

Bruno Machini Jornalo

Diogo de Souza Dutra

Robô móvel de duas rodas com sistema de equilíbrio dinâmico

Monografia de Conclusão de Curso
apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obten-
ção do Título de Engenheiro

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Jun Okamoto Jr.

FICHA CATALOGRÁFICA

Jornalo, Bruno Machini

**Robô móvel de duas rodas com sistema de equilíbrio dinâmico / B.M. Jornalo, D.S. Dutra. -- São Paulo, 2010.
47 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Robôs 2. Controle linear 3. Algoritmos I. Dutra, Diogo de Souza II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.

Agradecemos principalmente nossa família e amigos que
tanto nos apoiaram nessa conquista.

Agradecimentos

Agradecemos em primeiro lugar ao nosso professor orientador Dr. Jun Okamoto Jr. que nos ajudou e nos guiou nesta tão desafiadora proposta. Agradecemos também à todos do LPA-USP que estiveram sempre nos incentivando e nos dando dicas e idéias. Agradecemos em especial ao José Carlos, que nos auxiliou muito no desenvolvimento da eletrônica e ao Carlos, que com muita atenção nos auxiliou na concepção mecânica do robô.

Resumo

Projeto e construção de um robô móvel de duas rodas, sem apoio, que se comporta como um pêndulo invertido. A comunicação com o usuário se dará remotamente, enquanto o equilíbrio dinâmico será mantido através de um algoritmo de controle baseado no modelo de pêndulo invertido.

Abstract

Design and construction of a two-wheeled mobile robot, without support, that behaves like an inverted pendulum. User communication will be made remotely, while the dynamic balance will be maintained through a control algorithm based on a model of the inverted pendulum.

Conteúdo

Lista de Figuras

1	Introdução	9
2	Análise	12
2.1	Revisão bibliográfica	12
2.2	Modelo e controle	17
3	Desenvolvimento	23
3.1	Projeto	23
3.2	Proposta	24
3.3	Soluções Mecânicas	27
3.4	Soluções de Software	28
4	Resultados	30
5	Conclusão	33
	Referências	34
	Apêndice A – Detalhes técnicos do Projeto	37
A.1	Fonte de Alimentação	38
A.2	Lista de componentes de hardware utilizados	40
A.3	Integração dos Componentes	40
A.4	Projeto da estrutura mecânica	42
A.5	Construção do Cubo	46

Lista de Figuras

1.1	Segway	10
2.1	Modelo do sistema	18
2.2	Diagrama de Blocos	21
2.3	Diagrama de Blocos PID	22
3.1	Esboço inicial da estrutura física/mecânica do robô	25
3.2	Arquitetura de hardware	25
3.3	Vista lateral e frontal do robô	27
3.4	Vista Superior do robô	27
4.1	Resposta ao degrau utilizando realimentação por espaço de estados	31
4.2	Resposta ao degrau utilizando PID	31
4.3	Resposta ao degrau do sistema real	32
A.1	Projeto elétrico: Fonte de Alimentação	39
A.2	Projeto Elétrico: Interface	40
A.3	Projeto Elétrico: Sensores e Microcontrolador	41
A.4	Projeto Elétrico: Alimentação e acionamento	41
A.5	nBot	42
A.6	Projeto mecânico: Base	44
A.7	Projeto mecânico: Meio	44
A.8	Projeto mecânico: Topo	45
A.9	Acoplamento do kit do Motor	45
A.10	Projeto mecânico: Cubo	46
A.11	Cubo montado	47
A.12	Cubo desmontado	47

1 Introdução

Este documento tem por objetivo apresentar o desenvolvimento e os resultados do projeto do sistema mecatrônico "Robô móvel de 2 rodas com sistema de equilíbrio dinâmico". O objetivo deste, no contexto do trabalho de formatura de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da USP, é de acompanhar e dar suporte aos alunos no desenvolvimento de um projeto em engenharia. Este sistema, bem como este documento, foi desenvolvido por Bruno Machini Jornalo e Diogo de Souza Dutra e orientado pelo Prof. Dr. Jun Okamoto Jr.

O curso de Engenharia Mecatrônica (1) é formado por diversas perspectivas devido ao seu caráter interdisciplinar. O curso é intersecção de 3 grandes áreas da Engenharia: Mecânica, Eletrônica e Computação. O grande propósito deste do curso é de conhecer cada uma destas áreas e ter a capacidade de integrá-las. Além do conhecimento de cada área em específico, para o trabalho de integração, são necessários conhecimentos novos, como teoria de controle e programação em micro-processadores. E são nestes conhecimentos que o engenheiro mecatrônico mostra seu diferencial integrador, onde este detém de conhecimentos em Mecânica, Eletrônica, Computação e integra estas áreas se utilizando de teorias de controle e microprocessadores.

Nesta lógica, na qualidade de alunos Mecatrônicos do último ano, a idéia proposta para projeto de formatura deveria englobar um projeto Mecatrônico completo. Este projeto deveria, então, envolver todos os aspectos da mecatrônica: Mecânica, Eletrônica, Computação, Teoria de Controle, bem como a utilização de um microprocessador.

Dado esta realidade, um projeto que pudesse preencher esses requisitos e que fosse viável, no aspecto do conhecimento técnico a ser adquirido e do tempo disponível para realização do mesmo, foi proposto e discutido com o professor orientador.

Um projeto que aos olhos dos alunos, em um primeiro momento, se encaixava nestes requisitos e que se mostrou um grande desafio foi a realização de um

dispositivo similar ao veículo Segway¹ (fig. 1.1).



Figura 1.1: Segway²

A maneira simples de se locomover impulsionada por este veículo inovador ganhou grande popularidade na Europa e nos EUA e hoje mostra uma das grandes tendências do futuro da mobilidade. A inovação de mobilidade gerada por esse veículo é dada pela simplicidade de locomoção onde o grau de inclinação do corpo do condutor controla a aceleração/frenagem do veículo, tornando a condução muito intuitiva.

Fazendo uma análise rápida do veículo, sabemos que para se existir o equilíbrio estático é necessário se restringir os graus de liberdade. O Segway tem como base uma plataforma horizontal sobre 2 rodas. Esse sistema tem um equilíbrio instável por natureza e portanto, para atingir a estabilidade seria necessário restringir mais um grau de liberdade (colocando uma terceira roda, por exemplo). Assim, manter o equilíbrio dinâmico do sistema (sem restringir o 3º grau de liberdade) torna-se um problema para a teoria de controle. O modelo representado pelo Segway é muito semelhante a um modelo de pêndulo invertido, muito usado para se analisar respostas clássicas de controle. Portanto, o sistema Segway com controle dinâmico de equilíbrio é bem semelhante ao controle clássico de um pêndulo invertido.

Assim, depois de uma análise inicial da complexidade do projeto, suas dificuldade em termos de base técnica (em mecânica, eletrônica e programação), o problema foi considerado abordável para um trabalho de formatura. Porém, a dificuldade em se construir um protótipo de tamanho humano fez com que o projeto sofresse algumas alterações para chegar até a proposta final que iremos apresentar neste trabalho.

¹<http://www.segway.com/>

²fonte: <http://skydivechick.com/>

O foco foi então redirecionado para o projeto e construção de um robô que contém o conceito descrito pelo Segway, porém, em menor escala.

Logo, este trabalho tem como objetivo mostrar o trabalho de análise e desenvolvimento do projeto de um robô móvel de 2 rodas que mantém seu equilíbrio dinamicamente.

2 Análise

Neste capítulo será discutida a fase de análise do projeto. Esta é basicamente a fase onde se estuda o problema de forma mais aprofundada. Nesta fase é necessário uma revisão bibliográfica de trabalhos semelhantes, testes e simulações de modelos de comportamento além da validação de abordagens para solucionar o problema proposto. Estes passos descritos anteriormente fazem parte da metodologia científica que utilizamos para o projeto. Assim, esse capítulo será dividido em 2 partes:

- **Revisão Bibliográfica:** Discute as literaturas que abordam o problemas semelhantes e relaciona as possíveis abordagens de modelo e controle para o projeto aqui proposto.
- **Testes e Validação de Modelos de comportamentos e Controle:** Discute algumas abordagens e realiza simulações de comportamento e controle do sistema. Em seguida são mostrados algumas conclusões e é mostrado o modelo de controle escolhido. Estes serão discutidos através de fórmulas e diagramas de controle.

2.1 Revisão bibliográfica

Robôs móveis de duas rodas que realizam seu próprio equilíbrio dinâmico vêm sendo objetos de interesse tanto da comunidade científica (JOE (7), Quasimoro (4), Yamabico Kurara (5), nBot (15), entre outros), como da sociedade no geral (Segway (6) e cadeiras de roda automáticas (9)).

Esse interesse se apresenta por dois motivos principais: o interesse nas características físicas e dinâmicas trazidas por um robô de duas rodas e o segundo é o interesse acadêmico, dado que este envolve uma integração de diversos conhecimentos em engenharia.

Em (11) e (3) o interesse do estudo é basicamente demonstrado a partir das características físicas e dinâmicas que este tipo de robô pode fornecer. Em (11)

características como dimensão reduzida e a possibilidade de giro no próprio eixo são valorizadas. Enquanto que em (3) é justificado que a sub-atuação ("underactuation") resulta em robôs mais leves, menos caros e mais eficientes.

Já em (14), o interesse principal apresentado, para o estudo e o desenvolvimento deste tipo de robô, é acadêmico. Este, ainda coloca que o projeto e o desenvolvimento deste tipo de robô se mostra uma boa oportunidade para se aplicar, em um só exemplo, técnicas de design de controladores, controle distribuído, processamento de sinais, além de verificar as limitações de aplicações de controle em tempo real.

Controlabilidade do Sistema: Dado o interesse, é necessário em um primeiro momento analisar se o sistema é controlável dado que a configuração usa somente um par de motores para atuar. Na literatura essa prova se mostra de duas formas, uma prática (utilizando de simulações numéricas), e outra teórica (teoria de controlabilidade linear e não-linear). Em (7) é apresentado a prova prática da controlabilidade do sistema, onde utilizando simulação numérica em MatLab, o autor prova que o sistema é controlável. Já em (3) o estudo é mais aprofundado e o autor chega a conclusões mais gerais sobre a controlabilidade do sistema. Este, prova que não é possível controlar o sistema utilizando somente o modelo cinemático do robô, chegando então a conclusão que o controle deve se dar a partir do modelo dinâmico. Além disso, o autor prova a controlabilidade por dois caminhos: linearizando o sistema e utilizando os critérios de controlabilidade de Kalman; e utilizando critérios modernos de controlabilidade para sistemas não-lineares. Logo, a controlabilidade do sistema está garantida na sua forma mais ampla.

