

CONTROLE DE SISTEMA NÃO-LINEAR EMBARCADO EM PLATAFORMA DE HARDWARE PROGRAMÁVEL

Wallace Pereira Neves dos Reis¹

Thiago Vinciprova Chiesse de Andrade²

Roberta Elena Ferreira Monteiro³

RESUMO

Os sistemas reais são, de maneira geral, instáveis. Daí vem a importância do estudo das técnicas de controle aplicadas a estes. A planta do pêndulo invertido é um problema clássico estudado em disciplinas como Controle de Servo-mecanismos. A proposta deste artigo é apresentar as etapas e os conceitos básicos do projeto, onde o controle proposto será embarcado em uma plataforma de hardware programável, uma solução alternativa aos CLPs e microcontroladores, para a implementação de controladores digitais quem vem ganhando espaço em aplicações industriais e possuem grande versatilidade e baixo consumo de energia. Este sistema possibilita o estudo de outros mecanismos complexos como o posicionamento de foguetes no momento do lançamento, os controles passivo e ativo das oscilações de arranha-céus, além da aplicação em veículos para locomoção humana.

Palavras-chave: Pêndulo Invertido. Controle de sistemas. Sistemas não-lineares. Hardware programável.

Introdução

O controle do pêndulo invertido é um problema clássico estudado em disciplinas como Controle de Servo-mecanismos e Controle de Processos. O sistema é constituído de uma haste fixada a um eixo que possibilita o giro livre da mesma, acoplado a um sensor que define a posição do pêndulo. Este conjunto é montado sobre um carro, movimentado por um motor

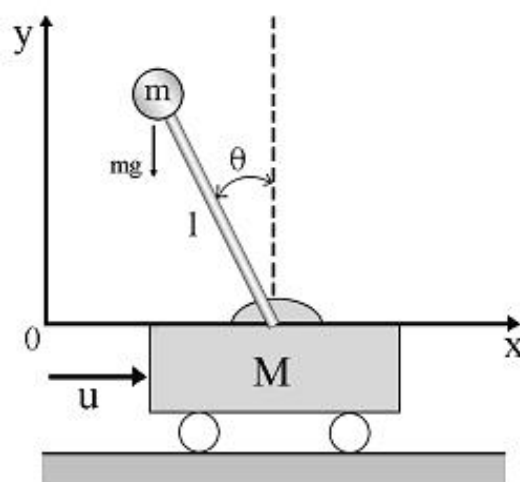
¹ Aluno do 5º ano do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Resende – FER/AEDB e-mail: wallace.reis@ifrj.edu.br

² Aluno do 5º ano do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Resende – FER/AEDB e-mail: vinciandrade@uol.com.br

³ Aluno do 5º ano do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Resende – FER/AEDB e-mail: roberta.monteiro@petrobras.com.br

através de um conjunto de polias e uma correia, se movimentando no eixo x em um trilho, exemplificado na Figura 1. O objetivo do controle é manter o pêndulo posicionado na vertical para cima, porém, a haste tende a retornar para sua posição inicial original, ou seja, voltada para baixo, por conta das forças envolvidas no sistema, e é essa característica que torna o sistema instável. Este movimento é mostrado na Figura 2.

Figura 1 – Pêndulo Invertido e as forças envolvidas

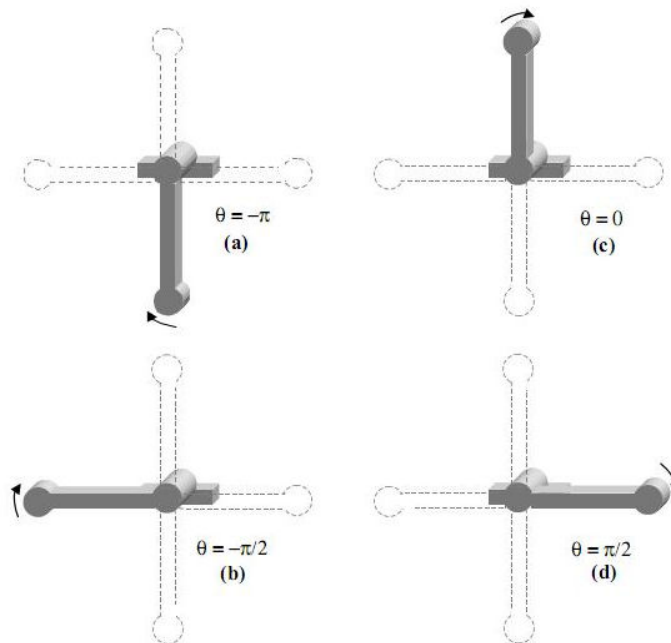


O controle é proposto, então, a fim de manter o pêndulo na posição vertical para cima, sendo esta posição adotada neste trabalho como 0° , controlando este ângulo da haste em relação à horizontal, de acordo com o valor do sensor de posição.

