



Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

Bacharelado em ciências exatas e tecnológicas

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Trabalho submetido ao colegiado do curso de Ciências Exatas e Tecnológicas para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Exatas e Tecnológicas, tendo como orientador o professor M. Sc. Gildeberto de Souza Cardoso.

Discente: Leandro Gonçalves da Cruz.

Cruz das Almas

18/11/2013



Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

Bacharelado em ciências exatas e tecnológicas

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Discente: Leandro Gonçalves da Cruz.

Cruz das Almas

18/11/2013

FICHA CATALOGRÁFICA

C957

Cruz, Leandro Gonçalves da.
Construção de uma bancada de levitação eletromagnética /
Leandro Gonçalves da Cruz._ Cruz das Almas, BA, 2013.
32f.; il.

Orientador: Gilberto de Souza Cardoso.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do
Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas.

1.Circuitos magnéticos. 2.Levitação eletromagnética.
3.Eletromagnetismo. I.Universidade Federal do Recôncavo da
Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. II.Título.

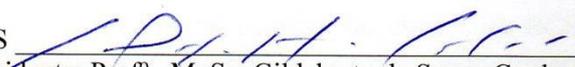
CDD: 621.31

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CETEC – CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS)

TÍTULO
CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Aprovada em: 18 /11/2013

BANCA EXAMINADORA:

ASS 
Presidente: Prof^º. M. Sc. Gildeberto de Souza Cardoso

ASS 
Membro I: Prof^º. Dr. Nilton Cardos da Silva

ASS 
Membro II: Prof^º. Dr. Juliano Pereira Campos

Orientador: Prof^º. M. Sc. Gildeberto de Souza Cardoso
Graduando: Sr. Leandro Gonçalves da Cruz

CRUZ DAS ALMAS, 18 de novembro de 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de participar como aluno no curso de Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas e ter vencido até o momento todas as dificuldades que surgiram ao longo do processo de conclusão do curso.

Agradeço à minha família pelo apoio nas tomadas de decisões durante o processo de graduação.

Agradeço ao meu orientador Gildeberto pela confiança e pelo empenho para que o projeto de levitação estivesse êxito.

Agradeço a todos os professores do CETEC que em conjunto contribuíram para a minha formação acadêmica e qualificação profissional, buscando sempre uma solução para os problemas à luz do conhecimento.

Agradeço aos colegas de classe do BCET que, em conjunto, contribuíram com esforços voluntários na luta pelo conhecimento.

Agradeço à Wellington pela doação de um contator para a retirada de material indispensável à construção da bobina utilizada no levitador eletromagnético.

Agradeço ao meu antigo chefe Nilson e à minha atual chefe Adaildes de Jesus dos Santos da Silva que durante todo o período em que estive no curso permitiram a existência harmônica de condições que mim proporcionaram conciliar meu trabalho com os estudos na universidade.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

RESUMO

Neste trabalho abordam-se os conceitos ligados ao fenômeno da levitação eletromagnética, bem como, os conceitos relacionados a materiais magnéticos e as teorias que norteiam as ideias de Maxwell, Faraday e Gauss servindo como base para a construção de circuitos magnéticos. Além do mais, dar-se uma abordagem especial para o entendimento de indutores, sendo este, a constituição básica para a criação do circuito magnético, de tal forma que possibilite experimentar na prática o fenômeno da levitação e descrever os processos relacionados à construção de uma bancada de levitação eletromagnética.

Palavras-chave: levitação, materiais magnéticos, circuito magnético.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

ABSTRACT

In this work we discuss the concepts related to the phenomenon of electromagnetic levitation, as well as concepts related to magnetic materials and theories that guide the ideas of Maxwell, Faraday and Gauss serving as basis for the construction of magnetic circuits. Besides, give yourself a special approach to the understanding of inductors, this being the basic constitution for the creation of the magnetic circuit, so that in practice allows experience the phenomenon of levitation and describe the processes related to the construction of a bench electromagnetic levitation.

Keywords: levitation, magnetic materials, magnetic circuit.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivos	8
1.2 Justificativa	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Substâncias Diamagnéticas.....	10
2.2 Substâncias Paramagnéticas	10
2.3 Substâncias Ferromagnéticas	11
2.4 A lei de Biot-Savart.....	12
2.5 A lei circuital de Ampère	13
2.6 Campos magnéticos variantes no tempo.....	14
2.6.1 Lei de Indução de Faraday	14
2.6.2 Lei de Lenz	15
2.6.3 Equações de Maxwell	15
2.7 Indutores	18
3 APLICAÇÕES.....	20
4 METODOLOGIA.....	21
4.1 Construção da bancada para levitação eletromagnética	21
4.1.1 Construção do eletroímã	21
4.1.2 Circuito de acionamento.....	25
4.1.3 Modelagem matemática do sistema.....	25
5 RESULTADOS	29
6 CONCLUSÃO	31
7 BIBLIOGRAFIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

No mundo o ser humano se depara com situações extremamente complexas que influenciam a nossa vida, contudo, muitas vezes ele não se dá conta disso. Na natureza o homem sempre conviveu com as quatro forças fundamentais da natureza, a saber, a força nuclear forte, a força nuclear fraca, a força gravitacional e a força eletromagnética. Porém, ficou-se muito tempo sob os holofotes da força gravitacional, em especial com o advento das ideias de Newton, ideias estas que proporcionaram ao homem descrever, por exemplo, desde o movimento orbital dos planetas até a queda de um paraquedista. Contudo, no íntimo da natureza humana reside algo tão importante quanto fundamental para a existência do mundo tal como se conhece hoje; a curiosidade, pois foi com a curiosidade aliada as necessidades, que as melhores estratégias de guerras se fizeram tão importante quanto o próprio ato de se manter vivo pra administrar os despojos de uma guerra, também foi através da curiosidade que cientistas e engenheiros puderam lançar satélites no espaço e revolucionar o mundo das telecomunicações, enfim, pode-se contemplar tantas belezas e fenômenos naturais com a certeza de que se tem explicações com diferentes pontos de vista rumo a busca do conhecimento.