Modelagem matemática do comportamento e estratégias de controle:

Com a controlabilidade garantida, é possível se utilizar das representações matemáticas existentes e estudar diferentes estratégias de controle. Na literatura se encontra diferentes modelos de robôs do tipo pêndulo invertido de duas rodas. Em (4) uma análise de novos modelos de pêndulo é desenvolvida. É discutido a posição do centro de massa do robô em relação à dificuldade/facilidade de controle e ao esforços mecânicos na estrutura. Diferentemente do que normalmente se modela, com o centro de massa acima dos eixos das rodas (como em (5), (6), (7), (10), (11), (12), (14), (15), (16), (17)), em (4) é proposto um modelo com o centro de massa abaixo do eixo das rodas. Com o centro de massa abaixo do eixo das rodas se tem um controle mais simples com equilíbrio estável, além de

causar menos esforços ao hardware. Em (9) é fornecido um modelo diferente do comum, com um pendulo em cima e um em baixo para fazer um contra-peso, no intuito de diminuir a dificuldade de controle. O problema desse tipo de modelo é que dependendo da aplicação, um pendulo na parte inferior pode fazer com que a plataforma fique muito alta. Além disso, o número de publicações para o primeiro tipo de modelo é muito maior, gerando mais confiança para aplicabilidade das equações e algoritmos de controle.

Dado um modelo físico a abordagem de modelagem matemática pode ser dividida em modelagem newtoniana (realizada em (3), (9), (10), (11), (12) e (19)) e abordagem Lagrangeana (realizada em (5) e (8)). A partir do sistema de equações gerados e que representam o comportamento do sistema são definidos os estados do sistema e é escolhida uma representação ou por espaço de estados ou por função de transferência. Como o sistema resultante em todas as literaturas é um sistema do tipo MIMO, a representação por espaço de estados é privilegiada com relação à representação por função de transferência. Assim, todos os artigos encontrados aplicam uma abordagem utilizando representação de espaço de estados. Outro importante aspecto para o controle é o desacoplamento de algumas das equações, tornando possível dividir o controle por partes. O sistema abordado desacopla movimento linear e de equilíbrio, do movimento de giro do robô, como pode ser visto em (3) e (5).

Outro aspecto de importância a se considerar é a não-linearidade do sistema. As equações do modelo do sistema mostram a clara não-linearidade do sistema, assim, na literatura são consideradas duas abordagens. Linearizar o modelo em torno do ponto de equilíbrio e trabalhar com um sistema de controle linear, ou então, manter a não linearidade e utilizar de técnicas de controle moderno para sistemas não-lineares.

Técnicas de controle para sistemas lineares: Trabalhar com técnicas de controle não-linear não é uma tarefa simples. Hoje, ainda, as técnicas mais simples são a partir do sistema linearizado. Dado o sistema linearizado duas possibilidades de controlador se mostram na literatura para o controle do pêndulo invertido: usar um simples PID no ângulo de queda do robô ((16), (17) e (19)); e utilizar uma realimentação de estados ("State Feedback control") em todas as variáveis do estado do sistema ((4), (6), (7), (8), (9) e (14)).

Em (16) o controle é feito utilizando somente um proporcional que não mostra uma resposta muito satisfatória. É um comportamento que tende a controlar,

porém não controla e muito menos atinge a estabilização. Além disso, problemas de processamento de sinais, fizeram que o projeto tivesse mudança nas escolhas de sensores antes de alterar o algoritmo de controle. Já em (17) e (19) são utilizados controladores PID's e o comportamento observado é de um sistema que controla porém que não estabiliza. A conclusão assim, feita por todos que utilizam essa técnica de controle, é a necessidade de acrescentar mais uma informação vinda de outro sensor, outro estado. Ou seja, o que se propõe é um avanço na direção de um controle por realimentação de estados. Outra possibilidade interessante, proposta em (19), é acréscimo de um segundo valor proporcional dependente da velocidade do sistema. A idéia consiste em diminuir o erro dado pela não linearidades do sistema, ou seja, o sistema não-linear é aproximado por uma sequência de retas de diferentes inclinações. Ainda abordando o controlador PID, outra alternativa sugerida em (14) seria a utilização de uma técnica de alocação de pólos adaptativa. Esta altera os valores das constantes do PID dependendo da velocidade do sistema visando a estabilização do sistema.

A segunda abordagem vista com muita frequência na literatura é o controlador por realimentação de estados. Em (4) o autor apresenta duas formas de se encontrar os valores do controlador e compara ambas as abordagens. Compara-se um controlador construído a partir da técnica de alocação de pólos (utilizada em (7), (14)) e outro por LQR (utilizada em (4), (6), (8) e (9)). É visto que o controlador, usando LQR, apresenta uma robustez maior em relação à erros e seu desempenho é melhor. Como dito anteriormente para o PID, em (14), é sugerido uma alocação de pólos adaptativa para uma melhor resposta do controle.

Técnicas de controle para sistemas não-lineares: Já outras literaturas preferem abordar o problema de forma não-linear. Em (3), autor justifica a utilização de um controle não-linear através da velocidade do sistema. Este, diz que em um controle linear, a acurácia diminui quando as velocidades do sistema aumenta e que em um controlador não-linear esse efeito é diminuído. Assim, a utilização de um controle não linear resultaria em um robô mais ágil.

Dos algoritmos de controle não linear o mais encontrado na literatura para aplicação em sistemas de robô do tipo pêndulo invertido foi o "feedback linearization". O artigo (2) explica a teoria por trás, enquanto que (11) e (12) aplicam o algoritmo para o controle do robô com resultados muito interessantes.

Processamento de Sinais e limites do controle em tempo real A escolha da modelagem e a definição de um algoritmo de controle estão intimamente

ligados aos sensores e as técnicas de tratamento de sinais utilizadas. Dado o modelo e seus estados, é necessário escolher entre medir todos os estados e se utilizar de observadores. Além disso, a definição de um sensor esta ligado ao tratamento numérico para se obter o valor do estado que se está medindo.

Na literatura se encontra, para esse tipo de aplicação geralmente 6 estados para ser determinados (3 efetivamente medidos e 3 obtidos por manipulações numéricas dos valores medidos):

- Angulo/Velocidade angular de queda
- Posição/Velocidade linear do robô
- Angulo/Velocidade de curva do robô

Antes de mostrar quais sensores se utilizam na literatura é importante fazer uma distinção entre um sensor sem nenhum tratamento embarcado e sensores que comportam um grupo de outros sensores e que fornecem uma informação mais precisa. Os projetos de pesquisa que se utilizam de sensores com tratamento embarcado têm um sinal muito mais confiável e podem se concentrar somente no software de controle.

Para a estimar os valores de angulo e velocidade angular de queda na literatura se encontram basicamente três tipos de sensores: Acelerômetros ((16) na primeira versão e (10)), Giroscópios ((5), (7), (9)) ou Inclínômetros Lasers((16) na segunda versão e (17)).

Já para valores de posição e velocidade é quase padrão a utilização de encoders ((4), (6), (7) e (15)), porém em (9) foi escolhido um tacômetro como sensor de velocidade e posição.

Por fim, não são muitos os artigos que aplicam e explicitam os sensores utilizados para o controle de curva, porém os sensores normalmente utilizados são giroscópios ((14) e (5)).

Porém, esses sensores, sem tratamento embarcado nem sempre fornecem boas leituras impossibilitando assim o bom controle do sistema. Assim, duas alternativas são colocadas para se obter valores mais precisos das variáveis físicas medidas: Utilização de sensores com tratamento embarcado ou realizar esse tratamento no processador que recebe o sinal do filtro.

Em (10), (5) e (7) é explicado que o comportamento do acelerômetro é muito sensível à distúrbios externos e normalmente, ao se utilizar filtros passa baixa

para eliminar as frequências altas, a resposta do sensor fica lenta. Apesar destes mesmos artigos exporem o problema de erro estático do giroscópio, quando integrado numericamente, (5) e (7) afirmam que este erro é eliminado utilizando um controlador com parte integrativa. Já (10) parte para uma outra abordagem utilizando um Median filter e um filtro de Kalman estendido na leitura do acelerômetro.

Outras abordagens são as fusões de dados, em (6) é utilizado uma fusão de dados vindo de 3 giroscópios e 2 acelerômetros. Em (14) e (15) é citado um inclinômetro FAS-G, que é um sensor com 1 giroscópio e 2 acelerômetros embarcados. O sinal desses sensores são combinados através de um filtro de Wiener e o resultado de inclinação é bem preciso. Em (15), um giroscópio e um acelerômetro de baixo custo são substituídos por um FAS-G, que mostra uma melhoria considerável.

Em (15) o autor ainda cita possíveis melhorias utilizando um filtro de Kalman ((20), (21) e (22)) e cita o artigo (13), que fala sobre um filtro complementar. Este filtro faz uma fusão de dados de um giroscópio e um acelerômetro usando filtros passa baixa e passa alta((18)) para estimação do ângulo de inclinação.

Dado a pesquisa e os estudos realizados a partir dessas referências, uma análise entre dificuldade de implementação e tempo de realização é necessária para a escolha de qual dos modelos propostos poderia ser utilizado para representar o sistema aqui proposto. Algumas possibilidades foram escolhidas e testadas ao longo do projeto. A próxima seção abordará o estudo de dois tipos de modelos de comportamento e controle. Ambos serão estudados a partir de simulações em MatLab e permitirão o entendimento melhor das influências de cada parâmetro no sistema.

2.2 Modelo e controle

A escolha da modelagem foi guiada principalmente por uma análise entre dificuldade de implementação e tempo estimado de realização das soluções propostas. Dado que a proposta do projeto é de desenvolver eletrônica, mecânica, software além do controlador, é necessário, assim, balancear entre abordagens muito complexas que demandem muito tempo de entendimento/desenvolvimento e abordagens muito simples que tivessem comportamento muito pobre.

Portanto, como primeira definição de projeto, foi optado a utilização de um modelo linearizado do sistema. A utilização desse modelo coloca algumas limita-

ções no sistema, como valores baixos de ângulo de queda e valores de velocidades baixas de atuação. Além disso, como muitas das referências apresentam resultados satisfatórios utilizando controladores lineares do tipo PID e realimentação de estados, então naturalmente a escolha de controle fica entre esses dois tipo de controladores.

O modelo linearizado escolhida foi retirado do artigo (14) e servirá de base para o nosso sistema e para as simulações.

