

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



IZABELA PAULINO FONSECA

**DESENVOLVIMENTO E CONTROLE DE ROBÔ
MULTIARTICULADO DE QUATRO PATAS**

VITÓRIA – ES
NOVEMBRO/2016

IZABELA PAULINO FONSECA

DESENVOLVIMENTO E CONTROLE DE ROBÔ MULTIARTICULADO QUADRÚPEDE

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Izabela Paulino Fonseca**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof. Dra. Raquel Frizera Vassallo

VITÓRIA – ES
NOVEMBRO/2016

IZABELA PAULINO FONSECA

DESENVOLVIMENTO E CONTROLE DE ROBÔ MULTIARTICULADO DE QUATRO PATAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Izabela Paulino Fonseca**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 21, de novembro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dra. Raquel Frizera Vassallo
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. Dra. Eliete de Oliveira Caldeira
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Comissão Avaliadora

Prof. Dr. Hans-Jörg Andreas Schneebeli
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Comissão Avaliadora

VITÓRIA – ES
NOVEMBRO/ 2016

RESUMO

Atualmente, é possível notar o crescente interesse pelo desenvolvimento de robôs de quatro patas, que são capazes de andar em regiões de solo irregular, além de poderem ultrapassar obstáculos como escadas e ressaltos com bom desempenho. Com isso, protótipos que apresentam estas características têm grande utilidade na exploração e varredura de ambientes que oferecem risco à vida humana como campos minados, escombros e até mesmo outros planetas. Neste contexto, decidiu-se desenvolver como projeto de graduação um protótipo de um robô de quatro patas multiarticulado controlado remotamente, composto por 12 servomotores comerciais que controlam seus 4 membros, tendo seu *design* inspirado na anatomia das aranhas, onde apenas uma de suas patas irá se levantar por vez (marcha descontínua). Seu controle é realizado através de um aplicativo criado para a plataforma Android, o qual se comunica com o circuito eletrônico que controla o robô (Arduíno Mega 2550) através de um módulo de comunicação Bluetooth.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Robô com rodas..... | 10 |
| Figura 2 – Robô movido a esteiras e robô com pernas..... | 11 |
| Figura 3 – Robô quadrúpede | 12 |
| Figura 4 – Robô tetrápode construído neste projeto..... | 15 |
| Figura 5 – Diagrama da perna dianteira de uma barata | 18 |
| Figura 6 – Exemplificação das articulações das patas do robô deste projeto..... | 19 |
| Figura 7 – Padrão de locomoção sucessivo para uma marcha descontínua de duas fases. | 22 |
| Figura 8– <i>Design</i> do robô deste projeto e robô do kit <i>Crawling Quadruped Robot Kit for Arduino</i> , vendido pela <i>Sunfounder</i> | 24 |
| Figura 9 – <i>Design</i> do robô tetrápode feito para este projeto. | 24 |
| Figura 10 – Posição inicial do robô e nomenclatura adotada para cada pata. | 26 |
| Figura 11 – Ciclo de locomoção do movimento para frente. | 26 |
| Figura 12 – Diferentes posições das pernas..... | 27 |
| Figura 13 – Ciclo de locomoção do movimento de giro em sentido horário. | 30 |
| Figura 14 – Ciclo de locomoção do movimento de giro em sentido anti-horário. | 31 |
| Figura 15 – Componentes de um servo motor..... | 34 |
| Figura 16 – Posicionamento dos componentes na caixa do servo motor. | 34 |
| Figura 17 – Motor servo usado neste projeto e seus fios para conexão. | 35 |
| Figura 18 – Malha de controle típica de servomotores..... | 36 |
| Figura 19 – Esquemático de um CI para controle de servomotores. | 36 |
| Figura 20 – Diagrama de tempo e posição do motor servo. | 37 |
| Figura 21 – Arquitetura do Arduíno. | 40 |
| Figura 22 – Arduíno Mega 2560. | 41 |
| Figura 23 – Esquema de ligação do HC-05..... | 42 |
| Figura 24 – Interface do <i>AppInventor</i> para criar o layout do aplicativo..... | 43 |
| Figura 25 – Interface do <i>AppInventor</i> para criar a rotina do aplicativo..... | 44 |
| Figura 26 – Interface do programa desenvolvido para o celular. | 45 |
| Figura 27 – Tela mostrada após clicar em “Procurar”..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 28 – Fluxograma ilustrando o funcionamento das rotinas implementadas através do Arduíno..... | 47 |
| Figura 29 – <i>Script</i> utilizado para testar o recebimento de dados do celular através do módulo HC-05. | 50 |
| Figura 30 – Dados enviados para o Arduíno e impressos no <i>Serial Monitor</i> | 50 |
| Figura 31 – Esquemático da placa de circuito impresso deste projeto. | 51 |
| Figura 32 – Placa dupla face fabricada artesanalmente. | 52 |
| Figura 33 – Sinais PWM enviados aos motores da Perna 1. | 53 |
| Figura 34 – Primeiro ciclo de locomoção desenvolvido. | 55 |
| Figura 35 – Filamento ABS e impressora 3D utilizados na fabricação das peças do robô. | 62 |
| Figura 36 – Dorso feito no <i>SolidWorks</i> e fabricado na impressora 3D, com dimensões 12 x 12 cm..... | 62 |
| Figura 37 – Peças que formam a coxa feitas no <i>SolidWorks</i> (separadas e montadas) e as fabricadas na Impressora 3D, também montadas. | 63 |
| Figura 38 – Fêmur desenhado no <i>SolidWorks</i> e fabricado na impressora 3D. | 63 |
| Figura 39 – Tíbia desenhada no <i>SolidWorks</i> e fabricado na impressora 3D. | 64 |
| Figura 40 – Design do corpo do protótipo montado no <i>SolidWorks</i> , e estrutura finalizada..... | 64 |
| Figura 41 – Variáveis globais inicializadas e rotina realizada quando o aplicativo é inicializado..... | 65 |
| Figura 42 – Rotina do botão “Procurar”. | 66 |
| Figura 43 – Rotina do botão “Conectar”. | 66 |
| Figura 44 – Rotina dos botões para frente, para direita e para a esquerda. | 67 |
| Figura 45 – Diagrama de Estados. | 69 |
| Figura 46 – Legenda das Tabelas 12, 13 e 14..... | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Defasagem entre as posições diagonal (D), estendida (E) e horizontal (H), sendo esta última considerada a posição referência. | 29 |
| Tabela 2 – Estados e seus possíveis próximos estados..... | 31 |
| Tabela 3 – Especificações técnicas dos motores servos utilizados neste projeto..... | 35 |
| Tabela 4 – Ângulos definidos para posicionar o robô com todas as patas em diagonal. | 37 |
| Tabela 5 – Ângulos assumidos pelos motores quando as pernas ficam na posição H e E..... | 38 |
| Tabela 6 – Ângulos referentes sequência de movimento para girar no sentido horário. | 38 |
| Tabela 7 – Ângulos referentes à sequencia de movimento para girar no sentido anti-horário..... | 39 |
| Tabela 8 – Ângulos referentes à sequencia de movimento de locomoção para frente. | 39 |
| Tabela 9 – Informações técnicas do servo módulo <i>Bluetooth</i> HC-05. | 42 |
| Tabela 10 – Tabela correspondente aos sinais PWM mostrados..... | 54 |
| Tabela 11 – Valores das variáveis indicadas no Diagrama de Estados referente ao robô..... | 70 |
| Tabela 12 – Ângulos em cada etapa da movimentação para frente..... | 72 |
| Tabela 13 – Ângulos em cada etapa da movimentação para a esquerda. | 73 |
| Tabela 14 – Ângulos em cada etapa da movimentação para a direita. | 74 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| ABS | <i>Acrilonitrila Butadieno Estireno</i> |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> |
| CI | Circuito Integrado |
| CISNE | Laboratório de Computação e Sistemas Neurais |
| COG | <i>Center of Gravity</i> |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| JCC | Junção Corpo-Coxa |
| JCF | Junção Coxa- Fêmur |
| JFT | Junção Fêmur-Tíbia |
| LD1 | Locomoção para a Direita 1 |
| LD2 | Locomoção para a Direita 2 |
| LE1 | Locomoção para Esquerda 1 |
| LE2 | Locomoção para Esquerda 2 |
| LF1 | Locomoção para Frente 1 |
| LF2 | Locomoção para Frente 2 |
| MIT | <i>Massachusetts Institute of Technology</i> |
| PIC | Placa de Circuito Impresso |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| RAM | <i>Random Access Memory</i> |
| ROM | <i>Read-Only Memory</i> |
| RX | <i>Receiver</i> |
| TX | <i>Transmitter</i> |
| UFES | Universidade Federal do Espírito Santo |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1. | Apresentação | 10 |
| 1.2. | Definições da estrutura da pata e dispositivos a serem utilizados..... | 13 |
| 1.3. | O robô feito neste projeto | 15 |
| 1.4. | Motivação | 15 |
| 1.5. | Objetivo geral e objetivos específicos | 16 |
| 1.6. | Divisão do trabalho | 17 |
| 2 | MORFOLOGIA DE UM ROBÔ TETRÁPODE | 18 |
| 2.1. | Locomoção de robôs com pernas e estabilidade | 19 |
| 2.2. | Geração de marcha descontínua | 21 |
| 2.3. | Estrutura física do robô tetrápode deste projeto | 23 |
| 2.4. | Cálculo dos ângulos de movimentação | 25 |
| 3 | ESTRUTURA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA | 33 |
| 3.1. | Servo motor e seu controle | 33 |
| 3.2. | Controle e ajuste dos ângulos dos servos motores | 35 |
| 3.3. | A plataforma de prototipagem Arduino..... | 40 |
| 3.4. | Comunicação entre o <i>Software</i> e o <i>Hardware</i> | 41 |
| 3.5. | Interface com o usuário | 43 |
| 3.6. | O controle realizado pelo Arduino e o acionamento dos motores..... | 46 |
| 4 | TESTES E RESULTADOS | 48 |
| 4.1. | Servo motor | 48 |
| 4.2. | <i>Script</i> e interface com o usuário | 49 |
| 4.3. | <i>Hardware</i> | 51 |
| 4.4. | Testes de caminhada..... | 54 |
| 5 | CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS..... | 57 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 59 |
| | ANEXO A | 62 |
| | ANEXO B..... | 65 |
| | ANEXO C | 69 |

INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O rápido desenvolvimento tecnológico nos campos da eletrônica, microeletrônica e informática vêm possibilitando a melhoria de sistemas embarcados, com microprocessadores capazes de realizar tarefas cada vez mais complexas. Aliado a isso, sistemas de controle mais complexos e sensores precisos fazem com que a robótica tenha uma extensa gama de aplicações, como, por exemplo, na indústria, no âmbito doméstico e até mesmo na reabilitação e tratamento de pessoas com deficiência. Outra crescente aplicação da robótica móvel que vem ganhando a atenção de pesquisadores e engenheiros, segundo Barasuol (2013, p.2), é a utilização de robôs móveis em áreas com solo irregular que oferecem risco a humanos, como em escombros ou na exploração de outros planetas, o que torna este objeto de pesquisa extremamente atraente.

Os robôs móveis podem se locomover através de vários mecanismos diferentes como, por exemplo, rodas, pernas e esteiras, onde o enfoque tem sido os robôs com rodas por sua considerável agilidade e velocidade em terrenos com superfície plana (OLIVEIRA, 2014, p.1). Robôs que utilizam rodas para se locomover (Figura 1) possuem uma estrutura física e controle de movimentos mais simples pois, em superfícies planas, têm todas as suas rodas em contato com o solo, o que permite desconsiderar o balanço do veículo em sua modelagem (DE PAULA, 2013, p.6). Entretanto, o desempenho destes é reduzido em terrenos irregulares ou acidentados (BARASUOL, 2013, p.2).

Figura 1 – Robô com rodas

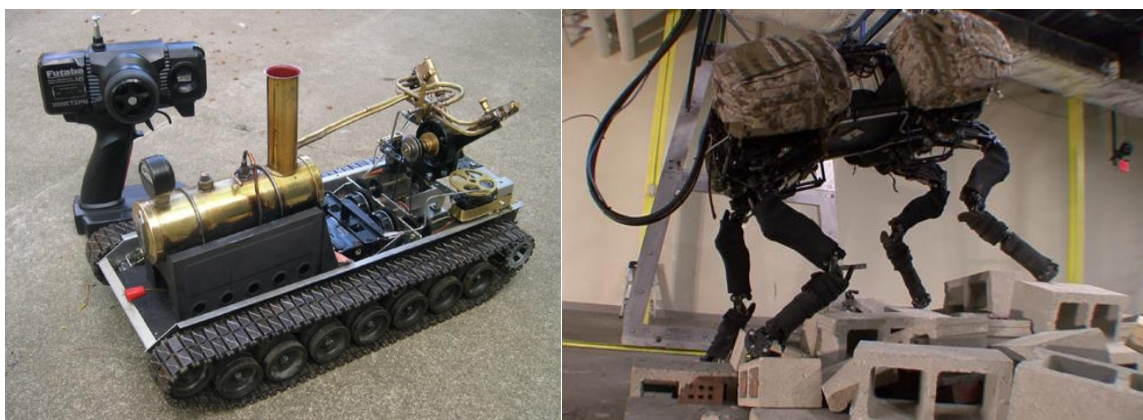


Fonte: SANDIA NATIONAL LABORATORIES, (2009).

Uma outra alternativa possível aos robôs com rodas são os robôs com pernas (Figura 2), que possuem um sistema de locomoção altamente adaptável a terrenos irregulares. Segundo Potts

(2011, p.3-4), tais máquinas requerem apenas alguns pontos de contato com o solo e podem ultrapassar obstáculos com facilidade. Além disso, não danificam a superfície de deslocamento como ocorre no caso dos robôs que se movimentam por esteiras (Figura 2), que apresentam esta desvantagem, apesar de terem um melhor desempenho que os robôs movidos a rodas em solos irregulares, como descreve Barasuol (2013, p.3). Com isso, fica clara a maior utilidade de robôs que se locomovem com pernas em ambientes de solo acidentado ou irregular, ou que contenham obstáculos como escadas e ressaltos.

Figura 2 – Robô movido a esteiras e robô com pernas



Fonte: CRABFU, e BOSTON DYNAMICS, (20--?).

Robôs movidos por pernas têm seu modelo de locomoção e número de pernas inspirados em diferentes animais como mamíferos, répteis e insetos. Tais animais possuem a capacidade de adaptar rapidamente sua locomoção às irregularidades do terreno e assim são capazes de manter sua velocidade média em diferentes tipos de terrenos (BARASUOL, 2013, p.7). O número de membros dentre as classes de animais citadas acima pode variar consideravelmente, e em projetos de robótica, a quantidade de pernas influencia fortemente na complexidade do padrão de locomoção e do controlador utilizados.

Uma outra informação interessante refere-se a estudos feitos em insetos hexápodes, onde era testada a forma de locomoção desses insetos à medida que suas patas eram retiradas. Estes estudos mostraram que tais insetos, quando estão com quatro de suas patas para se locomover, tendem a se locomover de maneira muito semelhante aos animais tetrápodes, como lagartos (KAR, ISSAC, JAYARAJAN, 2003, p.358).

Considerando que são necessários três pontos de apoio para se ter um suporte estável, a configuração de quatro membros é a que utiliza um número menor de membros, o que torna mais simples o movimento e de fácil construção. Entretanto, este fato faz com que o número de pontos de apoio seja reduzido, o que torna o equilíbrio de mais difícil obtenção para este caso do que para robôs de seis patas, os quais são altamente estáveis. Mas, ainda assim, o menor consumo energético dos robôs de quatro patas, bem como seu menor peso, tornam-se grandes vantagens quando comparados aos que apresentam mais de quatro pernas, que são características de grande importância no que se refere à autonomia de robôs (BARASOUL, 2013, p.7-8).

Na UFES, já foram realizados projetos com robôs movidos por patas, sendo os mais recentes realizados pelos Engenheiros Philippe Demuth (2013) e Pedro de Paula (2013). Demuth (2013) desenvolveu seu próprio protótipo de um hexápode e Paula (2013) propôs efetuar algumas das melhorias sugeridas no trabalho de Demuth (2013) em um projeto seguinte. Dentre tais melhorias, pode-se citar a substituição dos servos motores usados por servos motores com maior torque e uma estrutura mais leve (DEMUTH, 2013, p. 56-57).

Um importante exemplo de um robô de quatro membros, construído também na UFES, é o protótipo chamado “Guará”, desenvolvido pelos professores Antônio Bento Filho, Paulo Faria S. Amaral e Benedito G. Miglio Pinto e alunos da engenharia da UFES. Ele é capaz de ultrapassar obstáculos, andar em linha reta e fazer curvas. É considerado um robô de grande porte, com estrutura robusta e possui anatomia inspirada nos quadrúpedes, como o próprio nome do projeto indica.

Figura 3 – Robô quadrúpede



Fonte: LIMA; AMARAL; BENTO FILHO, 2008.

Diante das informações apresentadas acima, decidiu-se construir um robô de quatro patas controlado remotamente, onde a morfologia do robô escolhida baseia-se na morfologia dos insetos e dos répteis. Além disso, o padrão de caminhada que será definido para o robô irá obedecer à dinâmica estática, onde o centro de gravidade do robô não irá se deslocar para provocar o movimento, e irá ser realizado em terreno plano. Isto faz com que as patas tenham que se mover uma por vez, tornando a movimentação do robô e sua estabilidade mais simples de se controlar. A estrutura deste protótipo será feita visando-se aplicações futuras de maior complexidade como a caminhada em terrenos irregulares e a ultrapassagem de obstáculos.

1.2. Definições da estrutura da pata e dispositivos a serem utilizados

Tendo decidido o número de patas e a morfologia que se pretende adotar para a construção deste robô, é necessário definir o número de graus de liberdade que cada uma das patas terá, e de quantos motores estas precisarão ter para permitir os graus de liberdade estabelecidos. Segundo Bottchër (2016), para mover uma pata para frente são necessários pelo menos dois graus de liberdade por pata, uma para levantar e outra para girar a pata para frente. Entretanto, a maioria das patas de robôs têm graus de liberdade, tendo um motor para cada um, o que torna possível a movimentação do robô de uma maneira mais eficiente em terrenos irregulares e a realização e manobras mais complexas.

A escolha de três graus de liberdade para cada uma das patas torna necessária a utilização de três motores por pata, sendo um para cada articulação. Entretanto, existem diversos tipos de motores que podem ser utilizados para esta aplicação como o motor DC, o motor de passo e os servomotores, onde os motores mais utilizados em robótica são o de passo e o servomotor.

Os motores de passo são motores mais utilizados em aplicações que não exigem tanta precisão, e possuem torque baixo em velocidades altas, entretanto são motores de baixo custo e livres de manutenção. Já os servomotores são motores controlados em malha fechada, o que fornece à eles maior precisão e uma melhor utilização de sua capacidade de torque de pico, além destes serem capazes de manter uma posição de maneira precisa. Porém, este último necessita de manutenção e possui um valor maior que o motor de passo.

Os servomotores podem produzir velocidade e força de duas a quatro vezes maiores que um motor de passo. Sendo os servomotores mais apropriados para aplicações que necessitam de

uma confiabilidade maior e, pensando em aplicações futuras onde a resolução e garantia da mesma são necessárias, optou-se, então, pela sua utilização neste projeto. O controle dos servomotores é feito por modulação de largura de pulso (PWM).

Para viabilizar o controle dos movimentos dos motores, conseqüentemente das patas do robô, faz-se necessária a utilização de um sistema embarcado que contenha um microcontrolador. Decidiu-se utilizar, então, a plataforma de prototipagem, Arduíno, pela facilidade que a mesma oferece tanto em *hardware* quanto em *software*, uma vez que já apresenta diversas rotinas prontas para efetuar o controle dos motores.

O Arduíno pode gerar o sinal de controle PWM de duas formas, através de hardware e de software. O gerado através de software possui uma precisão maior, uma vez que sua resolução pode ser definida manualmente, desde que respeite a frequência máxima de chaveamento de cada porta. Já o sinal de hardware já possui a biblioteca *Servo* implementada, o que torna o controle dos servomotores mais simples. Como, para este projeto, não se faz tão necessária uma alta resolução do sinal de controle, já que o robô irá se locomover em terreno plano, decidiu-se implementar o sinal de controle por hardware.

