

# CONSTRUÇÃO DE UM PROTOTIPO DIDÁTICO DE UM LEVITADOR MAGNÉTICO

Ivan Daniel Corrêa da Silva<sup>1</sup>, Sidemar Roberto Ribeiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina ivanleinad@unochapeco.edu.br

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina sidemar\_ribeiro@hotmail.com

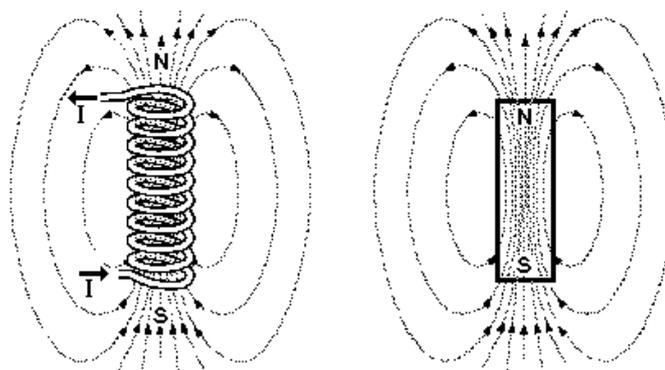
**Resumo-** Este trabalho propõe a construção de um protótipo didático de um levitador magnético para uso em aulas práticas de controle, integrando os conhecimentos das diferentes unidades curriculares da sexta fase do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia, campus Chapecó/SC. Trata-se de um sistema instável e não linear. Dessa forma o nível de complexidade do trabalho aumenta muito. Foi levantado o modelo matemático do sistema, feita a linearização do mesmo num ponto de equilíbrio desejado e posteriormente, com auxílio de ferramentas computacionais determinado a função de transferência do modelo completo. Projetou-se um controlador PID discretizado e implementou-se o mesmo numa placa microcontroladora (Arduino Mega). Os resultados obtidos não foram satisfatórios, uma vez que não foi possível a estabilização do sistema. É necessário um estudo mais aprofundado de algumas etapas do projeto.

**Palavras-Chave:** Levitação magnética, Controlador PID, Projeto Integrador.

## 1 INTRODUÇÃO

A levitação magnética é uma área que possui vasta aplicação no campo da Engenharia, entre as quais estão os trens de alta velocidade em testes no Japão e aplicações onde não se pode ter atrito entre componentes como mancais magnéticos por exemplo. Este trabalho, porém, tem o objetivo de desenvolver um protótipo didático para uso posterior nas aulas da disciplina de teoria e prática de controle do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia, campus Chapecó/SC. Para levitar um material ferromagnético precisa-se de um campo magnético. Uma forma de prover tal campo é utilizando um eletroímã, que consiste de um núcleo ferromagnético, enrolando nele varias espiras condutoras, chamadas de bobinas. Ao passar corrente em tais bobinas cria-se um campo magnético nas extremidades do núcleo, similar ao imã permanente conforme figura (01).

