

DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE PID APLICADO A ESTABILIDADE DE UM PÊNDULO INVERTIDO SOBRE RODAS

DEVELPMENT OF A PID CONTROL APPLIED TO THE STABILITY OF INVERTED PENDULUM ON WHEELS

Paulo Roberto Junior de Meneses Ferreira¹
Alex Franco Ferreira²

RESUMO: Este trabalho demonstrou uma das formas de controle de um pêndulo invertido sobre duas rodas motorizadas, através de sua construção feita em um protótipo. Buscou-se manter o protótipo construído em equilíbrio (pendulo na vertical para cima), através de algoritmos internos desenvolvidos para alterar a velocidade e direção da plataforma móvel. Descreveu-se as etapas da modelagem do sistema, do projeto de controle e da avaliação do desempenho do sistema em malha fechada. A modelagem considerou o motor de corrente contínua em um ambiente plano para a operação do pêndulo invertido. Essa consideração permitiu o projeto de controladores lineares a parâmetros fixos e foi apresentada uma técnica de controle PID aplicado ao controle de estabilidade de um pêndulo invertido no qual desempenha um papel muito importante para garantir que existisse uma boa interface entre o controle do ângulo e o sinal enviado para os motores, aplicando-se conhecimentos multidisciplinares nas áreas de engenharia eletrônica, mecânica, automação e computação. Utilizando-se de um controle Proporcional Integral e Derivativo realizou-se a estabilização do pêndulo na posição vertical. Onde objetivou-se verificar o melhor controle em função da aceleração linear da base móvel e o deslocamento angular do pêndulo para a melhor estabilidade. Foi utilizado um filtro de Kalman para estimar as variáveis de estado do protótipo proposto, de forma a minimizar a média do erro. Alcançando-se assim o objetivo estipulado ao estudo.

Palavras chaves: Controle PID. Pêndulo Invertido. Filtro Kalman.

¹Discente do Curso de Pós-graduação em Automação Industrial, pela Universidade de Vassoura - RJ.

²Orientador: Docente do Curso de Pós-graduação em Automação Industrial, pela Universidade de Vassouras - RJ.

ABSTRACT: This work demonstrated one of the ways to control an inverted pendulum on two motorized wheels, through its construction made in a prototype. We tried to keep the prototype built in balance (pendulum vertically upwards), through internal algorithms developed to change the speed and direction of the mobile platform. The stages of system modeling, control design and performance evaluation of the closed-loop system were described. The modeling considered the direct current motor in a flat environment for the operation of the inverted pendulum. This consideration allowed the design of linear controllers with fixed parameters and a PID control technique applied to the stability control of an inverted pendulum was presented, in which it plays a very important role to ensure that there is a good interface between the angle control and the signal, sent to the engines, applying multidisciplinary knowledge in the areas of electronic engineering, mechanics, automation and computing. Using a Proportional Integral and Derivative control, the pendulum was stabilized in the vertical position. Where the objective was to verify the best control as a function of the linear acceleration of the mobile base and the angular displacement of the pendulum for the best stability. A Kalman filter was used to estimate the state variables of the proposed prototype, in order to minimize the average error. Thus achieving the objective set for the study.

Keywords: PID Control. Inverted Pendulum. Kalman Filter.

INTRODUÇÃO

1035

Em sistemas mecânicos, o pêndulo invertido é um exemplo de pesquisa (MONTEIRO, 2006). O estudo do comportamento do pêndulo começou com as observações feitas por Galileu-Galilei no século XV desde então, este sistema tem sido mencionado como um exemplo clássico no ensino de livros que lidam com sistemas dinâmicos (OGATA, 2011; DORF; BISHOP, 2009). Tornando as técnicas de controle modernas para controlar o excelente sistema dinâmico do pêndulo, de modo a provar que o objeto deste estudo é a utilização do trabalho. Os módulos de ensino mais apropriados para controlar a prática laboratorial da pesquisa e aplicar controles modernos são relativamente econômicos. Move-nos também a vontade de expandir os limites de nosso conhecimento relacionado à implementação de observadores de estado e filtros e à fabricação e modelagem física de um protótipo previamente projetado.