Conhecer e ser capaz de explicar algo é tão importante que no século XIX quando o campo da eletricidade e do magnetismo estava em amadurecimento diferentes pensadores sobre o assunto divergiam constantemente seus pontos de vista sobre o mesmo fenômeno físico, além do mais, se acreditava que eletricidade e magnetismo não estavam relacionados entre si. Apenas na segunda metade do século XIX através dos trabalhos de James Clerk Maxwell é que se pôde ter uma forma final da teoria da eletricidade e do magnetismo que veio a ser chamada de teoria do eletromagnetismo; unindo aspectos relevantes da Lei de Gauss, Lei de Ampère e da Lei de indução de Faraday.

1.1 Objetivos

Este trabalho apresenta como principal objetivo a construção de uma bancada para levitação eletromagnética, visando em suma, consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo do processo de graduação, através da análise das principais ferramentas matemáticas e dos processos físicos que evidenciam as leis e teorias do eletromagnetismo na compreensão do mundo tecnológico e das práticas experimentais.

1.2 Justificativa

Através do eletromagnetismo o homem pôde desenvolver e aperfeiçoar equipamentos e procedimentos que facilitam a nossa vida e é neste sentido que um

sistema que possibilite a levitação de corpos através da aplicação do eletromagnetismo apresenta um campo vasto de aplicações, como por exemplo, o de transporte através da construção de trens de levitação magnética (maglev) e na construção de mancais magnéticos o que diminui o atrito, aumentando assim o desempenho de motores e máquinas.

Portanto, o eletromagnetismo desempenha um notável papel no cenário das engenharias, em especial a engenharia elétrica, e seu estudo e compreensão é essencial para a formação do profissional que trabalha no setor de tecnologia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à sua importância para a vida do homem contemporâneo, o eletromagnetismo deve ser colocado num patamar especial e análises cuidadosas da sua essência considerada como elemento motivador decisivo para uma investigação científica. Para tanto, é importante compreender algumas propriedades eletromagnéticas da matéria e investir na análise do magnetismo propriamente dito. Mas o que é magnetismo? Intuitivamente sabemos que o magnetismo está intrinsecamente ligado aos ímãs e que existem materiais que são atraídos por um ímã ao passo que outros não são. Portanto, entender a natureza dos ímãs nos ajuda a compreender o magnetismo, sendo assim, é interessante ressaltar que existem basicamente dois tipos de ímãs: o ímã natural e o ímã artificial.

Ímãs naturais são aqueles encontrados na natureza. Apresentando-se na forma de ferro magnético, é composto basicamente de óxido de ferro e é conhecido como magnetita. Já os ímãs artificiais são aqueles obtidos por processos de imantação, a saber, por atrito ou indução magnética. Portanto pode-se dizer que magnetismo é uma propriedade que caracteriza os campos e as substâncias magnéticas.

Torna-se necessário ainda saber que as substâncias quando submetidas a campos magnéticos se comportam de diferentes formas e é neste sentido que podemos classificá-las da seguinte forma:

2.1 Substâncias Diamagnéticas

Substâncias diamagnéticas são aquelas que quando submetidas a um campo magnético externo, apresentam uma tendência de se afastarem da região onde este campo é mais forte, por isto, muitas vezes, diz-se que elas possuem magnetismo negativo. Este fenômeno varia diretamente com a intensidade do campo externo e pode ser explicado pelo movimento orbital dos elétrons que cria um campo magnético oposto ao gerado pelo átomo, porém suas características são independentes da temperatura, por exemplos, podemos citar o cloreto de sódio, Cu, Ag, Zn, Bi e o Au. Em suma, substâncias diamagnéticas são fracamente repelidas por ímãs.

2.2 Substâncias Paramagnéticas

As substâncias paramagnéticas ocorrem geralmente devido a existência de um número ímpar de elétrons nos átomos, pois neste caso haverá um momento

magnético resultante devido ao não emparelhamento dos elétrons, além do mais, quando exposto a um campo magnético externo produzirá um campo resultante devido ao alinhamento dos dipolos atômicos. Neste caso, os momentos atômicos das substâncias paramagnéticas existem independentes da existência de campos externos, porém depende da temperatura e como exemplo, pode-se citar, a madeira, o Pt, Mg, Cr e o Al. Em suma, substâncias paramagnéticas são fracamente atraídas por ímãs.

2.3 Substâncias Ferromagnéticas

As substâncias ferromagnéticas apresentam uma magnetização espontânea mesmo na ausência de um campo magnético e exibem magnetismo permanente a temperaturas suficientemente baixas, devido ao alinhamento dos momentos de dipolos magnéticos. Quando expostos a um campo externo, ficam fortemente imantados na direção do campo impresso, por exemplo, podemos citar o Fe, Co e Ni.

Contudo, pode-se estender nossa análise para compreender a natureza essencial do magnetismo e das substâncias magnéticas, e é neste sentido que se deve considerar que em meio ao fascinante mundo do conhecimento científico o eletromagnetismo é sem duvida uma característica peculiar do cenário tecnológico atual. As equações e ideias da física e da matemática sempre contribuíram para o surgimento de novos caminhos que apoiaram o aperfeiçoamento das engenharias, e é com esta ótica, que estas ciências têm possibilitado a abertura de portas para um futuro com novos caminhos para a construção de um levitador eletromagnético.

A priori, para o entendimento do magnetismo é aceitável que a equação da força entre polos magnéticos é bastante semelhante à equação entre cargas elétricas, bem como, a equação da força gravitacional. Assim como as cargas elétricas, os polos magnéticos podem ser positivos ou negativos. Polos opostos se atraem e polos iguais se repelem. Há de se considerar que os polos magnéticos existem sempre aos pares (dipolos magnéticos) e que ao se cortar um ímã em duas partes, estas se tornarão dois ímãs distintos, cada um com polos norte e sul, portanto não existem monopolos magnéticos. Contudo, no magnetismo pode-se verificar experimentalmente que o campo magnético exerce forças entre cargas em movimento e que a força é proporcional à carga e à velocidade da partícula, sendo a direção da força perpendicular à direção da velocidade e do campo existente e é dada pela seguinte fórmula matemática:

$$\mathbf{F} = Kq\mathbf{v}\times\mathbf{B} \rightarrow F = qvB\text{sen}(\theta) \quad (1)$$

onde \mathbf{F} é o vetor força magnética, K é uma constante positiva (no SI $K=1$), q é a carga, \mathbf{v} é a velocidade da partícula e \mathbf{B} é o vetor densidade de campo magnético conforme é ilustrado na figura 1.