Este movimento do pêndulo é compensado pelo movimento do conjunto carro-motor, buscando equilibrar o pêndulo em sua posição de referência, ou seja, 0° . Para que se efetive este controle, um controlador deve ser desenvolvido e implementado.

Há na literatura, diversas técnicas e estratégias de controle e dentre elas, uma das mais utilizadas, é o controle PID, por sua simplicidade e eficácia em uma gama de sistemas e pela aplicabilidade em sistemas onde o modelo não é conhecido, usando de métodos específicos para sintonia do controlador (OGATA, 2010). Neste trabalho, a estratégia de controle utilizada será o PID digital, embarcado em um DLP (Dispositivo Lógico Programável), também conhecido como hardware programável, mais precisamente o kit de desenvolvimento FPGA Altera DE-2.

Figura 2 – Movimento da haste do Pêndulo Invertido



O controle PID, um controle clássico em malha fechada, é uma união dos controles proporcional, integral e derivativo, a fim de minimizar o erro estacionário, melhorar as características de amortecimento e tempo de resposta e também de estabilidade. O controle proporcional realiza um ajuste no ganho - diminuindo assim o erro - porém quando se aumenta em demasia o ganho, o sistema pode se tornar mais oscilatório, caminhando para a instabilidade. O controle integral fornece uma saída não nula para um erro nulo, portanto elimina o erro estacionário, melhorando a precisão do sistema, porém, acrescenta uma ordem ao sistema, podendo torná-lo instável. O controle derivativo aumenta o amortecimento antecipando a ocorrência do erro, tornando a resposta ao distúrbio mais rápida, diminuindo o tempo de subida do sinal. Juntas, as ações P, I e D minimizam o erro e melhoram o amortecimento e a estabilidade já que teremos um controlador sensível às taxas de variações do erro estacionário, quando bem sintonizadas.

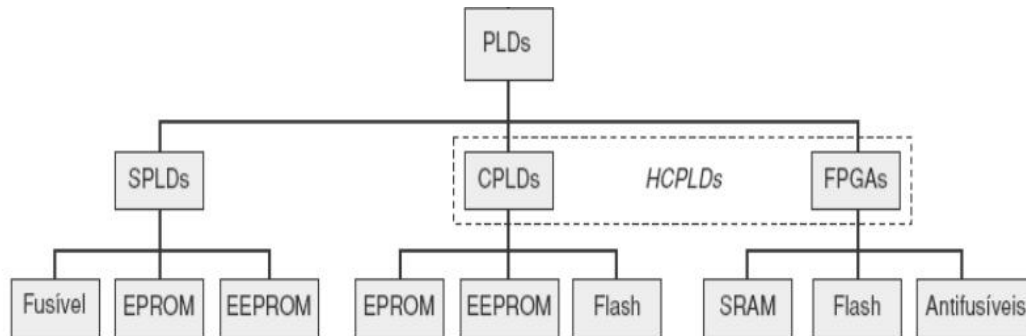
Dispositivos Lógicos Programáveis e Linguagem VHDL

Os Dispositivos Lógicos Programáveis (DLPs), do inglês *Programmable Logic Devices*, surgiram na década de 70 com os primeiros chips configuráveis, após a manufatura, pelo usuário. Os primeiros DLPs podem ser exemplificados como as memórias PROM (Programmable Read-only Memory), onde o arranjo de portas AND e OR internas pode ser configurado pelo usuário através de chaves fusíveis, que “queimadas” determinam as funções

lógicas executadas pelo chip. As memórias PROM podem ser usadas para implementação de circuitos lógicos quando as linhas de endereço são usadas como entradas e as linhas de dados usadas como saída.