Dado as forças atuantes no sistema representadas na fig. 2.1, obtém-se as equações da dinâmica do sistema utilizando a abordagem newtoniana (14). Essas equações, que representam a evolução dinâmica do sistema, formarão um sistema de equações não lineares, e essas mostradas com mais detalhes em (14).

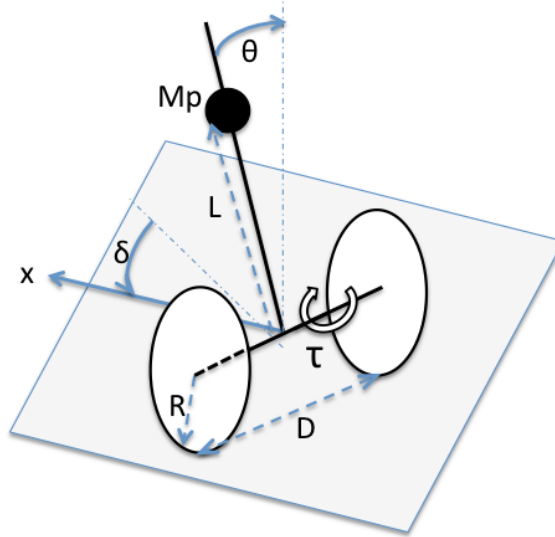


Figura 2.1: Modelo do sistema

Dado que o sistema tem três graus de liberdade (movimento angular de queda, movimento linear no plano e movimento angular no plano), e que os estados do sistema são variáveis que representam o sistema ao longo do tempo, o estado x do robô é representado pelos três graus de liberdade e suas derivadas:

$$x = [x_r \dot{x}_r \theta \dot{\theta} \delta \dot{\delta}]^T \quad (2.1)$$

Ainda, em (14), o sistema é linearizado em torno do equilíbrio ($\theta = 0$) e é apresentado na representação por espaço de estados. Esse equacionamento desacopla o movimento linear no plano e angular de queda do robô ($x_r e \theta$) do movimento angular no plano (δ). Portanto, divide-se a estratégia de controle em duas: controlar a postura e o movimento longitudinal; e controlar o movimento de curva.

Para o controle de postura e movimento longitudinal, representa-se os estados por

$$x = [x_r \dot{x}_r \theta \dot{\theta}]^T \quad (2.2)$$

E a representação linearizada do equacionamento dinâmico por espaço de estados é dada por

$$\dot{x} = A x + B u \quad (2.3)$$

$$y = C x \quad (2.4)$$

Onde,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & A_{43} & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \\ 0 \\ B_4 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

com,

$$A_{23} = -g \left(\frac{4 L M_p}{3 X} - 1 \right)$$

$$A_{43} = \frac{M_p g}{X}$$

$$B_2 = \frac{4 L Y}{3 X} - \frac{1}{L M_p}$$

$$B_4 = -\frac{Y}{X}$$

$$X = \frac{L M_p (M_p + 6 M_r)}{3 (M_p + \frac{3 M_r}{2})}$$

$$Y = \frac{1}{L} + \frac{M_p R}{M_p + \frac{3M_r}{2}}$$

E M_p sendo a massa do pêndulo, M_r a massa das rodas, R raio das rodas e L a distância do centro de massa ao eixo das rodas.

Já para o movimento angular no plano, dado a definição dos estados

$$x = [\delta \dot{\delta}]^T \quad (2.5)$$

E a representação da dinâmica em espaço de estados fica

$$\dot{x} = A x + B u \quad (2.6)$$

$$y = C x \quad (2.7)$$

onde,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ B_6 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

com

$$B_6 = \frac{6}{(9M_r + M_p)RD}$$

E D sendo a distância entre rodas.

Como segunda definição de projeto, o controlador desenvolvido não irá realizar controle de posição do robô no plano. A estratégia de controle irá focar somente no controle de postura do sistema, ou seja, no equilíbrio do corpo do robô.

Assim, é possível definir uma lei de controle por realimentação de espaço de estados,

$$u = K(x - v) \quad (2.8)$$

$$K = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & k_4 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

A partir dessa formulação, utilizando a técnica de alocação de pólos é possível encontrar os valores para k_1 , k_2 , k_3 e k_4 . A escolha dos pólos foi feita de maneira heurística atentando à sobre-sinais e tempo de resposta do sistema. Os resultados calculados para diferentes pólos e diferentes características mostraram uma mesma proporção entre os valores das constantes do controlador. Assim, em todos os resultados analisados, os valores de k_1 e k_2 chegam a ser de 10 a 100 vezes menos influentes que k_3 e k_4 no cálculo do torque ¹. É possível ainda observar que o valor de k_3 (relativo ao ângulo θ) é sempre o mais significativo, mostrando a importância maior do ângulo para o controle do sistema.

Dado esta constatação, foi escolhido uma estratégia de controle preliminar utilizando um controle PID em θ antes de partir para o controle em realimentação de estados. Visto também em alguns trabalhos já realizados, citados em 2.1, que um controle PID em θ parece razoável, e que fornece um comportamento já muito próximo ao comportamento obtido por realimentação de estados.

O Diagrama de blocos (fig. 2.2) representa o diagrama de controle por realimentação de estados.

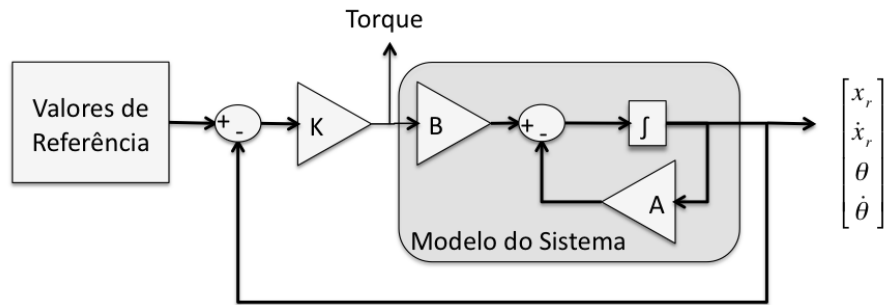


Figura 2.2: Diagrama de Blocos

Já para o controle usando PID o diagrama tem algumas leves modificações (fig. 2.3).

¹Os valores encontrados para pólos em $-0.5(\text{duplo})$ e $-1.5 \pm 0.2 i$ foram $k_1 = 0.0001$, $k_2 = 0.0003$, $k_3 = 0.0947$ e $k_4 = 0.0013$.

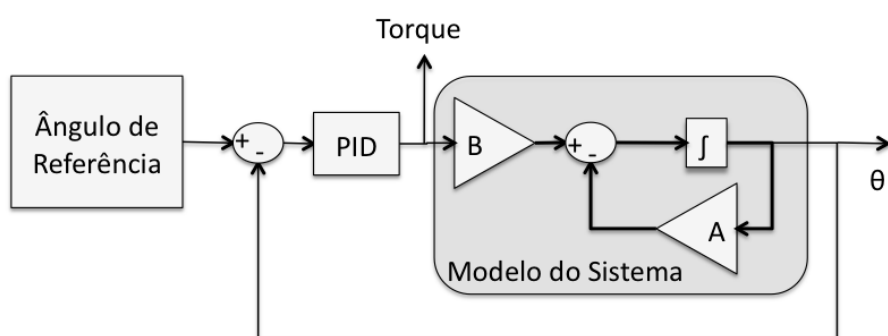


Figura 2.3: Diagrama de Blocos PID

3 Desenvolvimento

Neste capítulo será discutido a fase de desenvolvimento do projeto. Em um primeiro momento será abordado as definições de comportamento e funcionalidade particulares deste robô. Em um segundo momento será abordado a proposta de solução completa (envolvendo mecânica, hardware e software) para se alcançar esse comportamento e as funcionalidades do projeto. Em seguida será mostrado com mais detalhes algumas soluções técnicas de mecânica e de software que foram utilizadas para o funcionamento correto do sistema.

3.1 Projeto

Nessa seção serão abordadas as definições e as características do projeto do robô. Algumas características básicas já vêm definidas devido à escolha do modelo matemático, anteriormente descrito na seção 2.2.

- Duas rodas: O modelo matemático define um robô com duas rodas e dois atuadores independentes em cada. Ter duas atuações também implica na possibilidade do robô ter o movimento angular no plano.
- Centro de massa acima do eixo das rodas: Característica que define o comportamento matemático anteriormente definido.
- Sensoriamento: Para a realização do controle é necessário a mensuração (ou observação) dos estados do sistema, que realizam sua realimentação.

Dadas as características vindas do modelo matemático utilizado, é necessário definir outras características de projeto.

- Robô móvel: Para o robô poder ter o máximo de mobilidade é necessário que todos os seus sub-sistemas estejam embarcados. Ou seja, sensores, atuadores, controladores e alimentação devem estar embarcados no robô.

- Interfaces de usuário: É importante para poder alterar alguns parâmetros do programa sem a necessidade de reprogramar o controlador.

3.2 Proposta

Dado as características do projeto é possível então propor soluções que atendam à essas características. Essa seção, então, abordará propostas de arquiteturas mecânica, de hardware e de software que atendam as respectivas necessidades descritas anteriormente.

Arquitetura Mecânica Ao se analisar soluções de estrutura física para atender as características proposta uma proposta de arquitetura mecânica do robô foi elaborada. Esta foi pensada tanto para um projeto mecânico para uma arquitetura de disposição dos dispositivos de hardware. Dado que o robô deve ser um equipamento móvel, com todos subsistemas embarcados, a proposta contém uma idéia de modularidade onde a interface com usuário está separada da alimentação e do acionamento. A forma proposta, dado que um ponto importante era a localização do centro de massa, foi a disposição desses módulos em andares (fig. 3.1) .

No primeiro andar a proposta de utilização é para o sistema de acionamento das rodas. É importante salientar a importância engastamento dos acionadores nesse andar, pois caso este não ocorra de forma correta o sistema tende a fugir do comportamento esperado.

A idéia para o segundo andar está relacionada diretamente com a posição do centro de massa. Sabendo que o sistema de baterias seria o peso mais importante com relação ao restante do sistema, a proposta é utilizar o segundo andar para abrigar esta, e tê-lo assim, como referência para a altura do centro de massa. A proposta também abrange pelo menos três alturas diferentes para o centro de massa para se obter diferentes comportamentos do sistema.

O último andar é proposto como o andar de concentração da grande parte de hardware e da interface com o usuário. Por ser o último andar, o hardware fica mais acessível à medições e à gravação do microcontrolador e além disso, permite ao usuário interagir mais facilmente com a interface desenvolvida.

Arquitetura de Hardware Outra proposta importante esta relacionada principalmente ao sensoramento e a composição hardware/software do sistema.

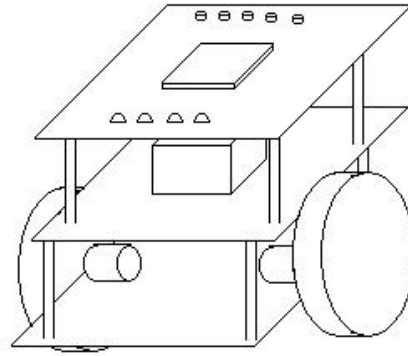


Figura 3.1: Esboço inicial da estrutura física/mecânica do robô

É possível encontrar na literatura (seção 2.1) diferentes tipos de arquitetura de hardware/software para a mesma tarefa, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Nossa proposta foi desenvolvida de forma que esta abrangesse possíveis soluções diferentes propostas na literatura e que o tempo de aprendizagem/implementação fosse compatível com o tempo de projeto.

O sistema proposto é dividido entre como sistemas de sensoriamento, processamento, atuação, interface e alimentação (fig. 3.2).

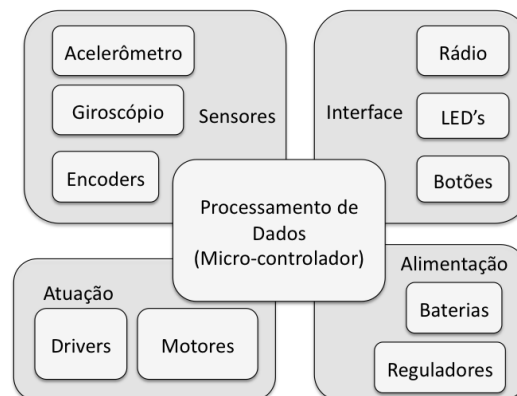


Figura 3.2: Arquitetura de hardware

No intuito de conseguir medir (ou estimar numericamente) todas as variáveis de estado, três sensores foram propostos:

- **Acelerômetro:** Mede a variação da leitura da aceleração da gravidade. Com a variação de leitura, dado a posição do mesmo, é possível calcular o ângulo de queda de forma muito simples. A velocidade angular de queda deve ser derivada numericamente.
- **Giroscópio:** Mede velocidades angulares. Este sensor pode ser utilizado de

duas formas - ou para a leitura da velocidade angular de queda ou para medir a velocidade angular no plano. A obtenção do ângulo de queda ou do ângulo de giro no plano é feita através de integração numérica.

- Encoder: Mede posição no plano do robô. A diferença de velocidades entre as rodas também fornecem um valor de velocidade angular no plano. A velocidade do robô no plano é definida através de derivação numérica.

Para o processamento foi proposto a utilização de uma plataforma de desenvolvimento de alto nível que facilitasse a integração de todos os componentes de hardware. A escolha dessa plataforma será mostrada com mais detalhes abaixo, na análise da terceira proposta desta seção, a proposta para software.

Para atuação foi proposto a utilização de um par de motores DC que fornecem torque e velocidade suficiente para a aplicação completa. Os valores calculados de torque e velocidade máxima do motor, bem como sua frequência de corte, foram retirados a partir de simulações testando diversas características do sistema.

Já para a interface com o usuário é possível dividir a proposição em duas, uma direta no robô e uma remota em um PC. A interface direta consiste em botões e sinalizações que fornecessem alguma informação sobre o estado do robô. Os botões também podem permitir ligar ou desligar funcionalidades durante a execução normal do programa. Já a interface remota é composta de uma comunicação por rádio que se comunica diretamente com um PC. Através desse, o usuário também teria a visualização e a atuação durante a execução do programa, porém sem a necessidade de estar próximo ao robô.

Para alimentação do circuito a partir das baterias, foi proposto o desenvolvimento de uma fonte com diversas saídas que fornecessem energia com diferentes níveis de tensão para cada componente.

Toda a arquitetura de hardware (fora sensores e atuadores) foi projetada para estar em uma única placa e suas disposição foi pensada para a melhor acomodação dos subsistemas. Como dito anteriormente, essa estrutura ficaria na parte superior do robô.

Arquitetura Software Esta proposta engloba principalmente a parte de software está muito relacionada à plataforma de processamento escolhida. A plataforma proposta, USBizi (23) é composto de um firmware que trabalha com diversas bibliotecas prontas e permite, utilizando uma ferramenta de desenvolvimento, escrever programas em linguagem orientada à objeto. Além disso, as

bibliotecas fornecidas permitem leituras e acionamentos de forma muito simples. E assim, torna o trabalho de desenvolvimento de software e sua interação com o hardware muito mais intuitivo e prático.

Assim, após a análise e especificação das propostas de solução, o desenvolvimento do robô foi lançado e seus projeto mecânico e eletrônico podem ser vistos no anexo A. O resultado deste desenvolvimento pode ser visto nas figuras 3.3 e 3.4 que mostra o robô na sua forma construtiva final.

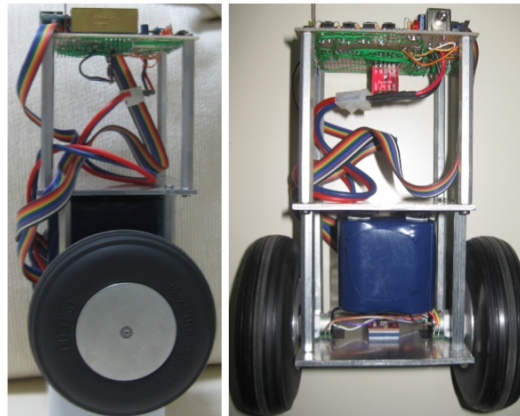


Figura 3.3: Vista lateral e frontal do robô

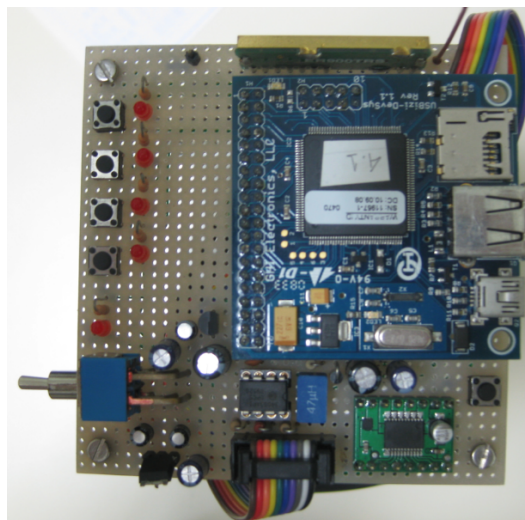


Figura 3.4: Vista Superior do robô

3.3 Soluções Mecânicas

Após a validação das propostas de solução, o desenvolvimento das mesmas foi lançado, gerando novos subproblemas que demandaram soluções de engenharia.

O problema mecânico mais significativo que será abordado nessa seção foi o

problema de acoplamento entre o motor e a roda escolhidos. Além do acoplamento mecânico, exigia-se uma solução que tivesse compatibilidade com o encoder especificado.

Este encoder faz parte de um kit especial, montado especialmente para o motor especificado. Esse kit já fornecia rodas e suportes para o engastamento do motor, porém, infelizmente a roda fornecida estava muito aquém das dimensões que o projeto exigia.

Portanto, foi necessário fazer um projeto de um novo cubo para as rodas com o tamanho já especificado. O material escolhido foi alumínio, para facilitar a usinagem e garantir um peso pequeno. As ranhuras para os sensores do encoder são substituídas por uma fita de espaços pretos e brancos, que pode ser facilmente feita e impressa.

Sendo assim, o cubo das rodas teve por base o kit de encoders e rodas especificados, afim de garantir a funcionalidade dos sensor. A facilidade de se usar esse kit já se mostra no momento em se obter as medidas relativas ao posicionamento das ranhuras dos sensores que já estão determinadas.

O projeto do cubo (detalhado no anexo A.5) também inclui pensar no sistema de fixação ao eixo do motor e na montagem do pneu no cubo, visto que o mesmo não tem elasticidade suficiente para ser "esticado" por cima do cubo. A fixação ao eixo pode ser feita através de um parafuso sem cabeça perpendicular ao furo do eixo e assim chegamos ao projeto ilustrado no anexo A.10.

Foi feito também um trabalho de planejamento de usinagem para buscar o melhor acoplamento entre as partes. Após a usinagem, chegamos ao resultado que pode ser visto nas figuras A.12 e A.11. Com o cubo pronto, a fita para o encoder foi desenhada em um programa de CAD, impressa e colada dentro do canal do cubo.

3.4 Soluções de Software

No desenvolvimento de software para a solução de controle final, diversos sub-problemas ocorreram que durante o desenvolvimento exigiram estudo e soluções em engenharia. Nessa seção serão abordados os problemas e as soluções mais importantes e não triviais do projeto de software.

Tratamento de sinais dos sensores: A escolha por sensores de baixo custo fez com que todo o tratamento, para obtenção de um valor confiável de variáveis de estado, fosse feito internamente no micro-processador.

Uma solução para os ruídos apresentados pelos sensores foi a implementação de filtros de software. Estes permitem uma flexibilidade para mudança das frequências de cortes de forma muito simples, que um filtro de hardware não permite de forma tão simples.

Além da filtragem de ruídos, outra dificuldade para se obter valores confiáveis dos estados do sistema foi a diferença de comportamento estático-dinâmico dos sensores. O acelerômetro tem um comportamento e uma mensuração muito efetiva no estático, porém no dinâmico, este não se comporta muito bem. Já o giroscópio faz medições confiáveis enquanto se movimenta, porém apresenta um importante erro estacionário.

Assim, na literatura foram pesquisadas formas de se resolver esse problema e as sugestões seguiam para filtragem de Kalman, algoritmos de fusão de dados e até mesmo trocar os sensores para sensores com esse tratamento já embarcado.

A alternativa encontrada foi a aplicação de um filtro complementar, como descrito no artigo (13). Esse filtro apresenta uma solução para se utilizar o valor do acelerômetro pra dinâmicas lentas e o do giroscópio para dinâmicas rápidas. Essa fusão de dados fornece um valor muito mais confiável do ângulo do pêndulo e assim, o algoritmo de controle pode atuar de forma muito mais eficaz.

Derivada do controlador PID: Outra grande solução de engenharia que forneceu bons resultados no comportamento do sistema está na substituição da parcela derivativa do controlador PID pelo sinal de velocidade do giroscópio. Para o PID simples, o valor do ângulo, após o filtro complementar, era derivado numericamente e entrava no controlador. Ao substituir essa entrada pelo valor medido pelo giroscópio (após passar por filtro passa-baixa) a resposta do controlador se tornou muito mais compatível e o sistema se comportou mais próximo do esperado.