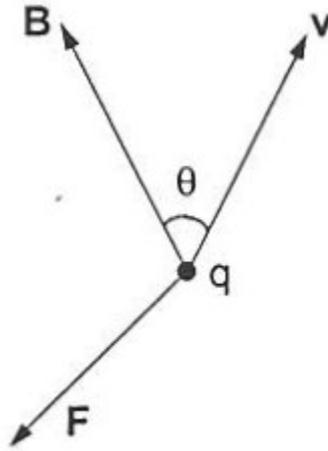


Figura 1: Força magnética sobre uma carga. [1]

2.4 A lei de Biot-Savart

A magnetostática pode ser definida como o conjunto de fenômenos obtidos por uma corrente no regime estacionário. Sendo assim, se um elemento diferencial de corrente elétrica contínua no espaço livre pudesse existir, ele produziria um campo magnético proporcional ao quadrado do inverso da distância, ou seja,

$$\Delta \mathbf{H} \propto \frac{\mathbf{I}}{R^2} \quad (2)$$

, onde \mathbf{H} é o vetor campo magnético ($\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$) e μ_0 é a permeabilidade magnética.

A direção da intensidade de campo magnético está relacionada com a direção da corrente pelo produto vetorial entre a intensidade de comprimento diferencial e o versor na direção da reta que conecta o elemento diferencial ao ponto P na qual o campo é desejado. Expressando de forma matemática pode-se dizer que

$$d\mathbf{H} = \frac{I d\mathbf{L} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} = \frac{I d\mathbf{L} \times \mathbf{R}}{4\pi R^3} \quad (3)$$

onde $d\mathbf{H}$ é a intensidade de campo magnético devido a corrente, $d\mathbf{L}$ é o comprimento do elemento incremental e R é a distância do elemento incremental ao ponto P , conforme é exposto na figura 2.

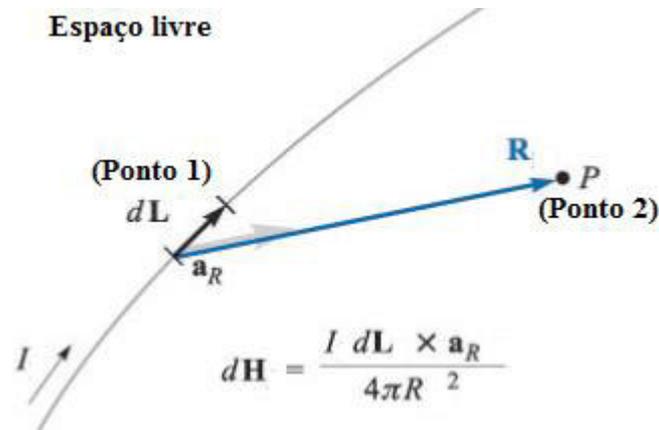


Figura 2: Campo magnético devido a um elemento diferencial de corrente. [3]

Porém, como correntes elétricas não podem existir em um elemento diferencial, todo campo magnético real deve ser encontrado adicionando-se as contribuições devido a cada segmento de corrente, portanto, segundo Hayt, 2008 apenas a forma integral da lei de Biot-Savart pode ser verificada experimentalmente.

$$\mathbf{H} = \oint \frac{I d\mathbf{L} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} \quad (4)$$

2.5 A lei circuital de Ampère

No século XIX o físico dinamarquês H. Oersted percebeu que se colocarmos uma bússola próxima de um fio com a agulha orientada de forma paralela ao fio conduzindo corrente, a agulha da bússola orienta-se na direção do campo magnético produzido pela corrente circulante no fio. Foi nesta perspectiva que Ampère levantou o seguinte questionamento: se um fio que conduz corrente exerce força sobre um ímã, então, será que este exerceria uma força sobre outro condutor de corrente? Tendo em vista que uma corrente elétrica produz um campo magnético e um campo magnético aplica uma força numa carga em movimento, podemos afirmar que correntes elétricas aplicam forças magnéticas entre si.

A intensidade do campo magnético devido ao fluxo de corrente num fio longo e reto é perpendicular ao fio e varia inversamente com a distância do filamento, obtendo como resultado um campo que descreve uma trajetória circular conforme figura 3.

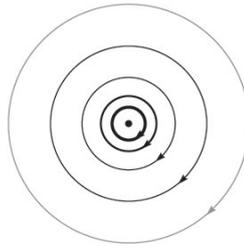


Figura 3: Linhas de força da intensidade de campo magnético em volta de um filamento de fio reto, pelo qual circula uma corrente contínua I , ao plano que contém as circunferências. A direção de I é para dentro da página. [3]

A lei circuital de Ampère pode ser derivada da Lei de Biot-Savart e seu uso requer considerações de simetria do problema, determinando que a integral de linha de \mathbf{H} ao longo de qualquer caminho fechado é igual à corrente contínua envolvida pelo caminho, ou seja,

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I \quad (5)$$

A aplicação da lei circuital de Ampère requer encontrar a corrente envolvida em um caminho fechado e nos diz que se \mathbf{H} possui circulação ao longo de um dado caminho, então uma corrente atravessa esse caminho.

2.6 Campos magnéticos variantes no tempo

As equações que conduzem o eletromagnetismo pode explicar uma grande variedade de fenômenos e constituem a base para o funcionamento de dispositivos eletromagnéticos. Dessa forma, faz-se necessário o estudo dos campos elétricos originados por campos magnéticos variáveis e o dos campos magnéticos originados por campos elétricos variáveis. Segundo Hayt, 2008 o primeiro destes conceitos resulta da pesquisa experimental de Michael Faraday e o segundo dos esforços teóricos de James Clerck Maxwell.

2.6.1 Lei de Indução de Faraday

A lei de indução de Faraday foi descoberta através dos experimentos de Michael Faraday em 1831 na Inglaterra. Ele acreditava que se uma corrente podia produzir campo magnético, então um campo magnético deveria produzir uma corrente. Foi para encontrar a lei quantitativa da indução que Faraday introduziu o conceito de linhas e tubos de força, definindo o que hoje corresponde ao fluxo de campo magnético através de um circuito [1].

Se for levado em consideração uma espira de fio imersa numa densidade de campo \mathbf{B} , o fluxo magnético pode ser considerado como o número de linhas de campo que passam através da superfície da espira e é definido como

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (6)$$

, onde $d\mathbf{A}$ é um elemento infinitesimal de área orientada.