Figura 01 - Vetores do campo magnético de um eletroímã



## 2 METODOLOGIA

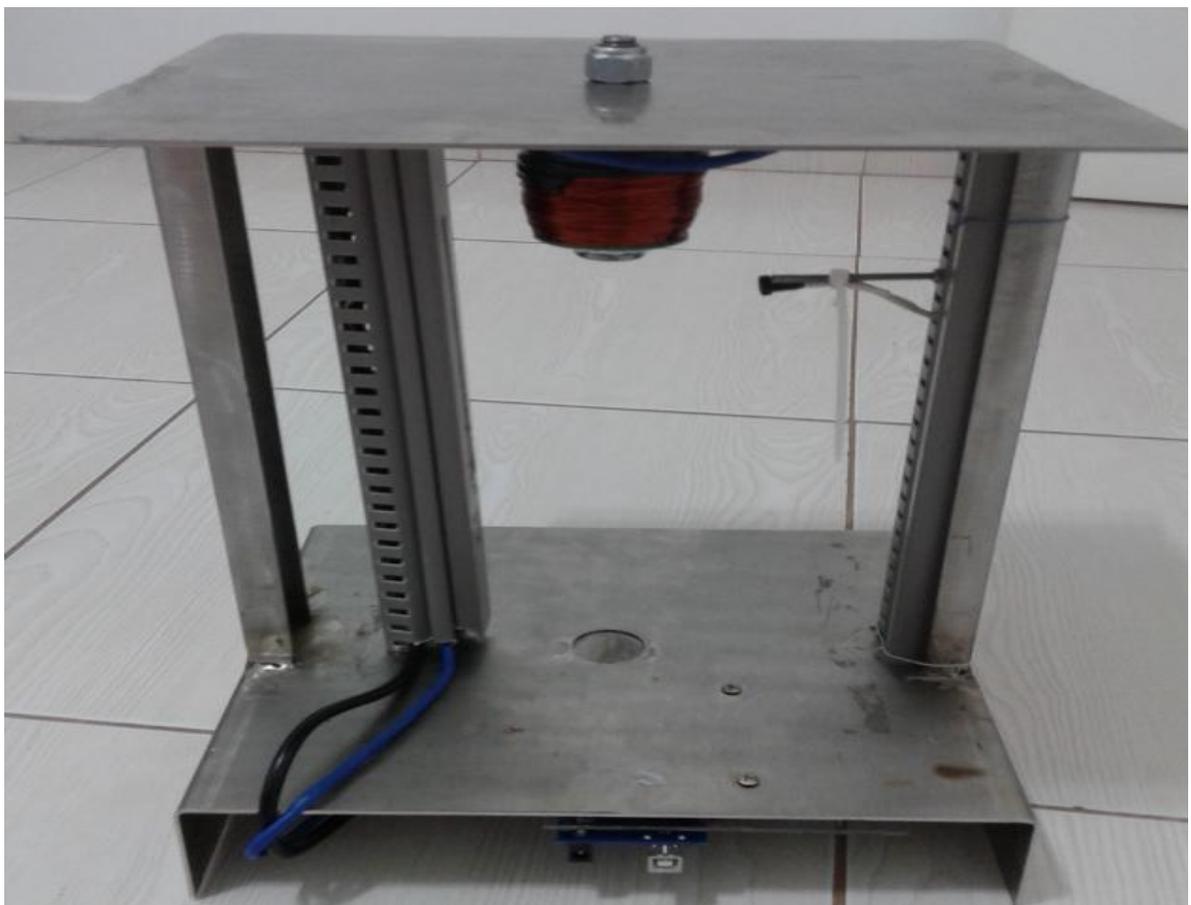
São apresentadas nessa secção os materiais e métodos utilizados para a implementação do levitador eletromagnético.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para a construção do protótipo utilizou-se uma estrutura metálica em aço inox de uma liga a-magnética para não causar interferências nas linhas de força do eletroímã, conforme a figura (02).

**Figura 02** - Estrutura metálica do levitador magnético



### 3.2 CONSTRUÇÃO DO ELETROÍMÃ

Para a construção do eletroímã utilizou-se um carretel de plástico (embalagem de estanho) de comprimento 50mm e diâmetro interno de 20mm. O fio utilizado foi o 24 AWG diâmetro 0,64mm.

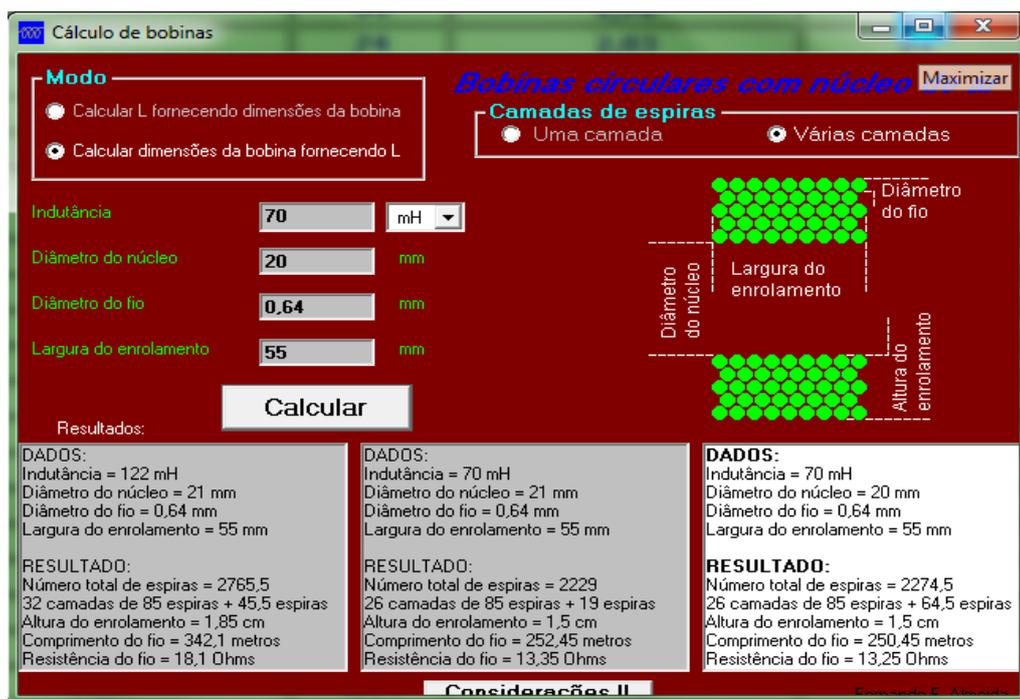
Com as características da bobina em mãos utilizou-se o software CalcBob Fig. (03) para calcular o número de espiras e obteve-se os seguintes resultados:

Número de espiras = 2272

Indutância = 70mH

Resistência = 13,25 ohms

Figura 03 - Tela do software CalcBob

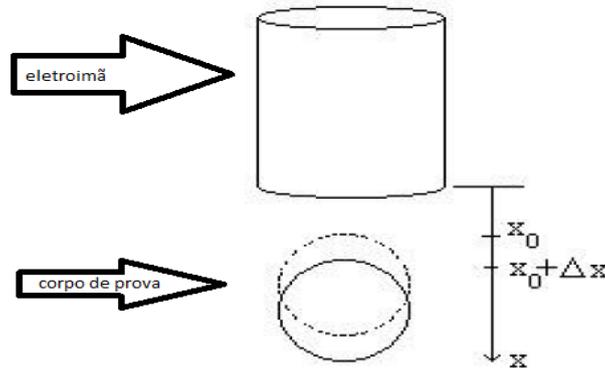


### 3.3 Modelo matemático

Para o entendimento do fenômeno e forças do sistema é necessária a utilização das equações que ajudam a descrever as variáveis desse sistema e conhecer as grandezas envolvidas.

Primeiramente com a utilização do diagrama de corpo livre do sistema fig. (04), pode-se chegar na equação de equilíbrio das forças, em  $X_0$  que é o ponto de equilíbrio do corpo de prova. O somatório das forças será zero, desta forma existe uma pequena variação na posição, para escrever a equação (1).

Figura 04 - Diagrama de corpo livre



A equação é a seguinte:

$$m.\ddot{x} = \sum \text{Forças} \quad (1)$$

Como se conhece as forças principais envolvidas no sistema pode-se fazer:

$$m.\ddot{x} = C.\left(\frac{i}{x}\right)^2 - m.g \quad (2)$$

Fazendo o modelo matemático do sistema com a utilização da equação (2).

$$m.\ddot{x} = C(i^2.x^{-2}) - m.g \quad (3)$$

Pode se observar a não linearidade do sistema pelo termo quadrático da equação, fazendo-se necessária a linearização em torno do ponto de equilíbrio, utilizando-se a série de Taylor, a força magnética na região de equilíbrio pode ser escrita da seguinte forma:

$$f_{mag} = \left(\frac{2.C.io}{X_0^2}\right).i - \left(\frac{2.C.io^2}{X_0^3}\right).x - m.g \quad (4)$$

Substituindo a eq. (4) na eq. (3)

$$m.\ddot{x} = \frac{2.C.io}{X_0^2}.i - \frac{2.C.io^2}{X_0^3}.x - m.g \quad (5)$$

Aplicando as transformada de Laplace:

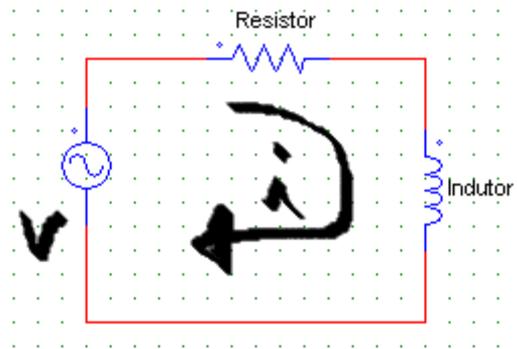
$$mS^2.X(s) = \frac{2.C.io}{x_0^2}.I(s) - \frac{2.C.io^2}{x_0^3}.X(s) - m.g \quad (6)$$

Trabalhando com a equação para obter a saída em função da corrente, continua-se o equacionamento.

$$X(s) = \frac{\frac{2Cio}{Xo^2}}{s^2 + \frac{2Cio^2}{Xo^3}} \cdot I(s) = \frac{2Cio \cdot Xo}{Xo^3 \cdot s^2 + 2Cio^2} \cdot I(s) \quad (7)$$

Agora é necessária a modelagem do subsistema elétrico da eletroímã .