4 Resultados

Neste capítulo se apresentará os resultados das simulações feitas em MatLab para os dois controladores estudados, bem como o resultado dos testes realizados no robô construído segundo as especificações descritas em capítulos anteriores. Uma vez com as características do robô bem definidas, é possível realizar simulações mais precisas, com os valores mais próximos dos reais para massa e posição do centro de massa do sistema. Além disso, é possível considerar a discretização dos sinais de controle através de reconstrutores de ordem zero. Com isso, a transferência de resultados da simulação para o sistema real fica mais confiável e a representação de seu comportamento esperado aproxima-se ainda mais da realidade. Assim, tem-se um ganho de conhecimento do funcionamento do sistema que auxilia no ajuste dos parâmetros de controle.

A figura 4.1 mostra a resposta do sistema controlado através da realimentação por espaço de estado tentando atingir a posição de equilíbrio ($\theta = 0$) quando o sistema apresenta uma condição inicial inclinada ($\theta = 0.122rad$). A resposta lenta permite observar claramente a restituição suave do equilíbrio, que acontece após aproximadamente 3 segundos, sendo que a posição final em x não é relevante para o algoritmo, dado que o equilíbrio acontece para $x \approx 0.3m$.

A simulação 4.2 demonstra que o mesmo caso mostrado anteriormente, controlado pela realimentação por espaço de estados, também pode, em teoria, ser controlado utilizando-se um PID, mesmo que para as constantes escolhidas haja um grande sobre-sinal e a oscilação demore a ser amortecida.

A implementação do controle por PID, no entanto, apresentou resultados insatisfatórios para controlar o sistema real, quando utilizado unicamente o valor de ângulo dado pela leitura do acelerômetro. Esse problema pode ser contornado com a utilização dos filtros descritos em 3.4 para a obtenção de uma leitura mais confiável do ângulo em relação à vertical. Além disso, o fato de podermos utilizar o próprio sinal do giroscópio na parcela derivativa do PID, evitando o cálculo da derivada (que é muito influenciado por ruído), auxilia muito na obtenção de um controle mais confiável. Essas melhorias forneceram resultados satisfatórios, ainda

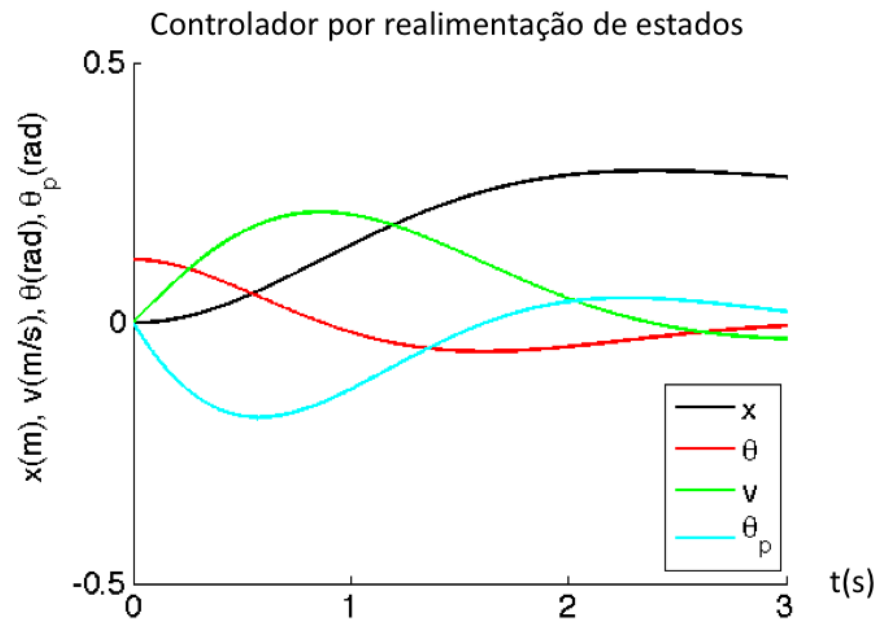


Figura 4.1: Resposta ao degrau utilizando realimentação por espaço de estados

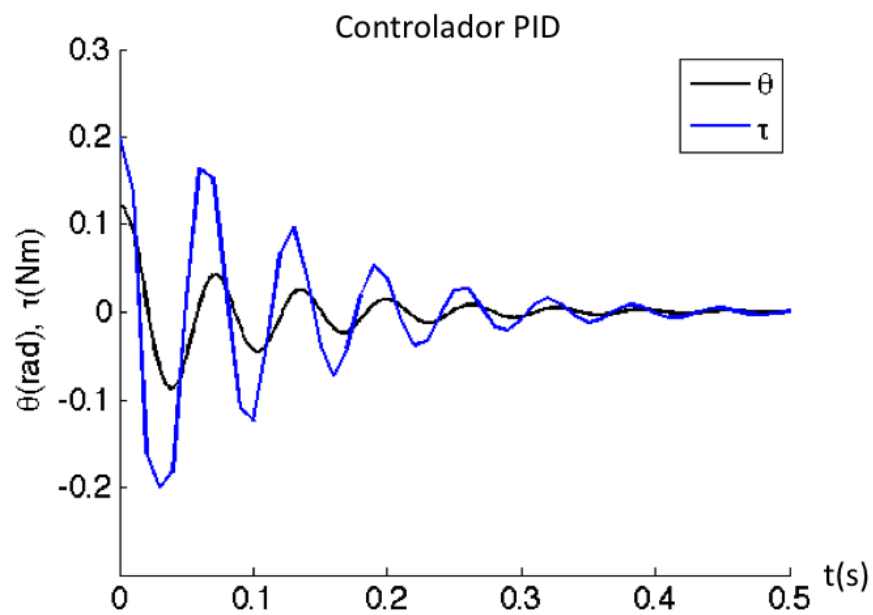


Figura 4.2: Resposta ao degrau utilizando PID

que o controle não seja robusto. O comportamento final pode ser evidenciado no gráfico do erro de θ em função do tempo 4.3.

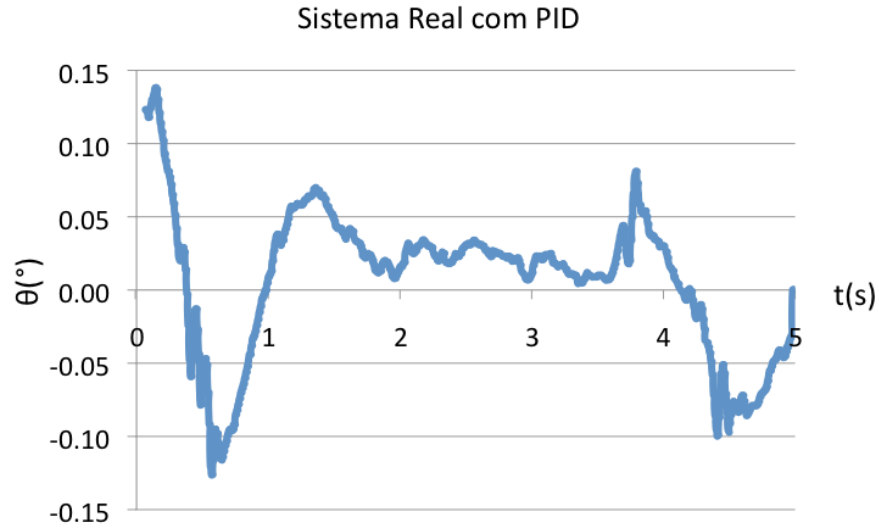


Figura 4.3: Resposta ao degrau do sistema real

Dadas as mesmas condições dos casos acima simulados, pode-se observar uma tendência de amortecimento do erro, e um período de estabilidade frágil próxima a posição de equilíbrio até aproximadamente $t = 3.5s$. Nesse momento, apesar da variável θ estar quase estável, o robô começa a ganhar velocidade e com isso aumenta sua energia cinética. Isso faz com que qualquer instabilidade do sistema torne-o não controlável pelo PID, visto que este é projetado para situações próximas ao equilíbrio (posição e velocidade iguais a zero).

Mesmo com essas dificuldades foi possível fazer com que o robô mantivesse seu equilíbrio por em média 20 segundos antes que adquirisse velocidades muito altas e acabasse caindo.

5 Conclusão

Neste trabalho foram apresentados os principais modelos e técnicas de controle encontrados na literatura para manter o equilíbrio de um robô móvel semelhante ao pêndulo invertido. Dentre as soluções estudadas, duas foram analisadas através de simulações, que demonstraram a controlabilidade e estabilização do sistema descrito, uma por realimentação por espaço de estados e outra controle por PID, ambas utilizando modelos lineares do sistema. Além disso, um robô móvel foi construído e controle do sistema real através de um PID levemente modificado foi testado.

Por fim, pode-se concluir que a utilização do PID utilizado atinge as expectativas e consegue controlar o sistema, ainda que com pequenos pontos de perda de estabilidade.

O grande desafio proposto por esse projeto dado por seu caráter interdisciplinar e completo, que se desenvolveu nas quatro grandes áreas que envolvem o curso (mecânica, eletrônica, computação e teoria de controle) foi alcançado com sucesso.

Referências

- 1 Departamento de engenharia mecatrônica e sistemas mecânicos em:
<<http://pmr.poli.usp.br.euniversidade.com.br/content/graduacao>>. Acesso em:
23 maio 2010.
- 2 MARINO, R. On the largest feedback linearizable subsystem. SYSTEMS & CONTROL LETTERS, 6., 1986, North-Holland.
- 3 SALEMO, A.; ANGELES, J. On the Nonlinear Controllability of a Quasiholonomic Mobile Robot. INTERNATIONAL CONFERENCE OF ROBOTICS & AUTOMATION, 2003, Taipei, Taiwan.
- 4 SALEMO, A.; ANGELES, J. The Control of Semi- Autonomous Two-Wheeled Robots Undergoing Large Pay load-Variations. INTERNATIONAL CONFERENCE OF ROBOTICS & AUTOMATION, 2004, New Orleans, LA.
- 5 HA, Y.; YUTA, S. Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot. ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS, 17., 1996, Japan.
- 6 NGUYEN, H. ET AL. Segway Robotic Mobility Platform. MOBILE ROBOTS, 17., 2004, Philadelphia, PA.
- 7 GRASSER, F.; D'ARRIGO, A.; COLOMBI, S.; RUFER, A. JOE: A mobile, inverted Pendulum. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, AUBURN, v. 49, n. 1, p. 107, 2002
- 8 FANTONI, I. ET AL Energy Based Control of the Pendubot. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, v. 45, n. 4, p. 725, 2000
- 9 BLANKESPOOR, A.; ROEMER, R. Experimental Verification of the Dynamic Model for a Quarter Size Self-Balancing Wheelchair. AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2004, Boston.
- 10 HA, H. ET AL A robust control of mobile inverted pendulum using single accelerometer. THE FIFTEENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 2000, Oita, Japan.
- 11 PATHAK, K. ET AL Velocity and Position Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, v. 21, n. 3, p. 505, 2005
- 12 SHIMADA, A.; HATAKEYAMA, N. High-Speed Motion Control of Inverted Pendulum Robots. IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED MOTION CONTROL, 9., 2006, Istambul.
- 13 BAERVELDT, A.; KLANG, R. A Low-cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter. CENTER FOR COMPUTER SYSTEMS ARCHITECTURE, HALMSTAD UNIVERSITY, Halmstad, Sweden.

