoritmos de aprendizagem. Technical report, UnB.
- [4] Z. Xiuli, Z. Haojun, G. Xu, C. Zhifeng, and Z. Liyao. A biological inspired quadruped robot: Structure and control. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2005.
- [5] STMicroelectronics. *Manual do acelerômetro LIS3LV02DQ - MEMS INERTIAL SENSOR*, Outubro 2005.
- [6] A. M. Shkel. Type I and type II micromachined vibratory gyroscopes. *IEEE*, 2006.
- [7] Analog Devices. *Manual do giroscópio ADXRS401*, 2004.
- [8] P. Gonzalez de Santos, E. Garcia, and J. Estremera. *Quadrupedal Locomotion, An Introduction to the Control of Four-Legged Robots*. Springer, 2006.
- [9] D. Pongas, M. Mistry, and S. Schaal. A robust quadruped walking gait for traversing rough terrain. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- [10] R. F. Souto. Modelagem cinemática de um robô quadrúpede e geração de seus movimentos usando filtragem estocástica. Technical report, UnB.
- [11] C. A. Luguesi, J. G. Boss, M. V. Freitas, R. J. Daciuk, R. L. Urzedo, F. N. Junior, and L. V. R. de Arruda. Robô hexápode escalador de superfícies magnéticas. *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática*.
- [12] G. Dudek and C. Zhang. Computational principles of mobile robotics. *Cambridge University Press*, 2000.
- [13] H. Kimura and Y. Fukuoka. Biologically inspired adaptive dynamic walking in outdoor environment using a self-contained quadruped robot: 'tekken2'. *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2004.
- [14] C. G. Cassandras and S. Lafortune. *Introduction to Discrete Event Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [15] A. S. Martins and G. A. Borges. Introdução ao padrão físico rs-485 para comunicação serial. Technical report, Universidade de Brasília, 2006. Disponível no site: <http://www.ene.unb.br/gaborges/recursos/notas/index.htm>.

- [16] S. R. S. de Lima. Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos. 2005. Curitiba.
- [17] H. A. Hermin and J. M. Balthazar. Uma abordagem geral sobre micro e nanotecnologia. *6th Brazilian Conference on Dynamics*, 2007.
- [18] Atmel Corporation. *Manual do microcontrolador AVR ATmega8*, 2007.
- [19] D. D. S. Santana. Estimação de trajetórias terrestres utilizando unidade de medição inercial de baixo custo e fusão sensorial. *Escola Politécnica da USP*, 2005.



# I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

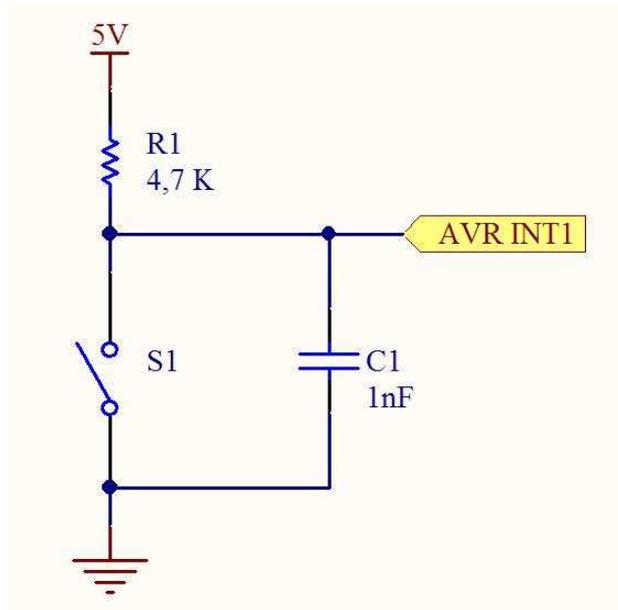


Figura I.1: Diagrama esquemático do circuito pertencente aos sensores de contato das patas.

