

# ESTUDO E APLICAÇÃO DA FERRAMENTA *xPC TARGET* EM SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DINÂMICOS

Bruno Borges Tsuchiya<sup>1</sup>, Sergio Ribeiro Augusto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup>Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este Trabalho tem como objetivo criar uma aplicação HIL (Hardware in the Loop) de um levitador magnético utilizando a ferramenta xPC Target da Mathworks, interfaceando-a com um microcontrolador executando uma lei de controle compatível, através de uma placa de aquisição de sinais analógico/digital.*

## Introdução

Na atualidade as ferramentas de simulação em tempo de máquina (*off-line*) são largamente usadas, não somente com objetivo econômico, visando corte de custos em testes, mas também como uma ferramenta de pré-validação e análise das soluções propostas. Entretanto, como consequência do avanço tecnológico, cada vez mais a complexidade dos problemas e soluções têm aumentado, e com ela a necessidade de ferramentas de simulação mais precisas cujos resultados sejam mais próximos possíveis aos obtidos em plantas reais.

A partir desta necessidade justifica-se o estudo e desenvolvimento de simulações em tempo real (*real time simulation*). Diferente dos simuladores *off-line* que executam em tempo de máquina (tempo de computação), os simuladores em tempo real levam em conta o tempo de resposta da planta real, fornecendo desta forma resultados mais próximos à realidade.

Um método usado para a execução da simulação em tempo real é o HIL (*Hardware in the Loop*) (BÉLANGER; VENNE; PAQUIN, 2010). Dentre as plataformas HIL disponíveis no mercado escolheu-se a ferramenta *xPC Target* (xPC TARGET, 2013) do software Matlab que é capaz de gerar simulações em tempo real através de modelos do Simulink sem a necessidade de programação/codificação específica (por exemplo, C, C++, Java, entre outros), além de permitir acesso virtual à I/Os por meio de uma placa de aquisição de dados. Nesta plataforma são utilizadas duas máquinas, designadas como: *Target* e *Host*. O primeiro simula uma planta em tempo real e o segundo realiza o controle dos parâmetros de simulação do primeiro e gerencia a obtenção dos resultados. Neste trabalho, tal método é aplicado na simulação de um sistema de levitação magnética (OLIVEIRA; COSTA; VARGAS, 1999), controlado externamente por uma unidade microprocessada. A Figura 1 ilustra a arquitetura utilizada onde DAC representa a placa de aquisição de dados usada para interface entre o controlador real e a planta simulada.

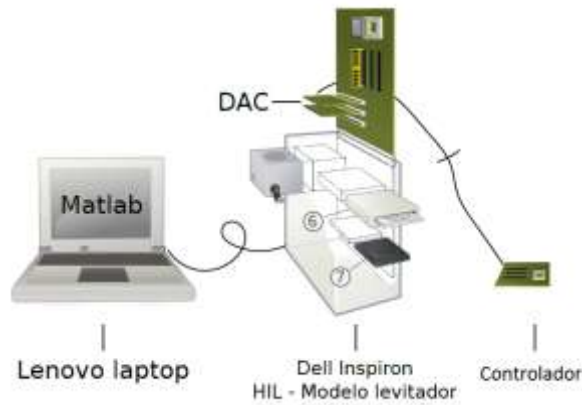


Figura 1 - Esquema de desenvolvimento usando a ferramenta *xPC Target*

Como ponto inicial, um modelo massa mola foi selecionado para os estudos com simulador *xPC Target* devido a sua simplicidade de modelagem e comportamento.

A equação que descreve o comportamento do sistema massa-mola é dada por (OGATA, 2003):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F - kx - b \frac{dx}{dt}$$

onde  $F$  é a força sobre a massa,  $x$  a posição da massa  $m$ ,  $k$  a constante elástica da mola e  $b$  o atrito viscoso entre a massa e superfície de deslizamento.