Além do mais, um campo magnético variante no tempo produz uma força eletromotriz (Fem) que, por sua vez, pode estabelecer uma corrente no circuito, isto é, a variação da quantidade de linhas de campo que passam através de uma espira induz uma Fem na mesma e a sua intensidade é igual à taxa com que o fluxo magnético que o atravessa varia com o tempo. Em termos matemáticos, tem-se que,

$$|Fem| = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| \quad (7)$$

Nota-se na equação 7 que se o fluxo aumentar causa um aumento do força eletromotriz, que, por sua vez, produz um campo magnético na mesma direção do campo original, o que fará crescer o fluxo através da área limitada pela bobina aumentando novamente a força eletromotriz, e assim por diante, o que não é um resultado razoável. Para tanto, o sentido e a intensidade de uma corrente induzida numa espira podem ser determinadas utilizando a lei de Lenz.

2.6.2 Lei de Lenz

Segundo Halliday, 2003, Lenz verificou experimentalmente, que o fluxo de campo magnético devido à corrente induzida, opõe-se à variação no fluxo que a causa. Portanto, a equação 7 se torna

$$Fem = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (8)$$

Portanto, a força eletromotriz induzida (e deste modo, a corrente induzida) não se opõe ao campo; opõem-se à variação do fluxo. Assim, temos que a lei de Lenz está diretamente vinculada ao princípio de conservação da energia.

2.6.3 Equações de Maxwell

As quatro equações básicas do eletromagnetismo, também conhecidas como equações de Maxwell levam à predição de ondas eletromagnéticas que se

propagam com a velocidade da luz formando uma robusta base para as teorias modernas do eletromagnetismo.

Assim como Ampère, Faraday, Lenz e tantos outros pesquisadores, Maxwell era fascinado pela eletricidade e magnetismo e foi com esta perspectiva que ele começou a investigar sobre as vibrações nas linhas de forças, pois Faraday afirmara que as cargas elétricas estavam ligadas umas as outras por linhas de forças no espaço, no entanto, esta ideia induzia uma intrigante questão científica, a saber. Será que uma carga vibratória faz vibrar as linhas de forças? Portanto, influenciado com as considerações das vibrações dos raios de Faraday, Maxwell descobriu a velocidade das ondas nas linhas de forças propostas por Faraday.

Sob o ponto de vista matemático de Maxwell as “linhas de Faraday” eram uma expressão ligada ao inverso do quadrado das distâncias, da qual dependiam as forças elétricas e magnéticas. Além do mais, cada uma dependia de uma constante específica, ou seja,

$$K_e = 8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2 \quad (9)$$

$$K_m = 1 \times 10^{-7} \text{ N.s}^2/\text{C}^2 \quad (10)$$

, onde K_e é a constante elétrica e K_m a constante magnética.

É interessante ressaltar que $K_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, sendo ϵ_0 a permissividade do espaço livre.

O valor de ϵ_0 é $\frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F/m}$.

Maxwell acreditava que as constantes elétricas e magnéticas estavam relacionadas, então dividiu a raiz quadrada da constante elétrica pela constante magnética e o resultado foi a velocidade da luz, ou seja,

$$\sqrt{\frac{K_e}{K_m}} = \sqrt{\frac{9 \times 10^{16} \text{ m}^2}{\text{s}^2}} = c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (11)$$

Faraday via a eletricidade em termos mecânicos, como linhas físicas numa estrutura sólida de forças que se radiavam através do espaço, com base nisto, Faraday buscou a base do fenômeno elétrico com noções reais do que acontecia no meio, e este meio, é o campo eletromagnético. Contudo, através desta forma de pensamento, Maxwell determinou que as ondas pudessem se propagar em campos elétricos e magnéticos com a velocidade da luz obedecendo as quatro leis fundamentais da eletricidade e do magnetismo, a saber,

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (12) \quad (\text{Fluxo elétrico através de qualquer superfície fechada- Lei de Gauss da eletricidade}).$$

$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$ (13) (Fluxo magnético através de qualquer superfície fechada. Estabelece que não exista monopolo magnético- Lei de Gauss do magnetismo).

$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \mathbf{I}$ (14) (Circulação do campo magnético ao longo de uma trajetória fechada- Lei de Ampère)

$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ (15) (A circulação do campo elétrico ao longo de uma trajetória fechada é igual a menos a variação do fluxo magnético através da trajetória- Lei de Faraday)

James Clerk Maxwell, depois de analisar os relatórios das pesquisas elétricas de Faraday, procurou formular matematicamente uma teoria de eletricidade e magnetismo (o eletromagnetismo). Maxwell imaginava o próprio espaço como um meio, o “éter”, de tal modo que suas ideias sobre corrente de deslocamento foi uma descoberta teórica fenomenal. Pois, para Maxwell, um campo magnético variável no tempo produz um campo elétrico, ou seja, uma onda magnética deve acompanhar uma onda elétrica e isto significa que sempre ocorre uma circulação do campo magnético nesta trajetória, porém, segundo a lei de Ampère isso só pode acontecer se existir uma corrente através do campo. Contudo, como no vácuo não há matéria, então de acordo com as teorias da época de Maxwell não poderia haver ondas eletromagnéticas no espaço, então por mais fundamentais que fossem as leis físicas da época elas estavam incompletas. Portanto, a tarefa de Maxwell foi examinar as leis existentes, chegando à conclusão de que a razão da variação do fluxo elétrico é igual a corrente que flui num fio, ou seja, a maneira pela qual o fluxo elétrico pode produzir um campo magnético como se fosse uma corrente elétrica é chamada de corrente de deslocamento, podendo ser expressa matematicamente por

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \Phi_E \quad (16)$$

, onde ε_0 a permissividade do espaço livre e Φ_E é o fluxo elétrico.

Assim, o campo magnético pode ser estabelecido tanto por uma corrente de condução I como por uma corrente de deslocamento I_d e, então pode-se escrever a lei circuital de Ampère da seguinte forma.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \mathbf{I} + \int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (17)$$

,onde \mathbf{D} é a densidade de fluxo elétrico, também chamado de deslocamento elétrico.