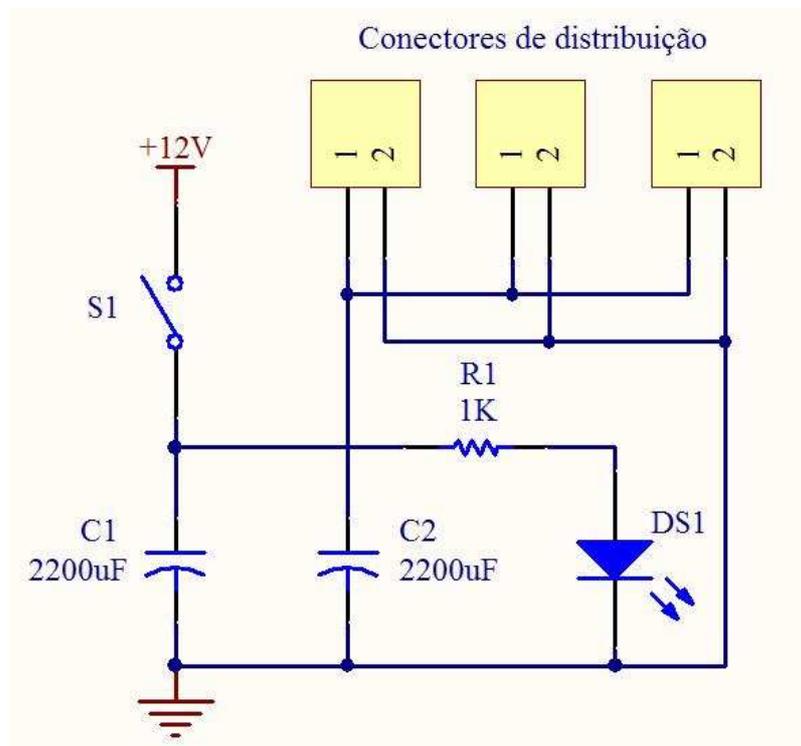


Figura I.2: Diagrama esquemático da placa de distribuição de alimentação da plataforma.