Pode-se dizer que o pêndulo invertido é um dos sistemas instáveis usados na teoria de controle e tem muitas aplicações diferentes, embora este problema seja um sistema mecânico muito simples e é possível analisar diversas situações práticas a

partir dos conceitos envolvidos em sua pesquisa. Em particular, o conceito de mover o pêndulo invertido tem sido usado em várias aplicações, como, em veículos de transporte humanos, que podem eventualmente existir como uma alternativa de entrega automática para áreas urbanas, incluindo o uso de pessoas com deficiência, motociclismo e engenharia civil nas construções de prédio e pontes. A técnica de controle utilizada neste trabalho é o PID que pode ser utilizado na maioria dos sistemas de controle, especialmente aos que não se conhece o modelo matemático da planta (DE OLIVEIRA, 2015).

A principal característica deste trabalho foi o uso de um protótipo robótico que consistiu de um pêndulo invertido sobre uma plataforma móvel, um critério alternativo para este trabalho seria a utilização de materiais de baixo custo. Utilizou-se um controlador ATME1328, 32 bits de memória RAM e um código de hardware aberto chamado Arduino, conforme Brock, et all (2009). Este hardware é amplamente utilizado em projetos porque é fácil de programar em uma linguagem conhecida como C e C ++ com um ambiente de programação livre. Neste trabalho, o protótipo robótico foi proposto para simular o efeito de pêndulo invertido e a técnica de controle, assim, quando ocorre o desequilíbrio o controlador tem a decisão de retornar à posição de equilíbrio. Este sistema é constituído por uma estrutura robótica em posição vertical, com uma inclinação de deslocamento, que tende a acontecer com a ação da gravidade. O controle do sistema é usado para estabilizar o robô na posição vertical, possivelmente após a força gerada pelo movimento dos motores que tende a equilibrar o movimento natural de queda.

Portanto, alternativas viáveis e de baixo custo para melhor compreender a pesquisa desta questão podem ajudar no futuro da aprendizagem profissional, ajudá-las a integrar-se no mercado de trabalho e alcançar uma medida importante das expectativas da indústria. Podem-se implementar protótipos de sistemas de controle, de modo que o comportamento e o impacto de determinados parâmetros e distúrbios nas respostas fornecidas pelo sistema possam ajudar a entender os conceitos teóricos dos sistemas de controle participantes.

Objetivou-se também levar à academia um trabalho que pudesse fomentar e auxiliar o estudo e desenvolvimento de técnicas de controle, levando-se em conta que

o controlador PID e suas variações são comumente a primeira forma de controle explorada por aqueles que abordam as teorias de controle.

O método utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido em uma pesquisa bibliográfica, onde buscou-se identificar os temas de interesses, como livros, teses, artigos e monografias já realizadas. As bases que foram utilizadas: o WEB OF SCIENCE, SCIELO e IEEE. Os termos utilizados nas bases de pesquisa foram “controle PID”. “Pêndulo invertido”, “filtro Kalman”. Após neste contexto de pesquisa prévia, foi definido o problema do trabalho, que se classificou como exploratória, onde objetivou-se proporcionar ao seu final uma base sólida argumentativa conclusiva, uma vez que os resultados vieram pelo próprio andamento da pesquisa.

Este estudo pode ser baseado em Malhotra (2001), que representa quando se precisa definir com mais precisão o problema e fornecer critérios e entendimento, mas também há explicações naturais para o uso do alvo para explorá-lo, o que, segundo Gill (1999). Onde o objetivo é identificar os fatores que determinam a ocorrência do fenômeno ou contribuir.

