



UM ROBÔ PENDULAR PARA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA

Ricardo Teixeira da Silva – ricardoteix@gmail.com
Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco
Rua Benfca, 455 POLI - UPE
50720-001 – Recife – PE

Sérgio Campello Oliveira – scampello@ecomp.poli.br
Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco
Rua Benfca, 455 POLI - UPE
50720-001 – Recife - PE

Resumo: *Para proporcionar aos alunos de engenharia a capacidade de atuar nos mais diversos cenários relacionados a área de controle de sistemas, é preciso enriquecer cada vez mais as aulas através de demonstrações práticas. Sistemas de pêndulo invertido têm sido utilizados como base para apresentar diversos conceitos relacionados ao tema. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta didática voltada para esta prática que pode ser rapidamente montada pelos alunos devido a sua simplicidade e baixo custo. Ela consiste de um robô apoiado em duas rodas paralelas todo construído com peças e materiais fáceis de serem encontrados. A eletrônica de controle utiliza arduino e motores pequenos. Por meio do acionamento dos motores o robô pode compensar a sua inclinação mantendo-se em pé de maneira autônoma, de acordo com o algoritmo de controle implementado em seu firmware. Toda a documentação está disponibilizada em ferramenta colaborativa tipo wiki para facilitar sua reprodução.*

Palavras-chave: *Pêndulo Invertido, Robótica, Controle de Processos, Sistemas de Controle.*

1. INTRODUÇÃO

A educação de sistemas de controle vem se tornando cada vez mais importante nas escolas de engenharia. As novas tecnologias de controle de sistemas fortalecem a necessidade de ênfase desta. Os controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) têm sido largamente utilizados na indústria devido a sua estabilidade e facilidade de implementação (JUNG & AHN, 2011). Contudo diversas abordagens vêm surgindo a fim de substituir ou complementar os controladores PID como em (TABARI & KAMYAD, 2013), onde os autores propõem um modelo com algoritmos genéticos, em LU *et al.* (2013) utilizam ACS (*Ant Colony System*) para estimar os parâmetros do controlador PID, e KIZIR *et al.* (2010) utiliza lógica *Fuzzy* para controlar um pêndulo invertido.



Apesar da importância do tema, o ensino de sistemas de controle em disciplinas dos cursos de engenharia nem sempre faz uso de ferramentas didáticas que complementem a teoria vista em sala de aula. Ferramentas didáticas podem proporcionar aos alunos uma visão real dos problemas teóricos abordados nas disciplinas. Jung e Ahn (2011) observam que para educação mais efetiva as teorias devem ser explicadas por meio de demonstrações experimentais, utilizando ferramentas que simulem situações reais.

Quando analisamos a literatura, podemos verificar que o ensino de sistemas de controle está fortemente relacionado com o experimento do Pêndulo Invertido, sendo este um problema clássico em publicações diversas e livros adotados por universidades (SILVA, 2013).

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta didática de baixo custo, que apresenta o comportamento de um pêndulo invertido sobre duas rodas. O robô pendular, batizado de MobPendubot, é todo constituído de materiais e peças baratas e fáceis de serem encontradas. O sistema robótico desenvolvido terá toda a sua documentação disponibilizada em ferramenta colaborativa tipo *wiki* para possibilitar a sua reprodução e uso por outras instituições de ensino.

2. O PÊNDULO INVERTIDO

Segundo Vasilkov *et al.* (2007) e Butikov (2011), Stephenson apresentou, em 1908, a possibilidade de estabilização dinâmica de um pêndulo cujo eixo foi forçado a oscilar na linha vertical estabilizando-o na posição invertida. Depois, em 1951, Kapitza realizou uma série de pesquisas para o mesmo problema independentemente da solução proposta por Stephenson, explicando fisicamente, comprovando experimentalmente e, desta forma, contribuindo para o surgimento de uma nova seção da Teoria das Oscilações Não Lineares para a mecânica vibratória (VASILKOV *et al.*, 2007; BUTIKOV, 2011).