**Figura 05** - Subsistema elétrico



Pela lei de Kirchoff, pode-se identificar o circuito pela seguinte equação, onde o somatório das tensões é igual a zero.

$$V - R \cdot i - L \cdot \frac{di}{dt} = 0 \quad (8)$$

precisa-se encontrar uma formula que relaciona tensão de entrada e corrente.

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i = V \quad (9)$$

Aplicando Laplace na equação (9) temos :

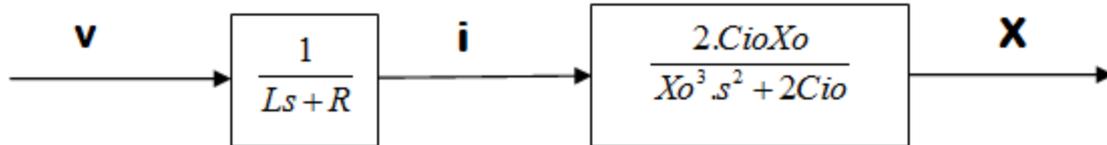
$$L(s) \cdot I(s) + R \cdot I(s) = V(s) \quad (10)$$

Isolando a corrente em função de V(s), chega-se na equação final do subsistema elétrico do sistema geral.

$$I(s) = \frac{1}{Ls + R} \cdot V(s) \quad (11)$$

Podendo representar o sistema em diagrama de blocos.

Figura 06 - Diagrama de blocos do sistema em malha aberta



Analisando o sistema dinâmico é possível observar a existência de polos que tornam o sistema instável pela equação.

$$Xo^3s^2 + 2Cio = 0 \quad (12)$$

$$s^2 = \frac{-2Cio^2}{Xo^3} \quad (13)$$

$$s = \pm \sqrt{\frac{-2Cio^2}{Xo^3}} \quad (14)$$

Portanto verifica-se que o sistemas é instável por sua construção.

Linearizando a equação do sistema dinâmico mecânico do projeto pela equação

$$G(s) = \frac{k1}{m.s^2 - k2} \quad (15)$$

Para a determinação da constante k1, utilizou-se duas esferas com massas diferentes e analisou-se a corrente necessária para criar um campo magnético com força suficiente para atrair as mesmas, conforme tabela (6).

