

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO DE UM PÊNDULO INVERTIDO E DO CONJUNTO PONTE H-MOTOR-CARRO

GUILHERME PEREIRA PAIM¹; MICHAEL ROPKE²; MARCELO ESPOSITO³

¹Universidade Federal de Pelotas – guilhermepaim.liberato@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – michaelropke@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – marcelo.esposito@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa à implementação de um sistema de controle de um pêndulo invertido, utilizando como base uma impressora de uso doméstico. Os modelos reais de sistemas de pêndulos invertidos apresentam características não lineares. Para sistemas não lineares a utilização de controladores lineares nem sempre é adequada. Além disso, o pêndulo invertido é um mecanismo com característica dinâmica intrinsecamente instável e representa uma plataforma muito útil para o estudo de outros mecanismos complexos. RIBEIRO (2007) fez uso de uma placa de aquisição de dados, um potenciômetro de precisão como sensor de posição angular da haste, um transdutor de posição sem contato, que emprega tecnologia magneto-restritiva para o carro e um amplificador *push-pull* como *driver* para o motor de corrente contínua (cc).

O objetivo principal foi desenvolver uma unidade experimental que servisse de auxílio para o ensino da disciplina de Sistemas Realimentados, ministrada para os cursos de Engenharia Eletrônica e Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Pelotas. Um dos objetivos específicos foi possibilitar a abordagem de diferentes modelos do processo e de diferentes estruturas de controle. Tendo em vista as características não lineares e a facilidade de visualização das ações tomadas pelo controlador, optou-se por desenvolver um sistema de controle de um pêndulo invertido.

Um pêndulo invertido típico é um dispositivo físico que consiste de uma barra cilíndrica, a qual é livre para se movimentar em torno de um ponto fixo. Esse ponto é montado em um carro que por sua vez é livre para se mover na direção horizontal. O carro é acionado por um motor que pode exercer uma força variável no deslocamento do mesmo. A haste naturalmente tende a cair, pois sua posição vertical é uma condição de equilíbrio instável. Utiliza-se uma malha de controle com o objetivo de estabilizar a haste do pêndulo na posição vertical. Isso é possível exercendo-se uma força através do movimento do carro que tende a contrabalançar a dinâmica natural do pêndulo. A intensidade da força pode ser controlada a partir da informação da posição angular da haste (RIBEIRO, 2007).

2. METODOLOGIA

Baseado no trabalho de RIBEIRO (2007), o sistema do pêndulo invertido foi desenvolvido sobre a plataforma de uma impressora HP, Deskjet 695C, fazendo-se uso dos componentes já disponíveis no próprio equipamento como o motor de corrente contínua e o carro onde ficam os cartuchos de tinta que corresponde à base móvel da haste. A fim de evitar colisões laterais com as extremidades da impressora também foi utilizado o conjunto *encoder/fita* da impressora. Este conjunto permitiu a identificação do modelo ponte H-motor-carro. A posição do carro foi localizada com o uso do *encoder* óptico linear incremental (Agilent, HEDS-9610 Optical Encoder). O

HEDS-9610 é um módulo emissor/detector em forma de C. Juntamente com uma fita codificada (*codestrip*), traduz o movimento linear em duas saídas digitais em quadratura.

O ângulo que a haste forma com a referência de equilíbrio foi mensurado com o uso de um *encoder* óptico incremental de 1024 pulsos por revolução (Yumo, E6B2-CWZ3E). O sensor informa ao controlador três pulsos, dois de posição e um de referência, sendo que a defasagem entre os pulsos de posição indica o sentido de rotação da haste e a quantidade de pulsos sinalizados somados indica o ângulo de inclinação.

A escolha dos dois *encoders* ópticos como transdutores de posição linear e de ângulo, ao invés da tecnologia de magneto-restrição e do potenciômetro utilizados no trabalho de RIBEIRO (2007), se dá no primeiro caso pelo custo financeiro. E no segundo pelo fato do dispositivo óptico ser imune a ruídos, o que garante a integridade da medição sem a necessidade de utilização de filtros analógicos ou digitais.

O microcontrolador utilizado para a integração entre sensores e atuadores com o controle digital foi o *kit* Max32 da Digilent, arquitetura PIC 32 bits da Microchip (SOUZA, 2010). As características desejadas para a escolha do microcontrolador foram: o bloco operacional PWM (*Pulse Width Modulation*) para o acionamento do *driver* (*L298 Dual H-Bridge Motor Driver*) ligado ao motor cc, o *timer* com interrupção para a aquisição de dados e realização do controle, os blocos de interrupção externa para a leitura dos *encoders*, a comunicação USB via porta COM *chip* FTDI232 e a alta frequência de atuação de 80 MHz. A programação foi realizada na *IDE* (*Integrated Development Environment*) MPLAB em linguagem C. O compilador utilizado foi o MPLAB C32.