A comunicação entre a plataforma de prototipagem eletrônica e o controle feito remotamente necessita da escolha de um protocolo de comunicação sem fio como Wi-Fi, WiMax, Bluetooth e infravermelho. Existindo-se o desejo de se controlar o robô através de um aplicativo de celular, o que torna o sistema mais atrativo e extingue possíveis problemas com a eletrônica que um controle com joystick necessitaria, devem-se considerar as tecnologias de comunicação sem fio utilizadas pelos celulares atualmente que são Wi-Fi e Bluetooth.

É importante lembrar que o Arduíno, já em posse do autor, necessita de um módulo de comunicação sem fio para poder se comunicar com o celular. Assim, comparando-se as principais informações das especificações técnicas dos módulos Bluetooth e Wi-Fi tem-se, respectivamente, corrente de consumo para recebimento de dados igual a 35mA e 60mA e alcance do sinal igual a 10m e 90m.

Com a intenção de se fazer um aplicativo, foi possível descobrir uma plataforma de desenvolvimento criada pelo MIT chamada de *AppInventor 2*, a qual possui diversas rotinas prontas para viabilizar a implementação de tal aplicativo, apenas para Android. Uma dessas rotinas permitia a utilização do protocolo *Bluetooth* para conectar o celular com o Arduíno, o que tornaria a utilização deste protocolo mais simples. Como o robô será alimentado por uma

fonte, ao invés de uma bateria, também não se faz necessário um alcance grande de sinal, sendo o módulo de protocolo Bluetooth, suficientemente adequado para esta aplicação, tendo sido, então, o escolhido.

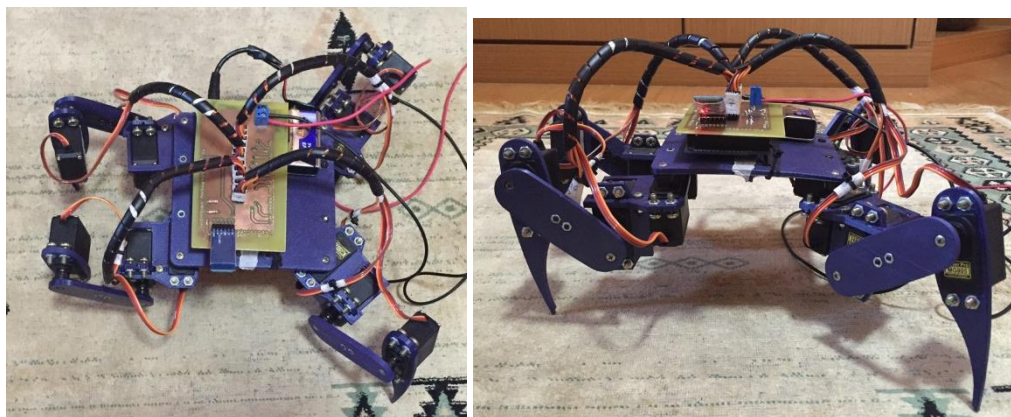
A estrutura do robô e cada um dos dispositivos utilizados serão explicados da Seção 2 em diante, bem como os testes feitos durante a realização deste projeto.

1.3. O robô feito neste projeto

A estrutura física deste robô foi fabricada utilizando-se uma impressora 3D “UP! Mini”, através de modelagem por fusão e depósito de um polímero do tipo *Acrilonitrila butadieno estireno* (ABS), tendo sido inspirada na morfologia dos répteis e insetos, assim como no projeto de Demuth (2013, p. 14-16). O desenvolvimento de tal estrutura foi feito com o auxílio do *software SolidWorks*.

Na Figura 4, é possível visualizar o robô feito neste projeto de graduação, nas vistas frontal (direita) e de cima (esquerda).

Figura 4 – Robô tetrápode construído neste projeto.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

1.4. Motivação

As principais motivações para o desenvolvimento deste projeto podem ser descritas como:

- Primeiramente, este projeto pode ser utilizado como modelo para um robô que vise auxiliar na exploração de outros planetas e de regiões que oferecem risco à vida humana. Estes fatores revigoram o sentido de realização deste projeto, e dão a ele um propósito que vai além da simples busca do conhecimento.

- A utilização de projetos de pesquisa feitos anteriormente tem importância não só pelo intuito de otimização, mas também pelo fato de valorizar os projetos já desenvolvidos e o conhecimento adquirido pelos seus respectivos pesquisadores.
- Finalmente, a intenção de se obter conhecimento no desenvolvimento de projetos na área de robótica, os quais são inovadores, envolvem várias vertentes da engenharia, de grande importância e trazem grande realização pessoal.

A estrutura pensada para este projeto possibilita um protótipo mais leve pelo fato de possuir menos pernas. Além disso, foram comprados servos motores que oferecem um torque bem maior do que os utilizados no projeto de Demuth (2013, p. 13). Tais motores precisam de alimentação separada do restante do circuito devido à geração de possíveis ruídos e da queda de tensão, caso eles sejam acionados simultaneamente. Estas características possibilitam, assim, algumas das melhorias sugeridas pelo mesmo.

Para o desenvolvimento do *hardware*, foi utilizado um Arduíno Mega 2560, que já disponibiliza de 14 portas digitais capazes de gerar 14 PWM em *hardware* com resolução de 16 bits. A utilização de tal dispositivo facilitou consideravelmente o controle dos motores através de sua biblioteca *Servo* e um módulo Bluetooth HC-05, os quais serão devidamente especificados mais a frente.

1.5. Objetivo geral e objetivos específicos

Este projeto possui como objetivo geral a construção de um robô multiarticulado tetrápode controlado remotamente.

A relação de objetivos específicos que se espera alcançar neste projeto está como segue:

- Realização do projeto de *design* da estrutura do robô quadrúpede que seja adequado para permitir a locomoção do protótipo;
- Ajuste da posição do eixo dos motores, para viabilizar a movimentação angular desejada;
- Montagem física e acionamento do robô, onde serão definidos o sistema de comunicação e a atuação dos motores;
- Definição do padrão de locomoção que o robô deve executar;

- Programação e implementação do código na plataforma Arduino Mega 2560 que permita a execução do padrão de locomoção definido, bem como a integração com a interface através do módulo *Bluetooth*;
- Desenvolvimento da interface com o usuário que permitirá o controle remoto do robô, onde tal interface consiste em um aplicativo na plataforma *Android*, o qual permitirá controlar o protótipo a partir de um dispositivo já existente, como um celular ou *tablet*;
- Confecção da placa de circuito impressa;

1.6. Divisão do trabalho

O capítulo “Morfologia de um robô tetrápode” descreve as principais características dos robôs tetrápodes inspirados na morfologia dos insetos e répteis. As variações angulares, estudo de estabilidade, as dimensões deste projeto, bem como o padrão de locomoção adotado e suas diferentes etapas também serão descritas neste capítulo.

No capítulo “Estrutura e princípio de funcionamento do sistema”, é explicado como ocorre comunicação entre *software* e *hardware*, a interface com o usuário e o funcionamento dos servo motores e os ângulos obtidos para cada tipo de locomoção, a plataforma de prototipagem Arduino e o controle realizado através do mesmo, bem como o protocolo de comunicação entre o *software* e o *hardware*.

O quarto capítulo, “Testes e resultados”, serão mostrados os testes feitos para se chegar ao resultado final deste trabalho.

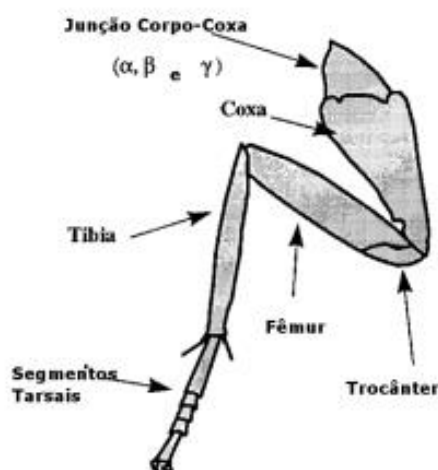
Finalmente, no Capítulo 5 é mostrado o que se concluiu após a realização deste trabalho, bem como sugestões futuras que poderiam melhorar o desempenho do projeto feito.

Os Anexos A e B mostram, com maiores detalhes, as peças desenhadas no *SolidWorks* e as rotinas implementadas para viabilizar a criação do aplicativo utilizado.

1 MORFOLOGIA DE UM ROBÔ TETRÁPODE

Apesar de possuir quatro patas, a estrutura física deste projeto foi baseada na morfologia de insetos como aranhas e formigas. Entretanto, seu comportamento de locomoção foi adaptado para o número de patas apresentados pela estrutura em questão. As patas desenvolvidas possuem as dimensões e o posicionamento das articulações fundamentadas nos membros dos insetos citados acima, sendo formadas por três grupos principais de segmentos nos membros, que são coxa, o fêmur e a tíbia. A Figura 5 mostra a estrutura da pata de um inseto, para melhor visualização dos aspectos descritos acima.

Figura 5 – Diagrama da perna dianteira de uma barata



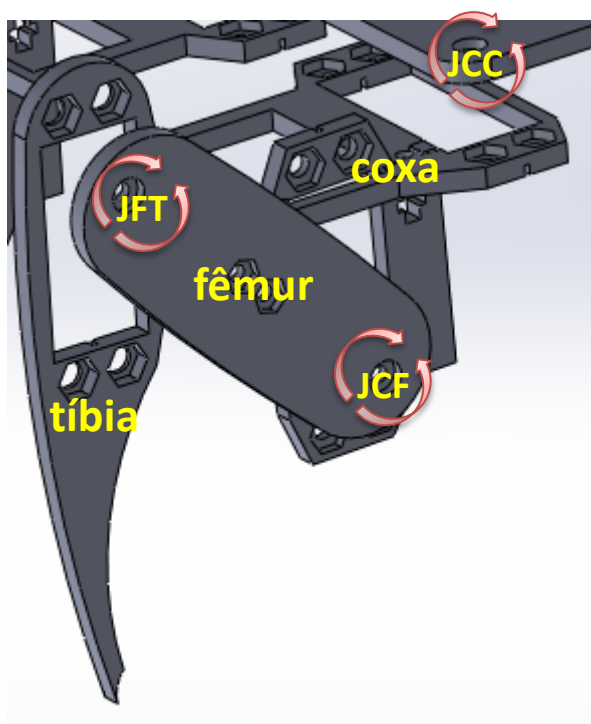
Fonte: QUINN; RITZMANN, 1998.

Para este projeto, alguns dos segmentos apresentados na Figura 5 foram omitidos, como os segmentos tarsais. Apesar dessa omissão causar uma perda na reprodução dos movimentos, prejudicando a cinemática, ela permite a redução da complexidade do projeto uma vez que a quantidade de variáveis a serem controladas se torna menor. Dessa forma, serão mantidos apenas os segmentos considerados essenciais para a realização do movimento satisfatoriamente. Estes segmentos são tíbia, fêmur e coxa.

Definidos, então, os segmentos que farão parte da estrutura deste projeto, é necessário determinar o número de articulações por membro. Primeiramente, foi definida uma articulação que permitia a movimentação da pata para frente e para trás com relação ao corpo,

devendo, então, ser situada na junção entre o dorso do robô e a coxa. A segunda articulação escolhida permite que o fêmur se mova para cima e para baixo com relação à coxa, devendo ser situada entre a coxa e o fêmur. A terceira articulação permite a movimentação para cima e para baixo da tíbia com relação ao fêmur, e é situada entre a tíbia e o fêmur. A primeira articulação (JCC), a segunda articulação (JCF) e a terceira articulação (JFT) são mostradas no esquema da Figura 6, bem como os sentidos de movimentação das mesmas.

Figura 6 – Exemplificação das articulações das patas do robô deste projeto.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O modelo de pata com as articulações escolhidas, apesar de ser a configuração mais comum encontrada em robôs deste tipo, não é obrigatório, podendo-se criar robôs que também consigam se locomover com menos ou mais articulações que o robô em questão.

2.1. Locomoção de robôs com pernas e estabilidade

Segundo Gonzáles, Garcia e Estremeira (2006, p.13-14), a forma de locomoção de robôs com patas podem ser classificadas, basicamente, de duas formas distintas como: marcha contínua (*continuous gait*) ou descontínua (*descontínuos gait*). A primeira se caracteriza pelo movimento constante do corpo do robô, onde todas as pernas movem-se simultaneamente e a

marcha descontínua é caracterizada por uma movimentação sequencial das pernas e do corpo, onde o corpo é impulsionado para frente/trás com todos os pés seguramente colocados no chão e as pernas são transferidas uma de cada vez. O protótipo construído neste projeto realiza a marcha do tipo descontínua.

Uma vez identificado e definido o tipo de marcha que o robô irá executar, é preciso avaliar de que forma o robô deverá se locomover para que este não perca sua estabilidade, sendo esta questão uma das principais dúvidas que surgem durante a concepção de um robô com pernas.

No livro *Quadrupedal locomotion* (GONZÁLES; GARCIA; ESTREMEIRA, 2006, p.33), é explicada a existência de dois diferentes conceitos de estabilidade. A estabilidade estática explica que um robô é estaticamente estável se a projeção horizontal de seu centro de gravidade (COG) permanecer dentro de um polígono de suporte. Já a dinâmica considera toda a dinâmica intrínseca de locomoção do robô para o alcance da estabilidade. Esta última é aplicada a sistemas de marcha contínua, onde o momento do robô devido ao movimento e as forças resultantes da interação das pernas com o solo compensam o torque realizado pela gravidade.

A ideia de estabilidade estática foi inspirada por insetos que, usando suas pernas extremamente leves, suportam o peso do seu corpo ao mesmo tempo que proporcionam propulsão, mantendo seu balanço através da sua sequência de movimentos. Em contrapartida, a escolha da estabilidade estática, apesar de facilitar o controle da locomoção do robô, penaliza sua velocidade. Dessa forma, a única maneira de aumentar a velocidade de locomoção do robô é considerar sua dinâmica ao realizar o controle de estabilidade (GONZÁLES; GARCIA; ESTREMEIRA, 2006, p.33).

Tendo escolhido para este projeto uma forma de movimentação intermitente (marcha descontínua), e sabendo da alta complexidade que a consideração da dinâmica intrínseca do robô pode gerar para o controle de sua movimentação, será aplicada neste projeto apenas a estabilidade estática. De acordo com Gonzáles, Garcia e Estremeira (2006, p.34), o primeiro critério de estabilidade estática para uma máquina andante ideal a uma velocidade e direção constante, proposto por McGhee e Frank (1968), é chamado de Método de Projeção do Centro de Gravidade.

O Método de Projeção do COG afirma que o robô será estaticamente estável se a projeção horizontal do seu COG reside no interior do polígono de suporte, definido como polígono

convexo formado pela conexão das pegadas. A Figura 7, da próxima subseção, permite uma boa visualização do polígono de suporte na locomoção do robô deste projeto.

Para manter a estabilidade do protótipo construído neste projeto, além de cuidar para que o centro de gravidade estivesse dentro do polígono de suporte, o robô teve de sofrer uma inclinação para o lado oposto ao da perna que seria levantada, uma vez que os motores utilizados tornaram as pernas do robô relativamente pesadas.

2.2. Geração de marcha descontínua

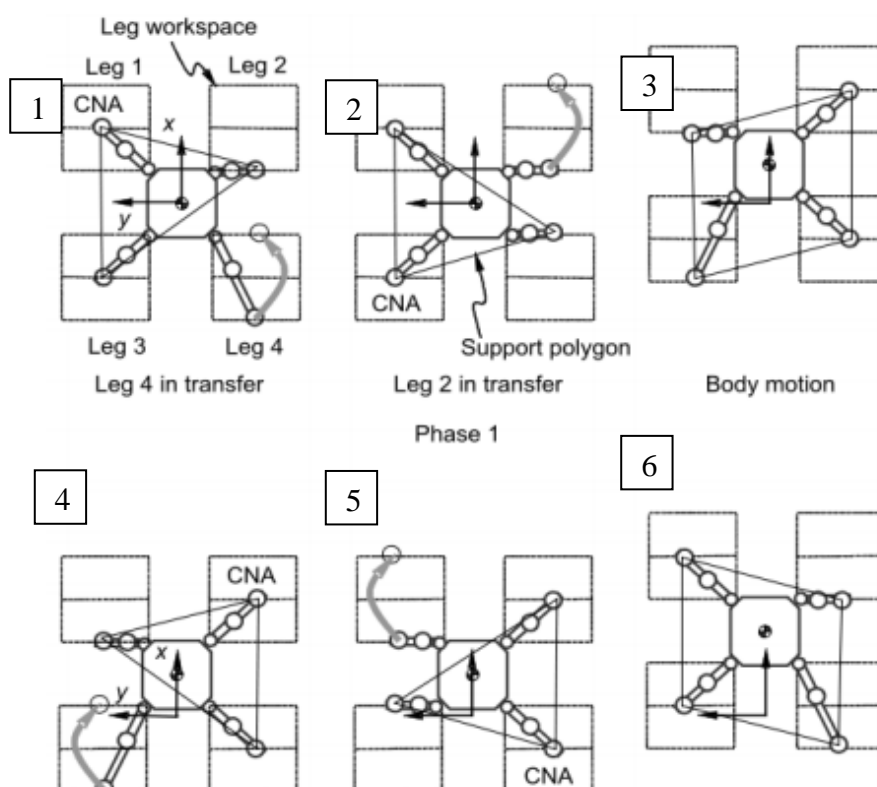
O padrão de caminhada utilizado neste trabalho foi baseado no padrão existente também no livro *Quadrupedal locomotion*, já citado anteriormente. O mesmo livro (GONZÁLES; GARCIA; ESTREMER, 2006, p.63-64) afirma que na geração de marchas descontínuas e periódicas para robôs de quatro patas, alguns aspectos, citados abaixo, devem ser considerados:

- Caso uma perna em sua fase de suporte atinja o limite posterior do seu espaço de trabalho (limite cinemático), tal perna deve mudar para a fase de transferência para ser colocada no limite frontal de seu espaço de trabalho. Isso pode ser visto na Figura 7, onde a perna posterior direita chega à posição estendida e é, em seguida, movida para a posição horizontal.
- O corpo deve ser impulsionado para frente com todas as pernas no chão. Terminado o movimento do corpo, a última perna deve ficar no limite posterior de sua área de trabalho para realizar a fase de transferência no movimento da próxima perna. Na Figura 7, após a perna frontal direita ser movida para a extremidade de seu espaço de trabalho, o corpo é movimentado, resultado na posição do quadro 3.
- A perna que é contralateral e não adjacente (CNA) à perna atualmente em transferência deve ser colocada em um ponto tal que depois de colocada a perna de transferência, o COG fique no polígono de suporte. Desta forma, é possível levantar a outra perna enquanto mantém a máquina estável. No quadro 1 da Figura 7, a perna movimentada é a posterior direita, e a CNA é a frontal esquerda, e é possível observar que o COG permanece dentro do polígono de suporte.

- A sequência de eventos deve ser periódica. Isso permitirá que vários ciclos de locomoção se juntem para seguir um caminho. A Figura 7 mostra os movimentos que devem ser realizados em um período e, para que o movimento seja contínuo, este ciclo de um período deve ser executado continuamente.

Os critérios citados anteriormente são aplicáveis à marcha descontínua de duas fases, e são exemplificados na imagem que segue, onde é possível ver o limite de trabalho de cada perna, seu centro de gravidade contido dentro do polígono de suporte, o que permite que o robô seja capaz de locomover suas respectivas pernas sem que o mesmo caia, bem como as possíveis movimentações e posições da pata e do tronco na locomoção para frente. Este tipo de marcha de duas fases é assim chamada pois são feitos dois movimentos do corpo por ciclo de locomoção.

Figura 7 – Padrão de locomoção sucessivo para uma marcha descontínua de duas fases.



Fonte: GONZÁLES; GARCIA; ESTREMER, 2006, p.35.