Sendo  $F$  a entrada e  $x$  a saída do sistema, podemos escrever:

$$mS^2X(S) = F(S) - kX(S) - bSX(S)$$

$$F(S) = X(S)(mS^2 + k + bS)$$

$$\frac{X(S)}{F(S)} = \frac{1}{(mS^2 + k + bS)}$$

De forma a obter um sistema com tempo de acomodação suficientemente pequeno para um sinal de 50 Hz, foram definidas as seguintes especificações de desempenho:

Frequência Natural	289,99 rad.s <sup>-1</sup>
Coefficiente de Amortecimento	0,24366

resultando na escolha dos parâmetros  $m = 0.0034$  Kg  $b = 0.0017$  N.s.m<sup>-1</sup>  $k = 1$  N.m

$$\frac{X(S)}{F(S)} = \frac{1}{1 + 0.0017S + (0.0034S)^2}$$

A partir das simulações do modelo massa-mola escolhido, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 2. Para este sistema simples foram obtidos resultados compatíveis entre o modelo simulado usando a filosofia em tempo real (Figura 2 b) e usando simulação *offline* (Figura 2 a).

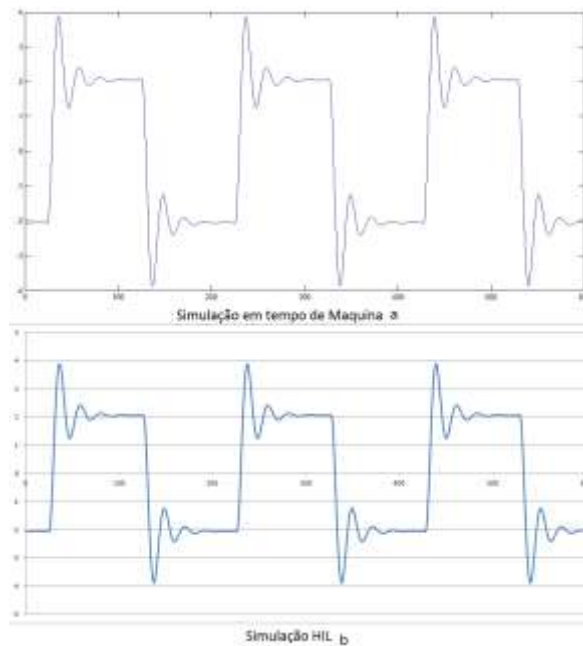


Figura 2 - Resultados da simulação do sistema Massa Mola

Após estudo e análise do uso da ferramenta *xPC Target*, como uma segunda etapa, foi feita a simulação de um levitador magnético usando a plataforma de desenvolvimento HIL. A Figura 3 ilustra o levitador magnético em estudo.

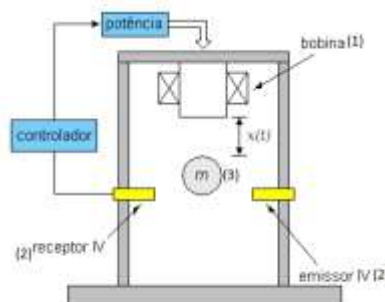


Figura 3 - Esquema de um Levitador Magnético

O sistema é composto por: uma bobina enrolada com fio de cobre num núcleo ferromagnético (1), um sensor de posição (2), uma interface de potência para acionamento da bobina, um sistema de controle, e uma esfera (3) ferromagnética a ser levitada. O sistema de controle deve gerar uma corrente elétrica para a bobina de acordo com a posição da esfera, de maneira a criar uma força para equilibrar o peso e assim mantê-la suspensa.