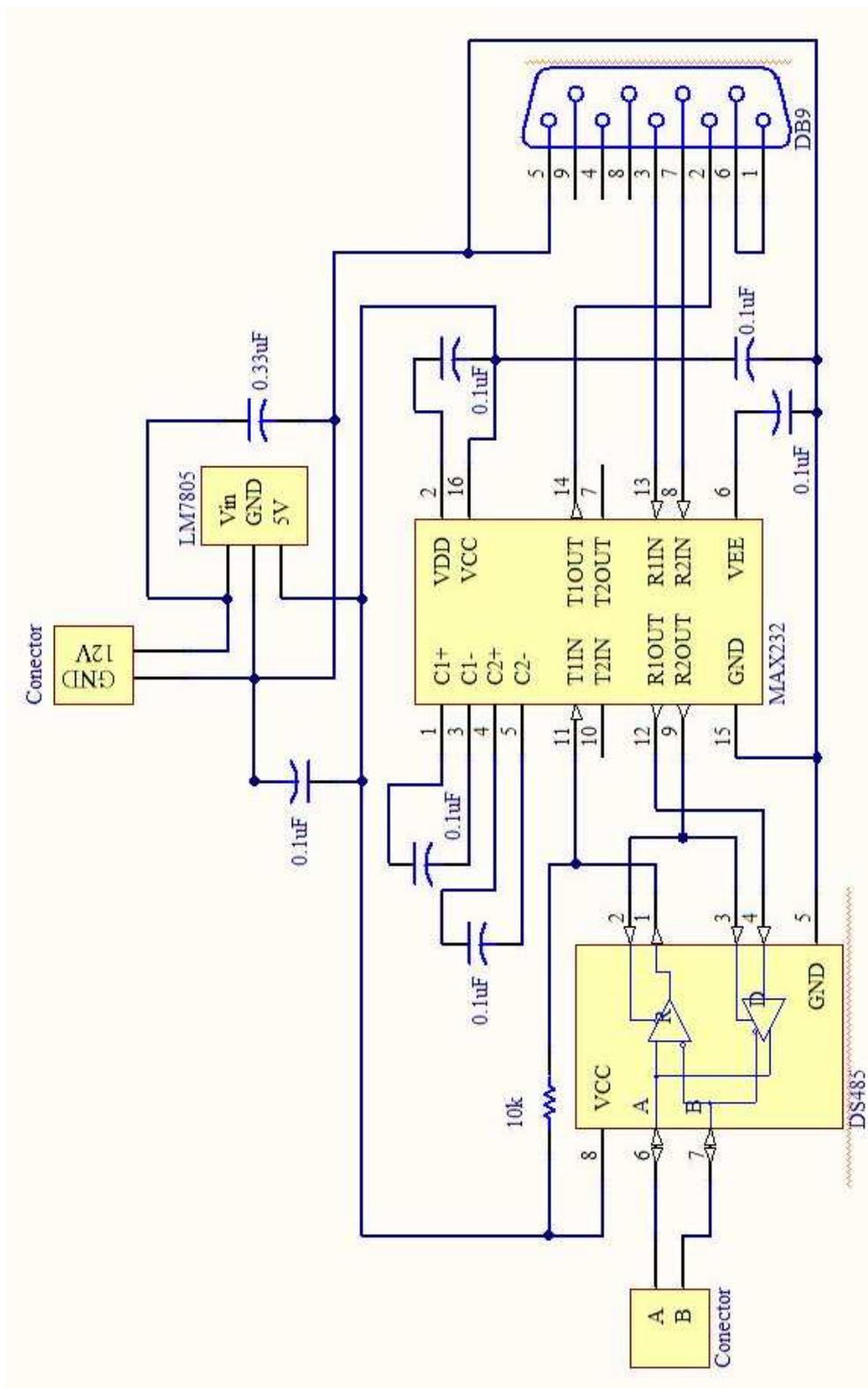


Figura I.3: Diagrama esquemático do conversor de padrões RS232/RS485.