O Controle PID

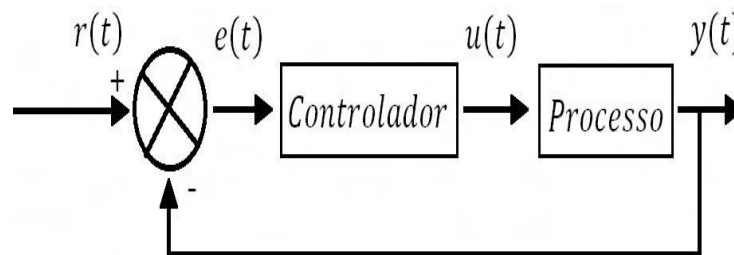
A teoria de controle é um campo que lida com disciplinas e métodos que levam a um processo de decisão automática, a fim de melhorar o desempenho de um sistema de controle. A evolução da teoria de controle está relacionada aos avanços em tecnologia, métodos teóricos de projeto de controladores e sua implementação em tempo real. O progresso da teoria de controle também está associado à educação e engenharia de sistemas de controle (Ambrose, R; et all, 2004).

Controladores do tipo PID são amplamente utilizados em disciplinas de controle de processos industrial e universitário. Tal uso deve-se ao fato deste controlador ser fácil de implementar, barato e versátil, com a capacidade de alterar o comportamento transitório e permanente dos processos sob controle. Atualmente, a maioria dos processos automatizados que usam controladores lógicos programáveis (CLP's) possuem algoritmos PID em seus circuitos de controle e os engenheiros de processo têm a tarefa de ajustar os parâmetros do CLP. (ASTROEN, HA " GGLUND, IEEE Press, 1996). Em geral, a finalidade do controlador mostrado na

Figura 1 é gerar um sinal de controle $u(t)$ capaz de corrigir e, se possível, substituir o erro $e(t)$ gerado entre o sinal de referência $r(t)$ e o sinal de saída $y(t)$.

Analisando-se um sistema genérico, uma representação em malha fechada pode ser observada no diagrama de blocos da Figura 1.

Figura 1: Diagramas de blocos de uma representação em malha fechada



Fonte: OGATA, 2003.

O controlador PID é o mais comumente usados em sistemas de controle de realimentação, pode ser ajustado em campo usando várias regras de ajuste. A utilidade do controle PID está na variedade de aplicações que eles têm em sistemas de controle, como controladores PID eletrônicos, hidráulicos e pneumáticos. “Os controladores PID são fáceis de implantar, baratos, poderosos e versáteis, proporcionando um comportamento transitório e estável que atende a uma ampla gama de processos da indústria.” (CAMPESTRINI, 2006).

O Filtro Kalman

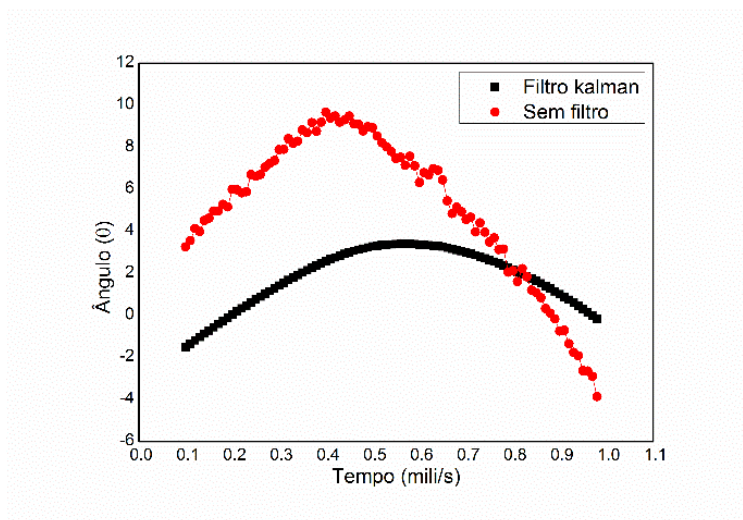
O filtro estimador foi desenvolvido em 1958 por Rudolf Emil Kálmán. Foi fundamental na era espacial e foi aplicado pela primeira vez para estimar a trajetória e controlar a resolução de problemas no projeto Apollo. Desde a sua publicação, também ganhou popularidade em outras áreas da engenharia. Uma área em particular que é frequentemente usado é na engenharia de controle digital. (De Oliveira, D. D. C. & Rossi, L. N, 2015).