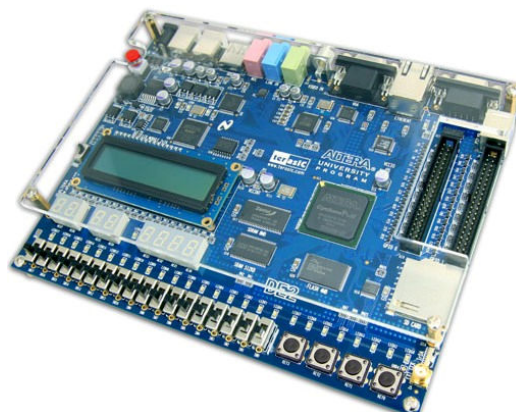
Desde o surgimento desta tecnologia, os DLPs evoluíram e a família conta agora com chips complexos que contemplam centenas de células de memória que são configuradas e re-configuradas via software. A Figura 3 mostra a família de DLPs, exemplificando os tipos de memórias utilizadas em cada dispositivo, composta pelos *Simple Programmable Logic Devices* (SPLDs) que englobam os dispositivos mais simples, como as memórias PROM, pelos *Complex Programmable Logic Devices* (CPLDs) e pelos *Field Programmable Gate Arrays* (FPGAs).

Figura 3 – Família dos Dispositivos Lógicos Programáveis



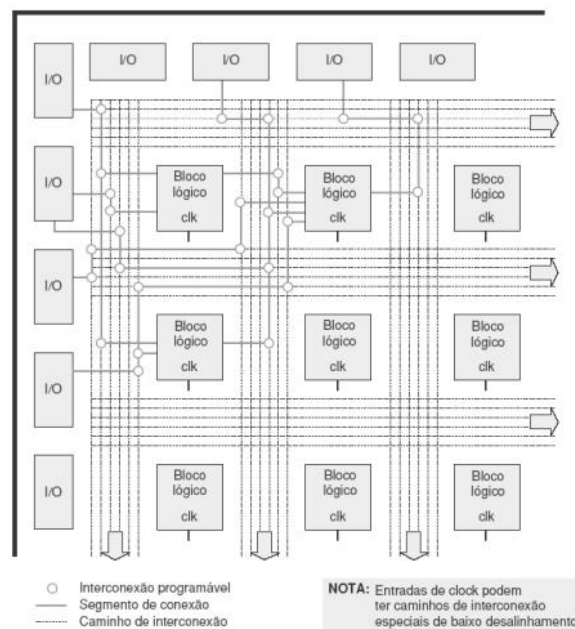
O Dispositivo Lógico Programável explorado neste trabalho pertence à classificação dos FPGAs (*Field Programmable Gate Array*), o FPGA Cyclone® II 2C35 da Altera® Corp. com 35.000 unidades lógicas, presente no Kit de Desenvolvimento e Estudo DE-2, mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Kit de Desenvolvimento e Estudo DE-2 – Altera ® Corp.



O FPGA é uma Matriz de Portas Programável em Campo (tradução livre), consistindo em semicondutores usados em programação e processamento de dados digitais, que pode ser configurado e programado de acordo com as aplicações particulares de cada usuário. O FPGA é composto basicamente por: flip-flops que são responsáveis pela parte lógica combinacional; buffers, que realizam a interface entre as entradas e saídas do FPGA; switch matrix, que são trilhas que conectam e fazem o roteamento entre os flip-flops e os buffers e a forma como serão utilizados e os blocos de entrada e saída. A arquitetura do FPGA é exemplificada na Figura 5.

Figura 5 – Arquitetura de um FPGA



Nos FPGAs mais comumente comercializados (por exemplo, da empresa Altera Corp. que será utilizado na planta em estudo), os blocos lógicos possuem geralmente quatro ou cinco entradas, o que permite endereçar 16 ou 32 células de armazenamento. A linguagem utilizada na programação do dispositivo é o VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language) que significa Linguagem de Descrição de Hardware para Circuitos Integrados de Altíssima Velocidade (tradução livre). Essa linguagem foi desenvolvida pelas Forças Armadas dos EUA para substituir os complicados manuais que descreviam o funcionamento dos circuitos integrados existentes na época. É bastante similar a linguagem Pascal, e já tem incorporada em sua biblioteca operações lógicas e aritméticas, entre outras.

Em realidade o VHDL permite que um circuito seja descrito tanto no eixo estrutural como no eixo comportamental (funcional). Quanto maior for o nível de abstração, mais dependente das ferramentas de síntese fica o projeto. Em contrapartida, mais flexível é a sua aplicação e possibilita o uso de diversas tecnologias com que pode ser implementado. (Silva, Gabriel P., 2009 p 8).