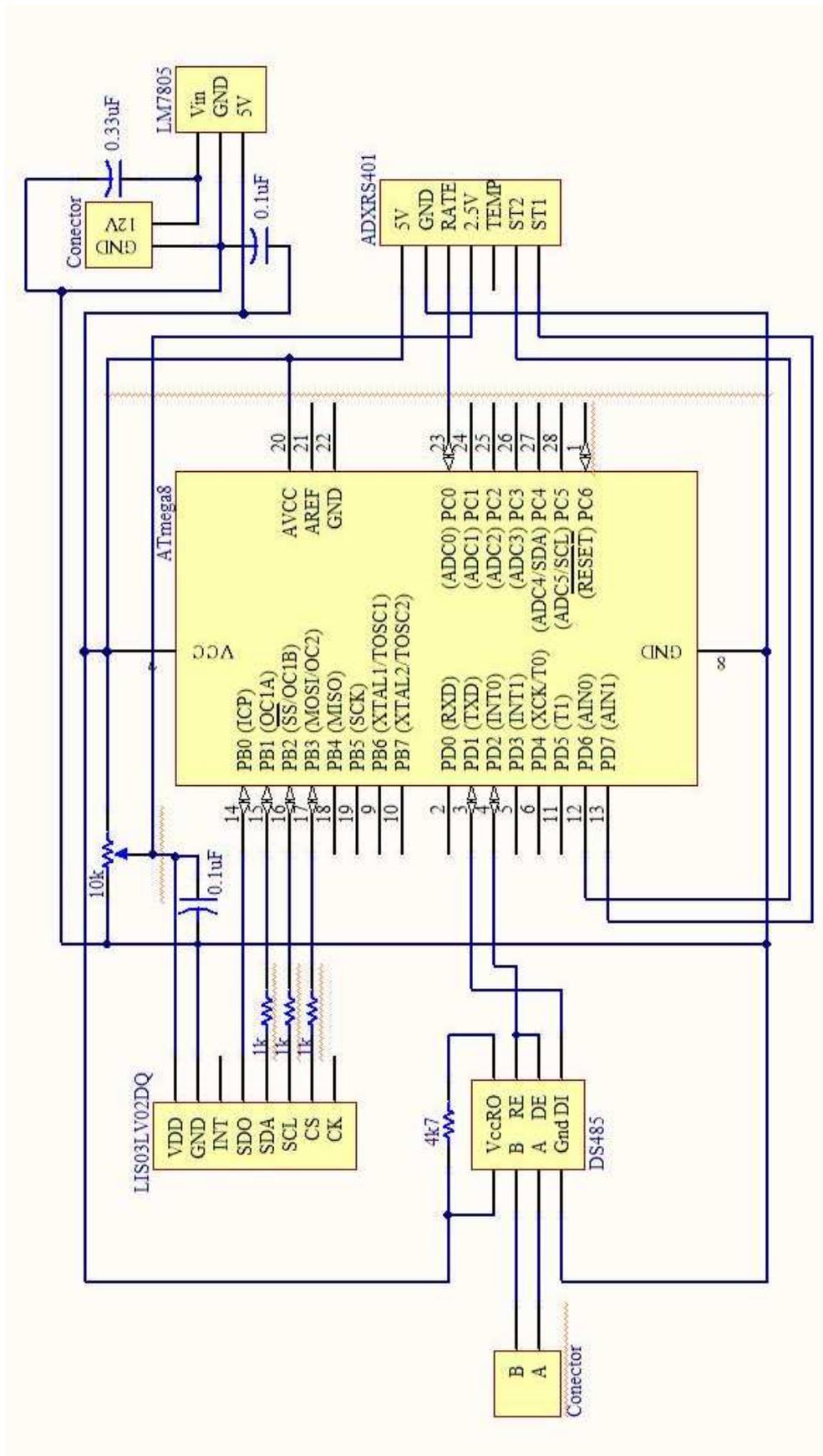


Figura I.4: Diagrama esquemático da IMU completa.

## II. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

O CD contém duas pastas e um arquivo do relatório em formato .pdf. As pastas se dividem em: programas e fotos.

Na pasta fotos estão presentes todas as imagens captadas da plataforma ou de seus componentes incluindo aquelas já apresentadas no decorrer desse documento.

A pasta programas possui dois diretórios com as seguintes denominações: Linux e AVR.

Os programas referentes ao PC foram feitos em ambiente linux e estão presentes na pasta de mesmo nome. Dessa forma os arquivos nela inseridos são:

1. **sensors.c**: programa responsável pela inicialização dos sensores de contato das patas e solicitação de atualização dessa informação ao PC pelos microcontroladores referentes a cada pata.
2. **actuators.c**: faz a inicialização de todos os servos da plataforma em uma posição estabelecida. Por meio de uma função de atualização dos servos, esse código possui o ferramental para passar do PC à plataforma a informação de posicionamento dos servos.
3. **motion.c**: trata de fato a questão de geração de movimento. Esse código possui em seu bloco de inicialização as condições iniciais dos autômatos do método de marcha em uso, bem como as funções de transição das patas aos pontos de segmentação da trajetória. No escopo de atualização, esse programa realiza a análise e evolução dos autômatos para ambos os casos de marcha.
4. **Observador.c**: executa uma rotina de coleta dos dados amostrados pelos sensores e os armazena em variáveis contidas em estruturas especialmente criadas para alocar tais informações. Estas estruturas são armazenadas em uma fila respeitando a ordem temporal com que os dados são coletados. No momento em que esta fila atinge o tamanho especificado pelo usuário, todos os dados armazenados são então salvos em um arquivo .txt alocado em uma pasta denominada resultados, a ser criada no diretório onde o programa é executado.
5. **quadrupede.c**: esse módulo possui o escalonador do sistema. É no seu escopo que se faz a inicialização de todos os outros módulos. De acordo com a taxa de amostragem necessária, esse módulo promove a chamada de rotinas de atualização de sensores, atuadores e geração de movimentos. A informação de cunho temporal é retirada da tarefa de temporização que possibilita o escalonamento que por sua vez roda nesse módulo corrente.
6. **Calculos.c**: é utilizado como um módulo do programa Observador.c que o chama sempre que um cálculo matemático deve ser executado. Neste módulo estão presentes todas as equações matemáticas utilizadas necessárias ao processamento dos dados da central inercial.

Já os programas da pasta AVR se subdividem em:

1. **PWM\_servos\_right**: lida com todos os códigos que são executados nos microcontroladores das patas do lado direito da plataforma. Possui todo o ferramental para comunicação destes com o PC

central incluindo o condicionamento de sinal para os sensores de contato das patas. Possibilita a interpretação de dados provenientes do PC de forma que seja de fato gerada a movimentação dos servos por meio de um sinal PWM.

2. **PWM\_servos\_left**: basicamente o mesmo que o módulo acima modificando apenas funções de normalização na geração de PWM.
3. **IMU.c**: utiliza as funções presentes nos módulos `acelerometro.c` e `giroscopio.c`. Gerencia a coleta dos dados de acordo com uma taxa de amostragem previamente definida, além de administrar toda a comunicação entre microcontrolador e PC.
4. **Acelerometro.c**: contém todas as funções a serem realizadas para o correto funcionamento do acelerômetro, tais como funções de inicialização, amostragem, calibração, *self test*, etc.
5. **Giroscopio.c**: de modo similar ao módulo giroscópio, neste módulo pode-se encontrar todas as funções para a perfeita utilização do girômetro.