O *driver* de potência da Robotbase é baseado no *chip* L298N que integra dois circuitos tipo ponte H completa. Cada canal permite controlar a velocidade de um motor cc com a possibilidade de inversão no sentido de rotação. O controle deste *driver* é realizado pelo microcontrolador por meio de três entradas lógicas por canal, uma PWM e as demais para o comando da inversão. No momento da inversão da polaridade da tensão na carga, este tipo de *driver* necessita de um tempo mínimo de desligamento a fim de protegê-lo contra curto-circuito na sua ponte de transistores. Por este motivo foi adotado um desligamento de oitenta milissegundos antes de cada inversão.

A alimentação externa do *driver* de potência foi de 30 Vcc porque esta é a tensão nominal do motor utilizado. A porta USB do microcomputador suporta a energização do *kit* Max32 e da parte lógica *driver*. Para não causar flutuações de tensão nos sinais de controle, utilizou-se a mesma referência de tensão (GND) para o microcontrolador e a ponte H.

A placa de aquisição de dados utilizada por RIBEIRO (2007) foi substituída pelo *kit* com microcontrolador, o que demandou bastante tempo de trabalho e de pesquisa por não haver, neste caso, uma configuração/ algoritmo dedicado para este fim. O amplificador *push-pull* foi substituído pelo *driver* L298, pela facilidade de integração com o microcontrolador. As principais vantagens de circuitos integrados sobre circuitos discretos são: redução no custo, peso e tamanho, aumento da confiabilidade e do desempenho.

Em motores cc a velocidade é proporcional à tensão de armadura o que facilita consideravelmente o controle desta variável. Durante os primeiros testes com o motor instalado na estrutura do pêndulo percebeu-se uma faixa de tensão onde o mesmo não opera, aproximadamente de -18 a 18 Vcc. Esta característica é uma não

linearidade chamada de zona morta. A fim de utilizar um modelo linear para o pêndulo invertido, esta não linearidade foi compensada definindo-se os valores encontrados experimentalmente como sendo os menores valores de tensão de alimentação possíveis, ou seja, quando o carro permanece estático.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sistemas dinâmicos como o pêndulo invertido podem ser descritos através de equações diferenciais, que por sua vez podem ser operadas utilizando-se a Transformada de Laplace. Isso com o objetivo de facilitar a realização dos cálculos para a determinação da resposta do processo a uma entrada nula ou ao estado nulo. A modelagem física do pêndulo invertido, que exige a decomposição das forças as quais o pêndulo está sujeito, é apresentada no trabalho de RIBEIRO (2007) e não será abordada no presente trabalho.

Para estimar os parâmetros do modelo da haste, colocou-se o pêndulo no sentido convencional (não invertido), afastando a haste 90° da sua posição de repouso, quando então foi solta de forma a caracterizar o movimento de um pêndulo. Com o uso de um banco de dados criado com período de amostragem de 1 ms, foram calculados os parâmetros do modelo do pêndulo a partir de um algoritmo desenvolvido por RIBEIRO (2007), adaptado para o caso do *encoder* óptico (sem filtro). A Figura 1a mostra o resultado do ensaio com o pêndulo. O movimento reflete o comportamento da haste de um pêndulo convencional e o modelo se baseia nos valores máximos do sinal senoidal resultante do ensaio.

Um método de resposta em frequência foi utilizado na obtenção dos parâmetros do modelo do conjunto ponte H-motor-carro. Utilizando modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*), a tensão analógica constante de alimentação do motor foi segmentada na forma de pulsos. Através da variação da largura dos pulsos, o valor médio da tensão foi alterado. A modulação PWM senoidal implementada no microcontrolador foi aplicada na tensão de alimentação do motor pelo *drive* de potência. A mudança do ângulo de fase permitiu a variação da frequência entre 0,8 e 5,5 Hz. No instante em que o ângulo do sinal senoidal é igual a 360° ocorre à comutação de uma das entradas digitais a fim de indicar o início e o fim do período da senoide. As frequências foram calibradas com a medição do período fazendo-se uso de um osciloscópio.

A amplitude do deslocamento do carro, mostrada na Figura 1b, juntamente com a respectiva frequência da senoide de excitação do motor, permitiu a confecção do gráfico mostrado na Figura 1c. De acordo com RIBEIRO (2007) o gráfico de magnitude, em decibéis (dB), pela frequência, em radianos, no caso do pêndulo invertido, pode ser decomposto em três partes. Em frequências muito baixas, o termo dominante é uma reta constante. Ainda em baixas frequências um polo na origem faz a magnitude do sistema cair -20 dB por década. Em frequências mais altas, um polo com parte real negativa faz a curva de magnitude cair -20 dB por década, totalizando, neste caso, uma queda de -40 dB por década na magnitude.