Diversas aplicações utilizam do princípio do problema do pêndulo invertido desde a mecânica clássica até a mecânica quântica, das quais podemos citar o sistema automático de pouso de aeronaves, estabilização de foguetes e satélites, entre outras (NÚÑEZ & TORRES, 2009; SOMWANSHI *et al.*, 2012).

É comum encontrar na literatura o modelo de pêndulo sobre um carrinho como em (TABARI & KAMYAD, 2013). Porém existem diversas configurações que podem realizar o experimento como o uso de um pêndulo conectado a um trilho horizontal, o pêndulo circular ou ainda o modelo com duas hastes (AHN & JUNG, 2008; JENSEN, 1998; CHARAIS *et al.*, 2004).

2.1. Contexto Educacional

Várias empresas produzem e comercializam *kits* para a realização do experimento do pêndulo invertido. Entre elas estão a *Quanser*[®] (QUANSER, 2013) e a *Googol Technology*[®] (GOOGOL TECHNOLOGY, 2013).

A *Googol Technology*[®] oferece a série GLIP200X de pêndulos lineares. A série é composta de três versões de pêndulos lineares com hastes, simples, dupla e tripla. Estes modelos têm a haste montada sobre um carro que desliza sobre dois trilhos paralelos de aproximadamente 72 cm (GOOGOL TECHNOLOGY, 2013).

A *Quanser*[®] disponibiliza diversas versões de produtos com foco no princípio do pêndulo invertido. Entre eles o modelo *Linear Flexible Inverted Pendulum*, que consiste em um pêndulo de haste simples, e o *Linear Double Inverted Pendulum*, realizando o experimento com haste dupla. Ambos possuem a resolução de 4096 contagens por revolução, o que proporciona a precisão de $0,087^\circ$ em cada leitura do ângulo da haste conectada à base (QUANSER, 2013). A Figura 1 mostra o modelo *Linear Flexible Inverted Pendulum*.

Além dos modelos comerciais, há pesquisas que desenvolvem alternativas. Podemos citar a abordagem de Andrade (2012), o qual apresenta a utilização de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REE) para a montagem do Kit Pêndulo Invertido. Entre os materiais foi utilizada uma impressora e um disco rígido que haviam sido descartados (ANDRADE, 2012). Mais tarde, o kit foi modificado para incorporar melhorias (SILVA & OLIVEIRA, 2013).

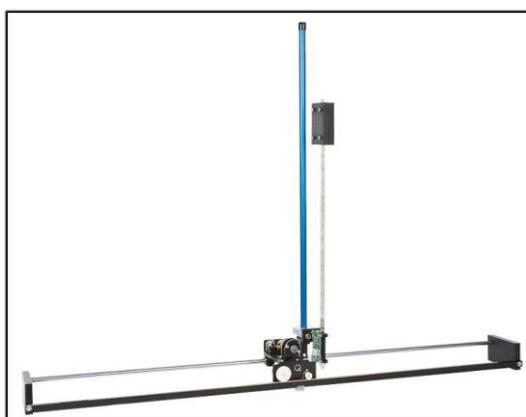


Figura 1. Pêndulo modelo *Linear Flexible Inverted Pendulum* (QUANSER, 2013).

3. O MobPendubot

O MobPendubot (*Mobile Pendulum Robot*, ou Robô Pêndulo Móvel em tradução livre), como denominado neste trabalho, consiste em uma plataforma móvel que deve ser equilibrada sobre duas rodas paralelas. O projeto consiste na definição de uma plataforma de montagem simples e barata para uso como ferramenta didática. A aplicação do recurso didático poderá ir desde disciplinas de controle e automação com o uso do controle PID até algoritmos voltados a inteligência computacional com aplicação de Lógica *Fuzzy*, otimização por enxame de partículas, porém não limitado a estes.