A equação (17) exprime a dependência do campo magnético da densidade de corrente de deslocamento, ou da velocidade de variação do campo elétrico, ou seja, é a Lei de Ampère generalizada por Maxwell.

Segundo Halliday, 2003 as quatro equações individuais eram conhecidas antes da época de Maxwell, e além da corrente de deslocamento nenhuma nova predição surgiu de nenhuma das equações individuais. Portanto, as equações (12), (13) e (15) são fundamentais e continuam válidas e de acordo com o formalismo matemático de James Clerk Maxwell.

2.7 Indutores

Segundo Geraldo Carvalho, 2011, pode-se definir indutores como um dispositivo constituído de fio magnético esmaltado, enrolado em forma de espiras, em volta de um núcleo.

Quando uma corrente é estabelecida na bobina, surge um campo magnético em cada espira e a contribuição de todas as espiras cria campos que se associam formando assim o campo magnético total da bobina. Para um indutor com N espiras a força magnetomotriz é dada por

$$F_{mm} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (18)$$

, onde Φ é interpretado como o fluxo que passa por qualquer uma das N espiras. A figura 4 sugere a forma da distribuição de linhas de campo magnético na porção de uma bobina.

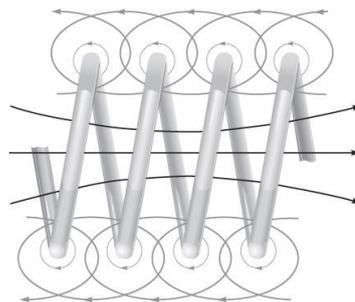


Figura 4. Distribuição de linhas de campo magnético na porção de uma bobina. [3]

Assumindo que o fluxo Φ envolve cada uma das N espiras o qual é produzido por uma corrente I . O enlace de fluxo $N\Phi$ é igual ao fluxo total. Assim, pode-se definir indutância (indutância própria) como a razão entre o enlace total de fluxo e a corrente envolvida, ou seja,

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (19)$$

A equação (19) é aplicável apenas a meios magnéticos lineares, de forma que o fluxo seja proporcional a corrente.

3 APLICAÇÕES

Os fenômenos da levitação eletromagnética têm revelado um caráter inovador no sentido de revolucionar diversos setores da sociedade em especial o de transporte através da construção de trens de levitação magnética (MAGLEV), como pode ser observado nas figuras 5 (a) e (b). Com a utilização das tecnologias atuais torna-se cada vez mais viável o emprego do MAGLEV como meio de transporte, em especial, nas grandes metrópoles onde o fluxo de pessoas tem aumentado significativamente e a necessidade por tecnologias alternativas que sejam ecologicamente corretas se mostram cada vez mais presentes.



(a)



(b)

Figura 5: (a) e (b) Um trem deslocando-se acima dos trilhos [7].

Além do mais, a engenharia encontra situações em que é necessário reduzir ou eliminar vibrações decorrentes do atrito entre componentes mecânicos, para tanto, a construção de mancais magnéticos se torna uma saída eficiente. Segundo Rômulo Lira Milhomem, 2010 o uso desta tecnologia visa à levitação do eixo de máquinas rotativas com a finalidade de atenuar vibrações e diminuir as perdas por atrito mecânico, na intenção de aumentar a eficiência da máquina. Esta é uma das aplicações mais promissoras da levitação magnética, a qual permite que motores operem em altas velocidades sem que haja atrito ou desgaste dos eixos. Além do mais, os mancais magnéticos encontram sua aplicação em diferentes áreas da ciência, a saber:

Indústria: motores de alta velocidade ou de difícil manutenção de mancais mecânicos;

Bioengenharia: bombas de sangue e corações artificiais;

Aeroespacial: Giroscópio de satélites artificiais;

Nuclear: Ultracentrífuga de enriquecimento de urânio.

4 METODOLOGIA

Neste trabalho apresentam dispostos alguns aspectos relevantes para a construção de uma bancada de levitação eletromagnética, onde as equações de Maxwell e as teorias de Gauss e Faraday são alicerces fundamentais para o entendimento e manipulação dos processos que norteiam a sua construção, seguidos de uma explanação de como se obter a levitação de um corpo, e posterior aplicação envolvendo o fenômeno da levitação.

4.1 Construção da bancada para levitação eletromagnética

Com o objetivo de corroborar os cálculos expostos até aqui, decidiu-se pela construção de uma bancada que seja de fácil montagem, formada de produtos de baixo custo e ecologicamente corretos, de forma que permita o entendimento dos parâmetros matemáticos abordados na teoria, relacionando-os com a prática.

Assim, chegamos a um protótipo que consiste essencialmente em um eletroímã e um circuito de acionamento, com a finalidade de compensar a força peso de um corpo de massa m , através de uma força, gerada da circulação de uma corrente elétrica na bobina do eletroímã.

4.1.1 Construção do eletroímã

Decidiu-se na construção de um eletroímã, formado por um núcleo de material ferromagnético envolto por uma bobina, que tem a função de gerar o campo magnético responsável pela força de repulsão que age entre a bobina e o objeto a ser levitado. Além do mais, a intensidade da força será determinada pela corrente que circula nos enrolamentos da bobina. Assim, na construção do eletroímã buscou-se uma configuração que permita a substituição do núcleo no interior da bobina, então foi utilizada uma estrutura feita com um pedaço de PVC no qual se pode enrolar o condutor, conforme figuras 6 e 7.

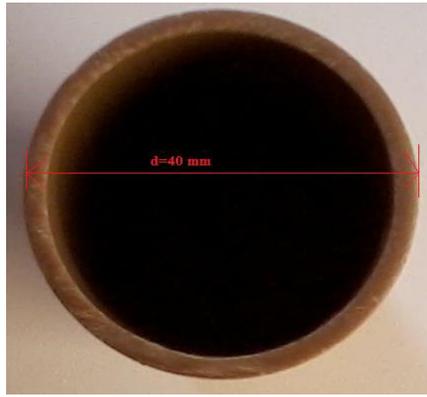


Figura 6: Diâmetro do tubo de PVC. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

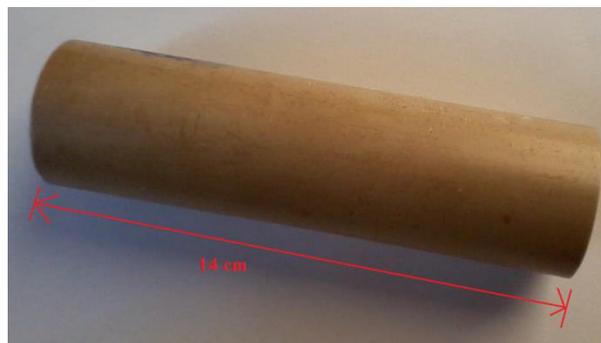


Figura 7: Comprimento do tubo de PVC. Fonte: Dados de pesquisa 2013.