De posse do modelo matemático que descreve o conjunto em questão e dos dados experimentais, mostrados na Figura 1c, foram encontrados os valores numéricos do ganho referente à reta e do polo fora da origem. Ajustes foram realizados de forma a minimizar a diferença entre os dados experimentais e os provenientes da função de transferência utilizada como modelo.

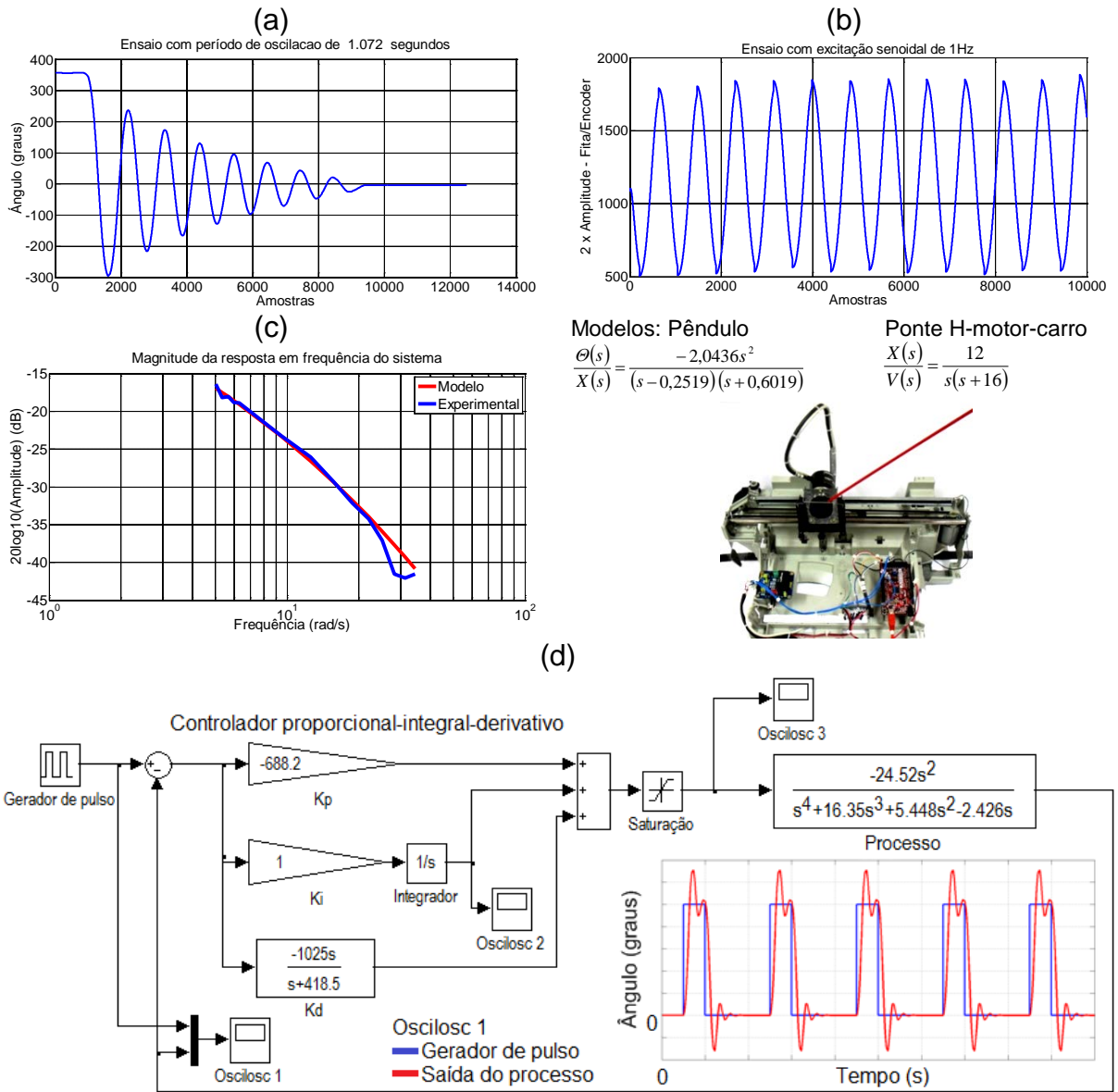


Figura 1 – (a) resultado do ensaio do pêndulo; (b e c) resposta da unidade experimental a excitação senoidal e resposta em frequência; (d) simulação do modelo quando aplicado um pulso na entrada.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos na simulação e da aplicação do mesmo controlador na unidade experimental, fica claro que o modelo reflete o comportamento dinâmico do sistema em questão. Além da obtenção de bons resultados com relação ao equilíbrio da haste na posição vertical, boas discussões técnicas permearam este trabalho o que garantiu a satisfação do objetivo principal.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SOUZA, A.S. **PIC32: Uma nova tecnologia**. São Paulo: Cerne. 2010.
RIBEIRO, R. **Implementação de um sistema de controle de um pêndulo invertido**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá.