

PROJETO E CONTROLE DE UM TRANSPORTADOR PESSOAL ROBÓTICO AUTO-EQUILIBRANTE

Aluno: Guilherme Machado Pereira
Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, pode-se perceber a incorporação progressiva da robótica em nosso cotidiano. Exemplos de áreas com expressiva atuação de sistemas robóticos incluem tanto as indústrias automobilísticas e demais indústrias com alta tecnologia agregada, assim como os veículos e residências automatizados. Essa automação visa ao aumento da eficiência de algum processo, o que só é possível através de técnicas de controle. Estas atribuem ao sistema alguma inteligência computacional capaz de efetuar medições e verificar seu próprio funcionamento, introduzindo correções de forma adaptativa às mudanças dos principais elementos sob controle.

Dentro da área da robótica encontram-se os transportadores pessoais auto-equilibrantes, que são veículos de 2 rodas que possuem como princípio de funcionamento o equilíbrio do indivíduo que o usa. Através de um giroscópio e de um acelerômetro, o transportador é capaz de perceber variações na posição do corpo do condutor, conforme este se inclina tanto para frente quanto para trás. O transportador, na tentativa de manter-se em constante equilíbrio vertical, avança automaticamente conforme o condutor projeta seu peso e se inclina para frente. O equivalente acontece ao inclinar a haste de comando para trás [1]. O deslocamento do transportador é consequência de seu comportamento adaptativo às mudanças impostas, ou seja, de sua estabilização dinâmica.

Esta interação intuitiva entre homem e máquina torna a utilização dos transportadores pessoais auto-equilibrantes confortável e semelhante ao ato de caminhar. Essa vantagem, associada à sua grande flexibilidade de movimentos e tamanho compacto, o torna uma grande ferramenta de transporte urbano, principalmente nas grandes metrópoles em que o sistema de transporte público não é satisfatório [2].

A sua aplicação na substituição dos veículos à combustão também traz benefícios para o meio ambiente. Por fazer uso de energia elétrica, não libera gases de efeito estufa para a atmosfera. Além disso, por ocupar um volume consideravelmente menor que um carro de passeio comum, promove um aproveitamento significativo de espaço.

História

Os transportadores pessoais auto-equilibrantes começaram a ser produzidos em larga escala e comercializados a partir de 2002, graças à empresa americana *Segway*®. O desenvolvimento do *Segway Personal Transporter* (Transportador Pessoal) teve início em 1995, depois que Dean Kamen presenciou as dificuldades de locomoção de um deficiente físico em sua cidade. A partir daquele momento, Dean Kamen e sua equipe focaram suas pesquisas em ferramentas para otimizar o transporte urbano, de modo que em dezembro de 2001 foi anunciado o primeiro modelo do *Segway PT*.

Atualmente, nove anos depois do lançamento, a empresa conta com a segunda geração deste equipamento e o exporta para diversos países. A marca *Segway*® detém domínio absoluto sobre este nicho do mercado, uma vez que tem a patente de transportadores pessoais deste tipo.



Figura 1. Modelo i2-Multi da marca *Segway*®

Objetivos

Este trabalho teve por objetivo o projeto e desenvolvimento de um sistema de transporte pessoal elétrico auto-equilibrante de apenas duas rodas. Isto incluiu desde a estrutura mecânica e alguns componentes eletrônicos até simulações no *software MATLAB* e testes finais. Este projeto também visa obter um custo de construção relativamente baixo em comparação aos preços comerciais de transportadores desse tipo, que custam em torno de sete mil dólares americanos.

Metodologia

Inicialmente foi realizada uma pesquisa acerca de projetos e estudos relacionados ao tema, a fim de se analisarem os conceitos básicos e maiores dificuldades associados à construção de transportadores auto-equilibrantes. Em seguida, com base nessas informações, foram feitos desenhos esquemáticos de como seria a estrutura do transportador. Também foram discutidas as especificações do projeto, incluindo a forma como seriam realizadas curvas assim como questões acerca da ergonomia e segurança.

Uma vez que foi definida a composição do guidão e da haste vertical, as peças que comporiam a estrutura mecânica foram selecionadas e devidamente importadas através do catálogo virtual da *Bosch Rexroth - Aluminum Framing Shop*. Optou-se por peças de alumínio devido à sua baixa densidade, qualidade fundamental em estruturas móveis.

Para que o projeto se tornasse viável em curto prazo, alguns componentes foram aproveitados de um robô de competições pré-existente no laboratório, incluindo os motores, baterias, rodas, caixas de redução e placa eletrônica de alta potência. O robô escolhido foi o Anúbis, construído pela equipe RioBotz no ano de 2004 (figura 2).