O projeto em VHDL envolve uma metodologia básica, mostrada na Figura 6, que requer o conhecimento dos requisitos e especificações do circuito a ser projetado para que assim o programador gere o código em linguagem VHDL, para posterior síntese e criação das equações lógicas. O circuito lógico é, então, criado no software de programação. No processo de gravação, é executado o posicionamento das unidades lógicas e roteamento das conexões, implementando assim o circuito. Em cada etapa e nível do projeto, é possível realizar uma simulação do código, tornando mais fácil a otimização do circuito.

Justificativa

O sistema do pêndulo invertido, por sua complexidade na análise, suas características instáveis e aproximações a outros sistemas instáveis, é utilizado em diversas aplicações. O estudo do comportamento do sistema pode ser aplicado a diversas áreas do conhecimento como na Engenharia Civil e Arquitetura e Biomecânica.

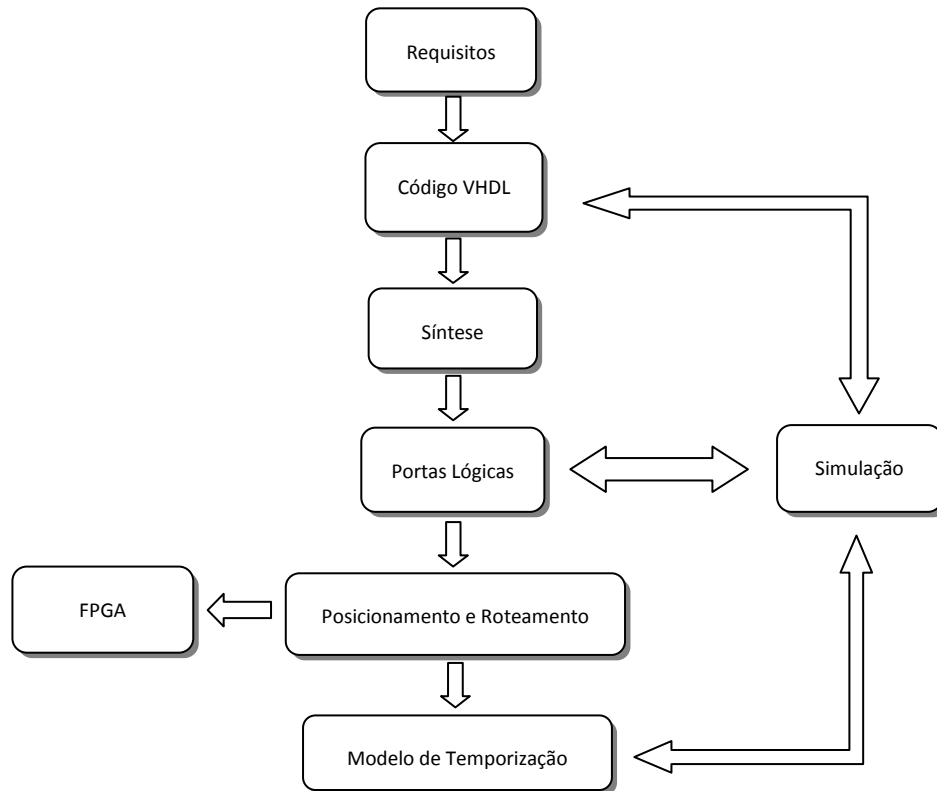
Uma aplicação relativamente recente é a aplicação do controle de oscilação de arranha-céus, que cada vez mais apresentam maior altura e sofrem com as ações dos ventos que causam oscilações nas estruturas. Para compensar a ação dos ventos, utiliza-se um contrapeso acoplado à acionamentos hidráulicos, buscando reduzir a amplitude deste movimento. (RIBEIRO, 2007 p.19)

De modo análogo, Zayas (1996 *apud* RIBEIRO, 2007) desenvolveu um conceito original de um mecanismo para proteção sísmica denominada mancais *Friction Pendulum*, utilizados na proteção de edifícios e construções em regiões propensas a atividades sísmicas. Basicamente, o conjunto é composto por uma placa metálica plana e outra convexa com uma esfera colocada entre as placas. Este conjunto é alocado em cada ponto de sustentação da estrutura, permitindo, assim, que a estrutura se movimente suavemente sobre as bases de apoio durante os abalos de um terremoto.

Outras aplicações descritas na literatura envolvem o controle de posicionamento de mísseis e foguetes espaciais durante o lançamento (OGATA, 2003), modelos biomecânicos do

caminhar humano, utilizados para estudo postural (MOCHIZUKI, 2003), fabricação de calçados, esportes e na robótica.