Os componentes do sistema foram escolhidos de forma a ter um baixo custo, sendo assim, viu-se necessário a utilização de 2 caps de PVC para conter o enrolamento da bobina, com a finalidade que este fique ajustado e as camadas de enrolamento sobrepostas com melhor precisão, conforme pode ser visto na figura 8.



Figura 8: Caps de PVC. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Para compor o núcleo, achou-se conveniente a utilização de lâminas de ferro doce, com o objetivo de reduzir o efeito das correntes de Foucault (correntes parasitas), evitando assim, que o material do núcleo se aquecesse excessivamente. A figura 9 mostra as lâminas utilizadas para compor o núcleo.



Figura 9: Lâminas de ferro doce. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Com base nos materiais existentes, montou-se a estrutura do eletroímã composto pelo núcleo de ferro doce rigidamente confinado dentro do tubo de PVC, justapostos com os dois caps e envolto por fios de cobre esmaltado com espessura de 1,290 mm que pode ser visualizada na figura 10. Assim, as estruturas de enrolamento da bobina apresentam-se dispostas em 8 camadas, sendo que cada camada apresenta 70 voltas, totalizando 560 voltas espirais. Para maiores informações, pode-se visualizar a tabela 1 que mostra algumas medidas da bobina.

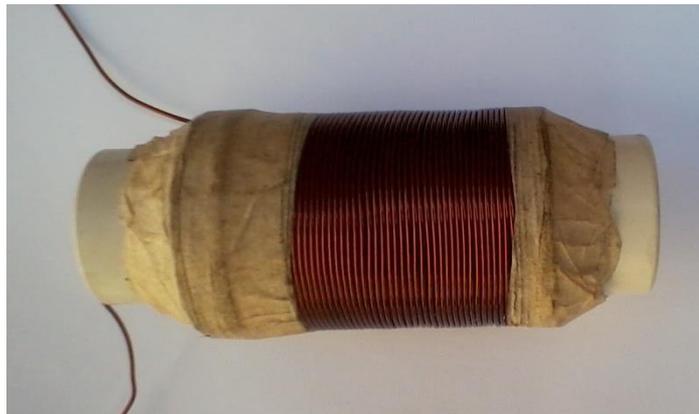


Figura 10: Bobina depois de finalizada sua construção: Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Tabela 1: Dados e medidas da bobina

Diâmetro do fio (mm)	1,290
Nº de espiras	560
Área da seção transversal (m²)	0,00148617
Raio da seção transversal (cm)	2,175

Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Achou-se conveniente utilizar como objeto a ser levantado um ímã em forma de anel conforme figura 11 com massa 0,0041kg, o qual flutuaria seguindo um guia de 20,5

cm de comprimento anexado na parte superior da bobina que pode ser visualizado na figuras12.



Figura 11: Imã utilizado como objeto a ser levantado. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.



(a)



(b)

Figura 12: (a) bobina com guia. (b) bobina com guia e imã usado para levitação.

4.1.2 Circuito de acionamento

O circuito de acionamento consiste em uma fonte de alimentação dupla, modelo HK3003D conforme figura 13. Utilizou-se ligação em paralelo de tal forma que a corrente total fosse a somatória da corrente fornecida por cada uma das fontes.



Figura 13: Fonte de energização do circuito. Fonte: [9].

4.1.3 Modelagem matemática do sistema

Como o sistema se encontra na superfície terrestre e é influenciado pela força gravitacional terrestre é importante ressaltar que uma das forças atuantes no corpo é a força peso $\mathbf{P} = m\mathbf{g}$; onde m é a massa do objeto e \mathbf{g} é a aceleração gravitacional. A outra força é a força de repulsão magnética \mathbf{F} , oriunda do campo magnético do eletroímã, devido a passagem de corrente elétrica no enrolamento da bobina. Admitindo ainda que a força peso seja positiva na direção vertical e orientada para baixo, pode-se aplicar a segunda lei de Newton ao sistema descrito pelo diagrama de forças ilustrado na figura 14, para obter a equação da força resultante descrita pela seguinte expressão matemática:

$$\mathbf{P} - \mathbf{F} = m \frac{d^2y}{dy^2} \hat{\mathbf{a}}_y \quad (20)$$

Portanto, notamos que a força depende da distância do objeto à bobina, contudo, para o estado de equilíbrio analisado neste trabalho a equação (20) é expressa por:

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} = m\mathbf{g} \quad (21)$$

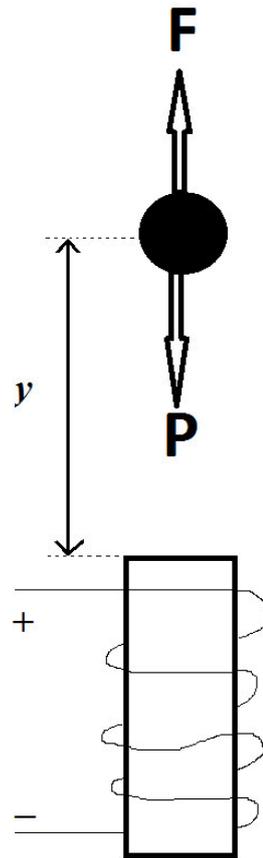


Figura 14: Esquema do dispositivo em funcionamento. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Desprezando a relutância do núcleo e a dispersão do campo magnético nas bordas da bobina, pode-se considerar o sistema como linear e assim calcular a força de levitação magnética que pode ser visualizada na equação (22). Para tanto, temos que

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (22)$$

, onde F é a força magnética, B é o valor da densidade de campo magnética e μ_0 a permeabilidade magnética do ar. Como $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ e

$$Hy = NI = \frac{B}{\mu_0} y \quad (23)$$

então, podemos fazer,

$$B = \frac{NI\mu_0}{y} \quad (24)$$

O que implica, substituindo (24) em (22), que:

$$\mathbf{F} = \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{NI}{y} \right)^2 \quad (25)$$

Logo, notamos que a força magnética depende da corrente e da distância do objeto levantado à bobina. Isto significa que para um determinado valor de corrente a bobina exerce uma força que fará o objeto levitar uma altura y . Pode-se também determinar uma equação em que a posição dependa da corrente, basta reconhecer que $F = mg$, dessa forma,

$$\frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{NI}{y} \right)^2 = mg \rightarrow y = \sqrt{\frac{\mu_0 A (NI)^2}{2mg}} \quad (26)$$

, ou seja, $y \propto I$.