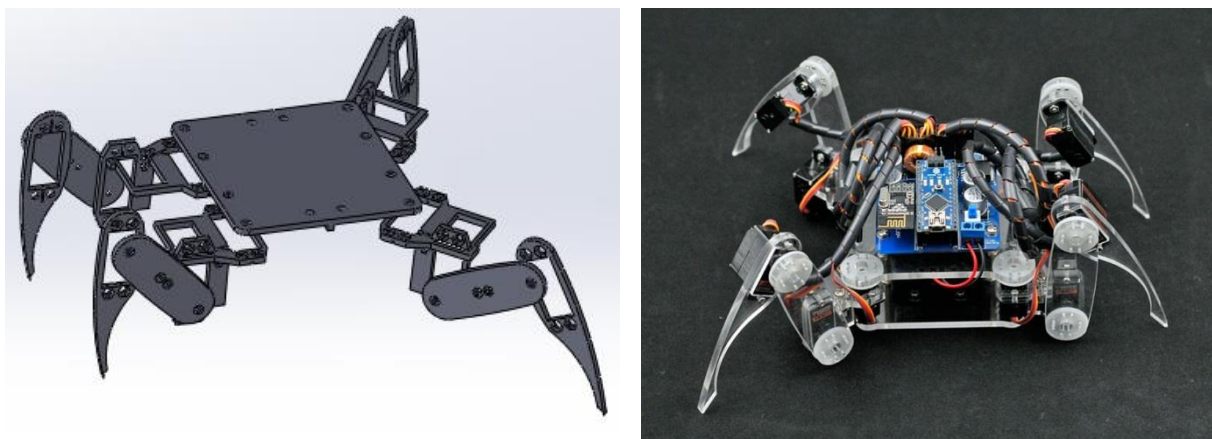
O ciclo mostrado na Figura 7 pode ser descrito da seguinte forma:

- Quadro 1- Posição inicial do robô, onde as pernas de apoio formam o polígono de suporte contendo o COG, e a perna que se encontra na extremidade de seu espaço de trabalho é a posterior direita. Esta é movimentada para frente, fazendo com que o robô fique na posição mostrada no Quadro 2.
- Quadro 2- A perna que entra em movimento agora é a frontal direita, e as demais pernas formam o polígono de suporte, novamente contendo o COG. Após o movimento da perna frontal direita, o dorso do robô é movimentado para frente com as pernas no chão, fazendo com que o robô adquira a posição mostrada no quadro 3, o que caracteriza um deslocamento para frente. Isto pode ser observado no eixo mostrado no dentro do dorso do robô. Obviamente, o polígono de suporte quando as 4 pernas estão no chão contém o COG.
- Quadro 4- Este quadro apresenta a mesma posição do quadro 3, e neste quadro a perna que é movimentada é a posterior esquerda, o que faz com que agora o robô esteja na posição do Quadro 5.
- Quadro 5- Quando o robô está nesta posição, a perna frontal esquerda é movimentada e, em seguida, o dorso do robô novamente se move com as demais pernas no chão, fazendo com que o robô adquira a posição mostrada no Quadro 6.
- Quadro 6- O robô concluiu um ciclo de movimento, tendo aqui a mesma posição vista no Quadro 1.

2.3. Estrutura física do robô tetrápode deste projeto

O robô de quatro patas construído teve suas peças baseadas em um robô tetrápode vendido pela empresa *Sunfounder* (SUNFOUNDER, 2016), produzido em acrílico, sendo vendido como um kit chamado *Crawling Quadruped Robot Kit for Arduino*, em sua loja online. Este robô possui três articulações por pata, bem como três segmentos. A *Sunfounder* é uma empresa de tecnologia que fabrica protótipos do tipo *open source* objetivando o desenvolvimento da educação e de novos produtos no que diz respeito à área de robótica. Na Figura 8 pode-se ver o robô de quatro patas do kit vendido pela *Sunfounder* e, ao lado, o *design* do robô construído neste projeto.

Figura 8– *Design* do robô deste projeto e robô do kit *Crawling Quadruped Robot Kit for Arduino*, vendido pela *Sunfounder*.



Fonte: Produzido pelo próprio autor, e SUNFOUNDER, 2016.

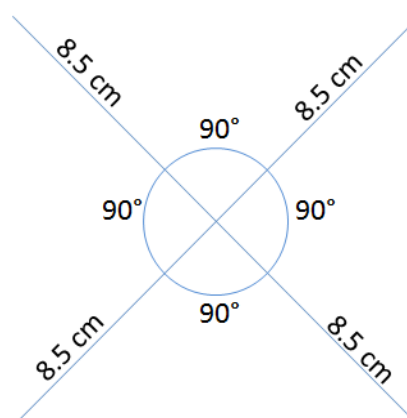
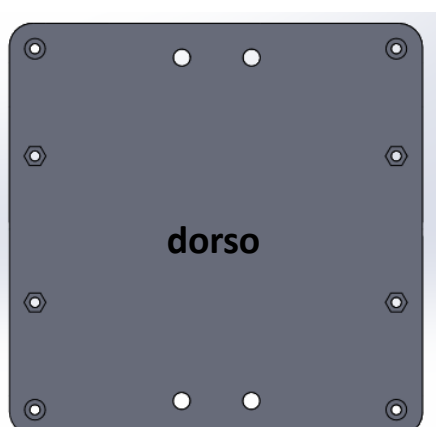
No projeto feito neste trabalho, as peças projetadas no *SolidWorks*, baseadas no robô mostrado na Figura 8 (direita), foram adaptadas em dimensões e algumas em formato para que fossem adequadas ao tamanho do motor utilizado e às necessidades do robô construído. Em cada uma das pernas foram usadas três articulações, onde cada uma dessas articulações é controlada por um servo motor. Na Figura 9, é possível visualizar o *design* do dorso, da coxa, da tíbia e do fêmur do protótipo em 3D e seu modelo cinemático correspondente.

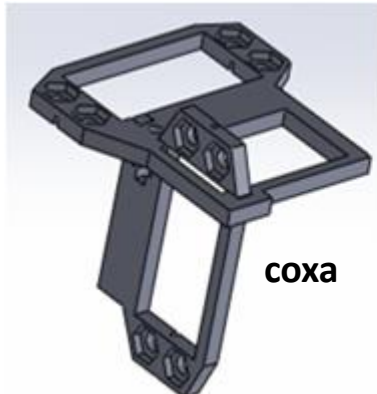
O segmento coxa, que pode ser visto na Figura 9(c), une a tíbia ao dorso, tendo dimensões suficientes e *design* adequado para tornar possível o encaixe dos dois motores das articulações corpo-coxa e coxa-fêmur.

Figura 9 – *Design* do robô tetrápode feito para este projeto.

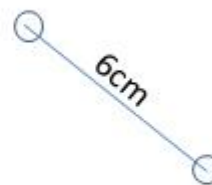
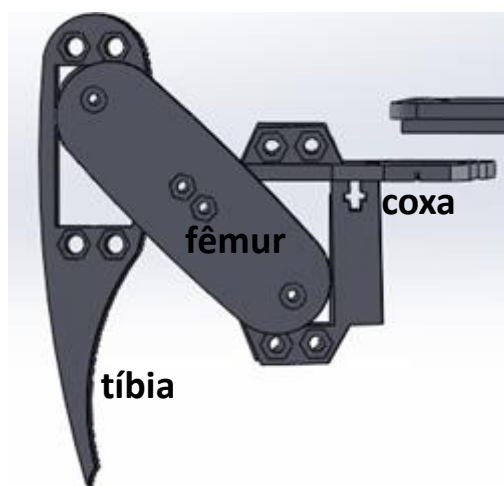
a) Modelo do dorso feito no *SolidWorks*.

b) Modelo cinemático equivalente do dorso.

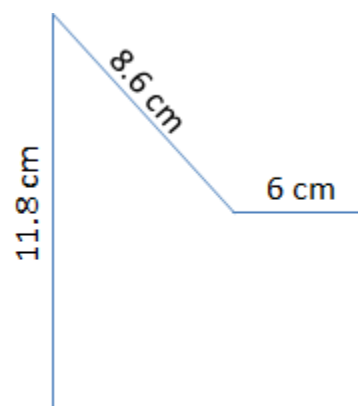


c) Modelo da coxa feito no *SolidWorks*.

d) Modelo cinemático equivalente da coxa.

e) Modelo da tíbia e do fêmur feito no *SolidWorks*.

f) Modelo cinemático equivalente da tíbia e do fêmur.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

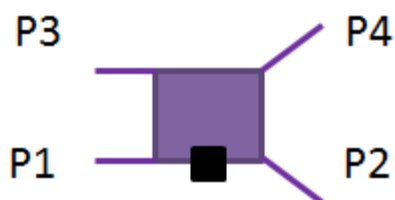
Todas as peças projetadas, exceto o dorso e a coxa, que é simétrica, tem uma versão espelhada formando o par de pernas frontais e posteriores. No Anexo A, podem ser encontradas as peças projetadas em maiores detalhes.

2.4. Cálculo dos ângulos de movimentação

Após o design das peças, de acordo com o tamanho do motor comprado, e a impressão destas na impressora 3D, existente no Laboratório CISNE, a etapa seguinte consistia na definição dos ângulos máximo, mínimo e os intermediários necessários para viabilizar a movimentação de todas as pernas e do dorso e, assim, a locomoção do robô para frente, para a direita e para a esquerda. Dessa forma, a partir do estudo de estabilidade e tipo de

marcha definido, e ainda, com base na Figura 7 mostrada anteriormente, foi definida a posição inicial do robô e todos os demais ângulos e posições dos membros. Na Figura 10, é mostrada a posição inicial, assumida pelo robô no começo e no final de todo o ciclo de movimento:

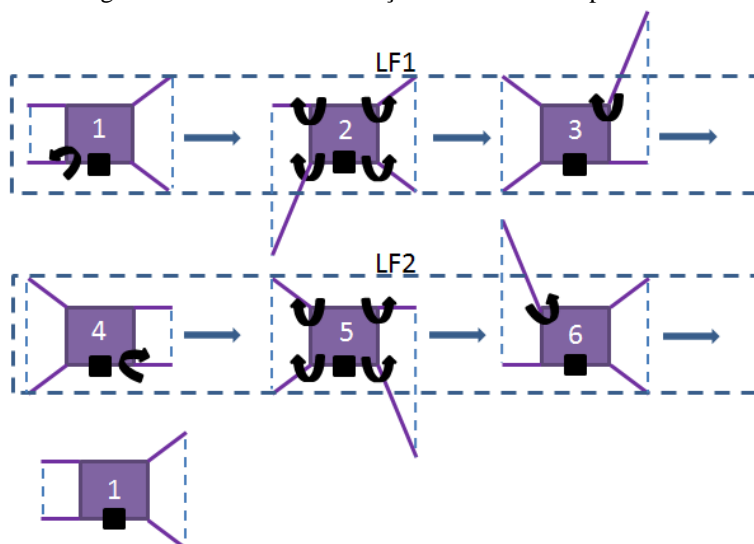
Figura 10 – Posição inicial do robô e nomenclatura adotada para cada pata.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O primeiro ciclo de locomoção definido foi o que possibilitava o protótipo se locomover para frente. Assim, foram calculados os deslocamentos angulares necessários de cada perna, e com isso obtido o diagrama mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Ciclo de locomoção do movimento para frente.



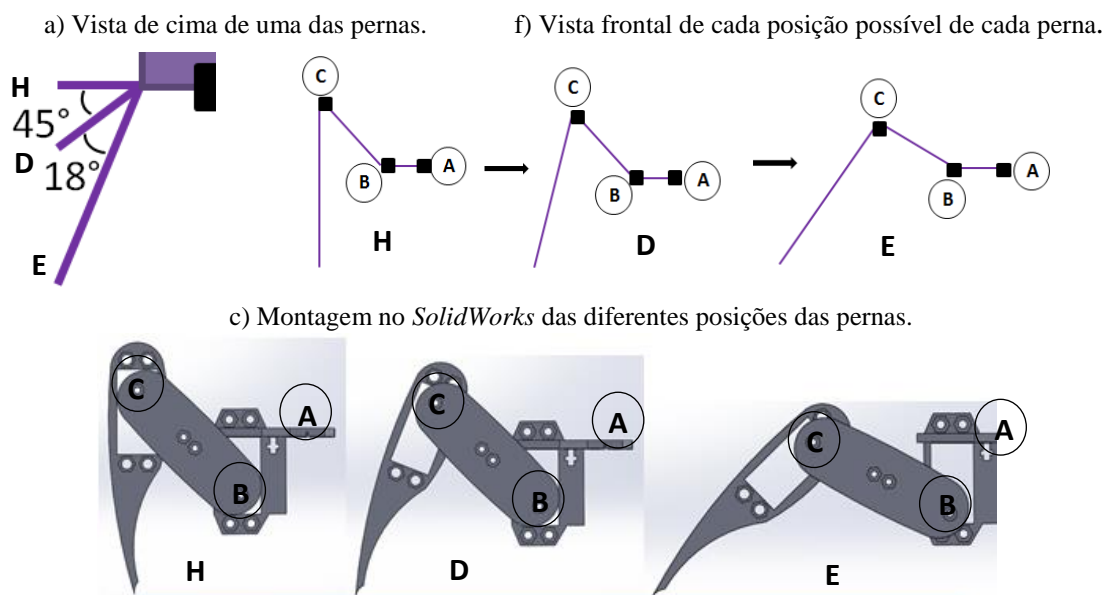
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O ciclo de locomoção para frente possui seis estados de movimento e foi dividido em dois diferentes momentos: locomoção para frente 1 (LF1) que, quando concluído, faz com que o robô fique no estado 4, e locomoção para frente 2 (LF2) que, ao final, retorna

o robô para a posição inicial. Essa divisão dos estados em dois grupos permite realizar a mudança do tipo de locomoção (frente, esquerda e direita) durante a execução de cada ciclo, que será melhor explicada adiante. As setas curvas presentes na Figura 11 indicam quais motores serão movidos em cada estado, o que irá gerar a posição do estado seguinte.

Na Figura 12, é possível ver um esboço mais detalhado das posições que as pernas podem assumir neste tipo de locomoção, onde é apresentada uma vista de cima e vistas frontais.

Figura 12 – Diferentes posições das pernas.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

No ciclo de movimento apresentado na Figura 11, todas as patas passam pelas posições diagonal (D), horizontal (H) e estendida (E), mostradas na Figura 12. Além disso, as extremidades das tíbias que tocam o chão das duas patas de um mesmo lado (P1 e P3 do lado esquerdo e P2 e P4 do lado direito) estão sempre alinhadas. Isto caracteriza o espaço de trabalho de cada pata e é demonstrado na Figura 11 pelas linhas verticais conectando as extremidades das patas P1 e P3, bem como P2 e P4.

O espaço de trabalho de cada uma das patas é muito bem exemplificado na Figura 7, sendo este indicado pelos quadrados que envolvem cada uma das patas. As patas, além de posições diferentes, possuem alcances distintos e, conseqüentemente, diferentes comprimentos de suas projeções no chão, sendo a pata em posição horizontal a de

menor comprimento e a pata estendida a de comprimento máximo. Isto também pode ser observado na Figura 12, que mostra a nomenclatura adotada para os motores de cada uma das junções. Os motores das JCC serão chamados de “A”, os das JCF de “B” e os das JFT de “C”.

As etapas da locomoção para frente, mostradas na Figura 11 podem ser mais detalhadas como:

- Estado 1- Neste Estado, o robô possui a posição inicial, e a perna que irá se mover neste estado para alcançar o próximo é a P1, mudando sua posição de horizontal para estendida.
- Estado 2- O Estado 2 é um dos estados em que ocorre o movimento do dorso do robô, caracterizando um avanço do centro de gravidade para frente. Nesta etapa, todos os motores são acionados ao mesmo tempo e, dessa forma, todas as pernas se movimentam, alterando suas posições e adquirindo, assim, as posições mostradas no Estado 3.
- Estado 3- Neste estado, a perna 3 (P3) é movimentada, saindo da posição estendida para a posição horizontal, concluindo assim o primeiro ciclo de movimento de locomoção para frente, e fazendo com que o robô assuma a posição do Estado 4. A partir desta posição, o robô poderá mudar seu tipo de movimento, indo para o segundo ciclo de movimento das locomoções para esquerda ou para a direita, como será mais detalhado adiante.
- Estado 4- No estado 4, é realizado o movimento da perna 2 (P2), que muda da posição horizontal para a posição estendida, assumindo, então, a posição apresentada no estado 5.
- Estado 5- Novamente, no estado 5 é feita a movimentação do dorso, onde todas os motores são acionados e todas as pernas movimentadas, levando o robô a assumir a posição do estado 6 e deslocando o dorso ainda mais para frente.
- Estado 6- No último estado em que ocorre movimento, a perna 3 (P3) muda sua posição de estendida para horizontal, fazendo com que o robô retorne à posição inicial. Assumindo novamente a posição inicial, é possível, mais uma vez, mudar seu tipo de movimento, podendo executar o primeiro ciclo de movimentos das locomoções para direita ou para a esquerda.

A defasagem entre a posição horizontal e diagonal das patas é de 45° , entre a posição horizontal e estendida é 63° e, por conseguinte, entre a posição diagonal e estendida é de 18° , o que também é mostrado na Figura 12. Tais valores são somados ou subtraídos da posição recorrente do motor da junção corpo-coxa (A), dependendo da perna em que o motor se encontra. Para o motor da junção coxa-fêmur (B), a defasagem entre a posição diagonal e horizontal da pata é zero, entre a posição diagonal e estendida e a posição horizontal e estendida é de 30° . Finalmente, para o motor da junção fêmur-tíbia, a defasagem entre a posição horizontal e diagonal é de 20° , entre a posição diagonal e estendida é de 60° e entre a posição horizontal e estendida é de 80° . Essas defasagens angulares são detalhadas na Subseção 3.2.

Tabela 1 – Defasagem entre as posições diagonal (D), estendida (E) e horizontal (H), sendo esta última considerada a posição referência.

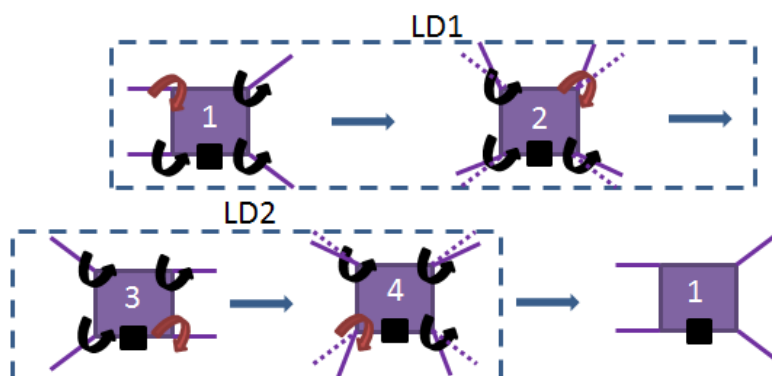
| Motor | Perna 1 e 4 | | | Perna 2 e 3 | | |
|-------|-------------|-----|--------|-------------|-----|--------|
| | D | H | E | D | H | E |
| A | $x-45$ | x | $x-63$ | $x+45$ | x | $x+63$ |
| B | y | y | $y+30$ | y | y | $y-30$ |
| C | $z+20$ | z | $z+80$ | $z-20$ | z | $z-80$ |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

As defasagens do motor B (JCF) e C (JFT), mostradas na Tabela 1, foram obtidas testando-se posições no robô já montado e com a posição do eixo do servo motor já ajustada para permitir a amplitude de movimento angular desejada. Este ajuste será explicado detalhadamente também na Subseção 3.2.

O seguinte ciclo de locomoção definido foi o que possibilitava o robô girar em sentido horário, ou para a direita. Da mesma forma que a anterior, foram calculados os ângulos referentes a essa movimentação e, assim, obtido o diagrama mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Ciclo de locomoção do movimento de giro em sentido horário.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Observando a Figura 13, é possível notar que o tipo de locomoção em questão possui 4 diferentes estados de movimentação. Da mesma forma como no tipo de locomoção explicado anteriormente, este também foi dividido em dois momentos: locomoção para a direita 1 (LD1), que quando concluído faz com que o robô fique com a posição do estado 3, e a locomoção para a direita 2 (LD2), a qual faz com que o robô retorne para a posição inicial quando concluída.

Através da Figura 13 já é possível perceber que as posições dos estados iniciais de cada um dos dois momentos do tipo de locomoção para frente e para a direita são iguais, bem como a posição gerada ao final de cada um desses momentos. Isso permite a mudança do tipo de locomoção de um para o outro. Por exemplo, se o robô está virando para a direita executando a segunda etapa do seu ciclo (LD2) e recebe o comando para começar a andar para frente, o robô iniciará o ciclo de locomoção para frente a partir da primeira etapa do seu ciclo de locomoção (LF1), uma vez que a posição resultante de LD2 é a posição inicial de LF1.