Figura 6 – Metodologia Básica de Projeto



Metodologia

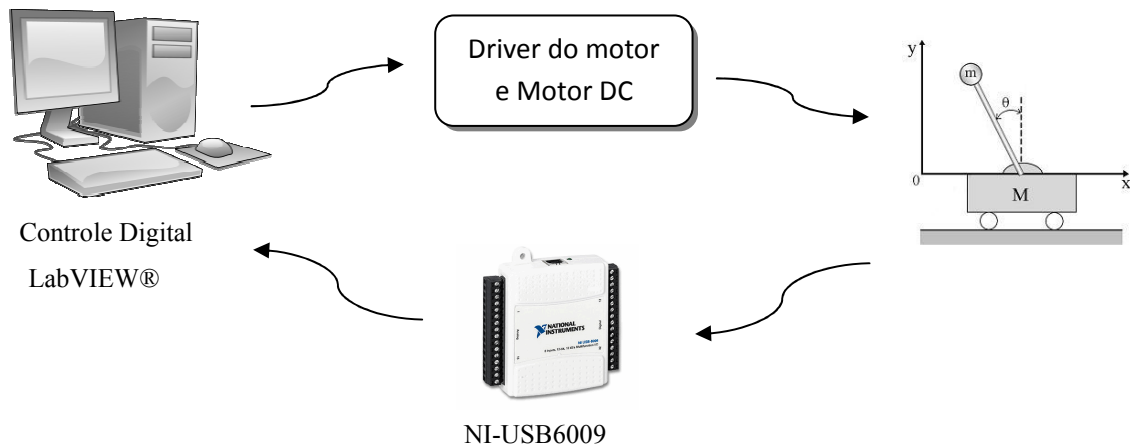
Inicialmente, uma pesquisa bibliográfica é necessária para embasar teoricamente o projeto, principalmente por conta da utilização de uma planta já elaborada e modelada matematicamente. De posse disso, inicia-se o aperfeiçoamento e reestruturação da estrutura física da planta, eliminando fatores que causam/podem causar problemas ao controle, como atrito nos trilhos, vibrações no eixo do potenciômetro, etc.

Com as modificações estruturais na planta, necessita-se refazer o modelo matemático, pois, muitos parâmetros foram alterados. Fez-se necessária uma pesquisa experimental, pois, a metodologia utilizada para a estimativa dos parâmetros da planta é a observação e medição de respostas da planta a estímulos controlados, analisando e trabalhando os sinais a fim de se extrair as informações necessárias para se ter um modelo matemático próximo da realidade.

Após a modelagem da planta como um todo, o controlador é desenvolvido com base na referência que se deseja atingir, utilizando as técnicas apropriadas. Primeiramente, o

controle será efetuado por um software instalado em um computador, o software LabVIEW® da National Instruments, que se comunica com a planta via porta USB, utilizando a placa de aquisição de dados National Instruments NI USB6009 para aquistar o sinal de posição da haste, e via porta serial com o circuito de acionamento do motor, que indica ao mesmo velocidade e sentido de giro. Esta primeira etapa é exemplificada na Figura 7.

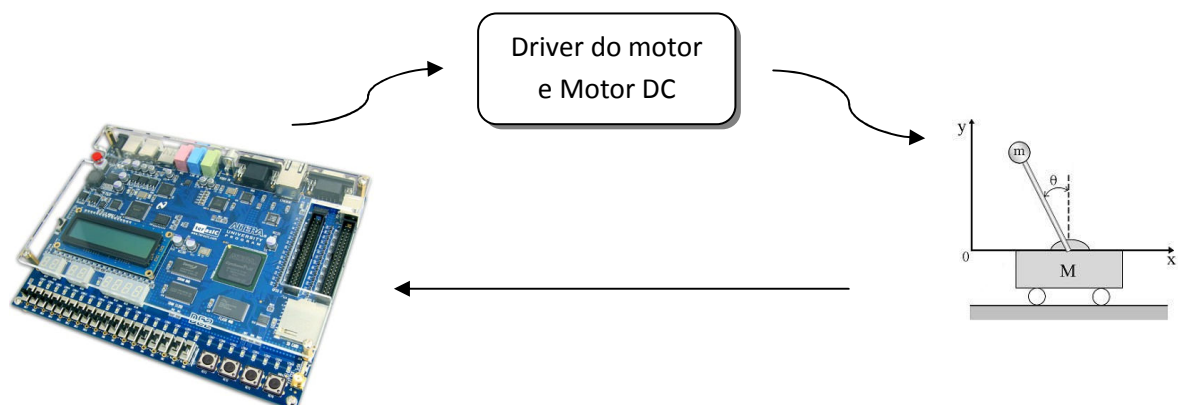
Figura 7 – Esquema de controle na primeira etapa do projeto.