O filtro é usado na engenharia de controle para remover o ruído de medição que pode afetar o desempenho do sistema sob controle. Também fornece uma estimativa do estado atual do processo ou sistema e é uma ferramenta que pode estimar as variáveis de uma ampla gama de processos. (De Oliveira, D. D. C. & Rossi, L. N, 2015)

Como apresentado na Figura 2, a comprovação da aplicação do filtro Kalman na leitura do ângulo θ sobrepondo a mesma leitura sem aplicação do filtro, pois tal

leitura dos dados foram coletadas durante o funcionamento do protótipo do Pêndulo Invertido o qual é o motivo de estudo.

Figura 2: Comprovação da aplicação do filtro Kalman.



Fonte: De Oliveira, D. D. C. & Rossi, L. N, 2015.

A Plataforma Arduino

Desenvolvido em 2005 por Massimo Banzi e uma equipe de colaboradores, incluindo David Cuartielles, Tom Igoe e Gianluca Martino, a plataforma Arduino visava, em princípio, facilitar o ensino de assuntos eletrônicos aos alunos, por meio de uma plataforma de código aberto. baixo custo que permitiria aos alunos facilitar o desenvolvimento de projetos práticos no campo da eletrônica (SOUZA, 2013). Esta plataforma permite adaptações e já inclui microprocessadores, bem como programas e botões de sensores já pré-adaptados, permitindo a ativação de máquinas como bombas hidráulicas, portões, sistemas de iluminação, motores e incluindo o protótipo deste trabalho.

Segundo MARTINAZZO et al (2014), o Arduino é uma ferramenta que pode facilitar o aprendizado em escolas e universidades, graças à capacidade de coletar dados e integrar sensores, pois essa plataforma possibilita a análise de vários fenômenos como a corrente elétrica, impedância, velocidade, resistência e bem como a compreensão de processadores e microcontroladores.

O Arduino é composto por hardware e software, sendo o primeiro a parte em que os projetos são montados (prototipagem) e o último o programa que é a lógica onde processa os dados coletado que é a sequência de comandos para coordenar as funções

que o Arduino irá executar mais tarde, a programação feita é enviada posteriormente para o microprocessador (SOUZA (2013), na Figura 3 é mostrado a imagem de uma placa Arduino do tipo UNO.

Figura 3: Placa Arduino



Fonte: SOUZA, 2013

Construção Do Pêndulo Invertido

Para a construção e configuração do protótipo robô pêndulo invertido, foi usado uma placa de controle Arduino Uno em um ambiente de programação muito acessível e de uso muito difundido para o desenvolvimento. Segundo (Brock, J. D., et al) um controlador ATMEL 328, memória Flash de 32 bit onde está armazenada a estrutura de toda a programação, sendo uma placa open-hardware denominada Arduino. Além disso um sensor IMU 6050 giroscópio e acelerômetro, que detecta a velocidade angular e retorna um valor que representa o número de graus referente ao movimento angular, da mesma forma obtém se o valor da aceleração em função do movimento linear do deslocamento no plano horizontal.

Para que o robô tenha mobilidade, dois motores de corrente contínua construídos de uma caixa de redução acoplada em seu eixo de 120:1 com rotação de 80 rpm e trabalhar em uma faixa de -6V a + 6V, tendo também um drive para acionamento desses motores L298N.

O pêndulo invertido é um problema muito comum no estudo da engenharia de controle, com a diferença de que o problema clássico consiste em um carro em movimento no qual se encontra um sólido que se destina a manter o equilíbrio (Tirmant, H., et al, 2002). No caso, começa-se com um único corpo que inclui rodas, motores, sensores.