Figura 2. Robô Anubis da equipe RioBotz

Este robô foi escolhido por ter uma base adequada para um transportador, com as duas rodas em paralelo e um suporte para transportar o usuário. No entanto, foi necessário desenhar as modificações estruturais para transformar este robô de competição teleoperado em um transportador pessoal. Inicialmente, nós tivemos de construir um suporte rígido para segurar a haste de controle do transportador, já que ela teria de suportar todo o torque realizado pelo condutor para movimentar o transportador (figura 3).

Com o suporte da haste fixado à base do transportador, montou-se a haste vertical. Foi introduzida uma fácil regulação da altura vertical e da angulação dessa haste, capacitando o transportador a se adaptar a cada usuário. A possibilidade de regulação satisfazia um dos requisitos do projeto, sua ergonomia (figura 4).

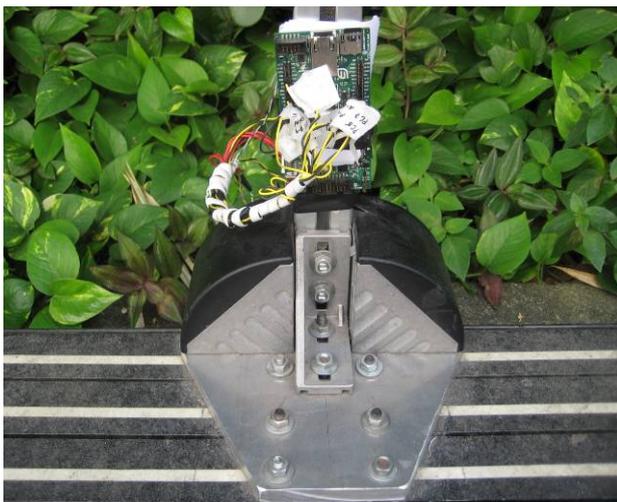


Figura 3. Suporte para a haste



Figura 4. Haste vertical com reguladores de altura e inclinação

Outra característica do transportador que recebeu maior atenção foi sua segurança e dirigibilidade. Visando aperfeiçoar estes aspectos em relação aos transportadores comerciais, foi alterada a maneira de se realizar curvas. Nos transportadores comerciais, como é o caso do *Segway*®, a haste toda se inclina para a realização de uma curva, o que pode trazer riscos para o usuário. Em caso de desequilíbrio, o condutor tentará instintivamente segurar na haste vertical para recuperar a estabilidade, enquanto esta não oferecerá resistência para sustentá-lo. Apesar do que era esperado, a haste se inclinará para o lado, fazendo com que o transportador movimente-se em círculos. Esta situação pode causar um acidente.

Objetivando solucionar este problema, a haste vertical do protótipo construído permanece imóvel e fixa na base. Para realizar curvas, somente o guidão é deslocado no sentido desejado. Um conjunto de molas em cada um dos lados do guidão promove seu retorno à posição central (neutra), garantindo que, mesmo em caso de desequilíbrio, o transportador siga em linha reta.

Foi utilizado um sensor de deslocamento linear fixado no topo da haste. Com seu núcleo conectado ao guidão, este sensor era capaz de medir seu deslocamento e enviar o sinal à placa de controle, para interpretar o movimento e realizar a curva. O sensor escolhido para esta função foi um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) devido à sua funcionalidade e precisão (figura 5).

O funcionamento desse sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Uma corrente é aplicada na bobina primária, fazendo com que uma tensão seja induzida em cada bobina secundária. O LVDT fornece como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que deve estar fixado no que se deseja medir [3]. A figura 6 mostra uma vista em corte desse sensor, com sua bobina primária (A), as duas bobinas secundárias (B) e seu núcleo no meio.

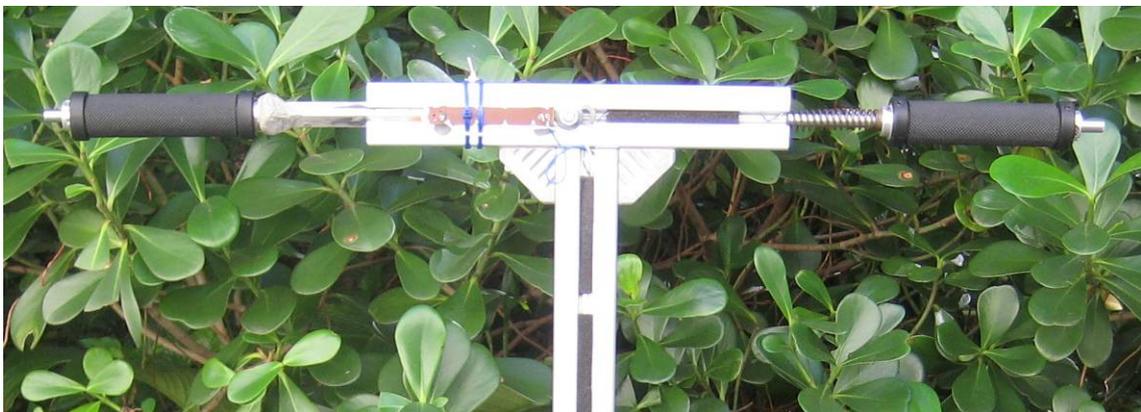


Figura 5. Guidão com o LVDT e molas

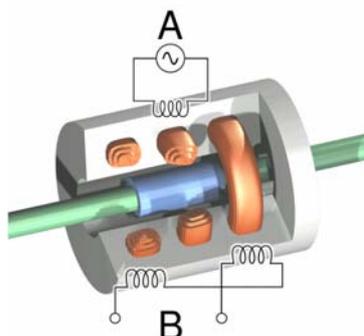


Figura 6.