A Figura 2 apresenta um diagrama em blocos do MobPendubot. Os pinos digitais são utilizados como portas de entrada e saída (E/S). Estes pinos são utilizados para realizar o controle dos atuadores e podem servir para expansão para outras formas de controle além do utilizado neste trabalho. O conector ICSP (*In-circuit Serial Programming*) do Arduino pode ser utilizado para realizar a programação de outros *chips* diretamente no circuito, não necessitando acoplá-los na placa do Arduino, ou ainda como interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) para expansão de periféricos. Os barramentos de expansão são utilizados para adicionar periféricos ao sistema, como acelerômetros, transceivers ou displays, por exemplo.

O giroscópio é conectado ao Arduino através do barramento I²C e fornece o ângulo de inclinação do MobPenduBot.

3.1. Estrutura Mecânica

Para que o projeto mantivesse a característica de minimização do custo de cada unidade do MobPenduBot, alguns tipos de materiais foram experimentados para a construção da base mecânica. As características principais levadas em consideração para a escolha do material foram a facilidade no manuseio, facilidade na aquisição e o baixo custo. Os primeiros testes foram feitos utilizando chapas de alumínio de 2 mm, que são ao mesmo tempo fáceis de serem encontradas no mercado e fáceis de cortar. Para cortar e furar foi utilizada uma microretífica juntamente com discos de corte apropriados para o material. A mesma microretífica foi utilizada para fazer os furos para realizar as junções utilizando parafusos e porcas de 3 mm.

Apesar da facilidade com o uso do alumínio outros testes foram realizados utilizando fibra de madeira de média densidade, ou MDF (*Medium-Density Fiberboard*), de 3 mm. Foi possível observar que a utilização da placa de MDF seria uma opção viável para a montagem, com o custo menor que o alumínio e ainda com a vantagem de ser mais fácil de cortar. Ficou então definido que seria utilizado o MDF para a construção da base e o uso do alumínio se limitaria a junção em formato de “L” que acoplaria os motores na base inferior.

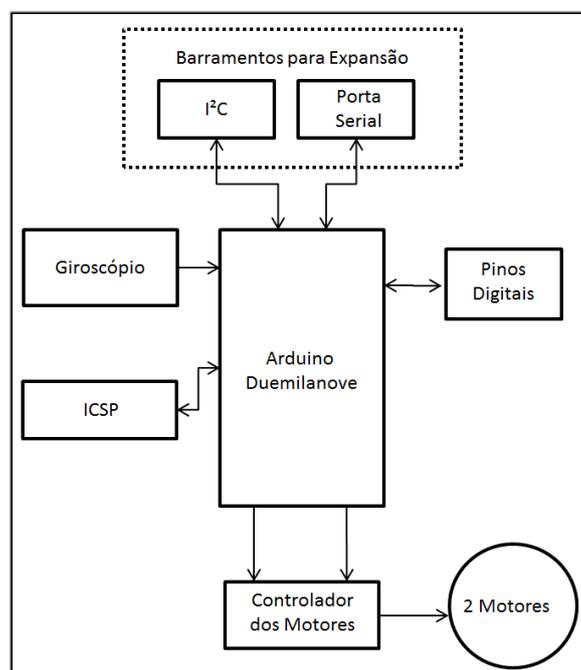


Figura 2. Diagrama em blocos do MobPenduBot.

Na Figura 3 está ilustrado o modelo do projeto tridimensional desenhado em ferramenta CAD, ainda sem a placa de controle. Em (a) tem-se a visão frontal da plataforma e em (b) a visão lateral. Mais detalhes podem ser observados na perspectiva (c) inferior, que apresenta a peça de alumínio em L que faz a junção do motor à base inferior. Em (d) está a perspectiva superior.

É possível observar ainda na Figura 3 que o projeto contém duas bases, superior e inferior. A decisão de se utilizar duas foi para deixar espaço disponível para acomodação de uma bateria entre as bases. Assim tanto bateria quanto circuito eletrônico podem ficar centralizados facilitando o equilíbrio.