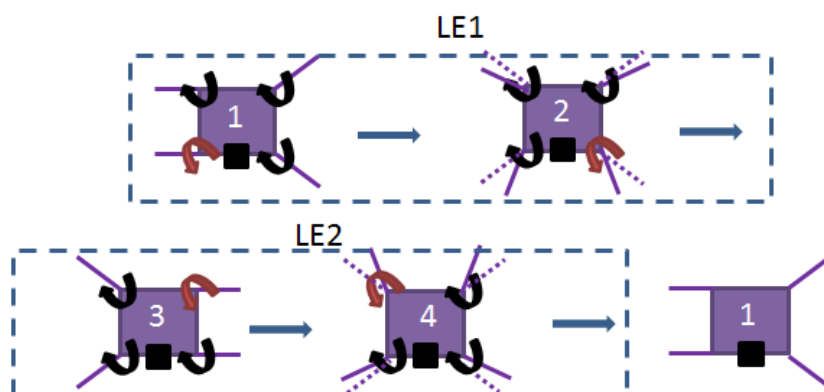
Outra característica a se notar na Figura 13 é o posicionamento de suas patas nos diferentes estados apresentados. As linhas pontilhadas nos estados 2 e 4 servem para mostrar que nesses dois estados as patas estão em uma posição intermediária com relação às posições diagonal e horizontal. Também é interessante notar que, ao realizar o movimento de giro, em todos os estados todos os motores se movem, sendo que 3 se movem com o mesmo sentido, e um deles se move no sentido oposto.

A perna correspondente ao motor que se move em sentido oposto aos demais será sempre a perna que terá o maior deslocamento angular, sendo este deslocamento angular de 67.5° no

sentido horário. Os demais motores se movem 22.5° em sentido anti-horário, o que faz com que as patas fiquem na posição intermediária, citada anteriormente. O deslocamento angular dos motores que giram no sentido anti-horário é subtraído da posição recorrente destes motores, e o no sentido horário é somado.

Por fim, o último ciclo de locomoção definido foi o que possibilitava o robô girar em sentido anti-horário, ou para a esquerda. Os deslocamentos angulares realizados pelos motores neste tipo de ciclo são iguais ao ciclo da locomoção em sentido horário, bem como seu número de estados, sendo alterados apenas os sentidos dos deslocamentos, que agora são opostos ao do caso imediatamente anterior. O diagrama deste ciclo pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Ciclo de locomoção do movimento de giro em sentido anti-horário.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Assim como nos casos citados acima, este tipo de locomoção também foi dividido em dois momentos distintos: locomoção para a esquerda 1 (LE1) e locomoção para a esquerda 2 (LE2). Esses dois momentos têm o mesmo resultado ao final de sua execução e mesmo estado inicial que os outros dois casos já tratados. Com isso, torna-se viável intercambiar o tipo de locomoção entre os dois momentos do primeiro caso, do segundo e deste terceiro. Na Tabela 2, estão listados todos os estados e seus possíveis próximos estados, onde tal próximo estado é definido em função dos comandos externos recebidos pelo microcontrolador utilizado.

Tabela 2 – Estados e seus possíveis próximos estados.

| Estado atual | Próximos estados possíveis |
|--------------|----------------------------|
| LF1 | LF2 |
| | LD2 |
| | LE2 |

| | |
|------------|-----|
| LF2 | LF1 |
| | LD1 |
| | LE1 |
| LD1 | LD2 |
| | LF2 |
| | LE2 |
| LD2 | LD1 |
| | LF1 |
| | LE1 |
| LE1 | LE2 |
| | LF2 |
| | LD2 |
| LE2 | LE1 |
| | LF1 |
| | LD1 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

2 ESTRUTURA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Para tornar possível a locomoção do robô em questão, foram necessários vários dispositivos de *hardware* embarcados, pelos quais foi possível implementar os ciclos de locomoção mostrados anteriormente e controlar o protótipo. Em um robô, segundo Dudek (2011), os principais dispositivos de *hardware* de um robô são seus sensores e atuadores, que podem apresentar diversas configurações. Sendo assim, neste capítulo serão apresentados, de maneira mais detalhada, os dispositivos de hardware que foram necessários na execução deste projeto.

3.1. Servo motor e seu controle

Os servos motores são motores de posição controlada que operam com corrente contínua. Seu controle de posição é feito internamente através de dispositivos incorporados, como *drivers* de potência e um circuito lógico ou microcontrolador, que formam um sistema de controle em malha fechada, o que faz com que esse dispositivo seja de fácil utilização.

Segundo Santos (2007), um potenciômetro, ligado diretamente ao eixo do motor, mede a posição de tal eixo e possibilita que o circuito de controle compare o valor medido com o sinal de entrada e, se ou houver erro, ele altera a posição do eixo para compensá-lo e, assim, chegar à posição desejada, para então mantê-la. Isso possibilita o dispositivo em questão realizar movimentos de forma precisa e controlada. Abaixo, na Figura 15, são apresentados os componentes internos de um servo motor, e na Figura 16, é possível visualizar o posicionamento de tais componentes na caixa do servo.

Figura 15 – Componentes de um servo motor.



Fonte: EPUSP, 2014.

Figura 16 – Posicionamento dos componentes na caixa do servo motor.



Fonte: SANTOS, 2007.

De acordo com Heringer (2014, p.24), o motor existente na caixa do servo motor é um motor de corrente contínua do tipo ímã permanente, o qual, devido à ausência de bobina para gerar o campo, tem sua construção simplificada e de tamanho reduzido. O campo magnético é constante para qualquer valor de corrente de armadura.

O conjunto de engrenagens mostrado na Figura 16 reduz a rotação do motor, transferindo um torque maior ao eixo principal de saída, onde estas são movimentadas pelo motor de corrente contínua existente dentro da caixa do motor. Além disso, os servos motores possuem rotação limitada, indo normalmente de 0° a 180° , como é o caso dos motores utilizados neste projeto. Geralmente, todos os servos motores possuem um padrão de conexão e comunicação, sendo o mais utilizado o padrão Futaba. Na Figura 17, é mostrada uma imagem do motor utilizado, bem como seus fios de conexão.

Figura 17 – Motor servo usado neste projeto e seus fios para conexão.



Fonte: FELIPEFLOP, 2016.

As engrenagens do motor mostrado na Figura 17 são de metal, o que o torna mais robusto e resistente. O fabricante do motor utilizado não fornece especificações claras e confiáveis quanto às características do dispositivo. Dessa forma, os dados do vendedor são usados, ao invés dos dados do fabricante. As características técnicas dos motores são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações técnicas dos motores servos utilizados neste projeto.

| Especificações do Servo Motor modelo <i>TowerPro</i> MG995 | |
|---|--|
| Tensão de operação | 4.8 – 7.2 V |
| Tipo de engrenagem | Metálica |
| Modulação | Analógica |
| Velocidade de operação | 0.17s/60° (4,8V sem carga)/ 0.13s/60° (6V sem carga) |
| Torque | 13 kg.cm (4,8V) e 15 kg.cm (6V) |
| Faixa de rotação | 180° |
| Tamanho do cabo | 300mm |
| Dimensões | 40x19x43mm |
| Peso | 69g |

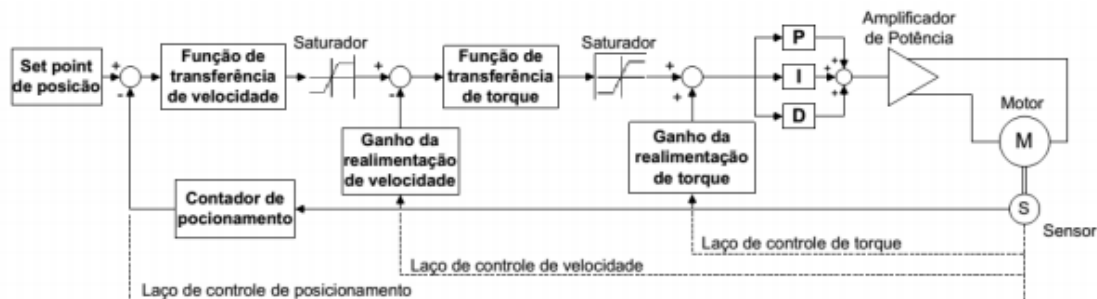
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2. Controle e ajuste dos ângulos dos servos motores

De acordo com Heringer (2014, p.18), o controle dos servos motores pode ser feito tendo-se como referência torque, velocidade ou posição. O controle em questão possui um regime em cascata, onde o parâmetro de posição gera uma referência para a velocidade que por sua vez gera referência de torque. A Figura 18 mostra que todos os

blocos possuem realimentação, o que torna o controle mais fino e preciso. Nela, também é possível observar uma malha de controle típica dos servomotores.

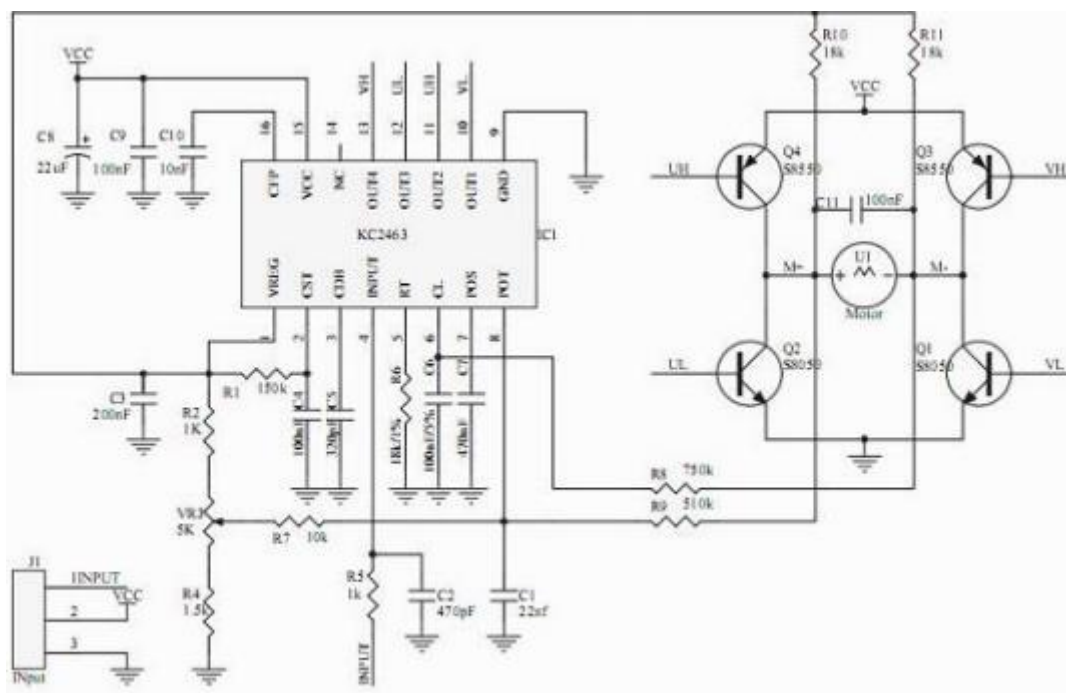
Figura 18 – Malha de controle típica de servomotores.



Fonte: ZUCATELLI; OLIVEIRA, 2007.

Na Figura 19, é possível visualizar um esquemático de um circuito integrado (CI), utilizado para controlar servomotores, e também o acionamento do motor que faz uso de uma ponte H formada por transistores IGBT's. Através do acionamento dos IGBT's, sinais são enviados ao servo motor. O chaveamento dos IGBT's é comandado por modulação de largura de pulso (PWM). A largura do pulso do sinal do tipo PWM define a posição que o motor irá manter.

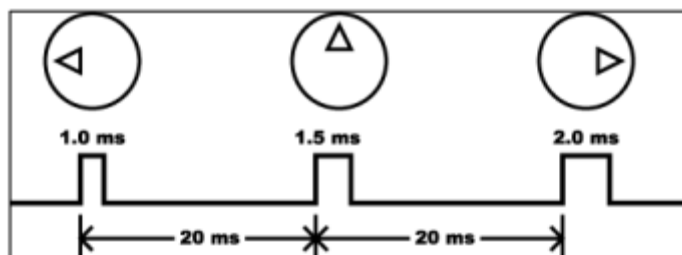
Figura 19 – Esquemático de um CI para controle de servomotores.



Fonte: CHENG TECHNOLOGY CO LTD, 20--.

No caso do servo motor deste projeto, é informado pelo vendedor que o pulso de 1 ms se refere a uma extremidade de giro do motor, 1.5 ms ao meio e 2 ms à outra extremidade de giro, os quais em graus correspondem a 180°, 90° e 0°, respectivamente. A Figura 20 mostra o diagrama de tempo do servo motor.

Figura 20 – Diagrama de tempo e posição do motor servo.



Fonte: DEMUTH, 2013.

Apesar das especificações de pulso informadas pelo vendedor, durante os testes foi observado que a temporização do motor era diferente da informada, bem como a amplitude de giro, sendo este último um pouco maior que o especificado. Os testes mostraram que a extremidades de giro correspondiam, em geral, a 0.5ms e 2.3ms. Dessa forma, durante as definições de posicionamento dos motores, buscando ângulos que atendessem adequadamente à montagem e locomoção desejada do robô, foram testadas as posições utilizando um *script* simples, implementado no próprio Arduino. Na Tabela 4, podem ser vistos os ângulos definidos para cada um dos motores, de forma que as patas ficassem em diagonal. É importante lembrar que os motores das junções JCC, JCF e JFT foram nomeados respectivamente de A, B e C, onde cada motor de cada junção é identificado por um número indicando a qual perna pertence (A1, por exemplo é o motor da JCC da perna 1).

Tabela 4 – Ângulos definidos para posicionar o robô com todas as patas em diagonal.

| Pernas em diagonal | |
|--------------------|------|
| P1 A1 | 60° |
| P1 B1 | 100° |
| P1 C1 | 30° |
| P2 A2 | 79° |
| P2 B2 | 48° |
| P2 C2 | 105° |
| P3 A3 | 82° |
| P3 B3 | 53° |
| P3 C3 | 98° |
| P4 A4 | 66° |

| | |
|--------------|-----|
| P4 B4 | 99° |
| P4 C4 | 42° |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A partir dos ângulos acima e das defasagens calculadas, explicitadas na Subseção (2.4), foram definidos os ângulos das demais posições das patas. Todos esses ângulos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Ângulos assumidos pelos motores quando as pernas ficam na posição H e E.

| Pernas horizontal | | Pernas estendidas | |
|-------------------|--------|-------------------|--------|
| P1 A1 | 60+45 | P1 A1 | 60-18 |
| P1 B1 | 100 | P1 B1 | 100+40 |
| P1 C1 | 30-20 | P1 C1 | 30+60 |
| P2 A2 | 79-45 | P2 A2 | 79+18 |
| P2 B2 | 48 | P2 B2 | 48-30 |
| P2 C2 | 105+20 | P2 C2 | 105-60 |
| P3 A3 | 82-45 | P3 A3 | 82+18 |
| P3 B3 | 53 | P3 B3 | 53-30 |
| P3 C3 | 98+20 | P3 C3 | 98-60 |
| P4 A4 | 66+45 | P4 A4 | 66-18 |
| P4 B4 | 99 | P4 B4 | 99+30 |
| P4 C4 | 42-20 | P4 C4 | 42+60 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Nas Tabelas 6, 7 e 8 são mostradas as sequências de ângulos enviadas aos motores que viabilizam as locomoções em sentido horário, anti-horário e para frente, respectivamente. As células pintadas em rosa indicam os motores que sofrerão a maior variação angular e deslocamento em sentido oposto aos demais para alcançar a posição do próximo estado, no caso dos movimentos para sentido horário e anti-horário, e quais motores são movimentados, no caso do movimento para frente. No Apêndice C é mostrado o diagrama de estados do robô, bem como o detalhe da movimentação de cada um dos motores através de tabelas.

Tabela 6 – Ângulos referentes sequência de movimento para girar no sentido horário.

| LOCOMOÇÃO EM SENTIDO HORÁRIO | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| - | Estado 1 | Estado 2 | Estado 3 | Estado 4 | Estado 1 |
| Perna 1 | Horizontal | Transição | Diagonal | Transição | Horizontal |
| Motor A1 | 60+45 | 60+45-22.5 | 60 | 60-22.5 | 60+45 |
| Motor B1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Motor C1 | 30-20 | 30-10 | 30 | 30-10 | 30-20 |
| Perna 2 | Diagonal | Transição | Horizontal | Transição | Diagonal |

| | | | | | |
|-----------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Motor A2 | 79 | 79-22.5 | 79-45 | 79+22.5 | 79 |
| Motor B2 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| Motor C2 | 105 | 105+10 | 105+20 | 105+10 | 105 |
| Perna 3 | Horizontal | Transição | Diagonal | Transição | Horizontal |
| Motor A3 | 82-45 | 82+22.5 | 82 | 82-22.5 | 82-45 |
| Motor B3 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 |
| Motor C3 | 98+20 | 98+10 | 98 | 98+10 | 98+20 |
| Perna 4 | Diagonal | Transição | Horizontal | Transição | Diagonal |
| Motor A4 | 66 | 66-22.5 | 66+45 | 66+22.5 | 66 |
| Motor B4 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Motor C4 | 42 | 42-10 | 42-20 | 42-10 | 42 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Tabela 7 – Ângulos referentes à sequência de movimento para girar no sentido anti-horário.

| LOCOMOÇÃO EM SENTIDO ANTI-HORÁRIO | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Estado 1 | Estado 2 | Estado 3 | Estado 4 | Estado 1 |
| Perna 1 | Horizontal | Transição | Diagonal | Transição | Horizontal |
| Motor A1 | 60+45 | 60-22.5 | 60 | 60+22.5 | 60+45 |
| Motor B1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Motor C1 | 30-20 | 30-10 | 30 | 30-10 | 30-20 |
| Perna 2 | Diagonal | Transição | Horizontal | Transição | Diagonal |
| Motor A2 | 79 | 79+22.5 | 79-45 | 79-45+22.5 | 79 |
| Motor B2 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| Motor C2 | 105 | 105+10 | 105+20 | 105+10 | 105 |
| Perna 3 | Horizontal | Transição | Diagonal | Transição | Horizontal |
| Motor A3 | 82-45 | 82-45+22.5 | 82 | 82+22.5 | 82-45 |
| Motor B3 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 |
| Motor C3 | 98+20 | 98+10 | 98 | 98+10 | 98+20 |
| Perna 4 | Diagonal | Transição | Horizontal | Transição | Diagonal |
| Motor A4 | 66 | 66+22.5 | 66+45 | 66-22.5 | 66 |
| Motor B4 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Motor C4 | 42 | 42-10 | 42-20 | 42-10 | 42 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Tabela 8 – Ângulos referentes à sequência de movimento de locomoção para frente.

| LOCOMOÇÃO PARA FRENTE | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Estado 1 | Estado 2 | Estado 3 | Estado 4 | Estado 5 | Estado 6 | Estado 1 |
| Perna 1 | Horizontal | Estendida | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Horizontal | Horizontal |
| Motor A1 | 60+45 | 60-18 | 60 | 60 | 60 | 60+45 | 60+45 |
| Motor B1 | 100 | 100+40 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Motor C1 | 30-20 | 30+60 | 30 | 30 | 30 | 30-20 | 30-20 |
| Perna 2 | Diagonal | Diagonal | Horizontal | Horizontal | Estendida | Diagonal | Diagonal |
| Motor A2 | 79 | 79 | 79-45 | 79-45 | 79+18 | 79 | 79 |

| | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| Motor B2 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48-30 | 48 | 48 |
| Motor C2 | 105 | 105 | 105+20 | 105+20 | 105-60 | 105 | 105 |
| Perna 3 | Horizontal | Horizontal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Estendida | Horizontal |
| Motor A3 | 82-45 | 82-45 | 82 | 82 | 82 | 82+18 | 82-45 |
| Motor B3 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53-30 | 53 |
| Motor C3 | 98+20 | 98+20 | 98 | 98 | 98 | 98-60 | 98+20 |
| Perna 4 | Diagonal | Diagonal | Estendida | Horizontal | Horizontal | Diagonal | Diagonal |
| Motor A4 | 66 | 66 | 66-18 | 66+45 | 66+45 | 66 | 66 |
| Motor B4 | 99 | 99 | 99+30 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Motor C4 | 42 | 42 | 42+60 | 42-20 | 42-20 | 42 | 42 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Os 12 servos motores do robô são alimentados com uma tensão entre 6 e 7 Volts, através de uma fonte, com corrente limitada em 6 Ampères.