A Figura 4 demonstra de como foi desenvolvido o respectivo projeto onde foi demonstrado todos os equipamentos utilizados na construção com uma explicação sucinta da escolha de cada item.

Como uma visão final do projeto onde pretendeu-se chegar, desenvolveu-se toda montagem do controle PID através da montagem de todo protótipo. Na Figura 4 é demonstrado em vista frontal a imagem do protótipo finalizado pronto para testes onde surgiram todas conexões já acopladas e as ligações da placa no controlador no caso o Arduino, os sensores e suas conexões de cabos e ligações.

Figura 4: Protótipo pronto para teste



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Analisando-se o pêndulo invertido através de uma vista lateral no qual observa-se ele perpendicular em um plano qualquer, demonstrando-se ele já montado e pronto para simulações, conforme Figura 5.

Figura 5: Pêndulo invertido na posição para testes



Fonte: Próprio Autor, 2022

Para fazer alguns movimentos onde foi necessário ter um dispositivo para realizar a captação da leitura dos ângulos, portanto analisou-se e verificou-se que seria

necessário instalar o sensor IMU 6050 conforme a Figura 6 para fazer a leitura da aceleração e do movimento angular.

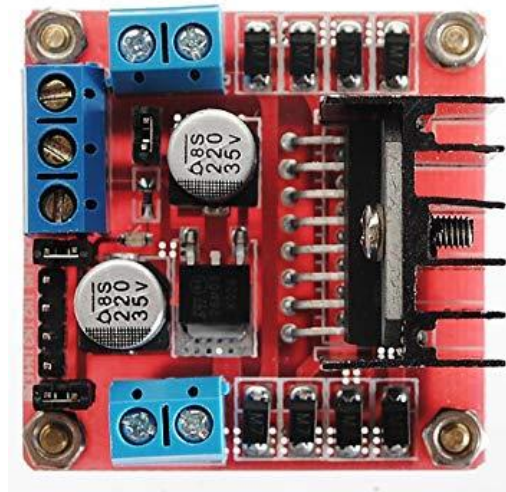
Figura 6: Sensor IMU 6050



Fonte: Próprio Autor,2022

O drive da Figura 7 é responsável pela partida dos motores CC onde recebeu sinal aplicado do controlar Arduino, controle de seus pulsos e lógica de programação, esse drive foi acionado através de um triac para partida do motor cc.

Figura 7: Driver



Fonte: Próprio Autor,2022

Finalizando-se a montagem do protótipo colocou-se a roda e seu motor acoplado com a caixa de redução, este motor é de corrente contínua de 3 a 6 volts com caixa de redução 120:1, rotação de 80 rpm, dimensões 70x37x22,5mm e roda de 68mm, conforme Figura 8.

Figura 8: Roda e seu motor acoplado

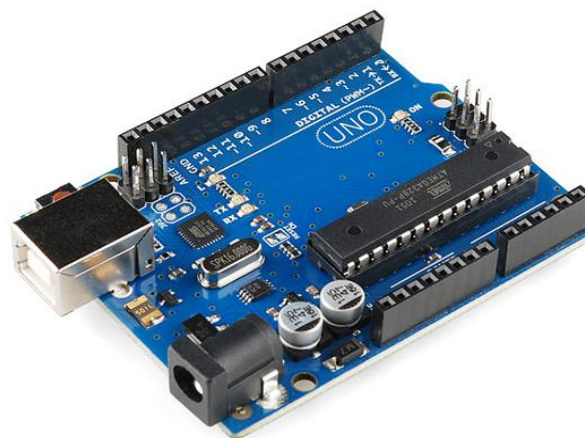


Fonte: Próprio Autor, 2022

Para processar todos sinais de sensores e saídas, para o dispositivo desenvolvido foi utilizado um Arduino Uno conforme modelo da Figura 9, optou-se por esse modelo no qual a ideia nesse projeto foi tentar utilizar o mínimo possível de sensores para conseguir fazer todos movimentos necessário do pêndulo invertido, sendo assim verificando esses conceitos foi avaliado o menor custo para o projeto.