A força magnética  $f_{mag}$  que age sob o objeto levitado depende da corrente elétrica  $i(t)$  que flui através da bobina, do entreferro  $x(t)$  (distância entre o eletroímã e o objeto) e da indutância  $L$  da bobina. Tal força pode ser calculada através da seguinte expressão (OLIVEIRA; COSTA; VARGAS, 1999):

$$f_{mag} \ i, L \ x = \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{dx} L \ x$$

Sabe-se que quanto menor o entreferro melhor o acoplamento magnético. Logo, a indutância varia em função de  $x$ :  $L$  decresce com um comportamento logarítmico à medida que o objeto se afasta do eletroímã, ao passo que a indutância é máxima para  $x = 0$ . Com o intuito de representar tal comportamento utiliza-se a seguinte relação (OLIVEIRA; COSTA; VARGAS, 1999):

$$L(x) = L(\infty) + \frac{L(0) - L(\infty)}{1 + \frac{x}{a}}$$

Em que:  $L(0)$  e  $L(\infty)$  denotam a indutância da bobina para  $x = 0$  e  $x \rightarrow \infty$ , respectivamente.

A constante  $a$  é usada para modelar o comportamento de  $L(x)$ .

Seja  $\Delta L = L(0) - L(\infty)$ . Ao substituir (1) em (2) pode-se escrever:

$$f_{mag}(i, x) = -\frac{\Delta L}{2a} \cdot \frac{i^2}{1 + \frac{x}{a}}$$

Por fim, podemos modelar o sistema através da segunda lei de Newton, onde  $g$  é a gravidade,  $x$  é a posição da esfera e  $m$  a sua massa:

$$\begin{aligned} mx &= F \\ &= m \cdot g + f_{mag}(i, x) \\ &= m \cdot g - \frac{\Delta L}{2a} \cdot \frac{i^2}{1 + \frac{x}{a}} \end{aligned}$$

Como é possível observar, a força magnética que age sobre a esfera apresenta um comportamento não linear. Neste caso, faz-se necessário o uso de técnicas de linearização para simplificação do modelo. A técnica de linearização usada para este modelo é a série de Taylor (OGATA, 2003). Linearizando em torno dos pontos nominais  $i$  e  $x$  podemos escrever:

$$f_{mag} \approx f_{mag}(i, x) + \frac{df_{mag}(i, x)}{di} \cdot (i - \bar{i}) + \frac{df_{mag}(i, x)}{dx} \cdot (x - \bar{x})$$

Considerando:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{df_{mag}(i, x)}{di} = -\frac{\Delta L \bar{i}}{a(1 + \frac{\bar{x}}{a})^2} \\ k_2 &= \frac{df_{mag}(i, x)}{dx} = \frac{\Delta L \bar{i}^2}{a^2(1 + \frac{\bar{x}}{a})^3} \end{aligned}$$

e definindo as variáveis incrementais:

$$\begin{aligned}\delta x(t) &= x(t) - \bar{x} \\ \delta i(t) &= i(t) - \bar{i} \\ \delta u(t) &= v(t) - R \cdot \bar{i}\end{aligned}$$

sendo  $v(t)$  a tensão na bobina e  $R$  a resistência da mesma, obtemos:

$$m\ddot{x} = mg + f_{mag}(\bar{i}, \bar{x}) + k_1(i - \bar{i}) + k_2(x - \bar{x})$$

Analisando o ponto de equilíbrio temos que neste ponto  $mg = -f_{mag}$ , sendo assim:

$$m\ddot{x} = k_2\delta x(t) - k_1\delta i(t)^1$$

Do circuito elétrico da bobina do levitador temos:

$$v(t) = R \cdot i(t) + \frac{d}{dt} \cdot L(x) \cdot i(t)$$

Para variações muito próximas do ponto de equilíbrio o valor de  $L(x)$  é pequeno, neste caso:

$$\delta u = R\delta i(t) + L \frac{d}{dt} \cdot \delta i(t)$$

Descrevendo o sistema no espaço de estados e definindo o vetor de estados como  $\zeta = [\delta x, \delta \dot{x}, \delta i]^T$ , temos:

$$\begin{aligned}\dot{\zeta}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_2}{m} & -\frac{k_1}{m} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \zeta(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \delta u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 0 & c_1 & 0 \end{bmatrix} \zeta(t)\end{aligned}$$

onde  $y(t)$  é a posição incremental da esfera medida indiretamente pelo sensor de posição, em torno do ponto de equilíbrio nominal 2,5V. Os parâmetros usados para simulação, obtidos de um levitador real, são dados na Tabela 1 (Romano, A.R., 2010)