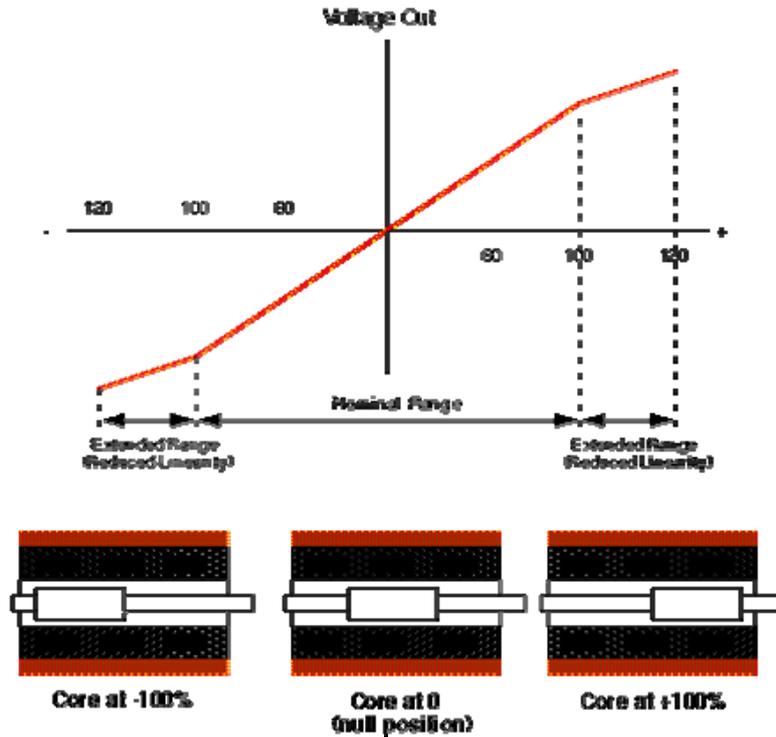


Figura 7. Tensão de saída em função da posição do núcleo do LVDT

O aluno de mestrado César Raúl Mamani Choquehuanca foi o responsável pela implementação da estratégia avançada de controle no sistema construído. Em função do comportamento não-linear do transportador, optou-se por uma técnica de controle usando Lógica *Fuzzy*. A técnica de controle PID não apresentou resultados satisfatórios nos testes realizados, apesar de sua facilidade de implementação, por ser uma técnica linear.

Após a realização das tarefas acima descritas, procedeu-se com a execução da simulação tridimensional do transportador através do *software MATLAB*. Para tal, todas as dimensões do protótipo foram medidas e seus principais componentes foram pesados. Com o auxílio do mestrando César foi possível analisar o desempenho teórico do transportador, levando-se em conta o tempo de estabilização, o erro em regime permanente, resposta ao impulso, e frequência natural do sistema.

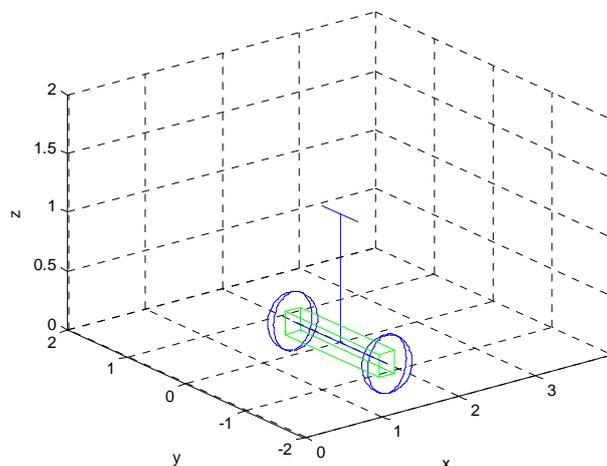


Figura 8. Desenho em wireframe do transportador

Resultados da simulação

As simulações no *MATLAB* geraram os seguintes gráficos relativos aos algoritmos de controle *Fuzzy* e PID, respectivamente, analisando as variáveis: posição angular, deslocamento e variação angular, sempre em função do tempo de simulação em segundos.