Mais informações acerca das especificações para o desenvolvimento do MobPenduBot podem ser adquiridas na página de internet do projeto em (SILVA, 2014a). Esta página é uma ferramenta *wiki* que poderá ser editada por outros usuários que eventualmente aprimorem o projeto. Pretende-se disponibilizar todas as informações detalhadas com medidas e arquivos fontes para estimular a reprodução do projeto.

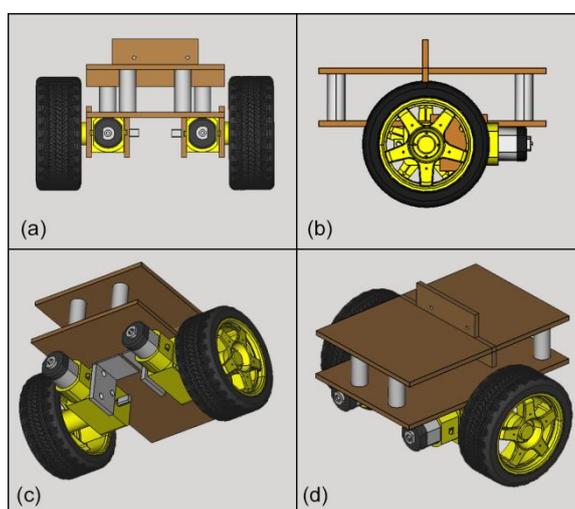


Figura 3. Modelo 3D do MobPenduBot. Vistas (a) frontal e (b) lateral e perspectivas (c) inferior e (d) superior.

3.2. Hardware de Controle

Para proporcionar uma interface de controle para o MobPenduBot foi utilizada a plataforma Arduino, que é uma plataforma de *software* e *hardware* abertos.

A placa utilizada no projeto foi a Arduino Duemilanove. Esta placa é dotada de um microcontrolador Atmega328 (ATMEL, 2009), tem 14 pinos de entrada e saída (E/S), dos quais 6 podem ser utilizados com PWM (*Pulse Width Modulation*). Contém ainda 6 entradas analógicas de 10 bits, memória flash de 32 KB, EEPROM de 1 KB e *clock* de 16 MHz. A alimentação da placa Duemilanove pode ir de 6 a 20 VDC, com o intervalo de 7 a 12 VDC recomendado. Além dos pinos de E/S a placa conta ainda com dois pinos para o barramento I²C e disponibiliza saídas de 5 VDC e 3,3 VDC (ARDUINO, 2014).

Além da placa de controle, foi preciso definir o *hardware* que faria a interface dos atuadores com o Arduino. Esta necessidade decorre do fato que a conexão direta com os pinos digitais do Arduino não é recomendada, pois estes pinos não fornecem corrente suficiente para controlar cada motor, proporcionando apenas 40 mA por pino digital. Então foi utilizada uma placa de expansão para controle de motores DC, comumente chamada de *shield* (escudo, do inglês). A placa escolhida utiliza o circuito integrado L298 (ST, 2000) e pode controlar dois motores simultaneamente podendo fornecer até 2 A de corrente para cada canal. A alimentação dos motores pode ser configurada para ser retirada diretamente da entrada de

alimentação da placa Duemilanove ou ainda de uma entrada independente (DFROBOT, 2012).

O MobPenduBot também conta com a possibilidade de comunicação sem fio via *Bluetooth* através do módulo HC-06. O módulo consiste em uma interface *Bluetooth*-Serial através da qual é possível enviar e receber dados através da porta serial do Arduino.

Para mensurar a inclinação do MobPenduBot em relação ao solo foi utilizado um módulo com o circuito integrado (CI) MPU-6050, da InvenSense (INVENSENSE, 2013). Este CI contém um acelerômetro e um giroscópio e utiliza o barramento I²C para interface com outros dispositivos. Neste projeto foi utilizada apenas a leitura do giroscópio. Com ele é possível fazer a leitura dos três eixos em relação à Terra. Para o MobPenduBot foi utilizado apenas o eixo y do CI, devido a disposição dos seus eixos e sua acomodação no MobPenduBot. Após estar acoplado ao MobPenduBot foi verificado que os valores da inclinação obtidos do giroscópio variam aproximadamente de -41° a 41° , sendo 0° o valor ótimo de estabilidade do sistema.