Tabela 1 - Parâmetros do Levitador Magnético real

Descrição	Símbolo	Valor[S.I.]
Massa da esfera	$m$	0,028 Kg
Resistência da Bobina	$R$	7,4 W
Indutância da Bobina	$L$	0,06 H
Variação da Indutância	$\Delta L$	0,0042 H
Corrente no ponto de equilíbrio	$\bar{i}$	1,0 A
Posição no ponto de equilíbrio	$\bar{x}$	0,005 m

<sup>1</sup> Para um melhor análise do modelo preferiu-se deixar o sinal negativo de  $k_1$  na equação para que se possa ver sua influencia no sistema.  $-k_1 = \frac{df_{mag}}{di} = \frac{\Delta \bar{i}}{a(1+\frac{x}{a})^2}$

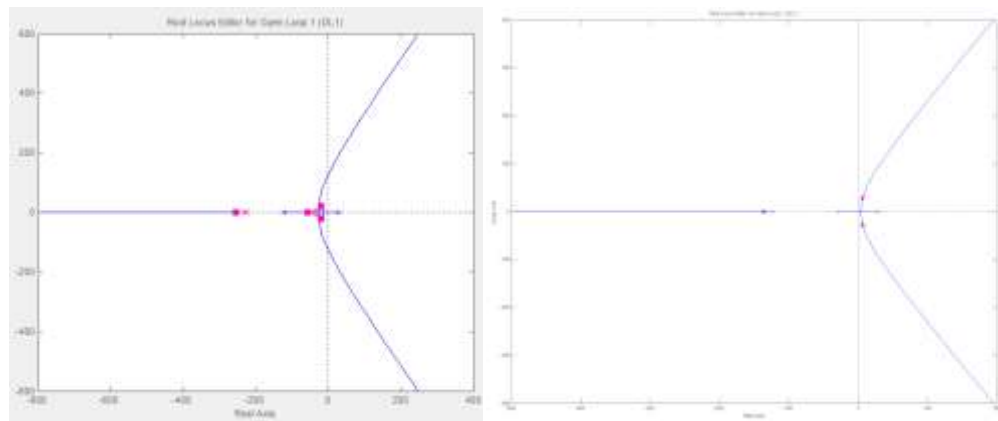
Constante de comportamento de $L(x)$	$a$	0,00377
Ganho do sensor de Posição	$c$	0,0015 V/m

Estabelecidos os parâmetros de simulação do sistema foi gerado um controlador do tipo avanço de fase para o controle da posição da esfera levitada. O controlador implementado é dado pela equação:

$$C/S = 2.1018 \frac{1 + 0,031S}{1 + 0,0044S}$$

O lugar das raízes do sistema é ilustrado na Figura 4.

A partir da equação do controlador e do modelo em espaço de estados do levitador magnético foi desenvolvido um modelo no Simulink do sistema completo, onde em primeiro estudo, tanto o controlador quanto o modelo da planta foram simulados no computador *Target*. O modelo simulink desenvolvido é ilustrado na Figura 5. Nesta etapa apenas a realimentação realizada externamente. O objetivo foi validar o funcionamento básico do conjunto controlador mais planta.