Gráfico 1 - Simulação com *Fuzzy*

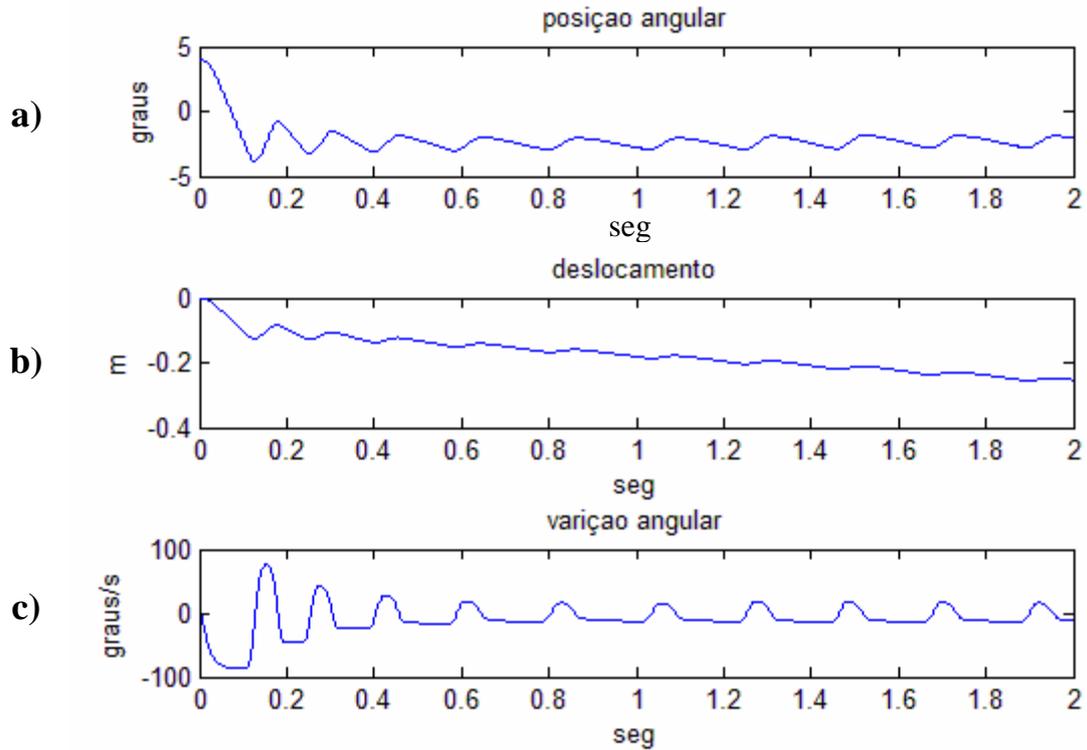
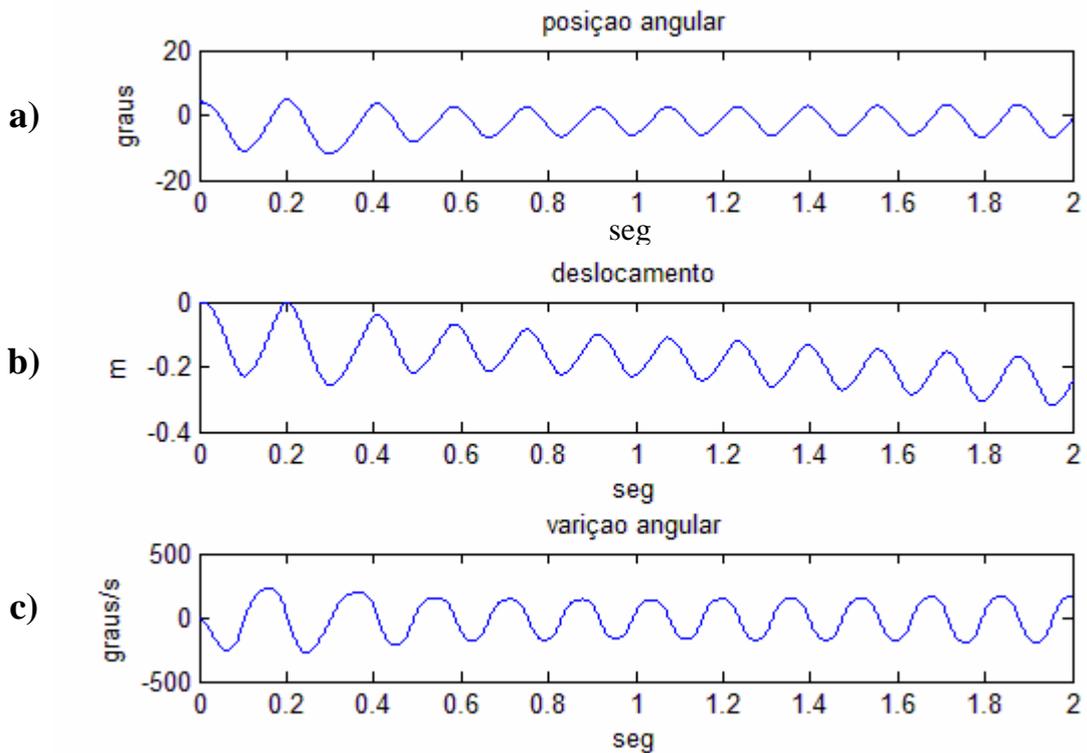