4. EXPERIMENTO

Após todas as definições para o desenvolvimento da plataforma foi então montado o protótipo apresentado na Figura 4. É possível observar as placas do Arduino Duemilanove e a placa de expansão DFROBOT acoplada. É possível também verificar o giroscópio MPU-6050 na base do Arduino.

Um dos aspectos analisados foi o tempo de montagem da plataforma. Foi preciso efetuar os cortes do MDF para bases e suporte da placa controladora e também do alumínio que acomoda os motores. Em seguida foi feita a soldagem dos fios dos motores e por fim a união de todas as partes com os parafusos. O tempo para se montar o protótipo completo foi de 4 horas. A maior parte do tempo foi gasta nos cortes do MDF e do alumínio. Uma nova versão do MobPenduBot está sendo desenhada para retirar o alumínio do projeto e utilizar apenas o MDF nas junções.

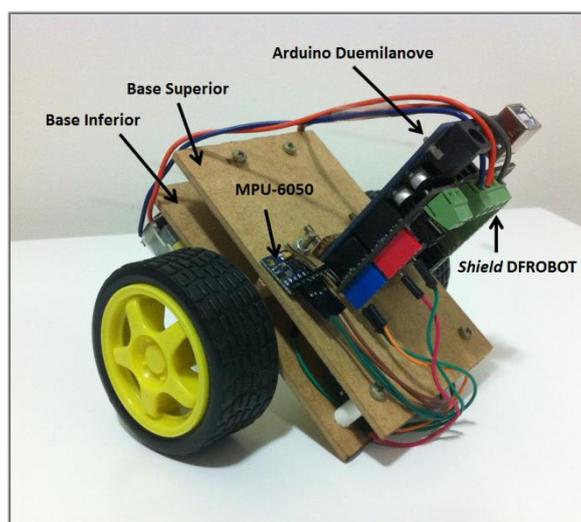


Figura 4. Fotografia do primeiro protótipo do MobPenduBot.

Para validar a plataforma foi realizado um experimento com o propósito de equilibrar o conjunto controlando apenas a intensidade da potência fornecida para o motor. No experimento foi utilizado o ajuste proporcional da intensidade dos motores de acordo com o ângulo e o sentido da inclinação.

Na plataforma Arduino é possível controlar os motores através de saídas digitais utilizando PWM. Este controle é efetuado escrevendo no pino digital, que deve estar devidamente configurado, o valor que se deseja no intervalo de 0 a 255. Como o estado de inércia estacionário do motor precisa ser rompido foram controlados valores de 0 a 55, e o resultado foi acrescido de 200. Experimentalmente foi observado que o sistema só conseguiria controlar ângulos no intervalo entre -20° e 20° , de acordo com as leituras do giroscópio, mesmo quando foi utilizado o valor máximo, 255, para o PWM de controle dos atuadores. O valor final do PWM aplicado ao pino digital foi então obtido através da Equação 1, onde θ é o valor absoluto do ângulo em graus

$$I = \begin{cases} 0, & \text{se } -1 < \theta < 1 \\ \frac{\theta \times 55}{20} + 200, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Observe que a estabilidade do sistema foi considerada para θ entre -1 e 1, não sendo necessário que θ chegue a zero.

Para alimentar o sistema foi utilizada uma fonte de 9 V que pode fornecer até 1 A de corrente. Até então não foi definido o tipo de bateria adequado para o projeto. Testes com baterias de 9 V alcalinas comuns *não* apresentaram bons resultados devido a baixa a corrente fornecida aos motores.

Para realizar o experimento o fio da fonte de alimentação foi mantido suspenso para evitar que grandes perturbações gerassem tendências no deslocamento do MobPenduBot.

Com o algoritmo utilizado foi possível perceber que houve muita variação, porém apesar de extremamente simples, o sistema consegue alcançar a estabilidade mantendo o pêndulo na vertical.