(a) Sistema completo

(b) planta simulada

Figura 4 - Lugar das Raízes

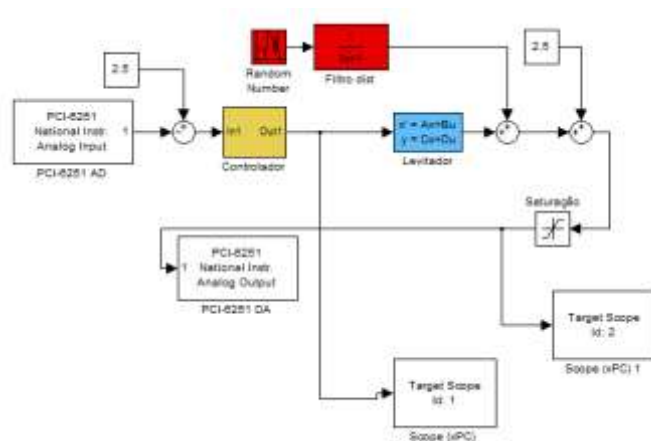


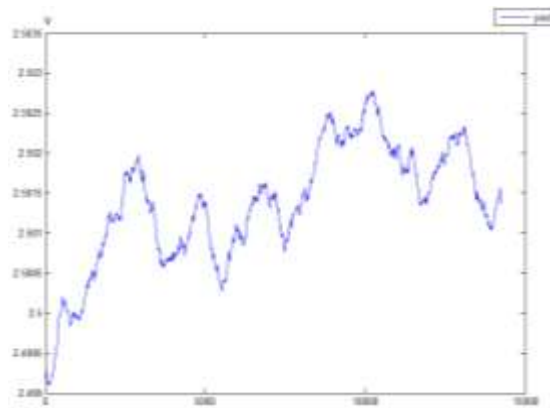
Figura 5 - Modelo Simulink do sistema completo

## Resultados e Discussão

Usando a topologia da Figura 5 sendo  $v(t)$  a tensão na bobina, ou seja,  $\delta u$  somado ao valor de equilíbrio  $R\bar{i}$  (7,4V), obtém-se o gráfico da Figura 6. A Figura 6a mostra a posição da esfera ao longo do tempo ( $y(t)+2,5V$ ) em função da tensão  $v(t)$  aplicada e indicada na Figura 6b. Uma análise qualitativa da Figura 6 mostra que o controlador mantém a esfera em suspensão.

Tendo em vista o objetivo de realizar uma simulação na qual o controle seja embarcado em um controlador digital externo, o compensador foi discretizado usando a Transformada Z (OGATA, 1999), com taxa de amostragem de 0.001 segundos, resultando:

$$C_z = \frac{14,8z - 14,37}{z - 0,7967}$$



(a) - Sensor de posição da esfera



(b) - Tensão na bobina  $v(t)$

Figura 6 - Resultados da simulação do sistema Levitador Magnético

Usando um microcontrolador PIC18F452 da *Microchip* (PIC18F452, 2013) como controlador e com a planta do levitador embarcada no computador *Target*, o sistema pôde ser simulado em tempo real, usado a filosofia HIL (Figura 7), com a interface entre a planta e o controlador externo realizada por um placa PCI DAC 6251 (M SERIES, 2013) da *National Instruments*. A plataforma *xPC Target* permite a monitoração dos sinais através de osciloscópios virtuais. Os resultados obtidos para a posição medida da esfera pelo sensor de posição ( $y(t) + 2,5V$ ) e da saída do controlador ( $v(t)$ ) são ilustrados na Figura 8 onde o controlador real manteve a esfera em equilíbrio. A Figura 9 ilustra a bancada usada para teste. A simulação obtida usando HIL permitiu uma validação mais realística do controlador projetado.

Uma levitador com a característica da Tabela 1 estava disponível (Figura 10) e a lei controle também equilibrou a esfera no levitador real.

A arquitetura HIL estudada permite que controladores reais sejam avaliados sem a necessidade de se ter um planta física disponível, permitindo testes mais assertivos sob condições diversas, incluindo condições de falha.