Posteriormente, o controlador será desenvolvido em linguagem de descrição de máquina [VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language)] e embarcado na plataforma de desenvolvimento FPGA Altera® DE-2, eliminando assim o uso do computador para o processamento do controle.

Do mesmo modo a aquisição do sinal de posição da haste também será efetuada pela plataforma de hardware programável eliminando o uso da placa de aquisição de dados NI-DAQ6009, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Esquema de controle na segunda etapa do projeto.



Resultados esperados

Espera-se a final do trabalho construir uma planta que faça parte do laboratório de Controle de Servo-mecanismos da Faculdade de Engenharia de Resende, que propicie aos alunos o estudo do controle do sistema do pêndulo invertido através de experiências práticas, desenvolvendo o controle digital através de softwares como o LabVIEW® e o MATLAB®.

Inclui-se também o controle pleno do sistema aos distúrbios atuantes no mesmo; controle do swing up do pêndulo, ou seja, o movimento do conjunto carro-motor que ergue a haste, posicionando-a na vertical; domínio da programação VHDL, de modo que possibilite o estudo e posterior implementação de um controle moderno no FPGA, como Espaço de Estados, Lógica Fuzzy ou Redes Neurais.

Conclusão

Este trabalho possibilita de estudo de um sistema que representa, com as devidas aproximações e considerações, diversos outros sistemas não-lineares e o estudo de seu respectivo controle, que não é simples por se tratar de um sistema instável.

Representa também a possibilidade de englobar no projeto diversas disciplinas do curso, vendo na prática a sinergia entre elas, o contato com uma tecnologia que vem ganhando espaço em novas aplicações industriais e didáticas, o FPGA, assim como aprendizado de uma nova forma de programação através da linguagem de descrição de software VHDL e o aprendizado em softwares largamente utilizados na Engenharia, como o Labview® e o MATLAB®, com suas funcionalidades e aplicações.

Espera-se, ao fim do projeto, ter uma planta funcional disponível no laboratório de Controle de Servo-mecanismos, de modo que os alunos possam fazer experiências e práticas da disciplina, além de ser base para outros projetos futuros como a implementação do controle em um veículo autônomo.

Referências

- [1] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Tradução Heloísa Coimbra de Souza. 5. Ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2010.
- [2] MIGUEL, A. S.; SANTOS, B. C. e SILVA, E. J. **Estudo, construção e modelagem de um pêndulo invertido para o laboratório de controle da Faculdade de Engenharia de Resende**. Faculdade de Engenharia de Resende – FER, 2011.

- [3] RIBEIRO, R. **Implementação de um Sistema de Controle de um Pêndulo Invertido**. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. 2007.
- [4] BEZERRA, M.S. **Projeto, implementação e ensaios de um controlador PID utilizando FPGA**. Universidade Federal do Ceará – UFC, 2010.
- [5] CAVALCANTI, José Homero Feitosa *et al.* Posicionamento de um Pêndulo Invertido usando Algoritmos Genéticos. **SBA Controle e Automação** Vol. 10, nº 01. 1999
- [6] MAHLER, Wagner Frederico Cesar; SANTOS, Denílson Paulo Souza dos. **Dinâmica não linear do Pêndulo Invertido**. X Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações. 2011
- [7] SILVA, Gabriel P. Notas de aula: **Introdução ao VHDL**. DCC-IM/UFRJ 2009
- [8] SILVA, Gabriel P. Notas de aula: **Dispositivos Lógicos Programáveis**. DCC-IM/UFRJ 2009
- [9] MINHONI, D. C. R. **Deteção de movimento de objetos em tempo real utilizando dispositivos de lógica programável complexa**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006
- [10] MOCHIZUKI, Luis, AMADIO, Alberto C. Aspectos Biomecânicos da postura ereta: a relação entre o centro de massa e o centro de pressão. Universidade de São Paulo. Brasil. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**. Vol. 3, nº 3. Portugal. 2003