corpo	massa	força peso	corrente
esfera1	3,515	0,0345	1
esfera2	28,07	0,275	1,2

Tabela 6 : Dados constante K1

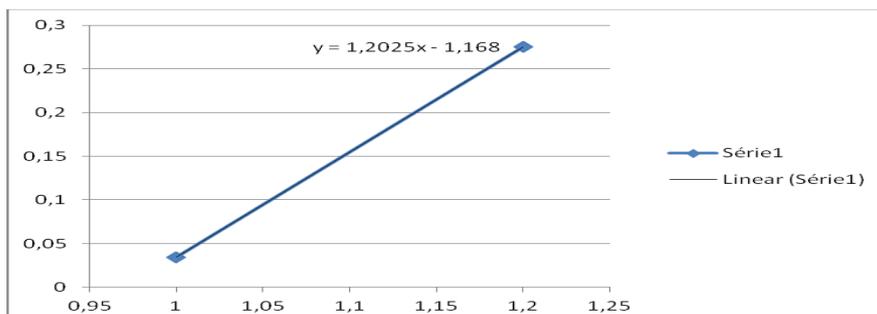


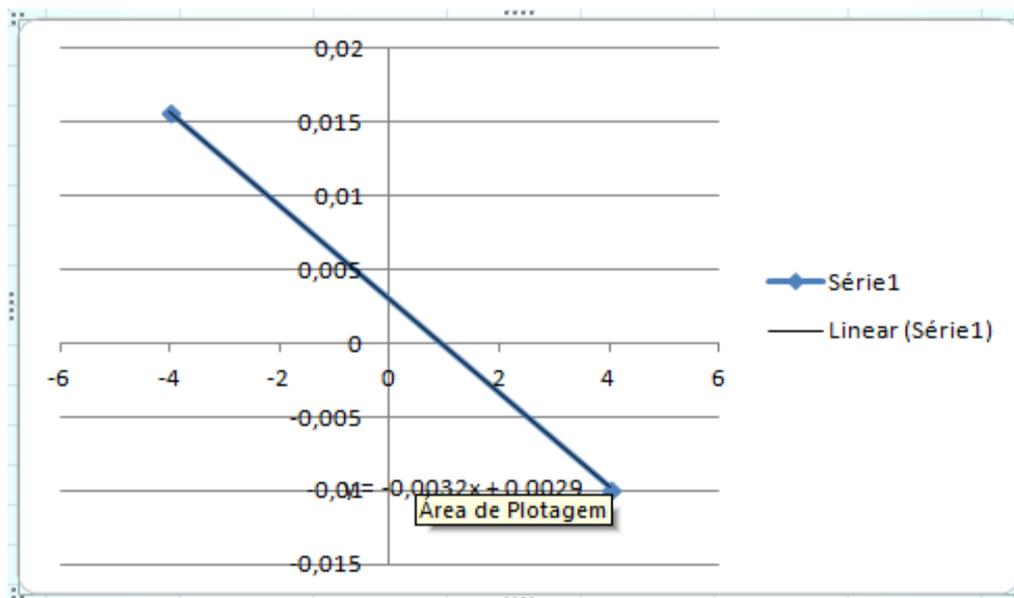
Figura 6. Gráfico constante k1

O coeficiente angular da reta formada pela tabela (6) nos dá o valor da constante k1.

Para a determinação da constante  $k_2$ , utilizou-se uma única esfera e variou-se a posição da mesma em -4mm a 4mm e analisou-se a variação da força em relação a corrente aplicada na bobina do eletroímã conforme tabela (7).

corpo	massa	força	mm
esfera1	3,515g	-0,0098	4
esfera1	3,515g	0,01568	-4

**Tabela 7: Dados Constante  $k_2$**



**Figura 7. Gráfico constante  $k_2$**

O coeficiente angular da reta formada pela tabela (7) nos dá o valor da constante  $k_2$ .

Substituindo os valores das constantes  $k_1$  e  $k_2$  na equação (12) temos a função transferência do subsistema mecânico.

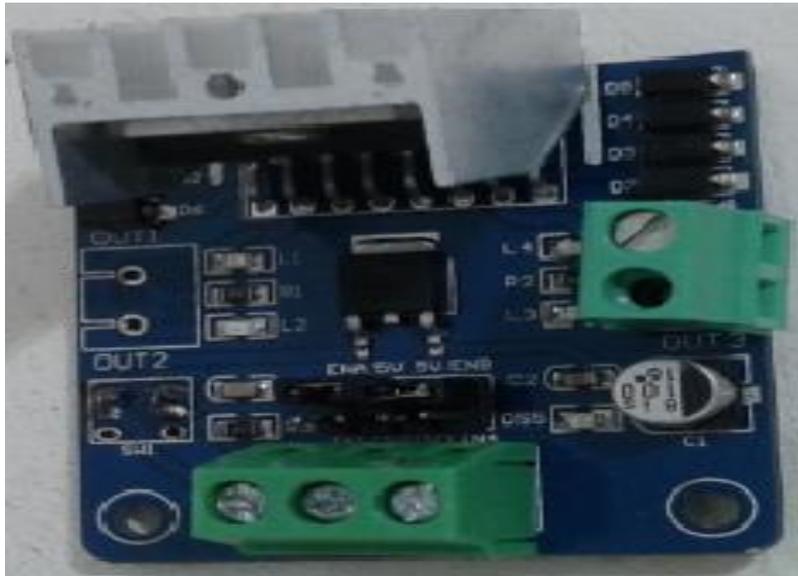
$$\frac{\Delta x}{\Delta i} = \frac{1.202}{s^2 - 0,003}$$

Para determinação da função do subsistema elétrico utilizou-se um multiteste para medição dos parâmetros de indutância e resistência do eletroímã e posteriormente substituiu-se os mesmos na equação (16).

$$I(s) = \frac{1}{0.122s + 13,5} \cdot V(s)$$



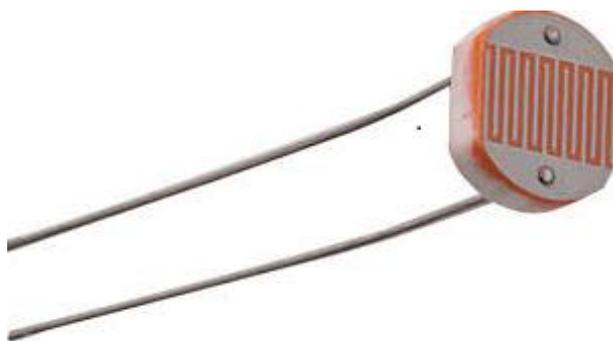
**Figura 08** - Ponte H L298M



### 3.6 SENSOR

Entre as opções de sensores levantadas na fase de estudos do projeto optou-se pelo sensor LDR Figura (09), por ser de baixo custo e facilmente encontrado e ter uma resposta satisfatória, na ordem de 7ms.