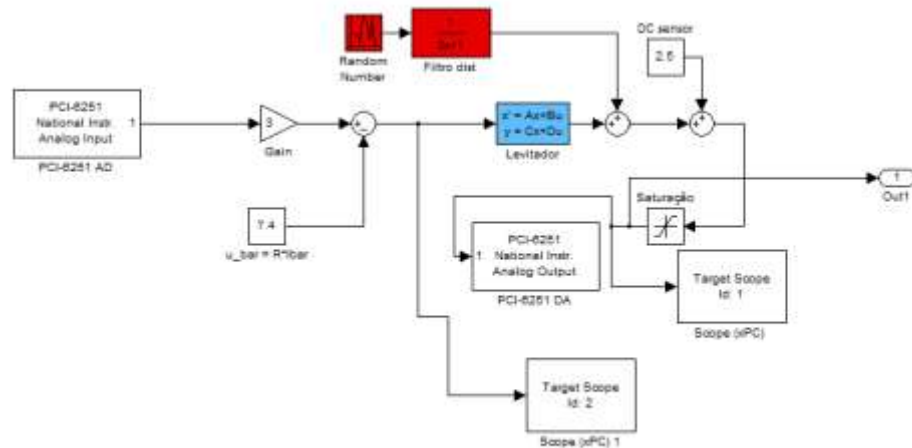
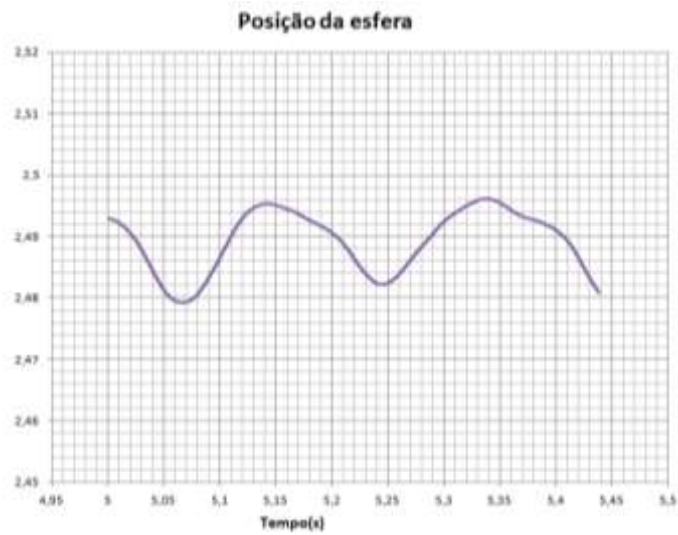
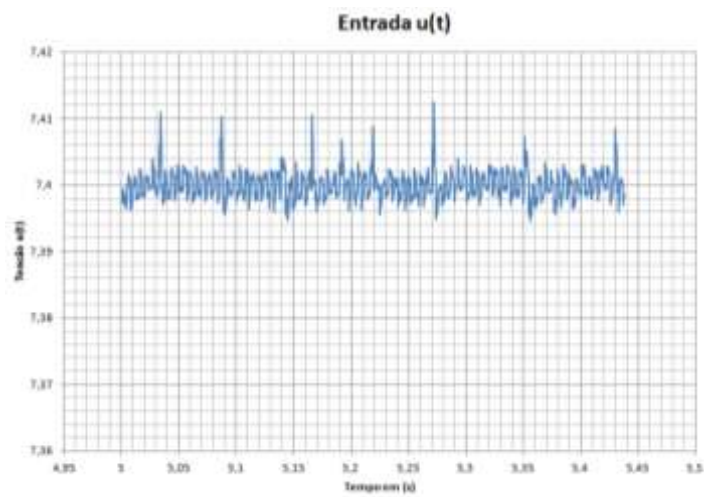


Figura 7 - Resultados da simulação do sistema Levitador Magnético





(a) - Sensor de posição com controlador externo



(b) - Tensão na bobina  $v(t)$  com controlador externo

Figura 8 - Resultados da simulação do sistema Levitador Magnéticos com controle embarcado