Gráfico 2 - Simulação com PID



A partir dos gráficos 1 e 2 dispostos acima, é possível perceber a maior estabilidade da técnica *Fuzzy*. Através do gráfico 1) a) “Posição Angular” pode-se perceber que este algoritmo estabiliza o transportador 0,4 segundos de simulação, e em seguida há pequenas variações angulares e oscilações de baixa amplitude e frequência, já que a escala do gráfico varia apenas de -5 a 5. Em contra partida, a partir do gráfico 2) a) pode-se visualizar que com a técnica de controle PID só há estabilização por volta de 0,5 segundos e as oscilações subsequentes têm maior frequência e amplitude, uma vez que os limites do gráfico são -20 e 20.

A mesma análise pode ser feita com relação aos gráficos 1)b) e 1)c) e 2)b) e 2)c) das técnicas *Fuzzy* e PID, respectivamente. Por consequência do que foi argumentado acima, é possível perceber que o transportador tem oscilações com amplitudes e frequências maiores utilizando a técnica PID, se comparado com a técnica *Fuzzy*.

Então, pode-se concluir que a técnica *Fuzzy* propicia uma maior estabilidade e funcionalidade para o sistema, já que gera oscilações de amplitudes e frequências menores enquanto mantém o transportador em equilíbrio vertical. Esta característica aproxima o protótipo de um transportador ideal, que deve manter-se em equilíbrio com pequenas variações angulares e deslocamentos lineares, quase totalmente estático. Esses fatores indicam uma melhora no funcionamento do sistema, aumentando o conforto e a segurança do usuário.

Testes e resultados

Com o projeto quase finalizado, foram feitos testes de desempenho do transportador. Essa etapa foi essencial para a calibração dos parâmetros do controle, tais como os ganhos dos controladores e obtenção de melhores estimativas sobre o desempenho dos motores. Nos testes foram analisados a distância utilizada pelo protótipo para manter-se em equilíbrio vertical e suas reações a esforços no guidão, simulando a ação do usuário. Também testou-se o funcionamento do sensor LVDT, responsável por realizar as curvas.

Por medidas de segurança, os testes iniciais foram realizados com o transportador parcialmente imobilizado e sem passageiros. Após uma série de testes, em que foi verificada a estabilidade do sistema e sua resposta adequada aos comandos, foram realizados testes com usuários sobre o veículo. Esses testes foram comparados, então, com os resultados da simulação.

Para comparar o resultado prático das duas técnicas de controle empregadas, *Fuzzy* e PID, realizou-se um teste de equilíbrio do transportador sozinho. Primeiramente, descobriu-se o ângulo em que o protótipo ficava estável verticalmente. Devido à assimetria do transportador, o ângulo medido pelos sensores não foi zero, mas -20 graus. O sinal negativo é apenas consequência da referência adotada pelo sensor. Em seguida, alterou-se o ângulo de equilíbrio nos dois algoritmos de controle e ligou-se o protótipo. O objetivo era analisar o comportamento do protótipo nas duas situações, conforme este tentava manter-se em equilíbrio vertical.

Em poucos segundos foi possível visualizar as diferenças entre as duas técnicas e obter resultados empíricos. No entanto, para poder gerar gráficos no *MATLAB* com os resultados dos testes, utilizou-se um cartão de memória acoplado à placa de controle para armazenar a posição angular do transportador ao longo do experimento. Aproveitou-se para plotar também um gráfico com a diferença entre o ângulo de equilíbrio e o ângulo observado pelos sensores. Essa variável foi denominada “erro”, já que ela indica o quanto fora do ideal o protótipo estava. Quanto menor for a variação angular em relação ao ângulo de equilíbrio (-20°), melhor é o desempenho do transportador, pois ele é capaz de corrigir seu posicionamento sem se distanciar do ângulo de equilíbrio.

Para efetuar a comparação, foram gerados os seguintes gráficos do ângulo e do erro em graus para a *Fuzzy* e PID, respectivamente:

Gráfico 3 - Teste com *Fuzzy*

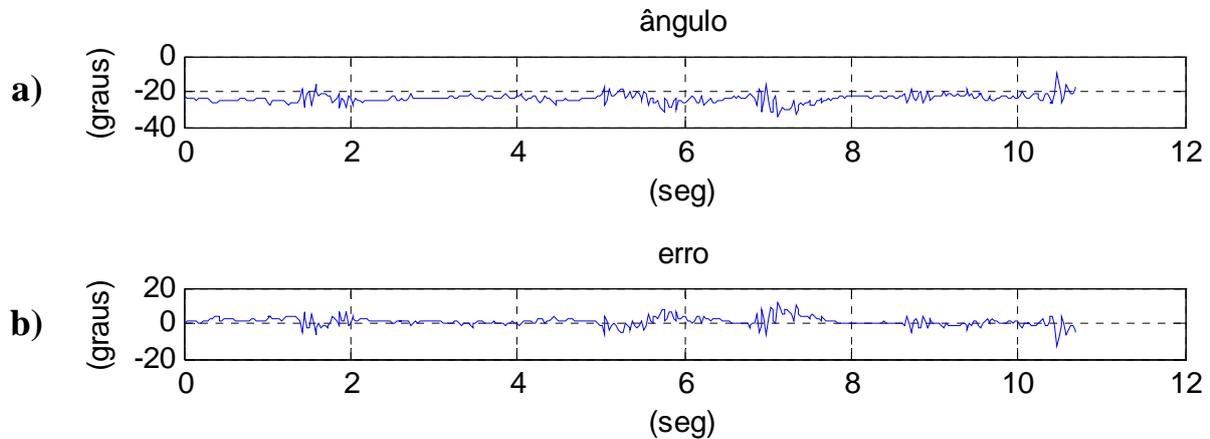
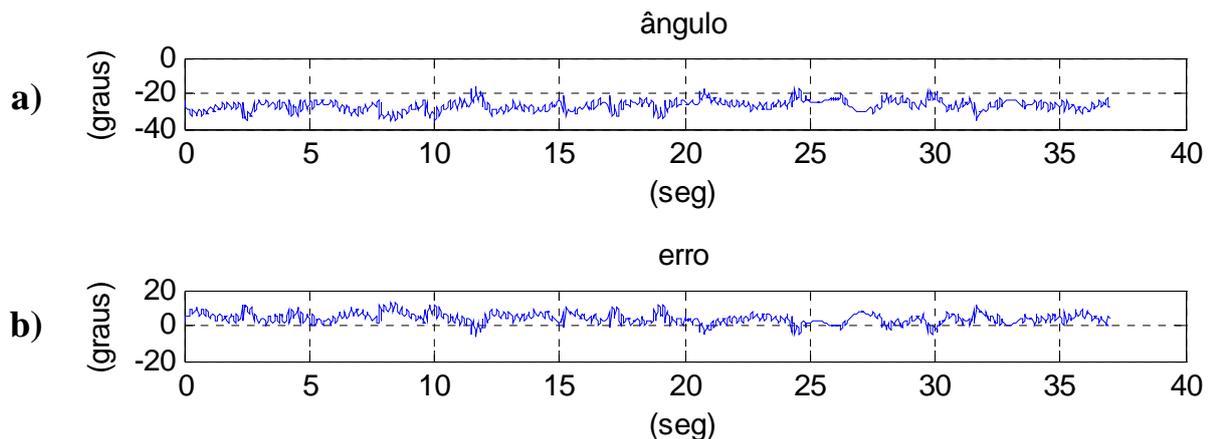


Gráfico 4 - Teste com PID



A partir dos gráficos 3 e 4 dispostos acima, é possível perceber que utilizando a técnica de controle *Fuzzy*, o ângulo da haste vertical do protótipo não varia tanto com relação ao ângulo de equilíbrio (-20°), se comparado com o PID no gráfico 4) a). Isso pode ser observado através da amplitude das oscilações dos gráficos. Como a amplitude das oscilações no gráfico 3) é menor do que no gráfico 4), pode-se dizer que o erro gerado pelo algoritmo *Fuzzy* é menor do que o obtido através do PID. O ângulo experimental permanece, de modo geral, perto de -20° .

Para efetuar comparações quantitativas, basta efetuar a integral dos gráficos 3)a) e 4)a) dos erros. Através deste cálculo obtém-se a área gerada entre a curva da função e o eixo das abscissas. Quanto maior for este valor, maior é o erro obtido. No caso do *Fuzzy*, o erro acumulado em 10 segundos de teste foi 487,1791 radiano*segundo, enquanto com o PID, obteve-se um erro acumulado de 2166,0 radiano*segundo no mesmo intervalo de tempo. Como o erro da técnica *Fuzzy* é menor, pode-se concluir que ela é mais estável e possibilita um funcionamento melhor para o transportador.

Após a realização dos testes e obtenção dos resultados, pôde-se considerar o projeto como finalizado (figura 9).