Na Figura 5 podemos verificar o gráfico do ângulo de inclinação do MobPenduBot em relação ao tempo. É possível observar que, o sistema se encontra estável, de acordo com o critério estabelecido na a Equação 1, a partir dos 67,662 segundos.

Na Figura 6 é possível observar a variação dos valores intermediários do PWM. Vale ressaltar que os intervalos onde o PWM tem valor zero no gráfico são os mesmo que definem a estabilidade. Podemos observar também que valores positivos do PWM movem o MobPenduBot para a direita, compensando a variação positiva do ângulo, e valores negativos movem-no para a esquerda, compensando a variação negativa do ângulo.

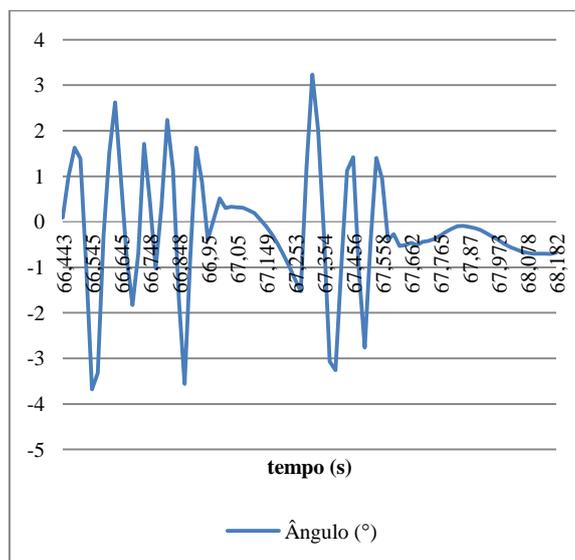


Figura 5. Gráfico do ângulo em relação ao tempo.

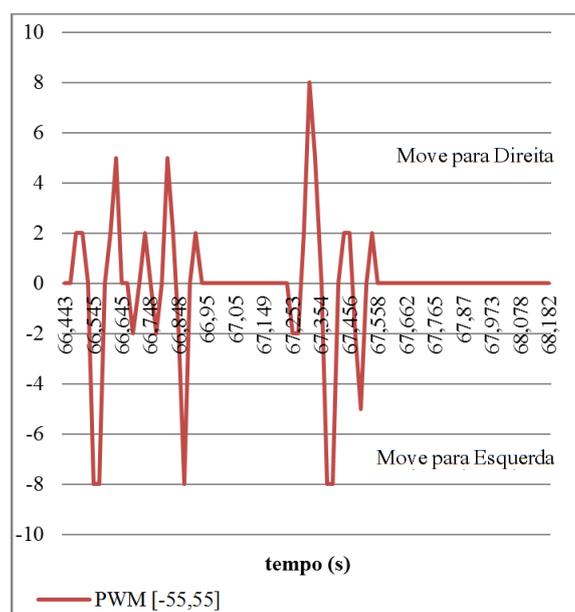


Figura 6. Gráfico da intensidade intermediária do PWM em relação ao tempo.

Na Figura 7 é possível verificar fotografias da operação do MobPendubot. Em (a) o sistema encontra-se estável, com os motores desligados, e em (b) é causada, manualmente, a perturbação do sistema deixando-o instável. Neste momento o controle passa a atuar. Os quadros (c) e (d) mostram o sistema em instabilidade e com o controle atuando para estabilização deslocando a plataforma para esquerda (c), e direita (d). Os dois quadros finais mostram o momento em que há pouca instabilidade (e), ou seja, o ângulo está com pouca variação, e o exato momento de estabilidade do sistema (f). É possível observar no quadro (e) que os LEDs que indicam a atuação dos motores estão acesos enquanto que no quadro (f) os

LEDs estão apagados e, portanto, não há atuação dos motores sobre o sistema comprovando o momento de estabilidade. É possível ver o experimento completo em (SILVA, 2014b).