Podem-se citar algumas especificações técnica do Arduino Uno, sua alimentação foi feita por uma porta usb, podendo também ser alimentado por meio de um pino P4 com alimentação de 7V a 10V ou até mesmo direto na placa por meio do pino Vin, sua placa possui alguns pino onde contempla fonte de 3,3V e 5V mais dois GND, entradas digitais e analógicas e um microcontrolador Atmega 328p.

Figura 9: Placa Arduino UNO

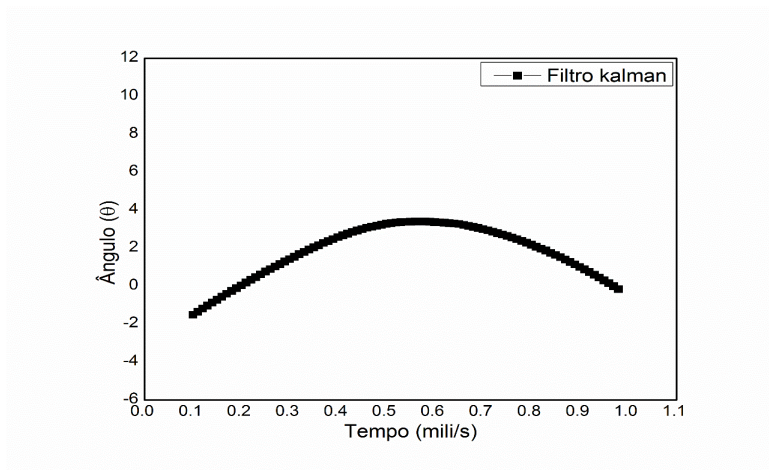


Fonte: Próprio Autor

RESULTADOS

Este trabalho baseou-se na utilização de um controle PID aplicado juntamente com um Filtro Kalman para melhor leitura dos dados enviados pelos sensores e na tomada de decisão para controle de equilíbrio do pêndulo invertido. Uma área particular para a qual o filtro de Kalman é frequentemente usado, é a engenharia de controle digital e é usado na engenharia de controle para suprimir o ruído de medição que pode afetar o desempenho do sistema sob controle. Com tal aplicação foi possível ver a diferença da leitura com aplicação do filtro e sem a utilização do filtro, conforme mostrado nas Figuras 10 e 11 respectivamente.

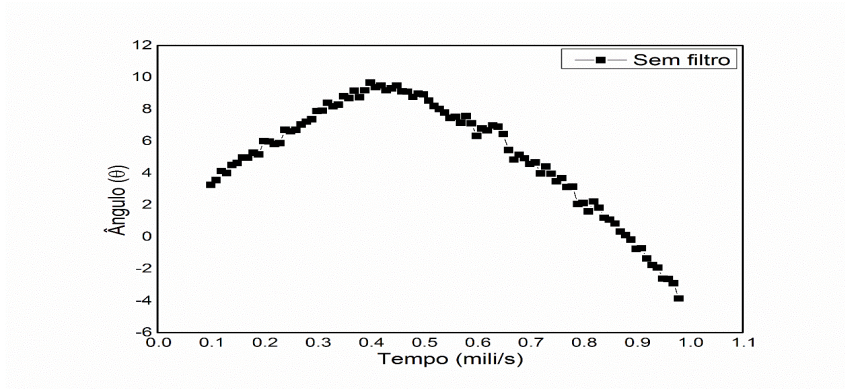
Figura 10: Aplicação do filtro Kalman



Fonte: Próprio autor, 2022

Na Figura 11 tem-se o gráfico da leitura dos ângulos sem nenhum tratamento de dados.