- 14 NAWAWI, S.W.; AHMAD, M.N.; OSMAN, J.H.S. Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Copenhagen, v. 39, mar.2008
- 15 SHERMAN, B.; SHERMAN, M. nBot Balancing Robot. Disponível em: <<http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robot/nbot/>>. Acesso em: 26 nov. 2010.
- 16 ANDERSON, D. BaliBot, An Inverted Pendulum Robot. Disponível em: <<http://home.comcast.net/~botronics/balibot.html>>. Acesso em: 26 nov. 2010.
- 17 KASPER; BENT; JOHNNY Experiments with the LEGO segway, legway. Disponível em: <<http://wiki.aasimon.org/?id=marvin:lab4>>. Acesso em: 26 nov. 2010.
- 18 MATULICH, A. All-Pole IIR filters. Disponível em: <<http://unicorn.us.com/alex/buttercrit.html>>. Acesso em: 26 nov. 2010.
- 19 LEE, S.S.; LEE, J.M. Robust control of the inverted pendulum and mobile robot. *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, 2009*, Suwon, Korea
- 20 MAYBECK, P. An Introduction to the Kalman Filter. *University of North Carolina at Chapel Hill, 2001*, Los Angeles, CA.
- 21 WELCH, G.; BISHOP, G. Stochastic models, estimation, and control. *Academic Press New York, 1979*, New York.
- 22 WELCH, G.; BISHOP, G. An Introduction to the Kalman Filter. *University of North Carolina at Chapel Hill, 2006*, Los Angeles, CA.
- 23 GHI ELECTRONICS USBizi - Accessible Prototyping & Evaluation. Disponível em: <<http://www.ghielectronics.com/product/113>>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- 24 POLOLU ROBOTICS & ELECTRONICS 150:1 Micro Metal Gearmotor HP. Disponível em: <<http://www.pololu.com/catalog/product/997>>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- 25 POLOLU ROBOTICS & ELECTRONICS TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier. Disponível em: <<http://www.pololu.com/catalog/product/713>>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- 26 SPARKFUN ELECTRONICS Gyro Breakout Board - LPR503AL Dual 30°/s. Disponível em: <http://www.sparkfun.com/commerce/product_info.php?products_id=9422>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- 27 SPARKFUN ELECTRONICS Dual Axis Accelerometer Breakout Board - ADXL213AE +/-1.2g. Disponível em: <http://www.sparkfun.com/commerce/product_info.php?products_id=843>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- 28 POLOLU ROBOTICS & ELECTRONICS Pololu 42x19mm Wheel and Encoder Set. Disponível em: <<http://www.pololu.com/catalog/product/1218>>. Acesso em: 13 abr. 2010.

- 29 ROBOT ELECTRONICS USB to I2C. Disponível em: <http://www.robot-electronics.co.uk/acatalog/USB_I2C.html>. Acesso em: 13 abr. 2010.

Apêndice A – Detalhes técnicos do Projeto

Os dispositivos essenciais correspondem às funções de sensoriamento (acelerômetro, giroscópio, encoder), de processamento (Micro-controlador), de comunicação (rádio) e de acionamento (motores e drivers) e foram escolhidos através da seguinte lógica:

- **Microcontrolador:** pela grande versatilidade e alta frequência de clock escolhemos o USBizi DevSys board ¹.
- **Motor:** dado o valor do torque necessário de $0,233Nm$, optamos pelo motor Micro Metal Gearmotor HP da loja Pololu² com redução de 150:1, o que nos fornece um torque de $0,314Nm$.
- **Rodas:** para evitar deslizamento, a necessidade de rodas com grande espessura nos levou a escolha de rodas de aeromodelismo. Rodas com o raio especificado podem ser encontradas por exemplo em lojas de aeromodelismo em geral. A roda da DUBRO de 4 polegadas de raio satisfaz essas características.
- **Driver:** O driver TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier além de possuir um preço atrativo, possui controle para ambos os motores e atende às suas especificações. Também pode ser encontrado na Pololu².
- **Sensores:** para medir a velocidade angular temos o Gyro Breakout Board - IDG1215 como opção, que é um giroscópio analógico com fundo de escala de $67^\circ/s$, que a princípio parece suficiente à nossa aplicação. O acelerômetro Dual Axis Accelerometer Breakout Board - ADXL213AE pode ser utilizado para obter uma medida mais precisa do ângulo de inclinação. Ambos podem ser encontrados na Sparkfun³. Há ainda a necessidade de encoders nas rodas, mas por não encontrar opções satisfatórias, decidimos por utilizar os

¹<http://www.ghielectronics.com>

²<http://www.pololu.com>

³<http://www.sparkfun.com>

encoders disponíveis que são específicos para o motor escolhido, e adaptá-lo às rodas especificadas no projeto.

- **Rádio:** optamos por utilizar uma comunicação serial via rádio para enviar as informações relevantes do robô para um computador onde as mesmas podem ser observadas mais confortavelmente. O Easyradio da Robot-Electronics⁴ realiza essa função de forma simples por oferecer um módulo pronto para ser conectado ao PC (RF04).

A.1 Fonte de Alimentação

Pela sua característica de mobilidade faz-se necessário também o projeto da fonte de alimentação que irá redistribuir a tensão necessária para os componentes.

Componente	Tensão de Alimentação	Corrente
USBizi	5V	100 mA
Driver	5V	1.1 mA
Encoder	5V	14 mA
Radio	5V	10 mA
Motor	9V	500 mA
Acelerômetro	3.3V	1 mA
Giroscópio	3.3V	6.8 mA

Para alimentar o robô móvel foi escolhida uma bateria de NiMH de 6 células tipo C, totalizando 7.2V, e com capacidade de 4500mAh, a fim de obter grande autonomia de carga. O peso da bateria não é fator crítico do projeto, pelo contrário, já que a bateria é a principal contribuinte da massa do pêndulo.

Com isso tem-se a necessidade de 3 reguladores de tensão distintos:

- MC34063: regulador 9V / 500 mA
- LP38690: regulador 5V / 1 A
- LP2950: regulador 3.3V / 100 mA

A seguir encontram-se os cálculos para a montagem do MC34063 em step-up com as seguintes configurações:

$$V_{in} = 7.2V \quad V_{out} = 9V \quad I_{max} = 500mA \quad V_{ripple(pp)} = 0.5V$$

⁴<http://www.robot-electronics.co.uk>

Valores típicos (retirados do datasheet do MC34063):

$$f = 33kHz$$

$$V_{sat} = 1V$$

$$V_f = 0$$

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{V_{out} + V_f - V_{in(min)}}{V_{in(min)} - V_{sat}} = 0.2903$$

$$t_{on} + t_{off} = \frac{1}{f} = 30.3\mu s$$

$$t_{off} = \frac{t_{on} + t_{off}}{\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1} = 23.5\mu s$$

$$t_{on} = (t_{on} + t_{off}) - t_{off} = 6.8\mu s$$

$$C_t = 4 \times 10^{-5} t_{on} = 272pF$$

$$I_{pk} = 2I_{max} \left(\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right) = 1.2903A$$

$$R_{sc} = \frac{0.3}{I_{pk}} = 0.23\Omega L_{min} = \left(\frac{V_{in(min)} - V_{sat}}{I_{pk}} \right) t_{on} = 32.7\mu F$$

$$C_o = 9 \frac{I_{out} t_{on}}{V_{ripple(pp)}} = 61.2\mu F$$

$$V_{out} = 1.25 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \rightarrow R_1 = \frac{R_2 \times 1.25}{V_{out} - 1.25}$$

assumindo $R_2 = 15k\Omega$, encontramos $R_1 = 2.42k\Omega$.

A partir dos valores calculados, buscamos os valores comerciais mais próximos dos resistores e capacitores. O projeto final dos 3 reguladores se encontram abaixo:

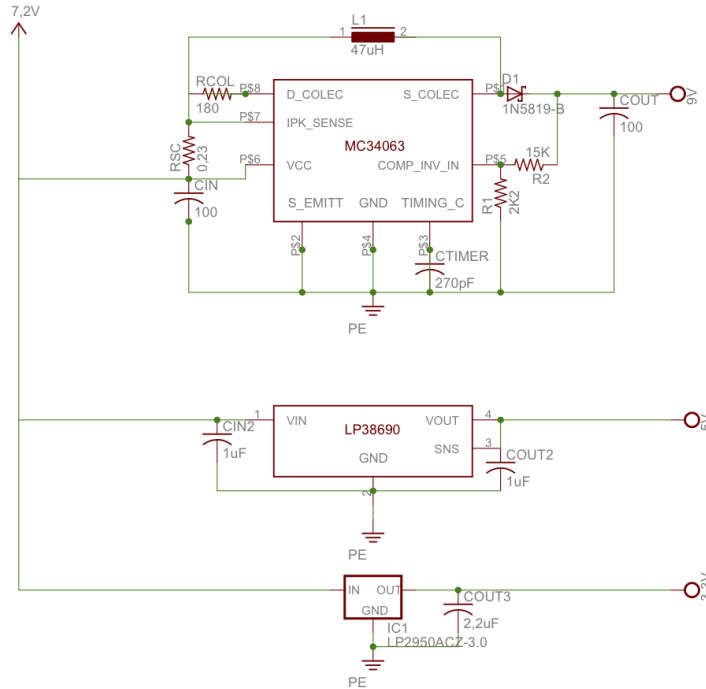


Figura A.1: Projeto elétrico: Fonte de Alimentação

A.2 Lista de componentes de hardware utilizados

A lista de componentes está resumida a seguir:

Componente	Tipo
Motor	150:1 Micro Metal Gearmotor HP
Driver	TB6612FNG dual motor driver
Micro-controlador	USBizi DevSys Board
Acelerômetro	ADXL213AE Dual Axis Accelerometer
Giroscópio	LPR503AL Dual 120°/s
Encoder/Kit Rodas	Pololu 42x19 mm wheel and Encoder Set
Rádio(USB)	RF04
Rádio	ER900TRS
Regulador 3,3v	LP2950
Regulador 5v	LP38690
Regulador 9v	MC34063
Baterias (7,2v)	6 Baterias tipo C NiMH 4500 mAh
Rodas de Aeromodelismo	Rodas Dubro $\phi 4'$

A.3 Integração dos Componentes

O projeto elétrico interligando os sensores e acionadores ao micro-controlador, como pode ser vistos nas fig A.3, A.2 e A.4, foi realizado após um intenso estudo das especificações dos componentes escolhidos.