Portanto, para um corpo de massa m , basta variar a corrente elétrica que teremos uma variação correspondente na altura y . Dessa forma, para os dados especificados na tabela 1 e considerando um corpo de massa 0,0041 kg podem-se calcular possíveis valores de corrente necessárias para manter o objeto flutuando a uma determinada altura y , conforme se pode visualizar na *tabela 2*.

Tabela 2: Valores teóricos de altura em função da corrente

Altura y (m)	Corrente (A)
0	0,0
0,043	0,5
0,085	1,0
0,128	1,5
0,171	2,0
0,213	2,5
0,256	3,0
0,299	3,5
0,341	4,0
0,384	4,5
0,427	5,0
0,469	5,5
0,512	6,0

Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Para uma melhor visualização da dependência da corrente em função da distância pode-se visualizar o gráfico da equação (26), ilustrado na figura 15, correspondente aos dados da tabela 2, tomando para $m = 0,0041\text{kg}$ e $g = 9,81\text{m/s}^2$.

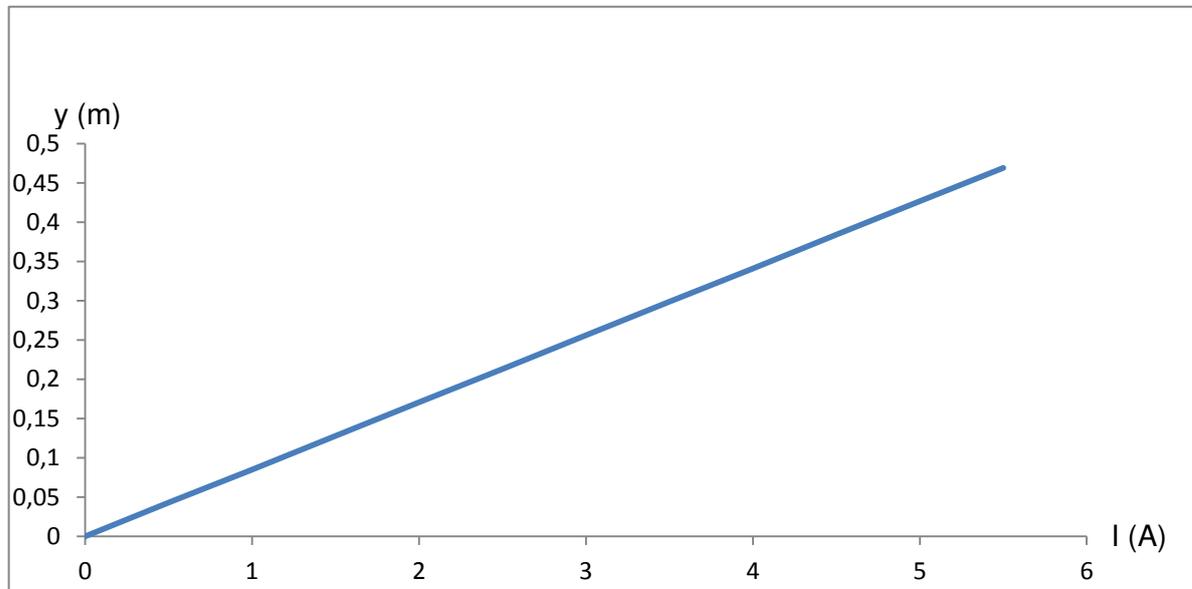


Figura 15: Relação entre altura de levitação e corrente na bobina. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

5 RESULTADOS

Com o intuito de corroborar com os resultados teóricos, alimentamos o experimento com os mesmos valores de correntes dc expressos na tabela 2, para então verificar a correspondência entre corrente e altura, que podem ser visualizados na tabela 3.

Tabela 3: Valores práticos de altura em função da corrente

Altura y (m)	Corrente (A)
0	0,0
0	0,5
0,006	1,0
0,008	1,5
0,014	2,0
0,016	2,5
0,019	3,0
0,023	3,5
0,025	4,0
0,028	4,5
0,030	5,0
0,032	5,5
0,035	6,0

Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Para um melhor entendimento dos resultados obtidos a partir dos valores práticos, pode-se visualizar o gráfico extraído da tabela 3, ilustrado na figura 16, onde se pode verificar uma aproximação da relação entre corrente e altura.

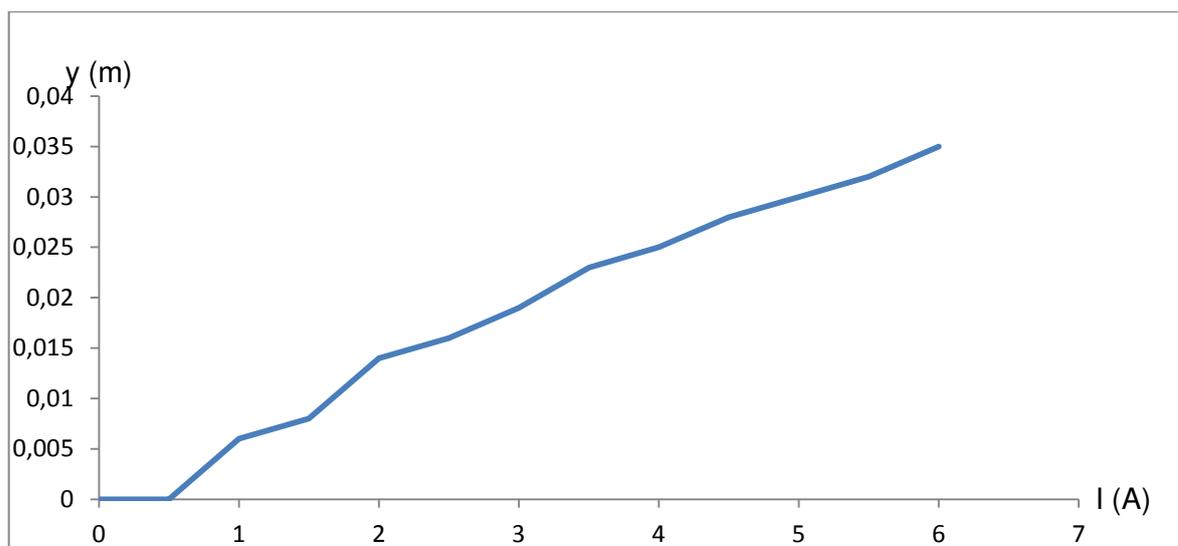


Figura 16: Aproximação da relação entre corrente e altura de levitação. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