3.3. A plataforma de prototipagem Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica, que possui seu projeto de *hardware* e *software* abertos, criados para tornar a construção de projetos eletrônicos em geral mais simplificada e acessível. A Figura 21 apresenta a arquitetura do Arduino.

Figura 21 – Arquitetura do Arduino.

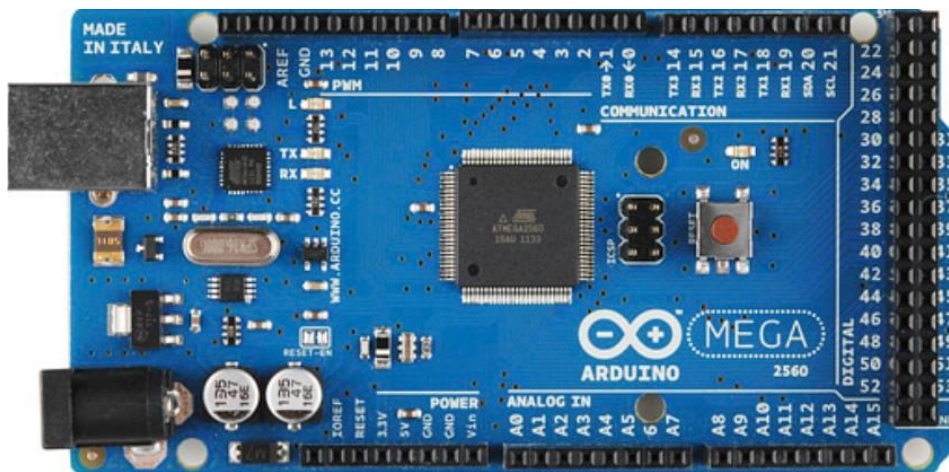


Fonte: HERINGER, 2014.

A plataforma Arduino pode ser encontrada em diversos modelos, diferenciados na capacidade do seu microcontrolador, na quantidade de memória ROM e nas quantidades de saídas e entradas disponíveis, descritas nas caixas de cor bege da Figura 21. Neste

trabalho, foi utilizado o Arduino Mega 2560, por ter o número de saídas digitais, possíveis de gerar sinais PWM em *hardware* (14 saídas, das quais foram utilizadas 12) com resolução de 16 bits e de serem usadas para comunicação serial, adequado para a realização deste projeto. A Figura 22 apresenta o modelo Arduino utilizado neste projeto.

Figura 22 – Arduino Mega 2560.



Fonte: KJP AUTOMATION, 2016.

O microcontrolador existente nesta placa é o ATmega, fabricado pela ATMEL, e nele é feito todo o processamento necessário. Ele apresenta memória RAM, memória programada (ROM), unidade de processamento aritmética e portas de entrada e saída. Mais adiante, será explicado o controle realizado pelo Arduino.

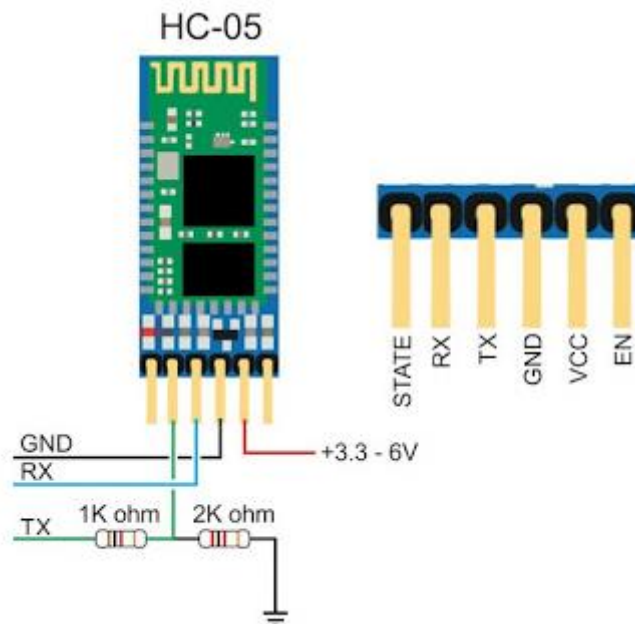
3.4. Comunicação entre o *Software* e o *Hardware*

A comunicação entre o *software* e o *hardware*, neste projeto, foi feita utilizando-se um módulo de comunicação *Bluetooth* de modelo RS232 HC-05, usado em modo escravo, ou seja, o módulo recebe conexões de outros dispositivos *Bluetooth*.

O módulo *Bluetooth* é alimentado por uma tensão contínua de 5V, onde, no caso deste projeto, será feita através do Arduino. Além disso, as portas de saída do Arduino fornecem um sinal em 5V e a porta RX do módulo de comunicação não tolera tensões maiores que 3.3V. Dessa forma, utilizou-se um divisor de tensão na saída do pino TX do microcontrolador, garantindo que a tensão no pino RX do módulo *Bluetooth* apresente valores aceitáveis. O circuito que mostra as conexões, inclusive o divisor de

tensão, pode ser visto na Figura 23 e as especificações técnicas do HC-05 podem ser vistas na Tabela 9.

Figura 23 – Esquema de ligação do HC-05.



Fonte: ELETRODEX, 2016.

Tabela 9 – Informações técnicas do servo módulo *Bluetooth* HC-05.

| Especificação | |
|------------------------------|----------------------------------|
| Protocolo Bluetooth | v2.0+EDR |
| Firmware | Linvor 1.8 |
| Frequência | 2.4GHz Banda ISM |
| Modulação | GFSK |
| Emissão de energia | $\leq 4\text{dBm}$, Classe 2 |
| Sensibilidade | $\leq 84\text{dBm}$ com 0.1% BER |
| Velocidade assíncrona | 2.1Mbps (Max)/160Kbps |
| Velocidade síncrona | 1Mbps/1Mbps |
| Segurança | Autenticação e Encriptação |
| Perfil | Porta Serial Bluetooth |
| Modos | Mestre/Escravo |
| CSR chip | Bluetooth v2.0 |
| Tensão | 3.3V (2.7-4.2V) |
| Corrente | Pareado 35mA; Conectado 8mA |

| | |
|----------------------------|-------------|
| Temperatura | -40 a 105°C |
| Alcance | 10m |
| Taxa de transmissão | 9600,8,1,n |

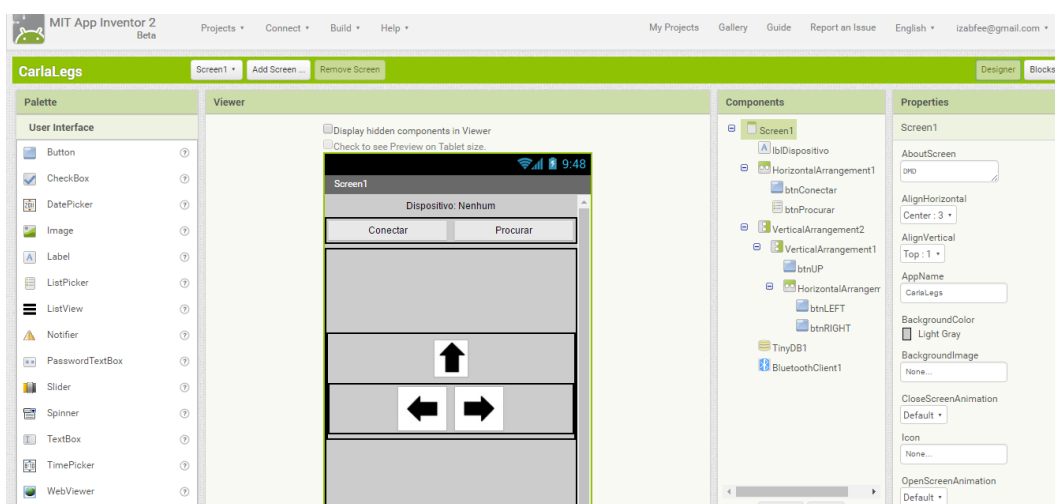
Fonte: FELIPEFLOP, 2016.

3.5. Interface com o usuário

A interface do usuário com o sistema foi feita através de um aplicativo de celular, criado para a plataforma *Android*, onde a comunicação entre o celular e o sistema eletrônico do robô é viabilizada pelo módulo *Bluetooth*, explicitado na Subseção 3.4. Basicamente, o aplicativo de celular envia os comandos para o módulo *Bluetooth*, o qual transfere as informações para o Arduíno através de suas portas seriais, possibilitando que o *hardware* execute os comandos desejados pelo usuário.

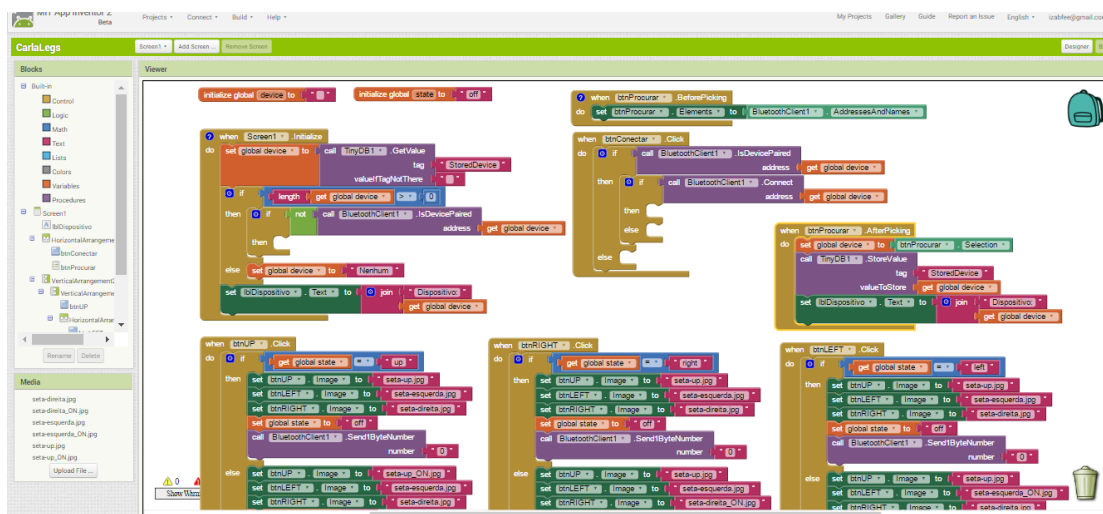
O aplicativo foi desenvolvido utilizando a plataforma de desenvolvimento de aplicativos criada pelo MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts): o *App Inventor 2*. Tal plataforma consiste na edição de blocos lógicos com rotinas prontas. Na Figura 24 e 25, são mostradas as interfaces do *App Inventor*, nas quais é possível visualizar a rotina de blocos de cada um dos botões criados, bem como a tela onde cria-se o layout do aplicativo.

Figura 24 – Interface do *App Inventor* para criar o layout do aplicativo.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 25 – Interface do *AppInventor* para criar a rotina do aplicativo.

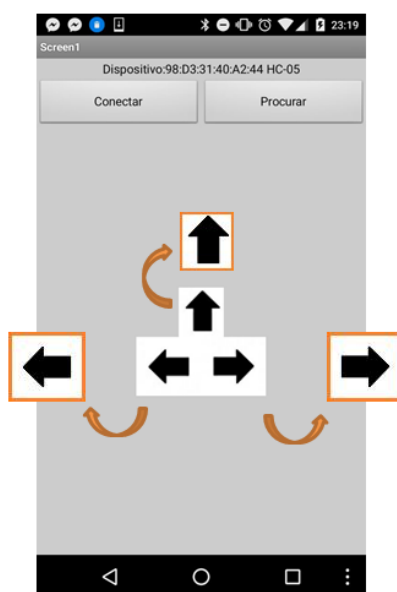


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O *display* do aplicativo, mostrado na Figura 26, possui um total de 5 botões, onde os dois botões superiores servem para conectar e desconectar o celular com o módulo HC-05, presente no sistema eletrônico embarcado no robô, e os outros três botões, localizados mais ao centro da tela, são utilizados para controlar a movimentação do robô. A seta que aponta pra cima indica o movimento para frente, e as setas que apontam para a direita e para a esquerda comandam o robô para girar para o lado apontado pela seta. As setas mudam seu entorno para laranja quando clicadas, indicando que o comando referente ao botão foi enviado.

Para abrir o aplicativo em um celular *Android*, é necessário ter o aplicativo MIT *AppInventor*. Este aplicativo abre a interface através da leitura do *QRcode* referente a mesma ou inserindo um código alfanumérico, também referente à interface criado.

Figura 26 – Interface do programa desenvolvido para o celular.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Além da tela principal, existe a tela que mostra a lista dos dispositivos encontrados pelo celular, a qual aparece após o botão “Procurar” ser clicado. A imagem desta tela pode ser vista na Figura 27.

Figura 27 – Tela mostrada após clicar em “Procurar”.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A lógica feita para o aplicativo serve, basicamente, para conectar o celular ao circuito eletrônico existente no protótipo. Assim, quando o aplicativo é aberto, este irá

inicializar duas variáveis: *device*, a qual foi utilizada para armazenar o nome do dispositivo ao qual o celular irá se conectar, e *state*, que irá assumir os possíveis estados “*up*”, “*left*”, “*right*” e “*off*” de acordo com o botão que é clicado. Através da manipulação de tais variáveis, o circuito eletrônico do robô será conectado ao celular e os comandos desejados serão enviados para, assim, realizar o controle do robô. Maiores detalhes podem ser encontrados no Anexo B.

3.6. O controle realizado pelo Arduíno e o acionamento dos motores

O Arduíno utilizado no projeto é responsável pela realização das principais tarefas que viabilizam o funcionamento correto do sistema como a leitura dos comandos recebidos através do módulo *Bluetooth* e o acionamento dos motores de acordo com os comandos recebidos.

Quando os botões presentes na tela principal do aplicativo são acionados, o aplicativo envia para o módulo *Bluetooth* uma *string*, que para os movimentos frente, direita e esquerda são “1”, “2” e “3”, respectivamente. Quando eles não estão clicados, o aplicativo manda a *string* “0”, o que faz com que o robô permaneça parado.

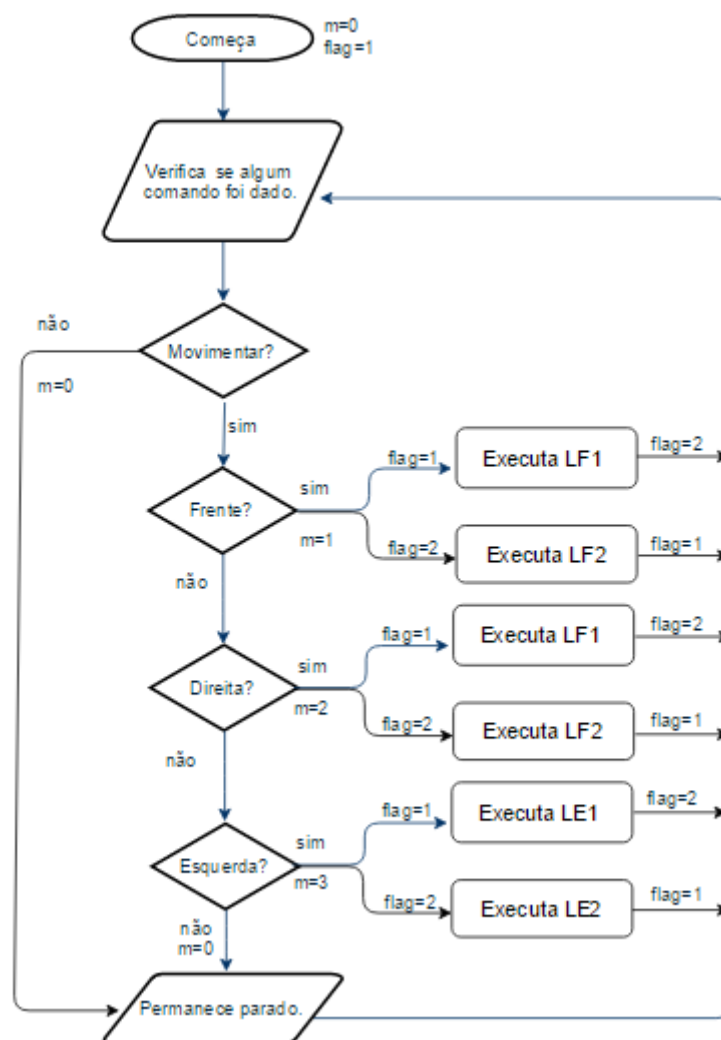
A Figura 28 mostra um fluxograma de como os movimentos são realizados de acordo com os comandos enviados. Nesta figura, são apresentadas as duas variáveis utilizadas para efetuar o controle dos movimentos: “*m*”, que indica o movimento a ser executado através do recebimento das *strings* “0”, “1”, “2” e “3”, e uma *flag*, que é utilizada para tornar possível a alternância entre os ciclos de movimentos (LF1, LF2, LD1, LD2, LE1 e LE2) durante a execução do programa, e permitir que o protótipo se movimente de uma maneira mais fluida.

A variável “*m*” é verificada constantemente, enquanto que a variável *flag*, quando o programa se inicia, é igual a “1”, e vai se alterando de acordo com o fluxo das rotinas. A *flag* de valor “1” indica que será efetuado o primeiro ciclo do movimento indicado pela variável “*m*” e, conseqüentemente, quando o valor é “2”, o segundo ciclo de “*m*” será efetuado.

O acionamento dos servos motores é feito utilizando-se a biblioteca *Servo*, a qual utiliza o *Timer5*, já existente para a plataforma Arduíno. Ela permite controlar os motores enviando apenas o valor ângulo referente à posição desejada através de seus pinos

digitais capazes de gerar sinais PWM, o que torna mais fácil a manipulação dos motores.

Figura 28 – Fluxograma ilustrando o funcionamento das rotinas implementadas através do Arduino.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3 TESTES E RESULTADOS

Através dos capítulos anteriores foi explicitado, de maneira geral, todo o processo de concepção do protótipo. Sendo assim, este capítulo procura explicar de maneira mais detalhada os testes realizados durante a execução do projeto.

4.1. Servo motor

Com as peças da estrutura finalizadas, deu-se início ao ajuste dos motores. Os motores foram ajustados por junção, tendo sido ajustados primeiramente todos os motores da junção corpo-coxa, os quais deveriam dar liberdade de movimentação angular de 45° para cada sentido (horário e anti-horário). Logo após, foram ajustados os motores das junções coxa-fêmur, os quais deveriam dar uma liberdade de movimentação de no máximo 30°, a partir da posição onde a perna se encontrava mais junto ao corpo (posição horizontal). Finalmente, foram ajustados os motores das junções fêmur-tíbia, os quais deveriam ter uma liberdade de movimentação de 80° a partir da posição horizontal.

A liberdade de movimentação angular de cada perna foi testada com o robô já montado, onde os eixos dos motores foram posicionados para proporcionar uma liberdade de movimentação maior que a desejada, possibilitando, assim, a definição dos ângulos de movimentação com base no padrão de locomoção, explicado no item 2.2.

Quando não energizados, os motores não sustentam uma posição, o que é caracterizado como falta de torque estático. Entretanto, quando energizados, os motores demonstraram ter torque suficiente para possibilitar a locomoção do robô e, quando todos estavam em funcionamento e conectados à uma tensão entre 6 a 7 Volts, drenavam uma corrente que podia atingir valores por volta de 6 Ampères.

Apesar de tais motores fornecerem um torque mais do que suficiente para viabilizar a locomoção do robô, estes tornaram as pernas do robô extremamente pesadas, em referência ao peso total do protótipo. Isto fere o conceito de uma das principais características apresentadas pela anatomia dos insetos, a qual indica que os mesmos possuem uma perna com massa desprezível. O problema causado por este fato e a solução encontrada são explicados na Subseção 4.4 que descreve os testes de caminhada.

4.2. *Script e interface com o usuário*

Neste projeto, inclui-se no *software* o *script* criado para a plataforma Arduino e a interface com o usuário, feita para o sistema operacional *Android*. Ambos foram feitos separadamente, para depois serem integrados.

Primeiramente, foi iniciada a produção do script, onde a lógica criada para viabilizar os movimentos foi testada através do *serial monitor* do Arduino, através do qual eram inseridos os comandos e verificados os valores dos ângulos ao longo de sua execução. Tendo alcançado o correto funcionamento da lógica, começou-se a criação da interface com usuário, onde os testes consistiam na realização das seguintes etapas:

- Criação da interface, através do *App Inventor 2*, contendo os botões desejados e da lógica referente à cada botão;
- Verificação se a interface estava agindo como desejado, como por exemplo, se um botão, quando clicado, alterava seu entorno para laranja;
- Teste de conexão entre o celular e o módulo *Bluetooth*;
- Teste de envio e leitura de comandos pelo Arduino.