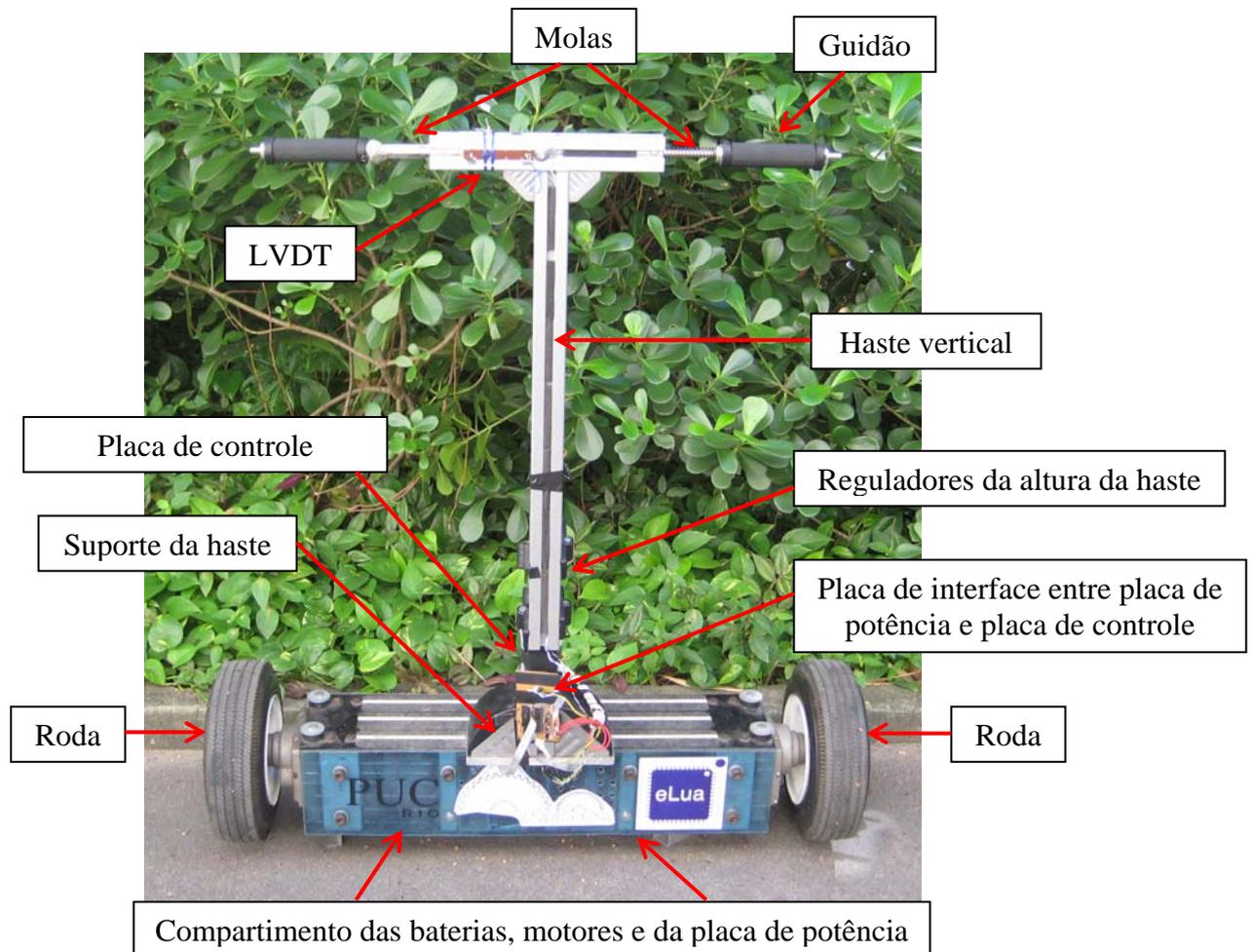


Figura 9. Transportador finalizado

Custo total do projeto

Para calcular o custo total do protótipo, foi necessário converter alguns valores de dólar americano para o real, pois algumas peças da eletrônica foram compradas nos Estados Unidos por professores do Departamento de Engenharia Mecânica. Utilizou-se uma taxa de câmbio de 1,8 reais para o preço do dólar. O custo de desenvolvimento do *software* foi nulo, pois se utilizou o *eLua*, um *software* livre desenvolvido na plataforma *Linux*. No cálculo final, foi incluído:

- Custo original do robô Anubis utilizado como base (incluindo baterias, OSMC/Victor, motores, rodas e estrutura): R\$3500,00
- Sensores utilizados, incluindo giroscópio, acelerômetro e potenciômetro deslizante linear (LVDT): R\$145,00 (US\$80)
- Placa do controlador: R\$160,00 (US\$89)
- Perfis de alumínio e demais peças encomendadas da *Bosch Rexroth*: R\$958,00
- Eletrônica variada (cabos, conectores, resistências, etc): R\$200,00
- Molas: R\$20,00

Assim, somando todos os valores acima descritos, obtém-se um custo total de R\$4983,00.

Esse valor é relativamente baixo, se comparado ao preço de venda de um transportador comercial semelhante. Para efeito de comparação, pode-se citar o modelo i2-Multi da empresa americana *Segway*®, por ser o que mais se assemelha ao protótipo desenvolvido no laboratório. Seu preço comercial nos Estados Unidos é, aproximadamente, de US\$7000 (incluindo taxas e frete), que convertido para a moeda nacional equivale a R\$12600,00. No entanto, é importante ressaltar que o preço deste modelo no mercado brasileiro é o dobro deste valor, chegando a R\$28760,00, segundo informações da empresa “Segway Brasil”, revendedora oficial do transportador em nosso país. Devido aos impostos nacionais e taxa de importação, o preço final se assemelha ao de um automóvel.