**Figura 09** - sensor LDR



### 3.6.1 FUNCIONAMENTO

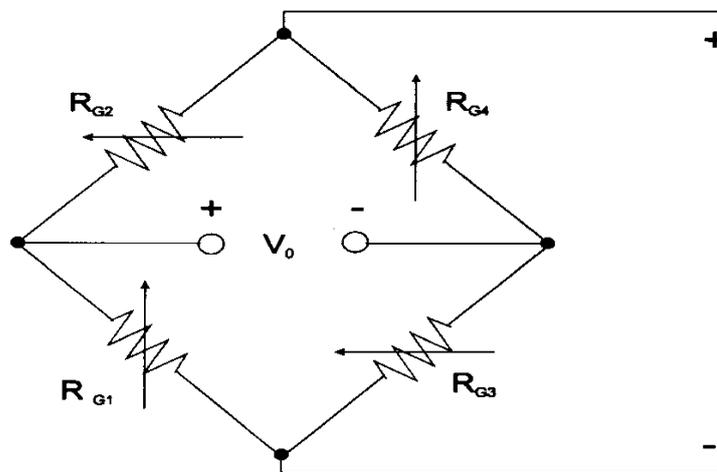
O *LDR* é um *Resistor Dependente de Luz ou Fotoresistência*. É um componente eletrônico passivo do tipo resistor variável, mais especificamente, é um resistor cuja resistência varia conforme a intensidade da luz que incide sobre ele.

Tipicamente, à medida que a intensidade da luz aumenta, a sua resistência diminui. O *LDR* é construído a partir de material semicondutor com elevada resistência elétrica.

Comercialmente se encontram sensores *LDR* de *5mm* e de *10mm*. No projeto em questão utilizou-se o de *10mm*.

Para linearização dos sensores utilizou-se uma ponte de wheatstone com dois braços ativos conforme figura (10), composta por dois *LDR*'s e dois trimpot's.

Figura 10 - Ponte de Wheatstone com dois braços ativos



- Escuridão : resistência máxima, geralmente mega ohms.
- Luz muito brilhante : resistência mínima, geralmente dezenas de ohms.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo de levitação eletromagnética construído é um excelente instrumento prático para ser utilizado de forma pedagógica em aulas de laboratório para os futuros acadêmicos, porém alguns parâmetros de controle precisam ser ajustados. Durante o desenvolvimento deste projeto, os alunos envolvidos no mesmo, constataram que quando saíam do ambiente de simulação para a prática, as coisas aconteciam de forma diferente.

Em após concluir a construção do protótipo e de fazer vários testes com o mesmo, pôde-se verificar pontos a ser melhorados para o sucesso do projeto. Pôde-se verificar que o peso do corpo de teste é importante, pois com um peso pequeno o magnetismo residual do núcleo consegue segurar o corpo sem ter ação de controle positiva e com uma massa grande a aceleração do corpo de teste será muito grande fazendo com que sistema não consiga buscar o corpo de teste quando sai da referência, assim uma esfera .oca seria uma possibilidade, também pôde-se observar que o sistema de medição precisa dar uma resposta satisfatória e com uma escala maior de trabalho. Outra possibilidade de melhoria do projeto seria a substituição de núcleo atual (parafuso) por um núcleo de ferrite para melhorar a força eletromagnética da bobina.

Por ser um sistema instável e não linear a estabilização do mesmo somente com controlador PID torna-se difícil, podendo assim aplicar outras técnicas de controle como por exemplo um controlador robusto, e alocação de polos com modelagem de espaço de estados. Para o futuro, esse trabalho pode ser melhorado pelas turmas posteriores do curso de Engenharia de controle e Automação do instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, IFSC Campus Chapecó- SC.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] - <<http://historiasylvio.blogspot.com.br/search?q=trem+bala>>. Acesso em 26 de agosto de 2014.
- [2] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno** 5ª Ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- [3] HART, Daniel w. **Eletrônica de potência. Análise e Projetos de circuitos**. Valparaiso University: Macgraw - Hill; 2010.