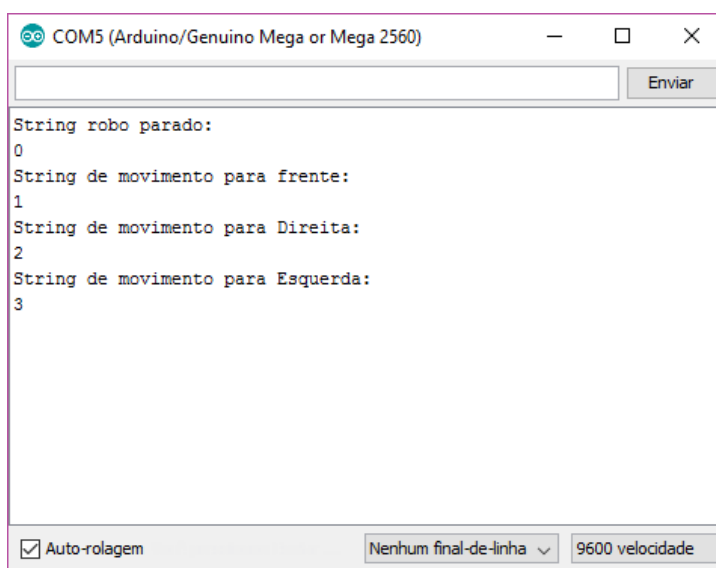
Para a realização dos testes com o módulo *Bluetooth* e o aplicativo do celular, foi criado inicialmente um código simples que atendesse apenas a esse propósito, o qual pode ser visto na Figura 29. Assim, através deste simples código, a interface foi testada, onde era impresso no *serial monitor* o dado que estava sendo enviado do aplicativo. Os principais erros que foram corrigidos eram referentes à velocidade de envio e recebimento de dados, que para o caso do HC-05 deve ser igual a 9600 *bits* por segundo, e que os dados lidos do aplicativo devem ser lidos como *string*. A Figura 30 mostra a impressão dos dados enviados pelo aplicativo ao Arduino através do módulo *Bluetooth* no *Serial Monitor*.

Figura 29 – Script utilizado para testar o recebimento de dados do celular através do módulo HC-05.