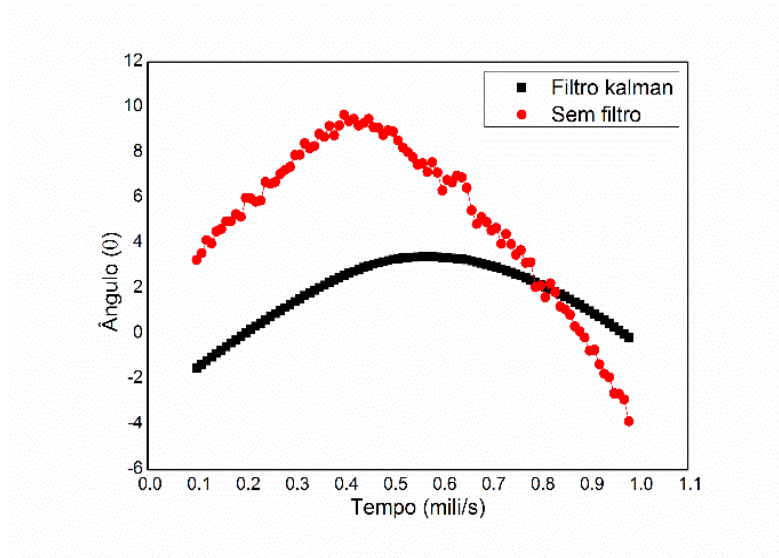
Figura 11: Leitura dos ângulos sem nenhum tratamento de dados.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Na Figura 12, observa-se a sobreposição dos valores de leituras enviados pelo sensor.

Figura 12: Dados sobrepostos



Fonte: Próprio Autor, 2022

CONCLUSÃO

Foi demonstrado que o sistema de pêndulo invertido é uma referência fundamental na teoria de controle não-linear. O interesse particular nesta aplicação reside na sua estrutura simples e na riqueza do seu modelo não linear. A estrutura simples permite que experimentos reais e virtuais sejam realizados. O protótipo do modelo mostrou sua utilidade em ilustrar todas as ideias emergentes na teoria de controle não linear. O uso de filtros de Kalman em controle automático gera grandes vantagens, minimizando os efeitos que os sinais de ruído aleatório causam na resposta desses sistemas. Como visto a partir do exemplo desenvolvido no presente trabalho, os resultados finais são completamente satisfatórios.

As simulações do controle do pêndulo invertido sobre duas rodas apresentaram resultados satisfatórios que garantem uma boa operação do controle e fornecem boas expectativas de funcionamento para aplicação em um sistema real. Observou-se que a principal variável de estado, que é o ângulo θ , permaneceu próximo de zero sem exceder a região de linearização. Foram realizados testes com perturbações e diferentes tipos de comando de posição e o controlador respondeu muito bem em todas as ocasiões sem saturar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROCK, J. D., BRUCE, R. F., & REISER, S. L. (2009). Using Arduino for introductory programming courses. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 129 – 130.

CAMPESTRINI. Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico. 2006.

De Oliveira, D. D. C. & Rossi, L. N. Modelagem, controle e prototipação de veículo baseado em Pêndulo Invertido. 68. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

GILL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

MALHOTRA, N. Pesquisa de marketing. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

MARTINAZZO, C. A.; TRENTIN, D. S.; FERRARI, D.; PIAIA, M. M.; Arduino: Uma tecnologia no ensino de física. *Perspectiva*, Erechim. v. 38, n.143, p.21-30, setembro/2014. Disponível em: http://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/143_430.pdf.

MONTEIRO, L. H. A. Sistemas dinâmicos. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. 625 p.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. trad. Paulo Alvaro Maya; rev. técn. Fabrizio Leonardi. 4. Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

SOUZA, Fábio. Arduino Primeiros Passos 06/11/2013. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/arduino/>.

R. Ambrose, C. Ambrose, "Primate Anatomy, Kinematics and the Principles for Humanoid Design," *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 1, No. 1, 2004, pp. 175-198.

TIRMANT, H., BALOH, M., VERMEIREN, L., GUERRA, T. M. AND PARENT, M. B2, an alternative two wheeled vehicle for an automated urban transportation system. *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, 2: 594-603. 2002.