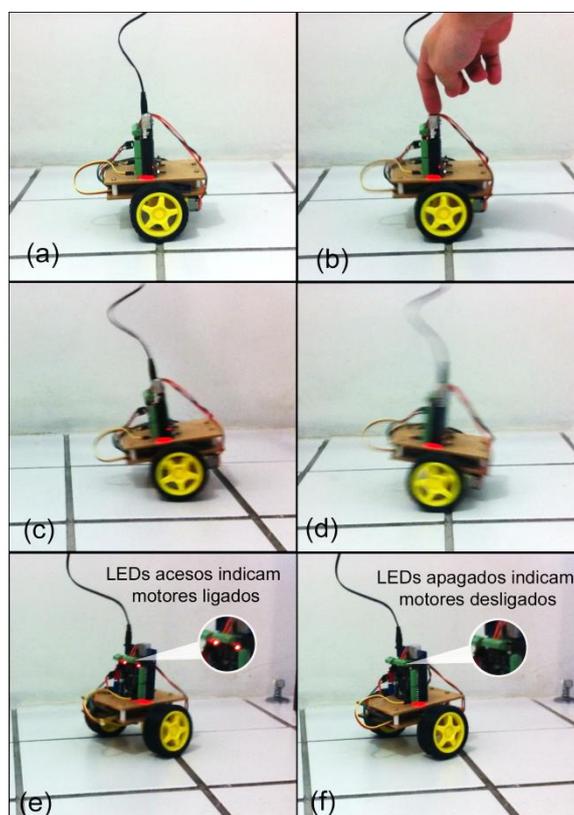


Figura 7. Fotografias do experimento. Em (a) estado estável; (b) causando perturbações manualmente; compensação do ângulo para (c) esquerda e (d) direita; (e) quase estável e (f) sistema estável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs uma plataforma robótica para realizar o experimento do pêndulo invertido voltada para ensino de engenharia.

No experimento foi possível observar que, mesmo utilizando um algoritmo de controle simples foi possível manter a estabilidade do MobPendubot.

Todo o projeto foi montado com materiais de baixo custo, como MDF e alumínio, utilizando motores de baixo custo de fácil aquisição. Devido à premissa do baixo custo e curto tempo de montagem é viável que alunos da engenharia possam montar e utilizar a plataforma, ou mesmo o departamento ou curso possa custear a fabricação de algumas unidades.

Dando continuidade a este trabalho, será desenvolvida uma interface para que o controle possa ser realizado através de circuitos analógicos, não se limitando a eletrônica digital ou a linguagens de programação e abrangendo ainda mais cursos e disciplinas que o projeto poderá ser aplicado.



Para que seja possível desenvolver algoritmos de controle no computador, será proposta uma abordagem de controle sem fio, onde o *software* embarcado no MobPendubot apenas enviará o valor do ângulo e receberá comandos de controle para sua estabilização, e também a definição de uma bateria apropriada, que forneça corrente suficiente para o sistema.

6. REFERÊNCIAS / CITAÇÕES

AHN, J.; JUNG, S. Swing-up Fuzzy Control of an Inverted Pendulum System for Control Education with an Experimental Kit Intelligent Systems and Emotional Engineering Lab . Chungnam National University. International Conference on Control, Automation and Systems 2008, 2008.

ANDRADE, M. A. O. Mitigação do impacto ambiental causado pelo REEE : Confecção de kits de treinamento a partir de equipamentos descartados como estratégia para tratamento do lixo digital, 2012. Universidade de Pernambuco.

ARDUINO. Arduino Duemilanove. Disponível em: <<http://goo.gl/uOcrvn>>. Acesso em: 23/3/2014.

ATMEL. ATmega48PA/88PA/168PA/328P. Disponível em: <<http://goo.gl/J0EzYw>>. Acesso em: 23/3/2014.

BUTIKOV, E. I. An improved criterion for Kapitza's pendulum stability. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, v. 44, n. 29, p. 295202, 2011.