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial mySerial(53, 51); //RX, TX
String val=""; //Sinal do bluetooth
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  mySerial.begin(9600);
}
void loop() {
  if( mySerial.available() ){ val = mySerial.read(); }
  if(val == "0"){
    Serial.println("String robo parado:");
    Serial.println("0");
    val = "4";
  }
  if(val == "1"){
    Serial.println("String de movimento para frente:");
    Serial.println("1");
    val = "4";
  }
  if(val == "2"){
    Serial.println("String de movimento para Direita:");
    Serial.println("2");
    val = "4";
  }
  if(val == "3")
    Serial.println("String de movimento para Esquerda:");
    Serial.println("3");
    val = "4";
  }
}
```

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 30 – Dados enviados para o Arduíno e impressos no *Serial Monitor*.



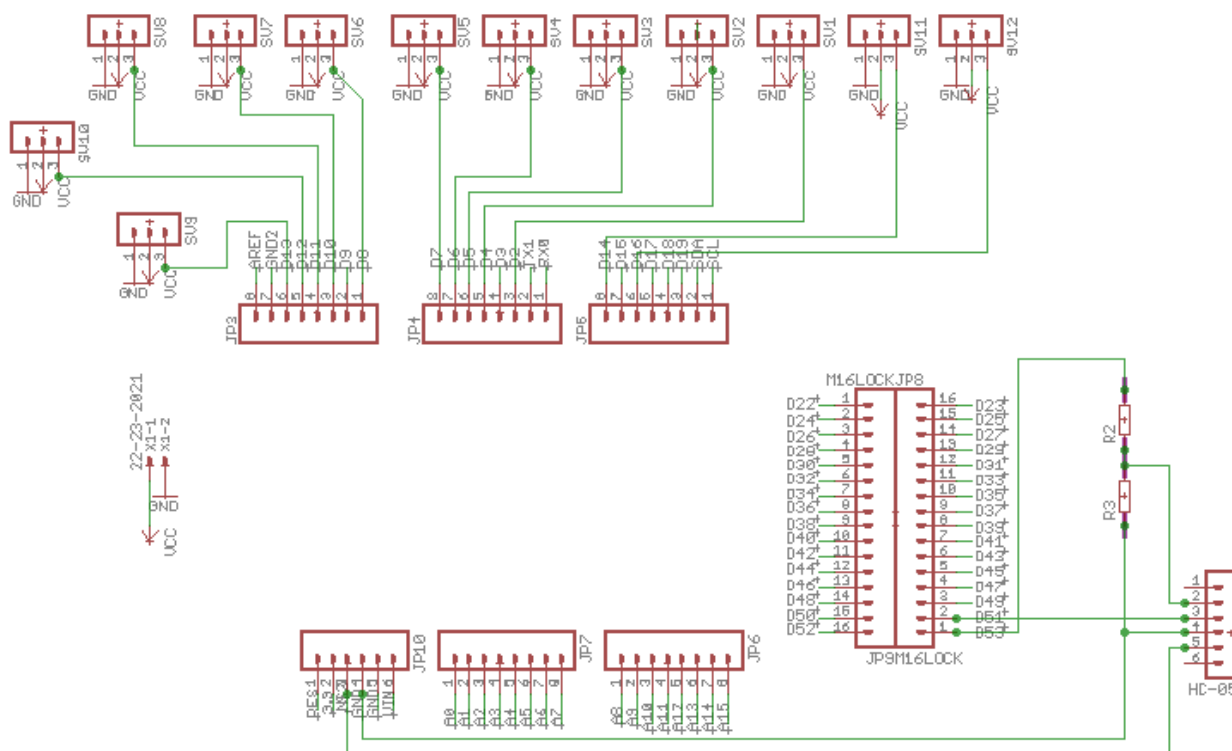
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Com *script* do padrão de locomoção e aplicativos finalizados, fez-se então a integração entre ambos, adicionando a biblioteca *SoftwareSerial.h* ao *script* da lógica de locomoção para a leitura dos dados enviados pelo aplicativo, permitindo o controle do robô através dos comandos enviados pelo aplicativo.

4.3. Hardware

O *hardware* deste projeto é composto por um Arduino Mega 2560, um módulo *Bluetooth* HC-05 e uma placa de circuito impressa feita para conectar os motores nos pinos do Arduino e na alimentação. O esquemático da placa pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Esquemático da placa de circuito impresso deste projeto.

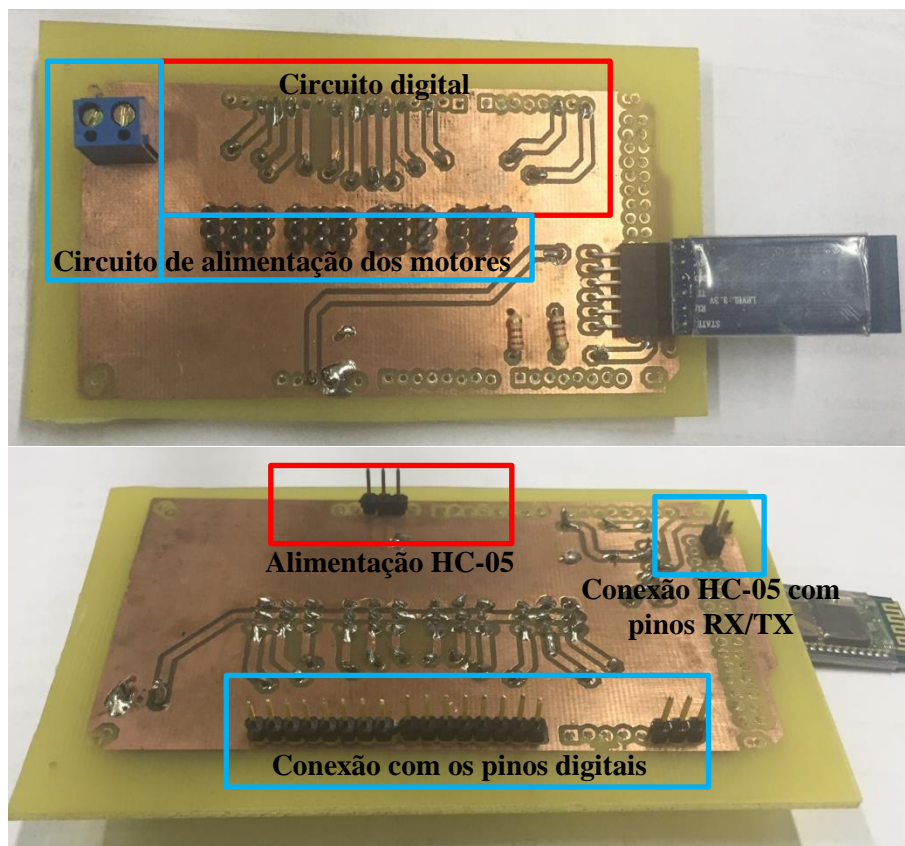


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A placa de circuito impressa foi feita artesanalmente e é dupla face pelo fato de possibilitar a conexão do Arduino, que ficará na parte de baixo, com os motores e o HC-05 que ficarão conectados na parte de cima. Sendo dupla face, foi necessário rotear as trilhas manualmente, sem utilizar a ferramenta de *autoroute* existente no *software Eagle*. Para viabilizar a conexão dos motores, Arduino e módulo *Bluetooth* com a placa, foram usados *pin-headers*, e a alimentação do circuito é feita através de uma fonte

externa, conectada à placa através de um fio de bitola de 1 mm, de 3 metros de comprimento. As imagens da placa finalizada podem ser vistas na Figura 32.

Figura 32 – Placa dupla face fabricada artesanalmente.

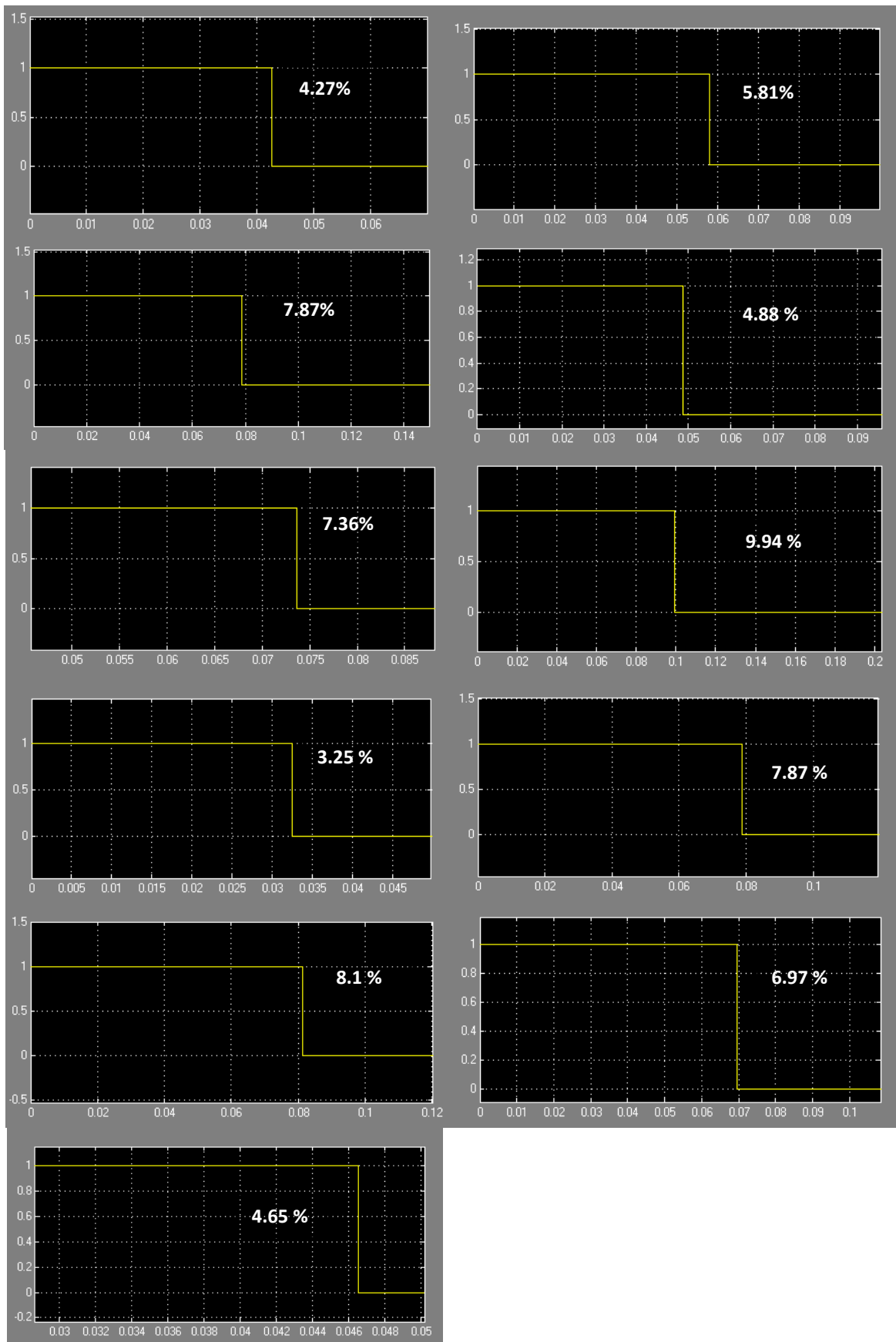


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Um fator importante a ser considerado, que também foi indicado pelo fabricante, é que a alimentação dos motores deve ser feita separada do restante do circuito devido à geração de possíveis ruídos e da queda de tensão causada pelo acionamento de todos os motores simultaneamente.

O Arduíno Mega 2560 envia sinais PWM que têm seu período em modo alto variando de 0.544 ms até 2.4 ms, que correspondem aos ângulos de 0 a 180, respectivamente. Os servos motores têm sua posição controlada por um sinal de período 20 ms (50 Hz) e uma rotação máxima de 180°. Em posse dessas informações, foi possível calcular o *duty cycle* dos sinais PWM, em % do período de 20 ms, correspondentes às posições angulares enviadas aos motores do protótipo deste projeto. Os sinais PWM das pernas podem ser vistos na Figura 33, e foram obtidos através da ferramenta Simulink do *software* Matlab, A Tabela 10, mostrada após a Figura 33, indica os ângulos correspondentes aos sinais PWM, posição e o respectivo motor.

Figura 33 – Sinais PWM enviados aos motores da Perna 1.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A Tabela 10 indica o ângulo, o motor e a posição que correspondem ao gráfico mostrado acima, onde as posições de “Transição” existem nos movimentos de giro para a direita e para a esquerda.

Tabela 10 –Tabela correspondente aos sinais PWM mostrados.

| Duty Cycle | Ângulo (°) | Motor | Posição |
|------------|------------|-------|---------------|
| 4.27% | 30 | C | Diagonal |
| 5.81% | 60 | A | Diagonal |
| 7.87% | 100 | B | Diagonal |
| 4.88% | 60-18 | A | Estendida |
| 7.36% | 30+60 | C | Estendida |
| 9.94% | 100+40 | B | Estendida |
| 3.25% | 30-20 | C | Horizontal |
| 7.87% | 100 | B | Horizontal |
| 8.1% | 60+45 | A | Horizontal |
| 6.97% | 60+22.5 | A | Transição 1/3 |
| 4.65% | 60-22.5 | A | Transição 2 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

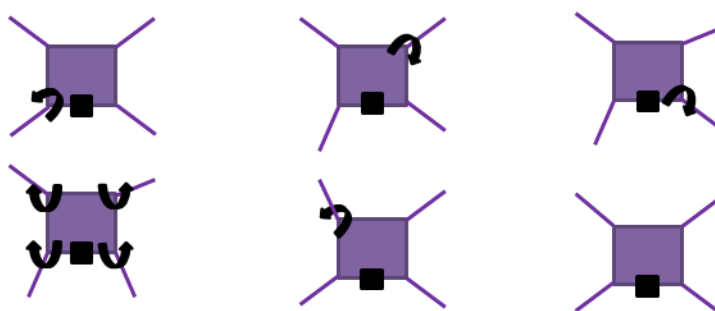
4.4. Testes de caminhada

O padrão de caminhada adotado já foi explicado anteriormente, no item 2 deste trabalho. Entretanto, para se atingir um padrão que realizasse a movimentação do robô satisfatoriamente, foram necessárias várias análises anteriores acerca de vários aspectos do robô.

Após a montagem das peças do robô com os motores, e a verificação dos ranges para obtenção e ajuste dos ângulos das posições que o robô assumiria, foi iniciada a primeira tentativa de movimentação de uma perna do robô. Para isso, os ângulos das pernas foram ajustados várias vezes, em busca de uma forma de movimentar a perna sem que o robô caísse, até ser obtida a conclusão do polígono de suporte juntamente com a inclinação do corpo do robô em sentido oposto ao da perna que se pretendia mover. Com isso, foi possível mover a primeira perna do robô.

A primeira movimentação de uma perna, sem que o robô caísse, e o conhecimento do polígono de suporte possibilitou a criação do primeiro ciclo de movimento, objetivando o avanço para frente. Na execução deste ciclo, foi possível movimentar as quatro patas em sequência, mas ao executar o movimento do dorso, observou-se que as patas se arrastavam ao invés de ficarem fixas no chão e mover apenas o tronco para frente, o que proporcionaria um avanço do corpo do protótipo. Nesse movimento do tronco, a posição dos motores das junções coxa-fêmur e fêmur-tíbia não eram movimentados. O ciclo citado pode ter seu esboço visto na Figura 34.

Figura 34 – Primeiro ciclo de locomoção desenvolvido.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Com a obtenção do resultado descrito, foi impulsionada a procura por mais detalhes acerca dos padrões de movimentação dos robôs para buscar soluções que melhorassem os movimentos do protótipo e o fizessem um ciclo capaz de fazê-lo avançar. Observando, então, diversos vídeos e, tendo encontrado o livro *Quadrupedal locomotion* (GONZÁLES; GARCIA; ESTREMER, 2006, p.33), o qual possibilitou a obtenção de detalhes importantes para a movimentação do robô, definiu-se então novos ângulos para a movimentação, que foram aprimorados ao longo dos testes de caminhada do ciclo de locomoção para frente, até ser alcançado o padrão desejado, explicado neste trabalho.

Tendo obtido o padrão de locomoção para frente, tornou-se muito menos complexa a obtenção dos ângulos para viabilizar a realização dos movimentos de giro para o lado direito e o lado esquerdo. Finalmente, após calcular os ângulos e testar a locomoção do robô para cada tipo de locomoção, todos eles foram integrados (explicação também na Seção 2), o que tornou o controle do robô muito mais interativo e dinâmico. Ao final de todos os testes, que foram realizados com atrasos entre os movimentos de cada robô

consideravelmente altos (200 ms), tais valores foram reduzidos para 30 ms, o que permitiu uma movimentação ainda mais fluida para o robô.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O robô quadrupede construído apresentou um bom desempenho, tanto em características construtivas e funcionalidade do sistema robótico, quanto na forma de caminhada definida. Sendo assim, foram cumpridos os objetivos definidos para este trabalho, principalmente o objetivo de aprendizado e introdução mais profunda na área de robótica, como desejado.

Um ponto importante a ser enfatizado neste projeto refere-se ao fato de que não foi utilizada nenhuma realimentação no controle das variáveis usadas pelo sistema, uma vez que não é utilizado nenhum tipo de sensor, como *enconders* ou acelerômetros. Desta forma, não foi possível realizar algumas das verificações que também seriam úteis na obtenção de diferentes padrões de locomoção do protótipo, como velocidade do robô ou posição do dorso do robô com relação à horizontal.

Em relação ao sistema de comunicação utilizado neste trabalho, foi observado um funcionamento eficiente, onde os dados transmitidos eram lidos corretamente pelo Arduíno, possibilitando controle de movimentos. Isso permitiu concluir que o script criado para o Arduíno, o módulo *Bluetooth*, o aplicativo e os motores funcionaram muito bem integrados.

Foi confirmado também, durante a realização do projeto, que, após definida a locomoção, o controle da movimentação do robô foi mais simples, se comparada com um robô hexápode. Entretanto, enfrentou-se o problema relacionados a estabilidade do robô. Além disso, a estrutura fabricada foi realmente muito leve e relativamente robusta. Uma outra importante vantagem observada é o menor consumo de energia, em comparação ao hexápode, devido ao uso de menor quantidade de motores, o que reduzia o consumo de corrente para praticamente um terço.

Como trabalhos futuros, foram observados vários aspectos do trabalho que possibilitariam uma melhoria do projeto em questão:

- A construção de uma estrutura maior, condizente com o poder de torque oferecido pelos motores utilizados, ou a utilização de motores mais leves que diminuíssem o peso das patas e o consumo de corrente, aumentando a autonomia

energética do robô, seriam sugestões interessantes para aumentar a estabilidade do protótipo;

- A utilização de sensores como acelerômetro e sensores de pressão, além de câmeras, que possibilitem o robô de andar em terrenos irregulares, testando-se também a capacidade do robô de contornar buracos e obstáculos, o que daria ao robô uma maior autonomia;
- O fato do robô já ser controlado com um protocolo de rede sem fio já oferece uma determinada liberdade ao mesmo. Tal liberdade pode ser melhor aproveitada substituindo a alimentação feita por fonte atualmente pelo uso de baterias, o que permitiria o robô explorar melhor os 10 metros de alcance oferecidos pelo módulo *Bluetooth*;
- A aplicação da modelagem cinemática, ao invés da abordagem individual aplicada neste projeto, também seria um ponto de melhoria importante que permitiria o robô a realizar movimentos mais complexos através da interação entre os ângulos dos diferentes motores;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

ARDUINO.INFO. *Arduino Timers and Interrupts*. Disponível em: <<https://arduino-info.wikispaces.com/Timers-Arduino>>. Acesso em: 04 dez. 2016.

BARASUOL, V. **Um sistema de controle reativo para locomoção de robôs quadrúpedes**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas)– Programa de Pós Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BOSTON DYNAMICS. *BigDog: The Most Advanced Rough-Terrain Robot on Earth*. Disponível em: <http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html>. Acesso em: 04 nov. 2015.

BÖTTCHER S. **Principles of robot locomotion**. Disponível em: <<http://www2.cs.siu.edu/~hexmoor/classes/CS404-S09/RobotLocomotion.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2016.

CHENG TECHNOLOGY CO LTD. KC2463. **Semicondutor de circuito integrado para controle do servo**. Datasheet, 20--.

CRABFU STEAM WORKS. *RC Live Steam Tank 1*. Disponível em: <http://www.crabfu.com/steamtoys/rcsteamtank_v3/>. Acesso em: 04 nov. 2015.

D.C. KAR; K. KURIEN ISSAC; K. JAYARAJAN. *Gaits and Energetics in terrestrial legged locomotion*. 2003. Division of Remote Handling and Robotics, Bhabha Atomic Research Centre Trombay, Mumbai, India. Indian Institute of Technology, Bombay, Mumbai, India. 2003.

DEMUTH, P. R. **Desenvolvimento e controle de um robô multiarticulado hexápode**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica, Vitória, 2013.

DUDEK, G., JENKIN, M. *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge, London, UK: The MIT Press, 2000.

ELETRODEX. **Esquema de ligação do módulo Bluetooth HC-05 Master/Slave**. Disponível em: <<http://eletrodex.blogspot.com.br/2015/06/controlando-led-via-bluetooth.html>>. Acesso em: 14 out. 2016.

EPUSP. **Controle de um servo motor**. São Paulo: 2014. Disponível em: <http://www2.pcs.usp.br/~labdig/pdf/files_2014/control-servo-semesteral.pdf>. Acesso em: 14 out. 2016.

FELIPEFLOP. **Módulo Bluetooth RS232 HC-05**. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-b4742-modulo-bluetooth-rs232-hc-05.html>>. Acesso em: 15 out. 2016.

FELIPEFLOP. **Módulo WiFi ESP8266 ESP-01.** Disponível em:<http://www.filipeflop.com/pd-1f55ad-modulo-wifi-esp8266-esp-01.html?gclid=CjwKEAiAmo_CBRC9qbGQssjqI28SJABYTgZxnRj3t8d9glYcg17weTEr_iOwSNV2sfSF9G2KlMe3jxoC4hrw_wcB>. Acesso em: 04 dez. 2016.

FELIPEFLOP. **Servo TowerPro MG995 Metálico.** Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-1469f0-servo-towerpro-mg995-metalico.html>>. Acesso em: 15 out. 2016.

FILHO, R. R.; DIAS, A. M., **Simulação e Acionamento de Robô de Quatro Patas**, 20--?, Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia. 20--?.

GONZÁLES,P.; GARCIA E.; ESTREMER, J. *Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots*. Edição única. Madri: Springer, 2006.

HERINGER, N. M. F.. **Sistema joaninha:** Uma plataforma robótica para fins educacionais. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica, Vitória, 2014.

KJP AUTOMATION. **Arduino Mega.** 2016.Disponível em: <<http://www.kjpaautomation.com/product/arduino-mega/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

LIMA, L. E. M.; AMARAL, P. F. S.; FILHO, A. B. **Controle da estabilidade de equilíbrio para um robô quadrúpede com uso de logica nebulosa.** In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 7., 2008, Poços de Caldas. **Anais da Sétima Conferência Internacional de Aplicações Industriais.** CD-ROM.

OLIVEIRA, T. B.; REZENDE, A. V.; FERREIRA, J. C. O.; SILVA, G. J.; SILVA, A. M. B. **Planejamento para construção de um robô quadrúpede autônomo.** In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA, 8., 2014, Universidade de Uberaba, Minas Gerais. **Anais e Pôster do oitavo Encontro de Tecnologia.** Minas Gerais: 2014. p. 1-2.

PAULA, P. H. O. **O robô Hexápode como alternativa para deslocamento em terrenos acidentados.** 2013. Proposta de projeto de graduação (Graduando em Engenharia Elétrica) - Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2013.

POTTS, A. S. **Modelagem e controle ótimo de um robô quadrúpede.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Telecomunicações e Controle – Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

QUINN, R. D.; RITZMANN, R. E. *Construction of a Hexapode Robot with Cockroach Kinematics Benefits both Robotics and Biology.* In: Connection Science, 10, 1998, Case Western Reserve University. Cleveland. 1998. p. 239-254.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. *The Precision Urban Hopper*. Disponível em: <https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/sandia-hopping-robots-to-bolster-troop-capabilities/#.Vjs2y7erTIU>. Acesso em: 04 nov. 2015.

SANTOS, A. **Servomotores**. Disponível em: <www.pictronics.com.br/downloads/apostilas/servomotores.pdf>. Acesso em: 14 out. 2016.

SINETIZE 3D. **Filamento plástico – Azul galáxia**. Disponível em: <<http://www.sintetize3d.com.br/produtos/filamento-plastico-abs-pla-azul-galaxia/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

SINETIZE 3D. **UP Mini!**. Disponível em: <<http://www.sintetize3d.com.br/produtos/imprensa-3d-up-mini/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

SUNFOUNDER. *Crawling Quadruped Robot Kit for Arduino*. Disponível em: <<https://www.sunfounder.com/robotic-drone/crawling-quadruped-robot-kit-for-arduino.html>>. Acesso em: 20 set. 2016.

ZUCATELLI, F; OLIVEIRA, M. **Controle de servomotores cc**. São Bernardo do Campo: 2007. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/16300774/Controle-de-ServomotoresCC#download>>. Acesso em: 12 dez. 2014.

TECHNO INC. **Choosing Between Steppers and Servo Motors**. Disponível em: <http://api.ning.com/files/G-InBArqYEU9KS4HSP-l6QtucMqpGdjp*0OnzOjJlceItDHHggItNtoT*ulxbz36JjfWZ97hsdrJ-AoHM7xiL8S4uaAP*FH/stepxservo_H834P041.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2016.

ANEXO A

O design da estrutura do robô deste projeto foi feita em três dimensões, utilizando-se o *software SolidWorks*, para que posteriormente as peças pudessem ser fabricadas através da impressora 3D, existente no laboratório CISNE, da UFES. Inicialmente, pretendia-se fabricar as peças em acrílico cortadas a laser, mas a impressora 3D daria uma liberdade muito maior na criação e adaptação das peças, tornando-se, assim, o recurso utilizado. O filamento ABS plástico usado foi na cor “azul galáxia”, que é mostrado na Figura 35.

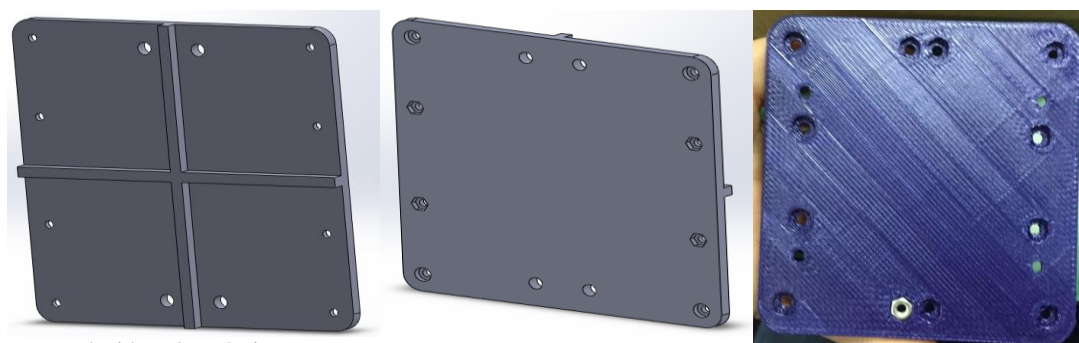
Figura 35 – Filamento ABS e impressora 3D utilizados na fabricação das peças do robô.



Fonte: SINTETIZE 3D, 2016.

Nas Figuras 36, 37, 38 e 39, são mostradas as peças feitas no *software SolidWorks*, e as peças produzidas pela impressora e ,na Figura 40, o robô montado no *SolidWorks* e a estrutura fabricada totalmente montada e finalizada.

Figura 36 – Dorso feito no *SolidWorks* e fabricado na impressora 3D, com dimensões 12 x 12 cm.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 37 – Peças que formam a coxa feitas no *SolidWorks* (separadas e montadas) e as fabricadas na Impressora 3D, também montadas.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 38 – Fêmur desenhado no *SolidWorks* e fabricado na impressora 3D.



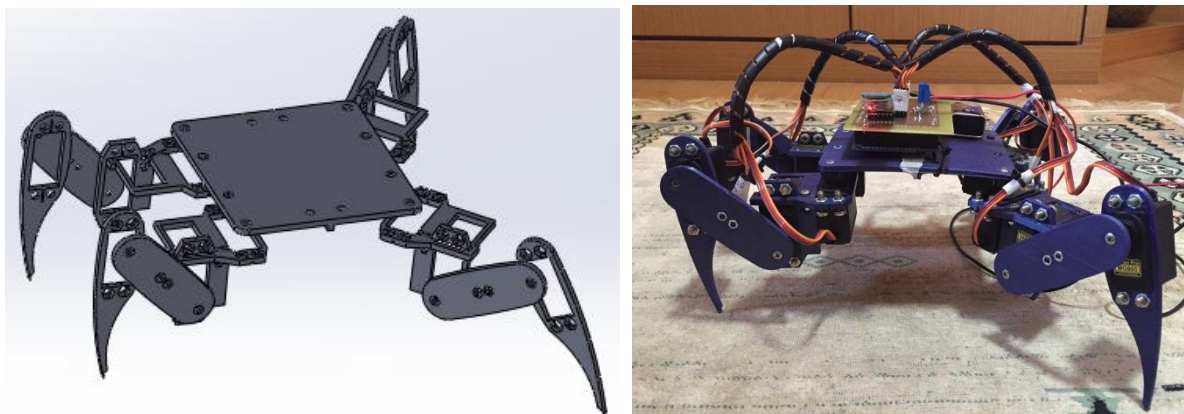
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 39 – Tíbia desenhada no *SolidWorks* e fabricada na impressora 3D.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 40 – Design do corpo do protótipo montado no *SolidWorks*, e estrutura finalizada.



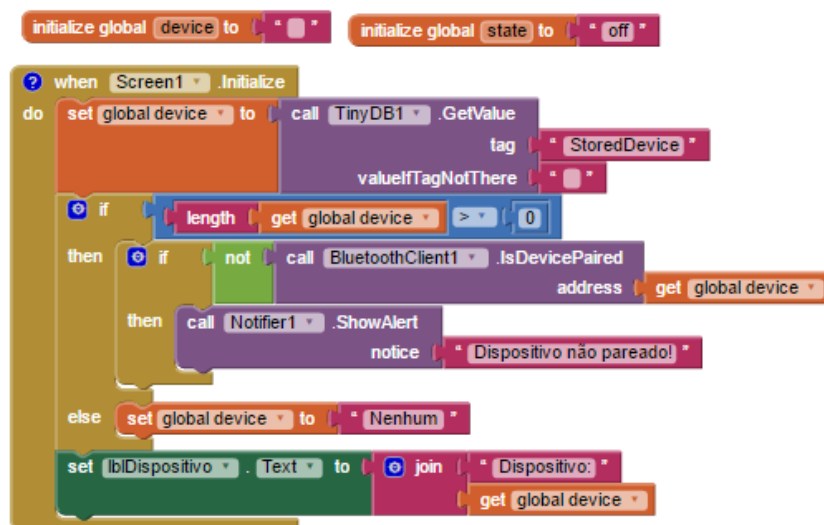
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Todas as peças desenhadas e fabricadas, exceto o dorso e o fêmur, tinham sua versão espelhada para possibilitar a montagem das pernas de lados diferentes (direita e esquerda) da parte frontal e posterior do robô.

ANEXO B

Neste anexo, serão explicadas as rotinas utilizadas para fazer o aplicativo através da plataforma *App Inventor 2*, criada pelo MIT. Na Figura 41, é apresentada a primeira rotina para explicação.

Figura 41 – Variáveis globais inicializadas e rotina realizada quando o aplicativo é inicializado.

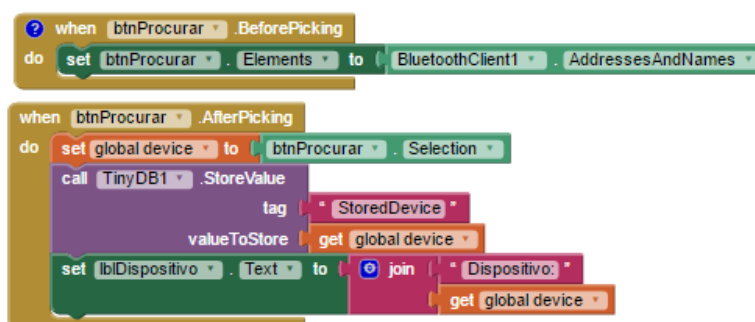


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Na imagem apresentada acima, são mostradas (de baixo pra cima), as variáveis inicializadas e a rotina que é executada quando o aplicativo é aberto. As duas variáveis, *device* e *state*, inicializadas como nada e “off”, são manipuladas durante a execução das demais rotinas para permitir a conexão com um dispositivo com a *device*, que no caso é o HC-05, e permitir a mudança entre os estados dos botões, usando *state*.

Nesta primeira rotina, apenas a variável *device* é usada. Quando a tela é inicializada, é verificado através de *TinyDB1* (banco de dados), os dispositivos com os quais o celular já se conectou alguma vez, e essa lista é então atribuída à variável *device*. Em seguida, é verificado o tamanho da variável *device* que, se for maior que zero, é verificado se o dispositivo armazenado em *device* está pareado. Se estiver pareado, nada é feito, e se não estiver, é mostrada uma mensagem “Dispositivo não pareado!”. Caso *device* tenha tamanho zero, é mostrado na tela do aplicativo “Dispositivo: Nenhum”, indicando que não há nenhum dispositivo pareado. A seguir é descrito o botão “Procurar”, o qual tem sua rotina mostrada na Figura 42.

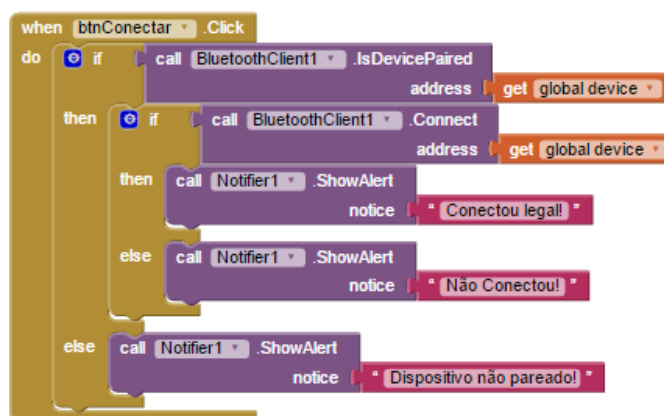
Figura 42 – Rotina do botão “Procurar”.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Antes do botão “Procurar” ser clicado, é preparada uma lista dos dispositivos que estão no alcance do *Bluetooth* do celular. Após ser clicado, o aplicativo vai para uma outra tela, onde nela é mostrada esta lista de dispositivos para que o usuário selecione um deles. Caso um seja selecionado, ele vai atribuir à *device* este dispositivo escolhido, carregando ele também no banco de dados e escrevendo na tela principal “Dispositivo:” o nome do dispositivo que está em *device*. Abaixo é explicado o botão “Conectar”, e mostrada sua rotina na Figura 43.