Comparando os dados das figuras 15 e 16 pode-se verificar que o gráfico obtido a partir da tabela 3 não condiz com os resultados teóricos, contudo, nota-se que a relação apresenta-se de forma não linear. Essa diferença no comportamento gráfico se deve principalmente a existência da resistência de atrito entre o objeto flutuante e o guia, além do fato de termos desconsiderado a relutância e as perdas devido ao fluxo de dispersão. Além do mais, pode-se afirmar através da figura 17 que o experimento foi realizado 2 cm acima das linhas de fluxo magnético, pois devido aos aspectos construtivos a menor distância prática que o objeto levitado pode alcançar corresponde na realidade a uma distância de 2 cm, portanto, este fato explica a existência de uma altura zero para uma corrente de 0,5 A o que comprova que os aspectos construtivos influenciam na obtenção dos dados referidos na tabela 3.

A seguir é mostrada uma imagem do eletroímã em funcionamento quando aplicado uma corrente de 6A.

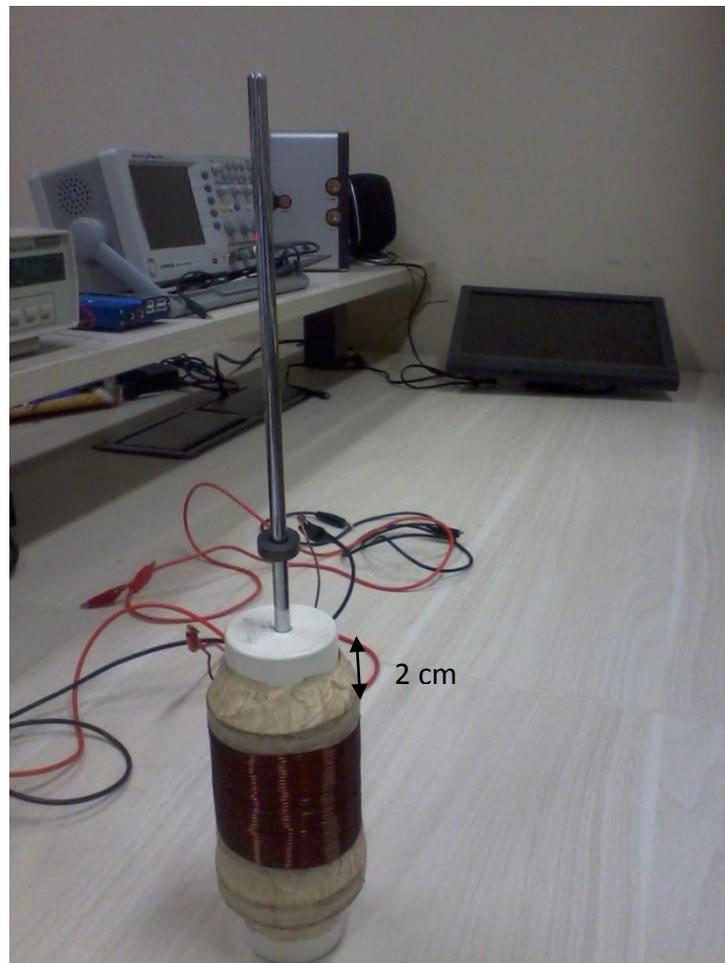


Figura 17: Eletroímã em funcionamento. Fonte: Dados de pesquisa, 2013.

6 CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados neste trabalho, foi possível alcançar a compreensão do funcionamento de sistemas compostos por circuitos magnéticos, além de possibilitar a análise de estratégias que norteiam a dimensão do magnetismo e sua aplicabilidade, servindo como base para sistemas mais complexos de levitação magnética, tais como, o estudo de mancais magnéticos e controle de levitação em sistemas não lineares.

Além do mais, o presente estudo, serve como base para estudos posteriores em que podem ser considerados os efeitos da relutância, dispersão magnética, bem como, atrito e variação de temperatura na obtenção de variáveis como altura de levitação e densidade de campo magnético por área.

7 BIBLIOGRAFIAS

- [1] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física basca.1** ed. São Paulo:lucher,1997. vol.3.
- [2] PURCELL, Edward Mills. **Eletricidade e Magnetismo**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. vol. 2.
- [3] HAYT, William Hart; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2008.574p.
- [4] NASCIMENTO JUNIOR, Geraldo Carvalho do. **Máquinas elétricas: teoria e ensaios**. 4 ed. São Paulo: Érica, 2011.
- [5] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física 3.5**.ed Rio de Janeiro: LTC, 2003.377p.
- [6] Raphael Barros Teixeira. *Desenvolvimento de um Protótipo de Levitação Magnética para ensino e pesquisa: Sistema de Levitação-MAGLEV*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2006.
- [7]<http://www.google.com.br/search?q=fotos+de+trem+maglev&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=PpmRUfXiK9Sw0QGCv4C4Cw&ved=0CCsQsAQ&biw=1366&bih=643>.Website, extraído em 13 de maio de 2013.
- [8]<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA6VgAB/construcao-bancada-didatica-processo-levitacao-magnetica-maglev#> .Website, extraído em 13 de maio de 2013.
- [9]https://www.google.com.br/search?q=fonte+HK3003D&rlz=1C1SAVU_enBR552BR552&espv=210&es sm=122&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=dOVcUsDoLtKIkQek_4HICw&ved=0CEQQsAQ&biw=1366&bih=653. Website, extraído em 15 de outubro de 2013.