Comparação com um modelo comercial

Após terminar o projeto e realizar diversos testes com o transportador, foram obtidas e analisadas suas especificações técnicas, a fim de compará-las com um modelo comercial da empresa americana *Segway*®. Nesta comparação utilizou-se novamente o modelo i2-Multi.

Tabela 1 - Comparação entre um modelo comercial e o protótipo desenvolvido:

	<i>Segway</i> ® i2-Multi ⁽¹⁾	Protótipo
Velocidade Máxima	20 km/h	10 km/h
Tempo de recarga	8 horas	0,5 horas
Tipo de bateria	Íon de lítio (Li-ion)	Níquel Cádmio (NiCd)
Peso	47,7 kg	50,5 kg
Dimensões da base (c x l)	63 x 63 cm	76 x 16,5 cm
Altura do solo	7,6 cm	3 cm
Diâmetro dos pneus	48 cm	15 cm

(1) Fonte: site oficial do *Segway*® <www.segway.com>

Nos testes, o sistema desenvolveu apenas 6 km/h como velocidade máxima, já que a potência de seus motores foi limitada a 60% de seu máximo, por questões de segurança. Porém, sem esta limitação, a velocidade máxima estimada seria 10 km/h. Por ser originalmente um robô de competição, seus motores (*NPC-T74* e *NPC-T64*) dispõem de uma potência bem elevada, chegando a 1,6Hp, equivalente a 1,193kW no sistema internacional.

Ao analisar as medidas de construção dos dois modelos, é possível perceber mais diferenças. O *Segway*® dispõe de uma base mais compacta em relação ao seu comprimento, o que o habilita a realizar curvas mais fechadas. Além disso, por ser mais larga, sua base se adequa melhor ao pé do condutor. O modelo i2-Multi apresenta uma maior altura em relação ao solo e maior diâmetro das rodas, dois parâmetros que permitem este transportador andar em terrenos mais irregulares. O protótipo desenvolvido, em contra

partida, sobe aclives não muito inclinados sem dificuldades. Como se utilizou a base de um robô já pronto, não foi possível aperfeiçoar esses parâmetros de construção, sendo necessário adaptar o projeto à base disponível.

Apesar desses desafios de projeto, o resultado final foi muito satisfatório, levando-se em conta que este foi o primeiro protótipo desenvolvido. Ele apresenta uma estabilidade e dirigibilidade semelhantes ao modelo comercial analisado. Para a continuidade do projeto, será importante remodelar sua base, visando ao aumento da segurança e conforto do usuário.

Conclusões

A análise dos resultados teóricos da simulação permitiu uma melhor compreensão de como deveria ser o comportamento do transportador nos testes reais. Além disso, os testes utilizando os controles PID e *Fuzzy* mostraram grandes diferenças, confirmando a escolha adequada pela técnica *Fuzzy*, devido à sua melhor funcionalidade e estabilidade. O algoritmo *Fuzzy* apresentou um erro quatro vezes menor que o PID, o que representa um ganho significativo no desempenho do transportador.

A realização do projeto mostrou que é possível construir um transportador pessoal auto-equilibrante com custo reduzido. O custo total do projeto desenvolvido foi quase seis vezes menor que o preço de venda de um transportador semelhante no mercado brasileiro. Uma redução de preços nessas proporções facilitaria, certamente, a incorporação do transportador auto-equilibrante no cotidiano das grandes metrópoles, onde os problemas de transporte urbano são mais graves.

O protótipo desenvolvido pode ser utilizado como substituto aos carros de passeio em trajetos curtos, com cerca de 15 quilômetros de distância, ou em diversas outras aplicações, como policiamento urbano e deslocamento dentro de indústrias.

Com o objetivo de melhorar o funcionamento do protótipo, as baterias utilizadas podem ser substituídas por baterias de íon lítio novas, para aumentar sua autonomia. Além disso, aumentar o diâmetro dos pneus e a altura do transportador em relação ao solo também podem ser aperfeiçoamentos importantes.

Referências

- [1] H. G. Nguyen, J. Morrell, K. Mullens, A. Burmeister, S. Miles, N. Farrington, K. Thomas, and D. Gage, **Segway Robotic Mobility Platform**, SPIE Proc. 5609: Mobile Robots XVII, Philadelphia, PA, October 2004.
- [2] SHAHEEN, S. A., FINSON, R. **A study of the Behavioral, institutional and economic potential of the Segway Human Transporter**, Transportation Research Board, Paper 03-4470, Jan. 2003.
- [3] GONÇALVES, L. M. G., **Sensores para robótica**, Departamento de Engenharia de Computação e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).