Figura 43 – Rotina do botão “Conectar”.

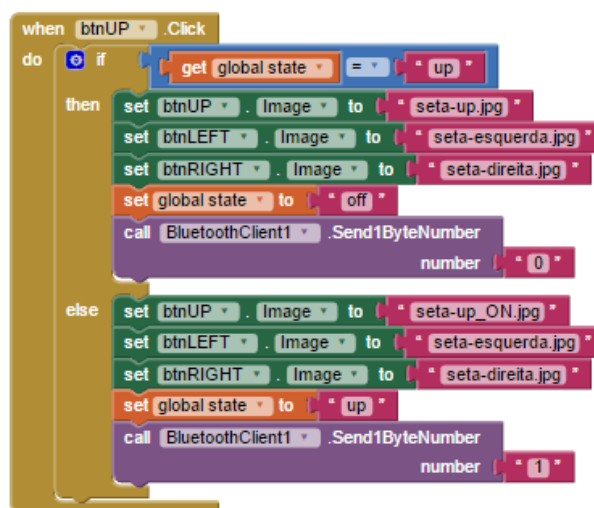


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Tendo um dispositivo pareado, posso tentar conectar o celular do usuário a esse dispositivo clicando no botão “Conectar”. Em sua rotina é verificado inicialmente se o celular do usuário está pareado com algum dispositivo, armazenado em *device*, e se há um dispositivo pareado, há a tentativa de conexão. Se for conectado com sucesso, é mostrado na tela “Conectou legal!”, e se não conectou é escrito “Não conectou!”. Se o

dispositivo selecionado não foi pareado com o celular, é mostrada novamente a mensagem “Dispositivo não pareado!”. Na Figura 44 é apresentada a rotina dos botões que enviam os comandos de virar para a direita, esquerda e para seguir em frente.

Figura 44 – Rotina dos botões para frente, para direita e para a esquerda.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Os três botões que controlam os movimentos do robô foram chamados no aplicativo de “UP”, “LEFT” e “RIGHT”, os quais indicam, respectivamente, os comandos para frente, para a esquerda e para a direita. A Figura 44 mostra a rotina do botão que envia o comando de andar pra frente para o robô, sendo esta rotina é semelhante para os demais botões que controlam os movimentos.

A variável *state*, inicializada como “off” quando o aplicativo é aberto, indicando que nenhum botão foi clicado, e é lida sempre que os botões são acionados. Clicando em um destes três botões, é atribuída à variável *state* o estado referente ao botão acionado, podendo ser “up” (frente), “left” (esquerda) ou “right” (direita), e o envoltório do botão torna-se laranja e os demais botões permanecem com o envoltório branco. Com este clique, uma *string*, “1” (direita), “2” (direita) ou “3” (esquerda), é enviada ao robô.

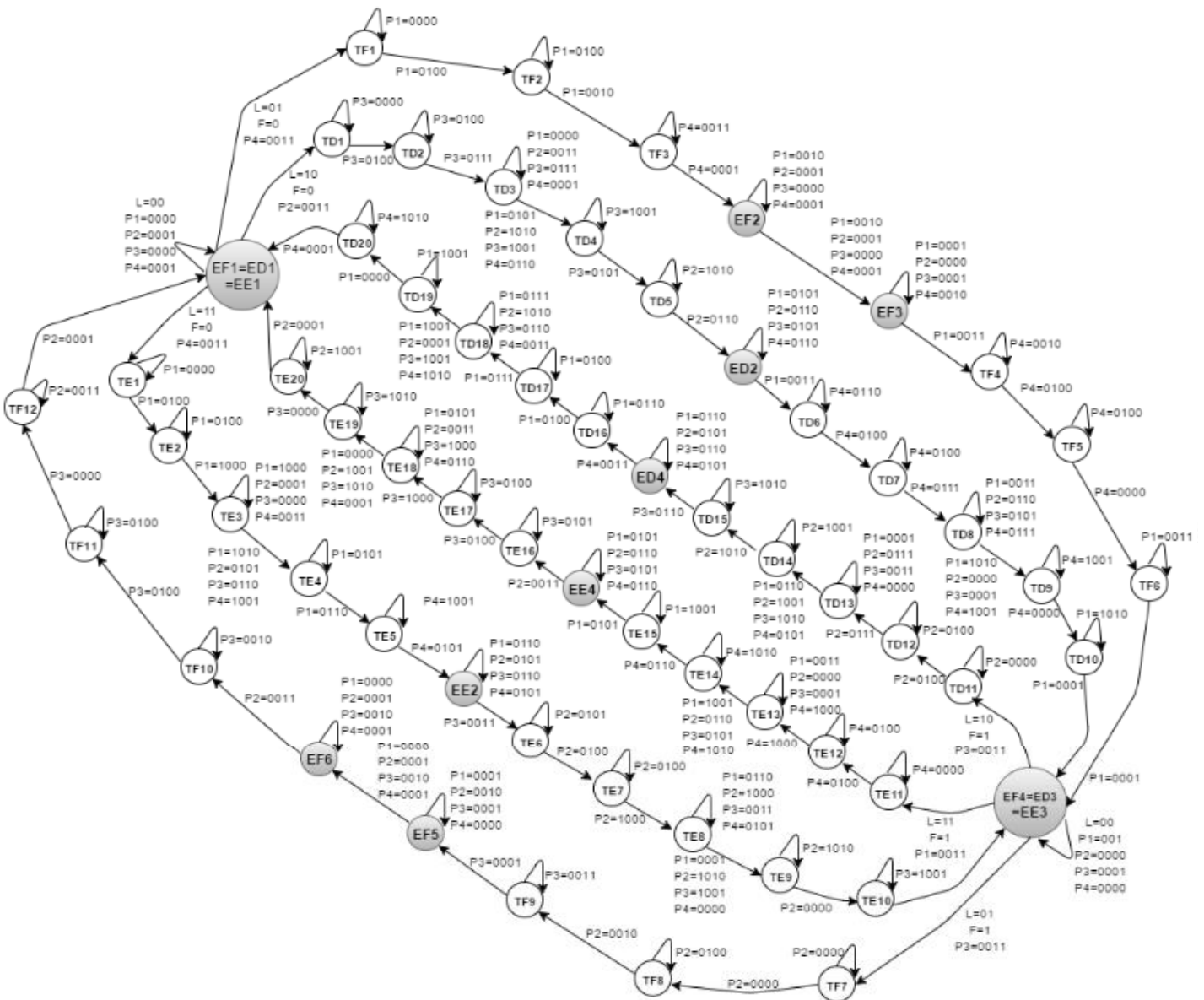
Caso o botão já esteja clicado, e recebe outro clique para desligá-lo, a variável *state* volta ao estado “off”, todos os botões ficam com seu envoltório branco novamente, e é enviado o robô a *string* “0”, que indica que o mesmo deve ficar parado. Também podem ocorrer cliques de um botão para o outro, sem que seja necessário desligar o botão clicado anteriormente ao que se deseja clicar. Neste caso, *state* assume o estado do novo

botão clicado, o envoltório do botão clicado fica laranja e o dos demais, novamente, branco, e a *string* referente ao novo comando de movimento é enviada.

ANEXO C

Neste apêndice é possível visualizar a máquina de estados referente à movimentação do robô, onde são mostradas as movimentações necessárias de cada perna para se alcançar o padrão de locomoção desejado.

Figura 45 – Diagrama de Estados.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

No diagrama de estados apresentado na Figura 45, são mostrados os estados principais, indicados nos círculos de cor cinza, e os estados intermediários em cor branca, onde estes últimos indicam as movimentações feitas para se atingir cada um dos estados principais.

Nos estados principais, são mostradas as situações de todas as variáveis, sendo estas as quatro patas (P1, P2, P3 e P4), a que indica o tipo de locomoção L e a *flag* F que indica qual ciclo de locomoção será executado (primeiro ou segundo), lembrando que esta separação em ciclos está demonstrada nas Figuras 11, 13 e 14 pelos retângulos pontilhados. Já nos estados intermediários são indicadas apenas as variáveis as quais, ao sofrerem uma alteração, causam a transição para o próximo estado. Na Tabela 11, são mostrados os valores possíveis de cada uma das variáveis, bem como o que cada um desses valores indica.

Tabela 11 – Valores das variáveis indicadas no Diagrama de Estados referente ao robô.

| Variável | Possível estado da variável | Explicação |
|----------------------|---|--|
| L (Locomoção) | 00 | Estado parado |
| | 01 | Estado locomoção para frente |
| | 10 | Estado locomoção para a direita |
| | 11 | Locomoção para a esquerda |
| F (Flag) | 0 | Primeiro ciclo do respectivo tipo de locomoção |
| | 1 | Segundo ciclo do tipo de locomoção |
| P# (Perna) | 0000 | Posição Horizontal |
| | 0001 | Posição Diagonal |
| | 0010 | Posição Estendida |
| | 0011 | Posição Inclinada |
| | 0100 | Posição Levantada |
| | 0101 | Posição 22,5° em sentido horário da posição diagonal |
| | 0110 | Posição 22,5° em sentido anti-horário da posição diagonal |
| | 0111 | Motor A (JCC) movido de 45° em sentido horário em relação à sua posição anterior |
| 1000 | Motor A (JCC) movido de 45° em sentido anti-horário em relação à sua posição anterior | |

| | | |
|--|------|--|
| | 1001 | Motor A (JCC) movido de 22,5° em sentido horário em relação à sua posição anterior |
| | 1010 | Motor A (JCC) movido de 22,5° em sentido horário em relação à sua posição anterior |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

As posições 0101 e 0110 indicam as posições das patas que existem nas locomoções para a direita e para a esquerda, que são posições intermediárias entre a posição diagonal e horizontal. Dessa forma, sua indicação foi feita em relação à posição diagonal. Os valores 0111, 1000, 1001 e 1010 referem-se às movimentações feitas apenas na junção corpo-coxa, ou seja, no motor denominado como A (Figura 12), podendo ser esta movimentação de 22,5° ou 45° e para o sentido horário ou anti-horário.

Para que seja melhor visualizada a movimentação de cada motor, são mostradas nas Tabelas 12, 13 e 14 todas as entradas de ângulos dos motores, bem como quais devem sofrer alterações para que o próximo estado seja atingido. Na Figura 46, é mostrada a legenda das tabelas.

Figura 46 – Legenda das Tabelas 12, 13 e 14.

| Legenda | |
|----------------|--------------|
| | Inclinada |
| | Levanto |
| | Movimentado |
| | Desinclinada |

A legenda apresentada na Figura 46 mostra as situações que as pernas podem se encontrar, de acordo com a movimentação de seus motores. As células pintadas nas Tabelas 12, 13 e 14 indicam os motores que precisarão sofrer deslocamento angular para alcançar o próximo estado (coluna) e sua cor indicará se está ficará levantada, inclinada, desinclinada, ou se assumirá uma das posições indicadas na Tabela 11 que não sejam inclinada e levantada.

Tabela 12 – Ângulos em cada etapa da movimentação para frente.

| PARA FRENTE | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Estado 1 | TF1 | TF2 | TF3 | Estado 2 | Estado 3 | TF4 | TF5 | TF6 | Estado 4 |
| Perna 1 | Horizontal | Horizontal | Levantada | Estendida | Estendida | Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | Diagonal |
| Motor A1 | 105 | 105 | 105 | 42 | 42 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Motor B1 | 100 | 100 | 70 | 140 | 140 | 100 | 75 | 75 | 75 | 100 |
| Motor C1 | 10 | 10 | 10 | 90 | 90 | 30 | 10 | 10 | 10 | 30 |
| Perna 2 | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal |
| Motor A2 | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 |
| Motor B2 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| Motor C2 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 |
| Perna 3 | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal |
| Motor A3 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 |
| Motor B3 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 |
| Motor C3 | 118 | 118 | 118 | 118 | 118 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Perna 4 | Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | Diagonal | Estendida | Estendida | Levantada | Horizontal | Horizontal |
| Motor A4 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 48 | 48 | 48 | 111 | 111 |
| Motor B4 | 99 | 74 | 74 | 74 | 99 | 129 | 129 | 129 | 99 | 99 |
| Motor C4 | 42 | 22 | 22 | 22 | 42 | 102 | 102 | 102 | 22 | 22 |

| PARA FRENTE | | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Estado 4 | TF7 | TF8 | TF9 | Estado 5 | Estado 6 | TF10 | TF12 | TF14 | Estado 1 | |
| Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal |
| 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Horizontal | Horizontal | Levantada | Estendida | Estendida | Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | Diagonal | Diagonal |
| 34 | 34 | 34 | 97 | 97 | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 |
| 48 | 48 | 78 | 18 | 18 | 48 | 73 | 73 | 73 | 48 | 48 |
| 125 | 125 | 145 | 45 | 45 | 105 | 125 | 125 | 125 | 105 | 105 |
| Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | Diagonal | Estendida | Estendida | Levantada | Horizontal | Horizontal | Horizontal |
| 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 100 | 100 | 100 | 37 | 37 | 37 |
| 53 | 78 | 78 | 78 | 53 | 23 | 23 | 53 | 53 | 53 | 53 |
| 98 | 118 | 138 | 138 | 98 | 38 | 38 | 58 | 118 | 118 | 118 |
| Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal |
| 111 | 111 | 111 | 111 | 111 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 |
| 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

No caso da locomoção para frente, existem dois diferentes momentos de locomoção: a movimentação de uma perna e a movimentação do dorso. Quando é necessária a mudança de posição de apenas uma perna para que possa haver a transição para o próximo estado, são explicitados os três estágios intermediários (TF1 a TF12) entre os estados principais (EF1 a EF6), onde suas transições consistem em inclinar a perna oposta àquela que deverá ter sua posição alterada, levantar a perna que pretende-se ter sua posição alterada, posicioná-la e retornar a perna que havia sido inclinada a sua

posição anterior. Isto acontece entre os seguintes estados: EF1 para EF2, EF3 para EF4 e EF6 para EF1.

Entre os estados EF2 para EF3 e EF5 para EF6, ocorre a movimentação do dorso do robô, com todas as suas patas no chão, e, nesta situação, todas as suas patas são movimentadas ao mesmo tempo. É interessante pontuar que, para este caso, o deslocamento angular de cada motor não foi incrementado de uma única vez. Isso foi feito pois a movimentação dos motores é extremamente rápida, e movimentar todos os motores necessários neste caso poderia prejudicar a performance da locomoção do robô. Desta forma, o deslocamento angular desejada para cada motor foi incrementado gradativamente.

Seguem abaixo as Tabelas 13 e 14, referentes às locomoções para a direita e para a esquerda.

Tabela 13 – Ângulos em cada etapa da movimentação para a esquerda.

| ANTI-HORÁRIO/ESQUERDA | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|
| | Estado 1 | TE1 | TE2 | TE3 | TE4 | TE5 | Estado 2 | TE6 | TE7 | TE8 | TE9 | TE10 | Estado 3 | |
| Perna/Motor | Horizontal | Horizontal | Levantada | 45°AH-MA | 22.5°AH-MA | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Diagonal | Diagonal | Diagonal |
| P1 A1 | 105 | 105 | 105 | 60 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 60 | 60 | 60 |
| P1 B1 | 100 | 100 | 70 | 70 | 70 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| P1 C1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 30 | 30 | 30 |
| Perna/Motor | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Levantada | 45°AH-MA | 22.5°AH-MA | Horizontal | Horizontal | |
| P2 A2 | 79 | 79 | 79 | 79 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 56,5 | 34 | 34 | 34 | |
| P2 B2 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 78 | 78 | 48 | 48 | |
| P2 C2 | 105 | 105 | 105 | 105 | 115 | 115 | 115 | 115 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | |
| Perna/Motor | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Inclinada | Inclinada | Inclinada | 22.5°H-MA | 22.5°H-MA | Diagonal | |
| P3 A3 | 37 | 37 | 37 | 37 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 82 | 82 | 82 | |
| P3 B3 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 53 | |
| P3 C3 | 118 | 118 | 118 | 118 | 108 | 108 | 108 | 118 | 118 | 118 | 118 | 118 | 98 | |
| Perna/Motor | Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | 22.5°H-MA | 22.5°H-MA | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Horizontal | Horizontal | Horizontal | |
| P4 A4 | 66 | 66 | 66 | 66 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 111 | 111 | 111 | |
| P4 B4 | 99 | 74 | 74 | 74 | 74 | 74 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| P4 C4 | 42 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 32 | 32 | 32 | 32 | 22 | 22 | 22 | |

| ANTI-HORÁRIO/ESQUERDA | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Estado 3 | TE11 | TE12 | TE13 | TE14 | TE15 | Estado 4 | TE16 | TE17 | TE18 | TE19 | TE20 | Estado 1 |
| Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | 22.5°H-MA | 22.5°H-MA | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Horizontal | Horizontal | Horizontal |
| 60 | 60 | 60 | 60 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 105 | 105 | 105 |
| 100 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 30 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
| Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Inclinada | Inclinada | Inclinada | 22.5°H-MA | 22.5°H-MA | Diagonal |
| 34 | 34 | 34 | 34 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 79 | 79 | 79 |
| 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 48 |
| 125 | 125 | 125 | 125 | 115 | 115 | 115 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 105 |
| Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Levantada | 45°AH-MA | 22.5°AH-MA | Horizontal | Horizontal |
| 82 | 82 | 82 | 82 | 104,5 | 104,5 | 104,5 | 104,5 | 104,5 | 59,5 | 37 | 37 | 37 |
| 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 83 | 83 | 83 | 53 | 53 |
| 98 | 98 | 98 | 98 | 108 | 108 | 108 | 108 | 118 | 118 | 118 | 118 | 118 |
| Horizontal | Horizontal | Levantada | 45°AH-MA | 22.5°AH-MA | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Diagonal | Diagonal | Diagonal |
| 111 | 111 | 111 | 66 | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 66 | 66 | 66 |
| 99 | 99 | 69 | 69 | 69 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 42 | 42 | 42 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Tabela 14 – Ângulos em cada etapa da movimentação para a direita.

| HORÁRIO/DIREITA | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | Estado 1 | TD1 | TD2 | TD3 | TD4 | TD5 | Estado 2 | TD6 | TD7 | TD8 | TD9 | TD10 | Estado 3 |
| Perna/Motor | Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Inclinada | Inclinada | Inclinada | Inclinada | Inclinada | Diagonal |
| P1 A1 | 105 | 105 | 105 | 105 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 82,5 | 60 | 60 | 60 |
| P1 B1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 100 |
| P1 C1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 30 |
| Perna/Motor | Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | 22.5AH-MA | 22.5AH-MA | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Horizontal | Horizontal | Horizontal |
| P2 A2 | 79 | 79 | 79 | 79 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 56,5 | 34 | 34 | 34 |
| P2 B2 | 48 | 73 | 73 | 73 | 73 | 73 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| P2 C2 | 105 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 115 | 115 | 115 | 115 | 125 | 125 | 125 |
| Perna/Motor | Horizontal | Horizontal | Levantada | 45H-MA | 22.5H-MA | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Diagonal | Diagonal | Diagonal |
| P3 A3 | 37 | 37 | 37 | 82 | 104,5 | 104,5 | 104,5 | 104,5 | 104,5 | 104,5 | 82 | 82 | 82 |
| P3 B3 | 53 | 53 | 83 | 83 | 83 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 |
| P3 C3 | 118 | 118 | 118 | 118 | 118 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 98 | 98 | 98 |
| Perna/Motor | Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Levantada | 45H-MA | 22.5H-MA | Horizontal | Horizontal |
| P4 A4 | 66 | 66 | 66 | 66 | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 88,5 | 111 | 111 | 111 |
| P4 B4 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 69 | 69 | 99 | 99 |
| P4 C4 | 42 | 42 | 42 | 42 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 22 | 22 | 22 | 22 |

| HORÁRIO/DIREITA | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Estado 3 | TD11 | TD12 | TD13 | TD14 | TD15 | Estado 4 | TD16 | TD17 | TD18 | TD19 | TD20 | Estado 1 |
| Diagonal | Diagonal | Diagonal | Diagonal | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Levantada | 45H-MA | 22.5H-MA | Horizontal | Horizontal |
| 60 | 60 | 60 | 60 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 82,5 | 105 | 105 | 105 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 70 | 70 | 70 | 100 | 100 |
| 30 | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Horizontal | Horizontal | Levantada | 45H-MA | 22.5H-MA | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Diagonal | Diagonal | Diagonal |
| 34 | 34 | 34 | 79 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 79 | 79 | 79 |
| 48 | 48 | 78 | 78 | 78 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 105 | 105 | 105 |
| Diagonal | Inclinada | Inclinada | Inclinada | 22.5AH-MA | 22.5AH-MA | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | 22.5AH | Horizontal | Horizontal | Horizontal |
| 82 | 82 | 82 | 82 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 59,5 | 37 | 37 | 37 |
| 53 | 78 | 78 | 78 | 78 | 78 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 |
| 98 | 118 | 118 | 118 | 118 | 118 | 108 | 108 | 108 | 108 | 118 | 118 | 118 |
| Horizontal | Horizontal | Horizontal | Horizontal | 22.5H | 22.5H | 22.5H | Inclinada | Inclinada | Inclinada | 22.5AH-MA | 22.5AH-MA | Diagonal |
| 111 | 111 | 111 | 111 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 66 | 66 | 66 |
| 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 74 | 74 | 74 | 74 | 74 | 99 |
| 22 | 22 | 22 | 22 | 32 | 32 | 32 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 42 |

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Em relação à locomoção para a direita e para a esquerda, foram criados 5 estados intermediários, presentes entre todos os estados principais destes dois casos. Cada 5 destes estados intermediários formaram um ciclo intermediário entre os principais. Eles permitem visualizar mais claramente quais patas, conseqüentemente quais motores, precisam ser movimentados para se alcançar o estado seguinte.

Da mesma forma que no caso da locomoção para frente, antes de mover uma perna para estes dois últimos casos, a perna oposta àquele que desejo causar o maior deslocamento angular, de $67,5^\circ$, em sentido contrário às demais é inclinada em sentido oposto (indicado pelas setas curvas vermelhas nas Figuras 13 e 14). Todos os incrementos e decrementos angulares são feitos normalmente nos motores da perna que está inclinada, como se fosse considerado que a mesma não havia sido inclinada. Quando completado cada ciclo intermediário, ao final, o deslocamento angular efetuado nos motores necessários da perna inclinada são desfeitos, fazendo com que esta fique na posição desejada.

Entre os estados principais, são realizados os seguintes movimentos para que se alcance o estado seguinte:

- Inclinação da perna não adjacente (ou oposta) àquela que sofrerá maior deslocamento angular;
- Após a inclinação da perna não adjacente àquela que desejo provocar o maior deslocamento angular, a perna que desejo movimentar é levantada, tendo um deslocamento de 45° apenas no motor localizado na JCC no sentido determinado nas Figuras 13 e 14, dependendo do tipo de locomoção que se está realizando;
- Em seguida, todos os motores da JCC sofrem um deslocamento angular de $22,5^\circ$, onde o sentido deste deslocamento para a perna que sofreu o maior deslocamento é em sentido contrário aos demais. Juntamente com este movimento, as pernas adjacentes àquela que sofre o maior deslocamento também sofrem os deslocamentos angulares necessários nos motores da junção fêmur-tíbia (JFT ou motor C), assumindo, assim, sua posição desejada;
- Em seguida, a perna que sofreu o maior deslocamento é posicionada;
- A perna não adjacente àquela que sofreu o maior deslocamento é desinclinada, assumindo a posição final desejada.

Com isso, concluímos a explicação detalhada acerca da movimentação de cada perna e, conseqüentemente, de cada motor.