CHARAIS, J.; LOURENS, R.; MICROCHIP TECHNOLOGY INC. Software PID Control of an Inverted Pendulum Using the PIC16F684. 2004.

DFROBOT. Arduino Motor Shield (L298). Disponível em: <<http://goo.gl/eFhGtJ>>.

GOOGOL TECHNOLOGY. Inverted Pendulum Instruction Manual. Disponível em: <<http://goo.gl/iRBz0C>>. Acesso em: 23/3/2014.

INVENSENSE. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions. ,2013. Disponível em: <<http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/RM-MPU-6000A-00v4.2.pdf>>.

JENSEN, J. S. Non-Linear Dynamics of the Follower-Loaded Double Pendulum With Added Support-Excitation. Journal of Sound and Vibration, v. 215, n. 1, p. 125–142, 1998 .

JUNG, S.; AHN, J. Remote Control of an Inverted Pendulum System for Intelligent Control Education. International Institute of Informatics and Cybernetics, v. 9, n. 4, p. 49–54, 2011.

KIZIR, S.; BINGUL, Z.; OYSU, C. Fuzzy control of a real time inverted pendulum system. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 21, v. 21, p. 121–133, 2010.



LU, H.-C.; LIU, H.-K.; YANG, L.-F. PID controller parameter estimator using ant colony system. 2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), p. 319–324, 2013. Ieee.

NÚÑEZ, D.; TORRES, P. J. Stabilization by vertical vibrations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, v. 32, n. 9, p. 1118–1128, 2009.

QUANSER. Linear Flexible Inverted Pendulum. Disponível em: <<http://goo.gl/uOFhBp>>. Acesso em: 23/3/2014.

SILVA, E. A. DA. Construção , Modelagem e Controle de um Pêndulo Invertido com CLP e Software SCADA, 2013.

SILVA, R. T. DA. MobPenduBot. Disponível em: <<http://goo.gl/UcXPaM>>. Acesso em: 24/4/2014.

SILVA, R. T. DA. MobPenduBot - Um Robô Pendular para Educação em Engenharia. Disponível em: <<http://goo.gl/XcMOXK>>. Acesso em: 24/4/2014b.

SILVA, R. T. DA; OLIVEIRA, S. C. MELHORIAS NO KIT EDUCACIONAL PÊNDULO INVERTIDO MONTADO COM REE. XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Anais... , 2013.

SOMWANSHI, D. K.; SRIVASTAVA, M.; PANCHARIYA, R. Analysis of Control of Inverted Pendulum using Adaptive Neuro Fuzzy system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF*

ADVANCED RESEARCH IN COMPUTER ENGINEERING & TECHNOLOGY, v. 1, n. 6, 2012.

ST. L298. Disponível em: <<http://goo.gl/QXW2Nl>>. Acesso em: 23/3/2014.

TABARI, M. Y.; KAMYAD, A. V. Design optimal Fractional PID Controller for Inverted Pendulum with Genetic Algorithm. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 4, n. 2, p. 2–5, 2013.

VASILKOV, V.; CHUBINSKY, A.; YAKIMOVA, K. The Stephenson - Kapitsa pendulum : Area of the Attraction of the Upper Positions of the Balance. *TECHNISCHE MECHANIK*, 2007.



A PENDULUM ROBOT FOR ENGINEERING EDUCATION

Abstract: *To provide engineering students the ability to act in various scenarios related to systems control, it is important to improve classes with practical demonstrations. Inverted pendulum systems have been used as basis for presenting various concepts related to the topic. This paper presents the development of a didactic tool for this practice that can be easily assembled by students due to its simplicity and low cost. It consists of a two parallel wheels supported robot constructed with low cost parts and materials. The robot has a simple arduino control electronics and two small engines. By activating the engines the robot can compensate its inclination stand in vertical position autonomously depending on the control algorithm embedded into its firmware. All documentation is available on a online wiki tool in order to facilitate its reproducibility.*

Key-words: *Inverted Pendulum, Robotics, Process Controller, Control Systems.*