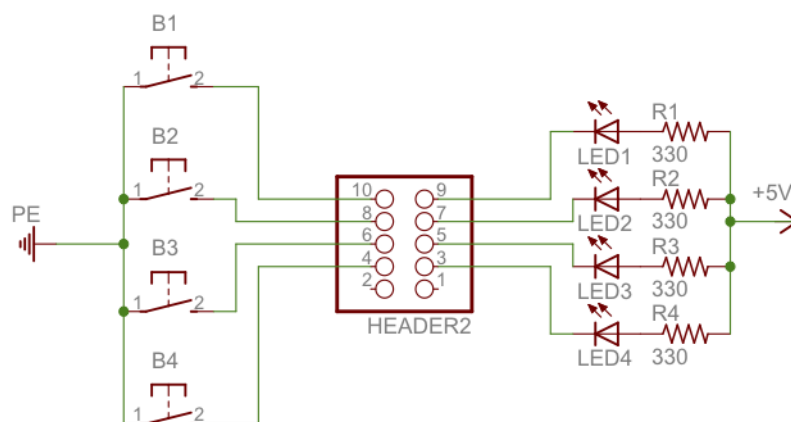


Figura A.2: Projeto Elétrico: Interface

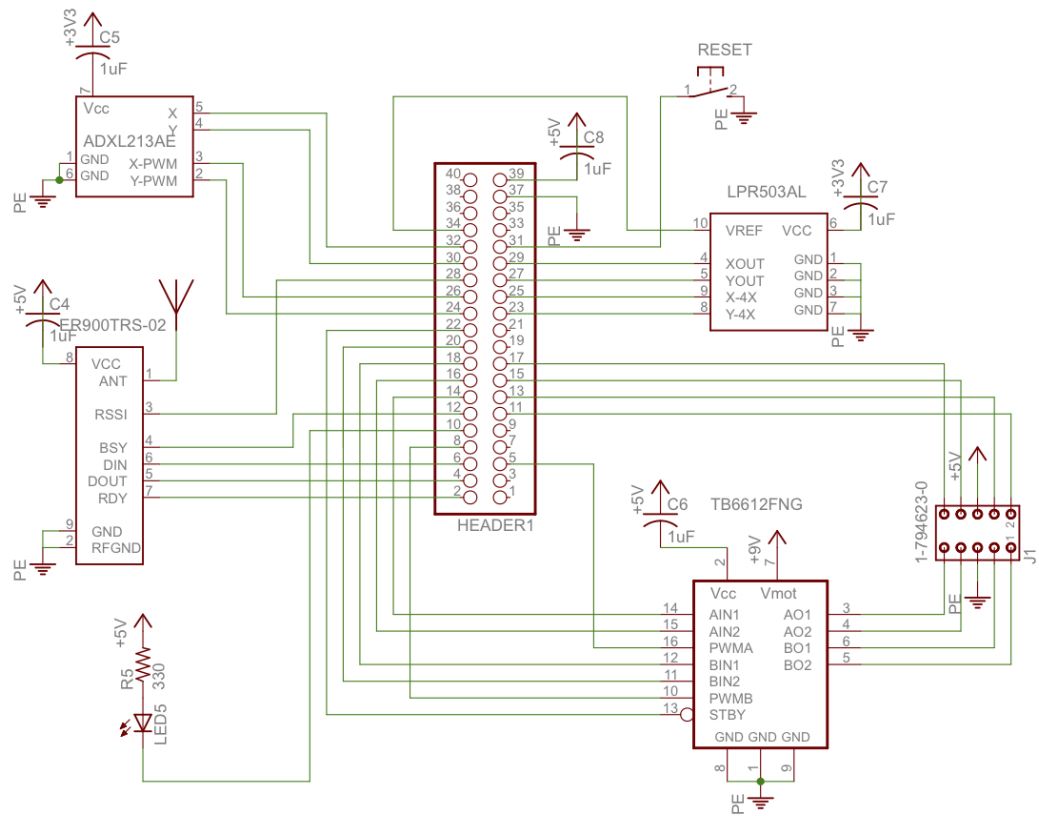


Figura A.3: Projeto Elétrico: Sensores e Microcontrolador

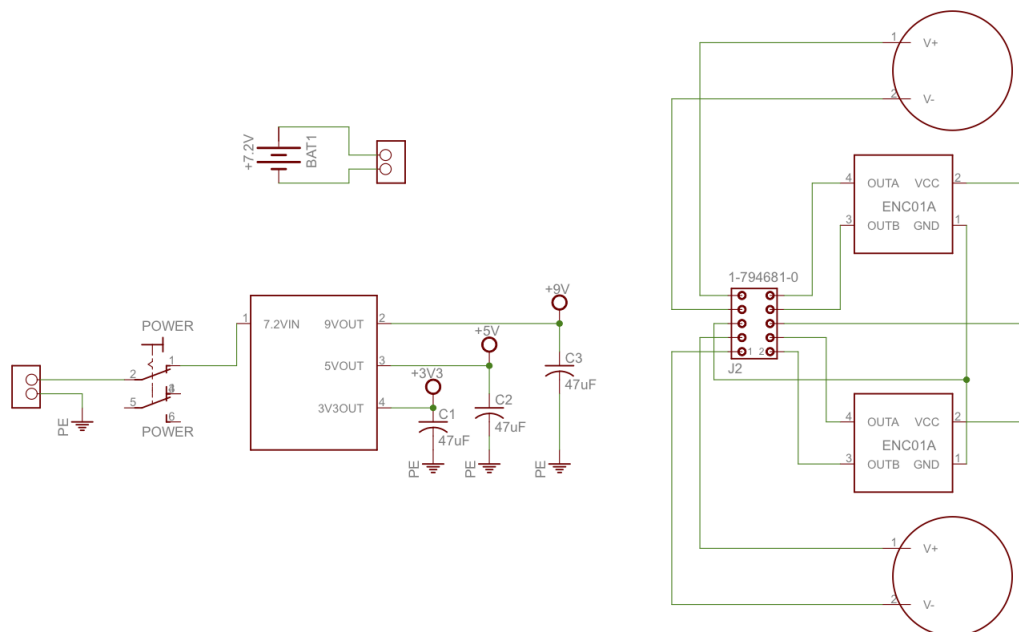


Figura A.4: Projeto Elétrico: Alimentação e acionamento

A.4 Projeto da estrutura mecânica

A estrutura física e mecânica do robô foram inspiradas do robô nBot (15)(fig. A.5) desenvolvido por David P. Anderson. A idéia de um robô com formato de torre com alguns andares que teriam diferentes finalidades pareceu interessante e gerou um esboço inicial. Esse esboço inicial (fig. 3.1) serviu de base para se questionar alguns pontos de vista e definir o posicionamento de algumas partes do robô.

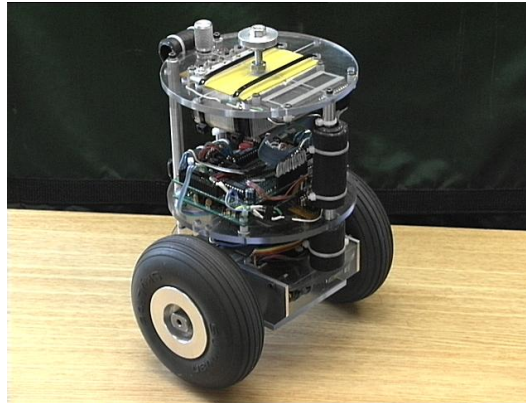


Figura A.5: nBot⁵

A única restrição que o modelo utilizado nas simulações exigia era que o robô fosse simétrico com relação ao plano zx , e o formato definido no esboço é compatível com essa exigência. Portanto, o que restava era definição das medidas.

Lateralmente não havia restrições no modelo(secção 2.2), porém esteticamente a bases quadrada parecia uma boa pedida. Portanto a idéia era ter uma base quadrado que ocupasse o mínimo possível de espaço. Porém, um dos andares deveria abrigar o pack de baterias, o elemento de maior tamanho físico, e portanto, a base quadrada deveria ter espaço suficiente para as baterias e para parafusar os postes de sustentação. Dado essas informações, o valor mínimo encontrado, dado diversas formulações de posições de baterias, foi de 90mm de lado.

A altura final do robô também não entrava no modelo (secção 2.2) descrito de forma direta, porém a altura do centro de massa fazia parte das variáveis do modelo. Como o peso maior se encontra no pack de baterias, foi necessário desenvolver um sistema de ajuste da altura do centro de massa baseado no pack de baterias. Assim, alterando-se a altura do andar do pack de baterias, o centro de massa seria deslocado com ele devido à grande concentração de massa. Assim,

⁵fonte: <http://geology.heroy.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>

foram projetados postes de sustentação de 3 alturas diferentes para os testes finais do algoritmo de controle. Dessa forma, será possível regular a altura do centro de massa e observar como o algoritmo se comporta nas diferentes situações.

A partir destas definições cada um dos 3 andares ficou definido para abrigar um conjunto distinto de funcionalidades, sendo esses:

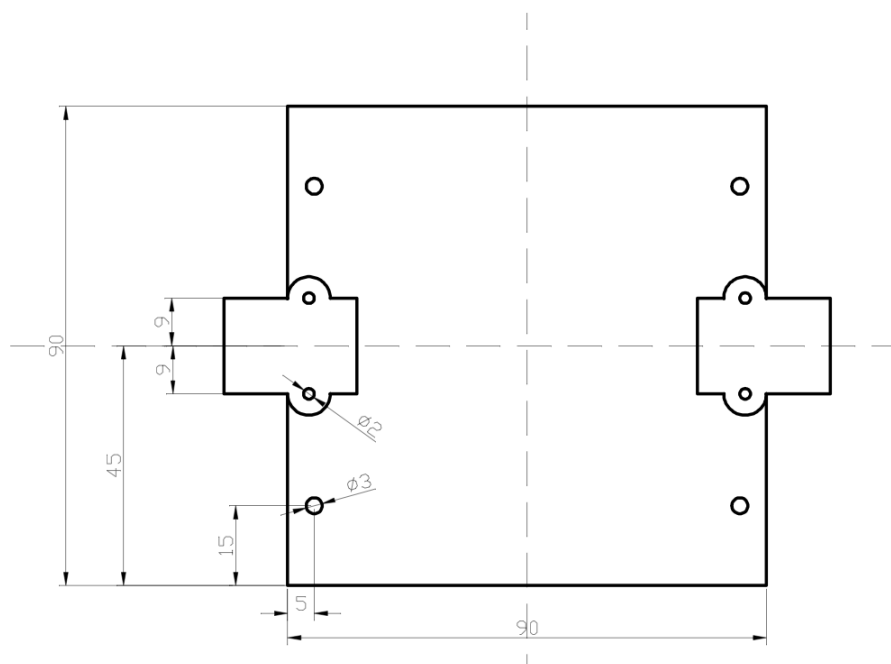
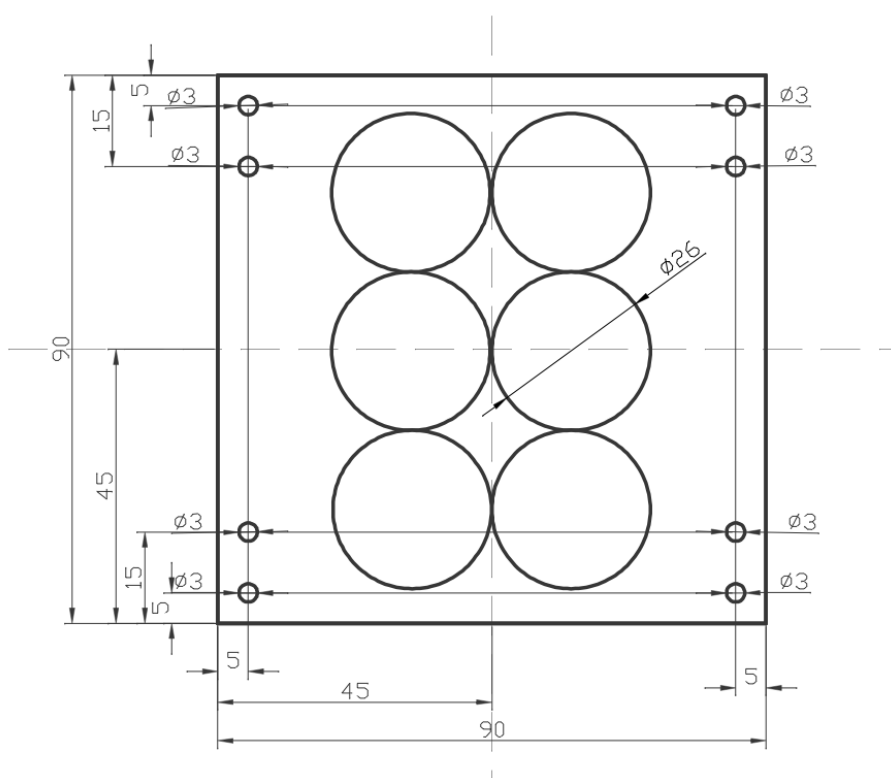
- **Eletrônica:** composta pelos componentes eletrônicos (microcontrolador, driver, sensores, radio e fonte de alimentação) bem como conectores para facilitar a ligação entre os componentes de outros andares e também dispositivos de interface humana, como LED's e botões, principalmente a fim de facilitar testes e ajudar a depurar futuros programas. Obviamente este deve ser o patamar superior do robô para ficar acessível.
- **Baterias:** O pack de Baterias representa quase que a totalidade da massa do pêndulo, tendo grande influência no controle tanto o seu peso quanto sua distância ao eixo das rodas. Sendo assim, esse conjunto compõe o andar do meio
- **Acionamento:** Os motores e rodas compõem o último grupo de componentes que forma a base do robô.

As figuras A.8, A.7 e A.6 mostram o projeto mecânico de cada um dos 3 andares detalhados com a posição pretendida de cada componente e os furos para fixação. A partir desse desenho é que foi possível se iniciar a fabricação dos mesmos.

Devido à facilidade de manuseio e a disponibilização do material pelo orientador, os andares foram construídos de chapas de alumínio com 3 mm de espessura. Devido à mesma razão, para sustentar os andares superiores foram utilizadas barras de alumínio de perfil sextavado, já utilizados pelo próprio professor orientador em protótipos prévios.

A distância entre o patamar intermediário e o topo é fixa, e determinada pelo tamanho do pack de baterias, com uma folga de 10 milímetros para facilitar sua remoção. Já a altura do andar do meio em relação a base poderá ser alterada, a fim de oferecer maior flexibilidade ao modelo de controle, como dito anteriormente. Sendo assim, projetamos 3 alturas diferentes para o suporte desse andar, sendo elas 175 mm, 135 mm e 85 mm.

Contudo, ainda resta, como projeto mecânico uma solução de acoplamento entre as rodas de aeromodelismo e os motores. Na tentativa de minimizar os erros

**Figura A.6:** Projeto mecânico: Base**Figura A.7:** Projeto mecânico: Meio

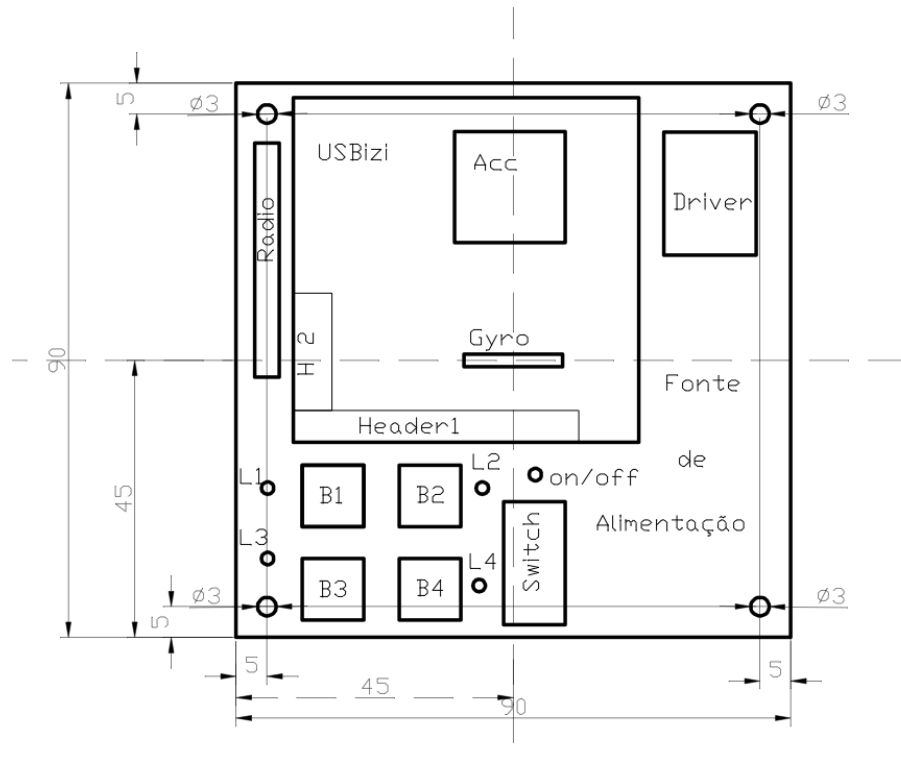


Figura A.8: Projeto mecânico: Topo

de medição foi escolhido os encoders que vinham acoplados ao motor comprado (Veja a fig. A.9). Porém, a roda que vinha junto ao kit era muito pequena para as nossas pretensões. Assim, a decisão foi de refazer o cubo das rodas de aeromodelismo para poder receber as ranhuras do encoder e permitir a fixação no eixo do motor.



Figura A.9: Acoplamento do kit do Motor

A.5 Construção do Cubo

Com o projeto em mãos (fig. A.10), seguiu-se a construção dos cubos. Nesta fase, encontramos diversas dificuldades, que não pudemos prever antes. Apesar do desenho parecer um trabalho comum de uma peça com simetria axial, não havia ferramenta pronta para usinar canais tão retos e profundos, um bedame precisou ser preparada especificamente para isso. Outro problema foi a usinagem da "tampa" do cubo, devido a sua espessura muito fina para ser afixada no torno. Isso pôde ser contornado pela sequência correta de usinagem. Mais um detalhe a ser observado é em relação ao parafuso de fixação, que para poder passar rosca até a profundidade correta, foi necessário alargar o furo, para que a ferramenta pudesse alcançar o furo do eixo o motor.

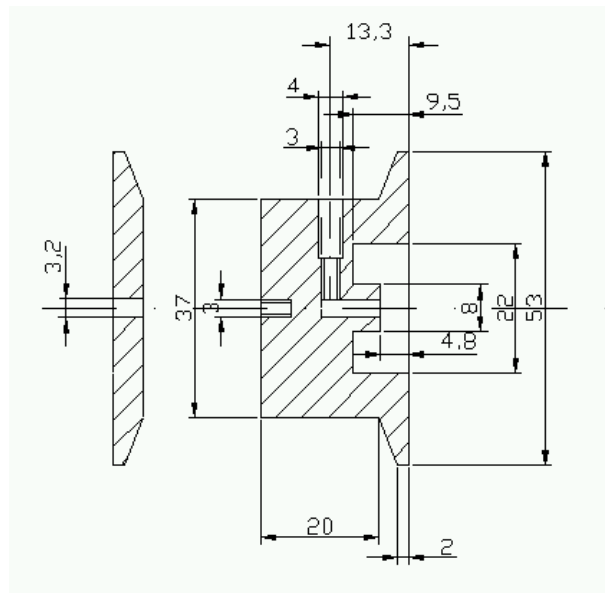


Figura A.10: Projeto mecânico: Cubo

Após algumas tentativas e duas semanas de trabalho, chegamos ao resultado que pode ser visto nas figuras A.11 e A.12.

Com o cubo pronto, faltava ainda a fita para o encoder, esta foi desenhada em um programa de CAD, impressa e colada dentro do canal do cubo. No entanto, com tamanhos iguais de espaços pretos e brancos a leitura dos sensores fornece uma onda quadrada distorcida. Por tentativa e erro, chegamos a uma relação ótima de 1,3:1 de espaços pretos para brancos, que nos forneceu uma leitura muito parecida com a roda original do kit do motor.



Figura A.11: Cubo montado



Figura A.12: Cubo desmontado