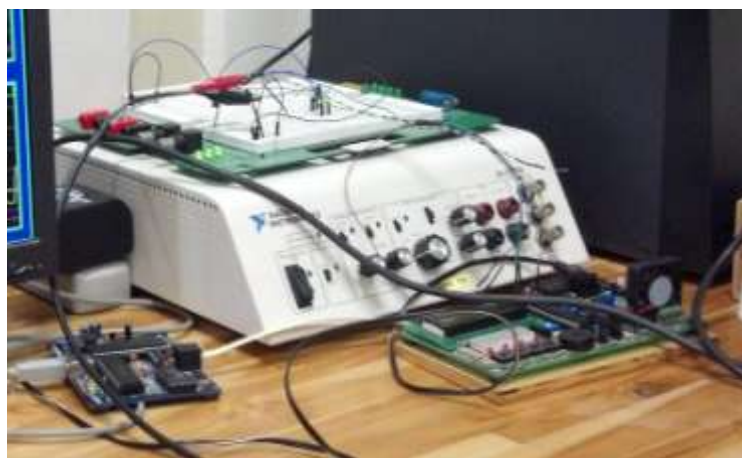


Figura 9 - Interfaceamento da planta simulada com o controle embarcado através da DAQ 6251

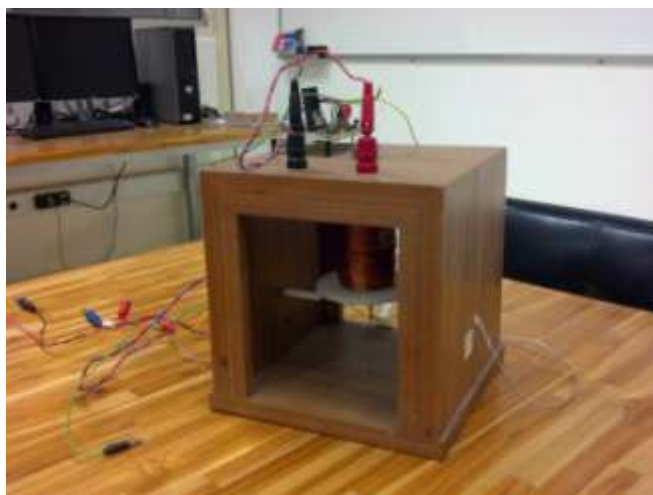


Figura 10 - Foto do levitador real

## Conclusões

Estabeleceu-se uma arquitetura HIL baseada no aplicativo *xPC Target* para simulação e controle de plantas dinâmicas voltada para o desenvolvimento de sistemas embarcados. Tal abordagem permite a simulação de várias leis de controle sem a necessidade de uma planta física, contribuindo para o estudo e desenvolvimento de técnicas de controle e simulação. Como planta alvo usou-se um sistema de levitação magnética, tipicamente instável, obtendo-se resultados satisfatórios e possibilitando o teste de controladores reais sem se ter a planta disponível.

Um Tutorial sobre a utilização e configuração do aplicativo *xPC Target* foi também desenvolvido como resultado deste trabalho, visando desenvolvimento de experimentos na área de controle e simulação em cursos de graduação em Engenharia Elétrica. O desenvolvimento de um modelo não linear do levitador também está em andamento.

## Referências Bibliográficas

- BÉLANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J. N. The What, Where and Why of Real-Time Simulation. Planet RT, 2010.
- M SERIES USER'S GUIDE. National Instruments. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds>>. Acesso em 25/03/2013.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 4 ed. Rio de Janeiro, Prentice Hall, 2007.
- OLIVEIRA, Vilma A.; COSTA, Eduardo F.; VARGAS, Jerson B. Digital Implementation of a Magnetic Suspension Control System for Laboratory Experiments. Education, IEEE Transactions on, v. 42, n. 4, p. 315-322, 1999.
- PIC18F452. Microchip. 2008. Disponível em <<http://ww1.microchip.com>>. Acesso em 18/08/2013.
- Romano, R.A. Levitador Magnético Nota Técnica. São Caetano do Sul: CEUN-IMT, 2010
- xPC TARGET USER'S GUIDE. The Mathworks. Inc., Natick, MA, v. 5, 1998. Disponível em <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em 13/04/2013.