

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

UNICAMP



UNICAMP

Instrumentação para Ensino de Física F 609

Experimento em Ferrofluido com campo magnético induzido por corrente variável.

Coordenador da disciplina: José Joaquín Lunazzi

Orientador do projeto: Adelino Aguiar Coelho

Aluno: Luis Felipe Affonso Pini RA 024428

Resumo

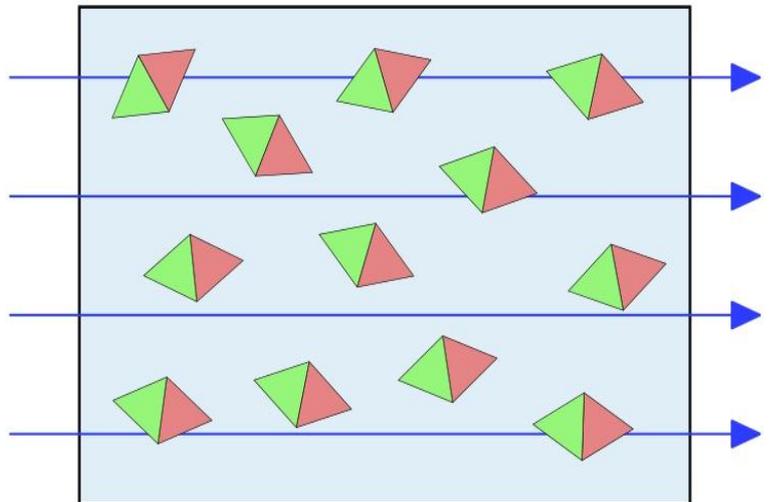
Esse trabalho visa à introdução do conceito de *eletromagnetismo* e linhas de *campo magnético* a alunos do segundo grau, com base nos efeitos encontrados no *ferrofluido*, um líquido que sofre grande influência dos campos magnéticos. Em adição, serão incluídos um ou mais procedimentos para a fabricação do ferrofluido e de bobinas com materiais de fácil acesso aos alunos.

Descrição

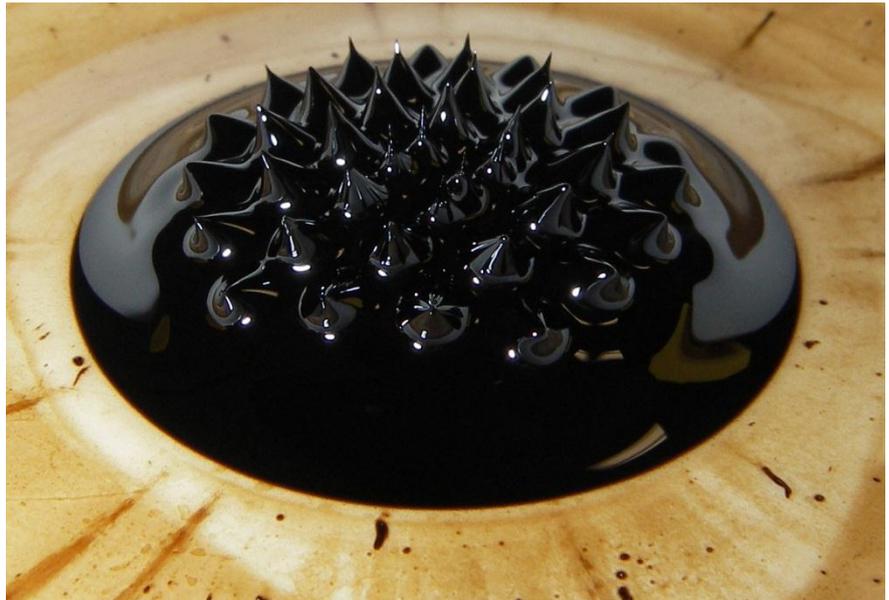
Em física, o eletromagnetismo é o nome da teoria unificada desenvolvida por James Clerk Maxwell para explicar a relação entre a eletricidade e o magnetismo. Esta teoria baseia-se no conceito de *campo eletromagnético*.

A variação do fluxo magnético resulta em um campo elétrico (fenômeno conhecido por indução eletromagnética, mecanismo utilizado em geradores elétricos, motores e transformadores de tensão). Semelhantemente, a variação de um campo elétrico gera um campo magnético (mecanismo utilizado em bobinas e indutores). Devido a essa interdependência entre campo elétrico e campo magnético, faz sentido falar em uma única entidade chamada campo eletromagnético.

Materiais chamados *Ferromagnéticos* são as substâncias que apresentam características bem diferentes das características dos materiais paramagnéticos e diamagnéticos. Esses materiais se imantam fortemente se colocados na presença de um campo magnético. É possível verificar, experimentalmente, que a presença de um material ferromagnético altera fortemente o valor da intensidade do campo magnético. São substâncias ferromagnéticas somente o ferro, o cobalto, o níquel, algumas terras-raras e as ligas que são formadas por essas substâncias. Os materiais ferromagnéticos são muito utilizados quando se deseja obter campos magnéticos de altas intensidades.



Os *ferrofluidos* se originaram na década de 1960, em tentativas da agência americana NASA de criar combustíveis que pudessem ser controlados na ausência de gravidade. A solução encontrada foi moer partículas magnéticas e dispersá-las no combustível, de modo que ele pudesse ser direcionado por meio da aplicação de um campo magnético. Desde então,

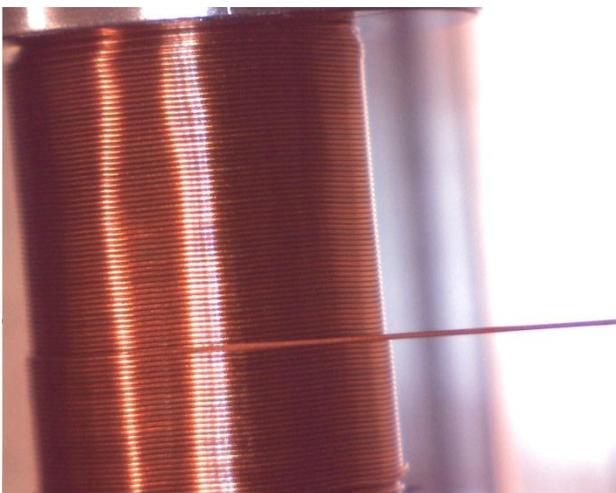


as técnicas de síntese se aperfeiçoaram, e hoje se produz fluidos magnéticos das mais diferentes características, usados em diversas aplicações tecnológicas e biomédicas.

O ferrofluido pode ser manipulado por qualquer tipo de campo magnético, sofrendo alterações na sua forma, o que é interessante do ponto de vista científico e didaticamente bem envolvente.

Objetivo

Introduzir os conceitos do eletromagnetismo, ilustrando o experimento com o ferrofluido, que além de prender a atenção dos ouvintes com notórios efeitos visuais mostra diretamente o sentido das linhas de campo, conceito fundamental no eletromagnetismo.



Experimento

O experimento consiste em três fases distintas. A fabricação do ferrofluido, o enrolamento de uma ou mais bobinas e a montagem das bobinas em uma bancada onde serão realizados os ensaios com o ferrofluido. O layout final da montagem ainda não foi decidido, pois ainda serão testados diversos arranjos das bobinas de modo a conseguir o melhor efeito possível. As três etapas distintas do projeto são mais detalhas a seguir:

Bobinas (Eletroímãs)

As bobinas serão enroladas em um dispositivo próprio, utilizando um material ferromagnético como eixo de modo a potencializar o campo gerado pela corrente elétrica. Será utilizado um fino fio de cobre esmaltado e cada bobina irá conter aproximadamente duas mil voltas. Serão alimentadas com uma fonte de tensão variável, que dependendo da resistência elétrica de cada bobina irá fornecer uma dada (e conhecida) corrente atravessando os fios, e isso induzirá um campo magnético orientado no eixo da bobina.

Ferrofluido

Existem diversas receitas para a obtenção de ferrofluido, inicialmente será testada a receita caseira utilizando *toner* de impressora e óleo de cozinha. Caso esta não apresente bons resultados, será utilizada a primeira receita da patente USA 3843540 [1], envolvendo a mistura de reagentes como *FerricChloridee FerrousChloride*, água destilada, hidróxido de amônia e querosene inodoro ou a receita apresentada no site da Universidade de Wisconsin ref [2].

Layout do Experimento

Diversos Layouts ainda estão em discussão, sendo **necessária** a obtenção do ferrofluido e análise do campo gerado pelas bobinas para a decisão final de como será o layout do experimento.

Originalidade

O experimento com ferrofluido não é original. Já foi realizado anteriormente no instituto, mas este utilizava apenas ímãs permanentes. A proposta desse trabalho é fabricar eletroímãs e utilizando fontes de tensão induzir correntes variáveis nos eletroímãs de maneira a criar os mais diversos arranjos de campos magnéticos induzidos.

Orientador e Sigilo

Meu orientador, o Professor Adelino Aguiar Coelho concorda com os termos aqui estabelecidos para o projeto e declara que poderá dispor de certo tempo e de todos os elementos necessários para a realização do projeto.

NÃO será necessário o sigilo do projeto, sendo esse **LIVRE** para ser reproduzido em quaisquer instituições de ensino de qualquer espécie.

Referências

[1] – Patente USA 3843540 – Production of magnetic fluids by peptization techniques.

[2] - <http://www.mrsec.wisc.edu/Edetc/nanolab/ffexp/>

- Projeto de Instrumentação para Ensino do aluno Rodrigo Ybarra de Oliveira Ribeiro - Demonstrações e estudos com Fluido Magnetico (2010)
link:http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2010/Rodrigoy-adelino_RP.pdf

- Projeto de Instrumentação para Ensino da aluna Rebecca Sophia Lima Happ – Ferrofluido (2010)
link:http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F609_2010_sem2/RebeccaS-Happ_RF2.pdf

- GRIFFITHS, David. IntroductiontoElectrodynamics 3ª Ed.

- www.pt.wikipedia.com

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrofluid>

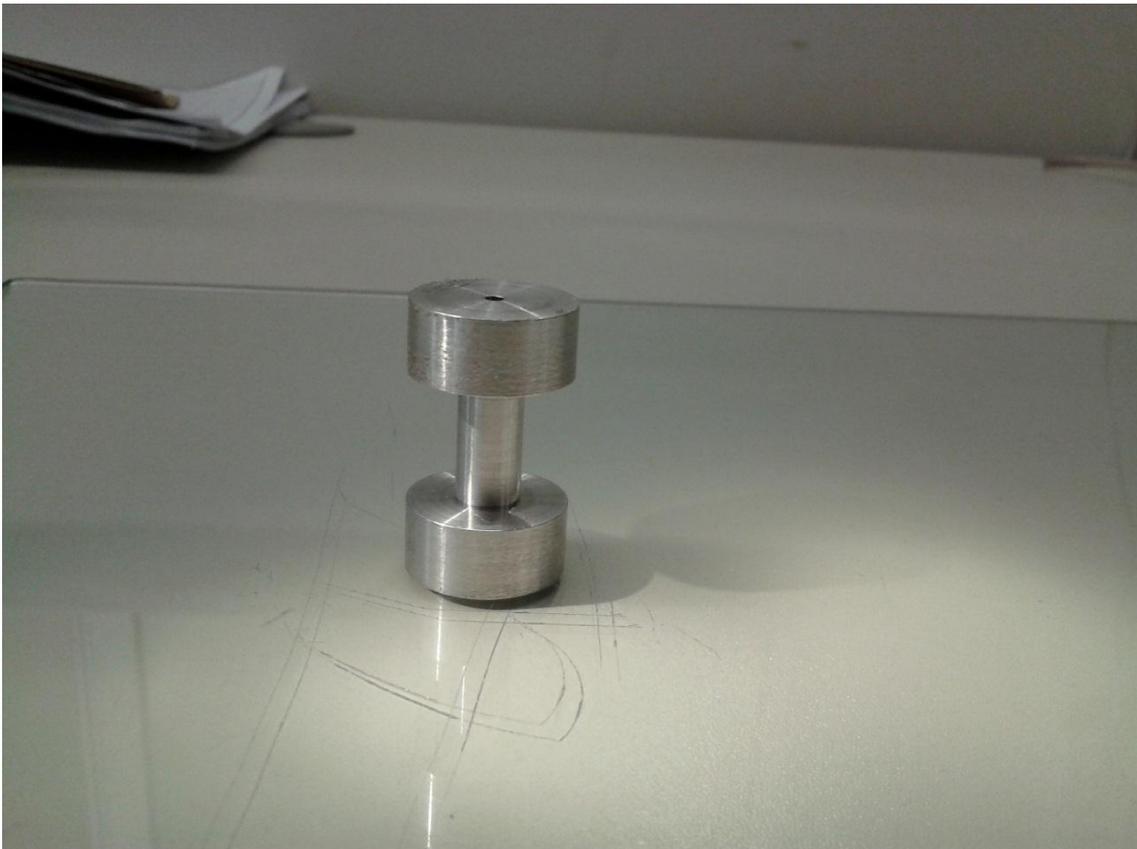
- **Todas as imagens** utilizadas no projeto são (e serão) originadas de *acervo público ou pessoal*, não infringindo qualquer copyright ou direito à imagem.

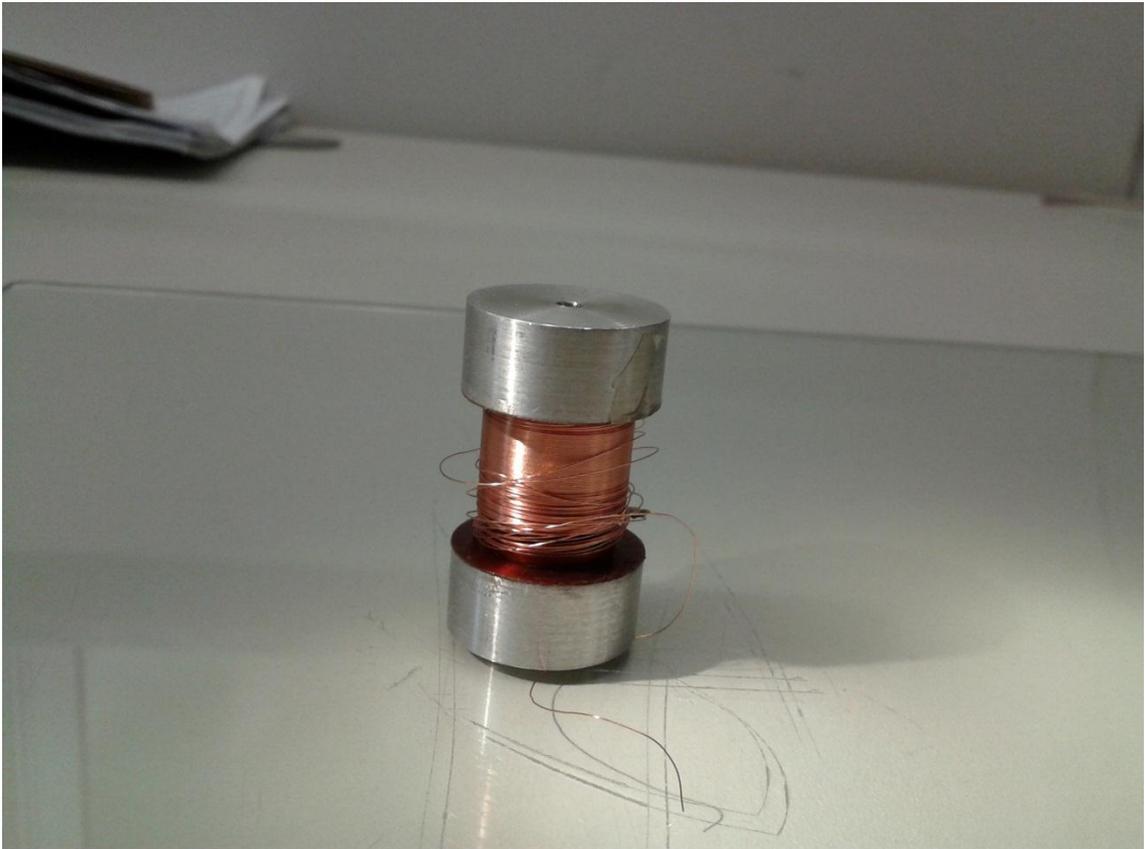
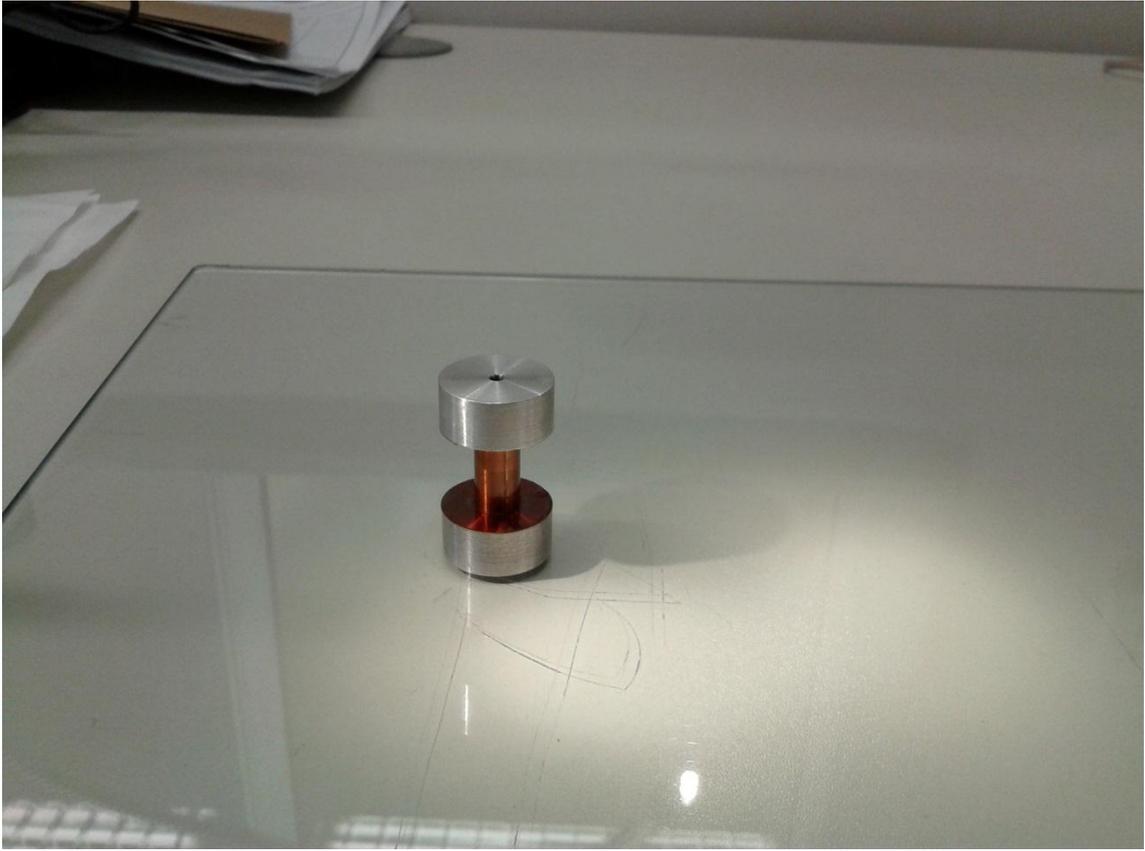
Resultados atingidos e o que falta fazer

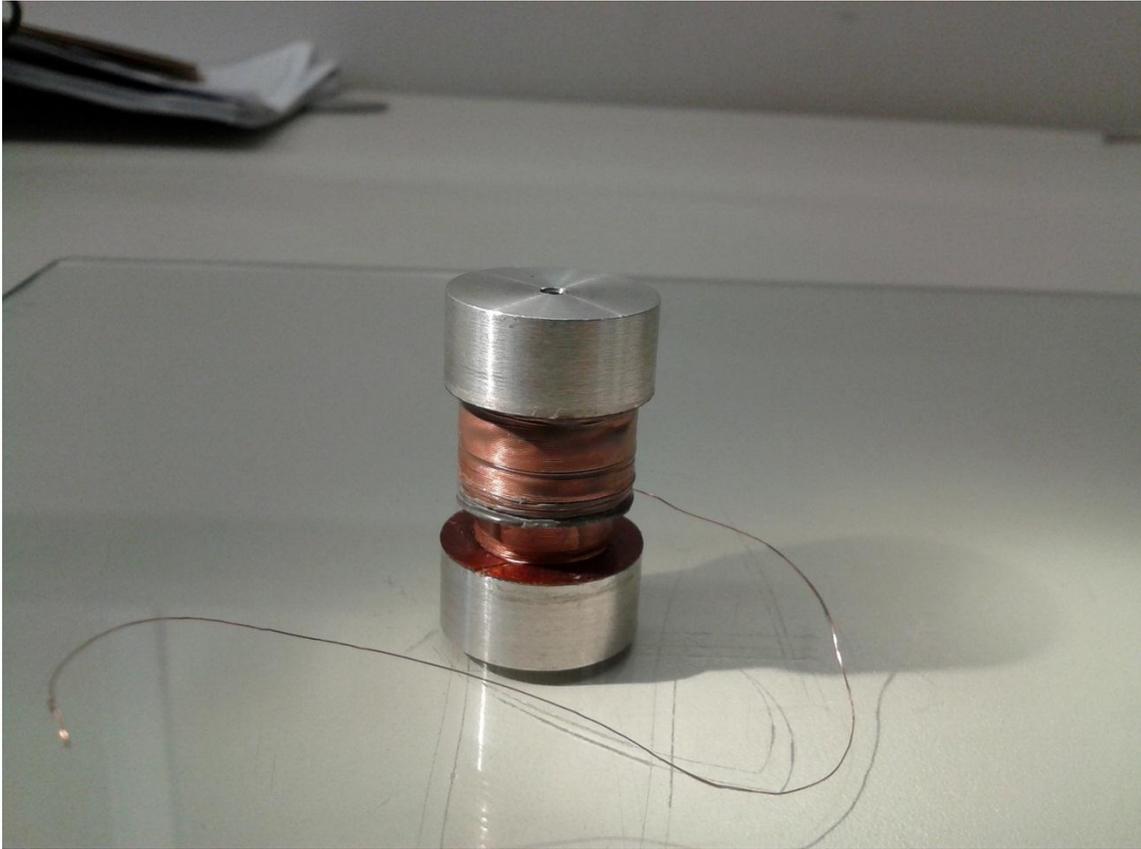
O projeto se encontra no estágio de construção e testes das bobinas. Alguns enrolamentos diferentes estão sendo testados pois devo chegar a um valor ideal para a modulação do ferrofluido. Com o ferrofluido produzido e as bobinas devidamente ajustadas restará solucionar o problema proposto pelo coordenador de melhorar a visualização do ferrofluido se filmado em vídeo e projetado em telão. Uma das propostas é testar diferentes formas de iluminação a fim de proporcionar uma experiência visual mais interessante.

Fotos do projeto em seu estado atual

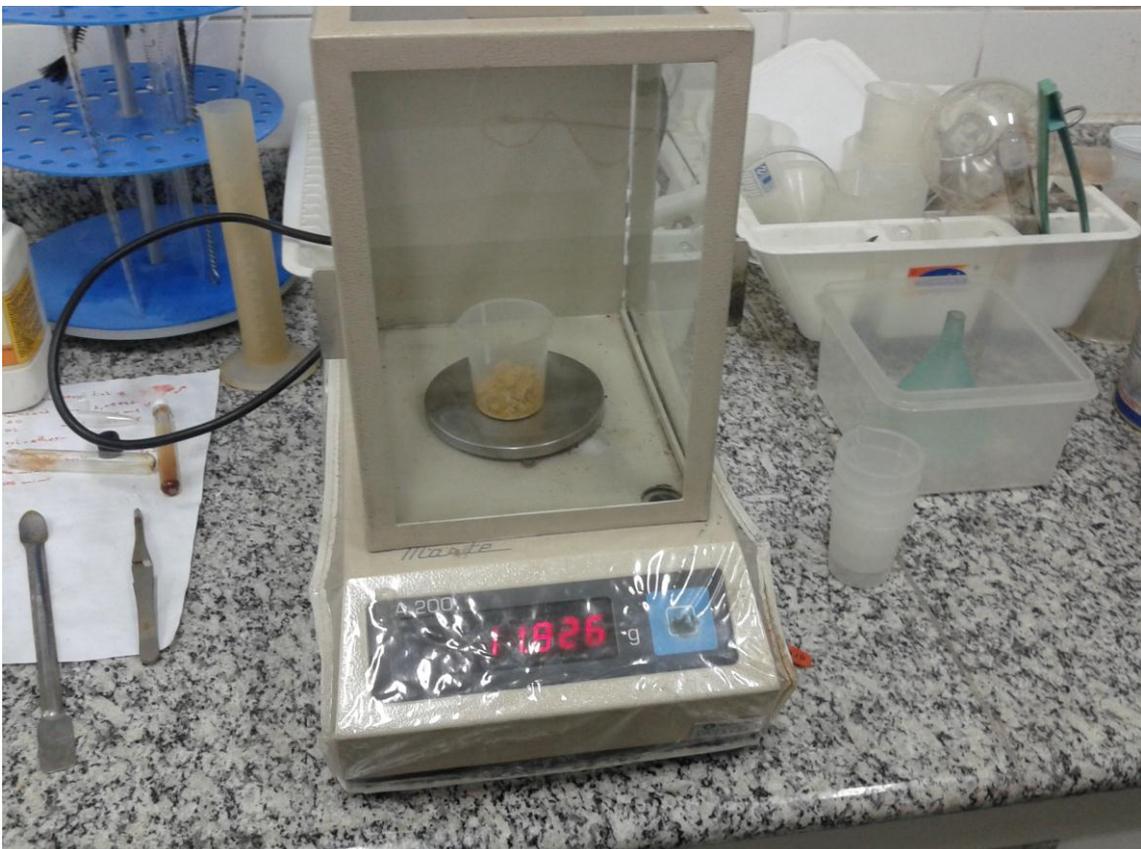
Seguem abaixo algumas fotos das bobinas testadas e dos carretéis.







ATENÇÃO essas bobinas não apresentaram campo magnético forte o suficiente para alterar a forma do ferrofluido significativamente e está sendo proposto outro modelo de bobinas.





Dificuldades Encontradas

Estabelecer o campo magnético necessário e a geometria das bobinas de modo a proporcionar uma experiência visual interessante no ferrofluido. **Tornar o ferrofluido iluminado e de melhor exposição via dispositivo de vídeo.**

Pesquisa

A receita do ferrofluido foi extraída do experimento publicado anteriormente pela aluna Rebecca Sophia Lima Happ:

http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F609_2010_sem2/RebeccaS-Happ_RF2.pdf

A receita utilizada foi baseada na patente USA 3843540 (ver final do documento).

Outras receitas : <http://www.popsci.com/diy/article/2009-09/making-ferrofluids-work-you>

A receita envolvendo Tonner de impressora, óleo vegetal e querosene foi realizadas mas não teve a eficiência do ferrofluido fabricado com a ajuda do professor Adelino e do Técnico Sérgio no laboratório do IFGW.

Aplicações e outras referências:

:<http://www.ferrotec.com/products/ferrofluid/otherApplications/>

Calcúlos dos campos produzidos por um solenóide foram feitos baseados no livro Introduction to Eledrodynamics - David J. Griffiths - Capítulo 5 e no PDF PROJETO FÍSICO DE TRANSFORMADORES E INDUTORES da UFSC em anexo no fim do documento.

Descrição em três níveis

Básico

Esse experimento consiste na elaboração do Ferrofluido, um líquido que tem propriedades magnéticas, ou seja, é afetado por campos magnéticos. Serão utilizados como geradores de campos magnéticos as bobinas, dispositivos que quando são submetidos a uma tensão geram campos magnéticos conhecidos. Com o líquido e as bobinas em mãos será feita uma montagem que possibilite o ferrofluido ser afetado pelos campos gerados nas bobinas, produzindo um efeito visual interessante.

Ensino Médio

Esse experimento consiste na elaboração do Ferrofluido, um líquido que tem pequenas partículas ferromagnéticas dissolvidas na solução e ligadas por um óleo viscoso. Tais partículas são afetadas por campos magnéticos, que quando aplicados ao líquido dão forma das linhas de campo. Os campos magnéticos serão gerados em bobinas com um enrolamento tal que quando forem submetidas a uma tensão variável podem produzir diversas intensidades de campos magnéticos. Com o líquido e as bobinas em mãos será feita uma montagem de tal

modo que possibilite o ferrofluido ser afetado pelas linhas de campo magnético produzidas pelas bobinas, mostrando assim o sentido de tais linhas e produzindo um efeito visual interessante.

Graduação em Física

Esse experimento consiste na elaboração do Ferrofluido e na observação de seu comportamento sob a ação de campos magnéticos induzidos.

Ferrofluidos são suspensões coloidais de nanopartículas magnéticas. Eles respondem a campos magnéticos externos fazendo com que regiões dessas soluções sejam controladas pela aplicação de um campo magnético. Nanopartículas de óxido férrico (magnetita, Fe_3O_4) podem ser produzidas misturando íons Fe(II) e Fe(III) em meio básico. É necessário um surfactante para que as partículas permaneçam finamente divididas e separadas umas das outras, mantendo um equilíbrio coloidal.

Em 1820, um professor e físico dinamarquês chamado Hans Christian Oersted observou que uma corrente elétrica era capaz de alterar a direção de uma agulha magnética de uma bússola. Quando havia corrente elétrica no fio, Oersted verificou que a agulha magnética se movia, orientando-se numa direção perpendicular ao fio, evidenciando a presença de um campo magnético produzido pela corrente. Este campo originava uma força magnética capaz de mudar a orientação da bússola. Este campo magnético de origem elétrica é chamado de campo eletromagnético. Interrompendo-se a corrente, a agulha retornava a sua posição inicial, ao longo da direção norte-sul. Oersted chegou a seguinte conclusão : Todo condutor percorrido por corrente elétrica, cria em torno de si um campo eletromagnético. Em decorrência dessas descobertas, foi possível estabelecer o princípio básico de todos os fenômenos magnéticos: Quando cargas elétricas estão em movimento manifesta-se entre elas uma força magnética além da força elétrica (ou força eletrostática).

AINDA SERÃO APRESENTADOS OS CÁLCULOS DAS NOVAS BOBINAS POIS AS ANTERIORES NÃO PRODUZIRAM O CAMPO MAGNÉTICO NECESSÁRIO.

Declaração do orientador

Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião: (COLOCAR A OPINIÃO, QUE PODE SER BREVE OU EXTENSA).”

Horário

Esse experimento será apresentado (com a aprovação do coordenador) na terça-feira dia 13 de novembro das 16 às 18 horas.

added to the reaction mix with continued agitation. The reaction mix within vessel 40 is further heated by any convenient means (not shown) until the temperature of the mix is above, and preferably at least 10° C. above, the decomposition temperature of the ammonium salt of the dispersing agent.

The reaction mix, now comprising a colloidal suspension of magnetite in solvent and ammonium salt in water, is passed via conduit 47 to distillation means 48. There, the excess ammonia and water is removed as overhead stream 49. A magnetic fluid product stream 50 is also recovered from the distillation means 48 leaving a solid residual salt fraction 51. It is to be noted that this embodiment of our process requires the solvent used to have a higher boiling point than water. Solvents such as kerosene are appropriate for use in this embodiment. Alternatively, a magnetic decanter such as was illustrated in FIG. 3, may be used to separate magnetic fluid from the water phase in place of distillation means 48.

FIG. 5 illustrates an embodiment of our process which we generally consider to be the most versatile since any compatible solvent may be used as a base for the magnetic fluid. There is provided a reaction vessel 60 with agitation means 61 into which is introduced an aqueous solution of iron salt. These iron salts preferably comprise a ferrous salt 62 and a ferric salt 63 in a ratio approximating that of magnetite. A stream of ammonium hydroxide 64, preferably in concentrated form, is added to the mixed ferrous-ferric salt solution with agitation to precipitate iron oxides and hydroxides. Ammonium hydroxide is added in excess of that required for the precipitation.

The suspension of colloidal size iron oxides is then transferred via conduit 65 to a second reaction vessel 66 also equipped with agitation means 67. A dispersing agent 68 is added to the suspension and the mixture is heated with agitation to a temperature above the decomposition temperature of the salt formed by reaction of the dispersing agent with excess ammonia contained in stream 65. Upon decomposition of the ammoniated dispersing agent, a gum-like material forms which comprises dispersing agent-coated magnetite particles. Excess ammonia is vented from vessel 66 by way of means 69. The coagulum-water-ammonium salt mixture is then passed to settling or decanting vessel 70 by way of transfer means 71. In vessel 70, the coagulum or magnetic gum, settles to the bottom since it has a relatively high specific gravity due to its magnetite content. A water stream containing dissolved salts 72 is decanted from the top of vessel 70 while a magnetic gum fraction 73 is removed from a lower point in the vessel. The last traces of entrained water are removed from the magnetic gum in drier means 74, the water being vented at 75.

A dried magnetic gum fraction 76 is recovered from drier means 74 and this may constitute the product of our process. Alternatively, the magnetic gum may be passed to a mixing or dispersing means 77 and a solvent 78 added to form a magnetic fluid product 79. Magnetic gum 76 may be considered to be a magnetic fluid concentrate and in this form offers advantages over the prepared magnetic fluid. For example, the magnetic gum may be dispersed in any one of a large variety of solvents. Transportation and storage advantages are obvious.

The process of FIG. 5 has been illustrated and described as operating on a semi-continuous or continuous basis. It may also be operated on a batch basis in which all of the processing steps are carried out within the same processing vessel.

Our invention is further explained and illustrated by the following examples.

EXAMPLE 1

A laboratory technique for the production of small quantities of magnetic fluids having reproducible charac-

teristics has been developed. This is a "recipe" type of procedure which can be accomplished using simple apparatus and open beakers.

Dissolve 0.09 mole of ferric chloride and 0.06 mole of ferrous chloride in 50 ml. distilled water. Note that the mole ratio of ferric to ferrous iron (3 to 2) is smaller than that of magnetite (2 to 1). However, during the reaction, some ferrous iron oxidizes to ferric since the reaction is performed in open vessels. Slowly add 50 ml. of concentrated (28%) ammonium hydroxide while stirring to precipitate the iron hydroxides. Heat the mixture to 95° C. and add 50 ml. of Fisher odorless kerosene and 5 ml. of Mallinkrodt U.S.P. oleic acid with rapid stirring. Continue heating and a distinct phase separation will occur between the aqueous and organic portions.

Remove the aqueous phase using a pipette. This reduces the heating time for water removal and also eliminates most of the ammonium chloride residue. Heat until the water has evaporated and allow the temperature of the organic phase to rise to 130° C.

Cool the fluid to room temperature and pour into a graduate. Add kerosene to adjust the fluid volume to 55 ml.; this compensates for kerosene lost during heating. Vacuum filter using Whatman No. 31 paper and remove oversized particles (if any) from the fluid with a magnet.

A fluid prepared by this method will have the following nominal specifications: (1) saturation magnetization of 140 gauss at 7000 oersteds applied field; (2) a specific gravity of 0.92 g./cc.; (3) a viscosity of 2.23 centipoise measured using an Ostwald type capillary viscometer at 25° C. It is emphasized that this specific procedure is designed for the production of experimental quantities of magnetic fluid having reproducible characteristics and does not necessarily represent a preferred method of manufacture.

EXAMPLE 2

Six batches, each containing 0.04 mole of $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and 0.02 mole of $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, were dissolved in water. Ammonium hydroxide was used to precipitate the colloidal iron hydroxides. Each batch of precipitate was decanted to a volume of 75 ml.

An electric fry pan was used to heat 300 ml. of the kerosene—2% oleic acid carrier fluid to 110° C. An argon atmosphere was maintained over the kerosene to prevent ignition. A Jet-Pac aerosol-type sprayer was then used to spray the aqueous suspension of hydroxides onto the kerosene. With each spray burst of hydroxide, the carrier fluid darkened, indicating the particles were going into suspension. When the spraying of a batch was completed, the fluid was cooled to room temperature. As only part of the water was lost by evaporation, the remainder, with its dissolved ammonium chloride, was removed by decantation. Some kerosene was lost by evaporation and fresh kerosene was added to return the fluid volume to 300 ml. This operation was repeated until the six batches had been sprayed.

To speed the settling of the oversized particles, a beaker containing the fluid was placed near the poles of a permanent magnet where a pipette was used to draw the fluid from the sediment. Kerosene was added to this fluid to return the volume to 300 ml.

The specific gravity of the fluid was 0.84 g./cm.³ as compared to 0.77 g./cm.³ for pure kerosene at the same temperature. Using this fluid it was possible to levitate copper balls of specific gravity 8.96 g./cm.³ with an electromagnet at a power setting of 3 kilo-oersted (koe) and having a one-half-inch pole piece gap.

EXAMPLE 3

A portion of the fluid from example 2 was evaporated at 110° C. until its volume was halved. Argon was flowed over the fluid to prevent ignition. This concentrated fluid had a specific gravity of 0.85 g./cm.³. It was possible to levitate lead of specific gravity 11.35 g./cm.³ and a plati-



INSTITUTO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Departamento de Engenharia Elétrica

Centro Tecnológico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROJETO FÍSICO DE INDUTORES E TRANSFORMADORES

Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

Eng. Carlos Henrique Illa Font, Mestrando

Eng. Ricardo Luiz Alves, Mestrando

MARÇO/2002

Caixa Postal 5119 – CEP 88040-970 – Florianópolis – SC

Tel. : (0xx48) 331-9204 – Fax: (0xx48) 234-5422 – Internet: www.inep.ufsc.br

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	2
2 – NÚCLEOS DE FERRITE DO TIPO E	2
3 – PROJETO FÍSICO DE INDUTORES	3
3.1 – Escolha do Núcleo Adequado	3
3.2 – Número de Espiras	5
3.3 – Entreferro	6
3.4 – Cálculo da Bitola dos Condutores	8
3.5 – Cálculo da Elevação de Temperatura	8
3.5.1 – Perdas no Cobre	9
3.5.2 - Perdas Magnéticas.....	9
3.5.3 – Resistência Térmica do Núcleo.....	9
3.5.4 – Elevação de Temperatura	9
3.6 – Possibilidade de Execução.....	10
4 – PROJETO FÍSICO DE TRANSFORMADORES.....	10
5 – BIBLIOGRAFIA	10

1 – INTRODUÇÃO

O sucesso na construção e no perfeito funcionamento de um conversor CC-CC está intimamente ligado com um projeto adequado dos elementos magnéticos.

O grande problema reside no fato de que transformadores e indutores operando em alta frequência inserem no circuito de potência uma série de elementos parasitas (não-idealidades), tais como: indutância magnetizante, indutância de dispersão, capacitâncias entre enrolamentos, capacitâncias entre espiras, etc.

Tais elementos parasitas se refletem em resultados indesejáveis no funcionamento do conversor. Os resultados mais comumente observáveis são picos de tensão nos semicondutores, altas perdas e emissão de ruídos (interferência eletromagnética conduzida e irradiada).

2 – NÚCLEOS DE FERRITE DO TIPO E

O objetivo do núcleo magnético é fornecer um caminho adequado para o fluxo magnético.

Entre os tipos de material utilizados na construção de núcleos destacam-se o ferrite e as lâminas de ferro-silício. Em operações em baixas frequências as lâminas de ferro-silício são mais adequadas, porém, com o aumento da frequência de operação, as perdas por histerese e conseqüentemente a elevação de temperatura tornam impraticáveis o seu uso. Os núcleos de ferrite são indicados para operação em frequências mais elevadas, porém, apresentam algumas desvantagens em relação às lâminas de ferro silício, tais como baixa densidade de fluxo de saturação (0,3T) e baixa robustez a choques mecânicos.

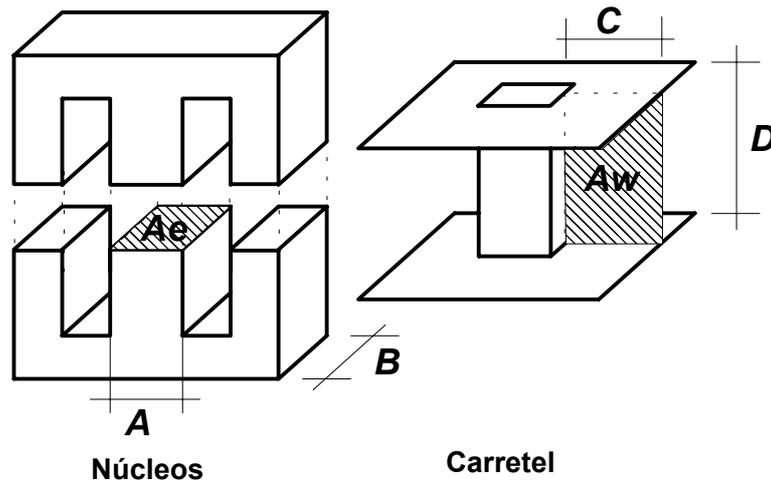


Fig. 1 – Núcleo e carretel do tipo E.

Na Fig. 1 pode ser observado o modelo de um núcleo de ferrite do tipo E-E. A área da seção transversal do núcleo, denominada A_e , e a área da janela, denominada A_w , são fatores importantes no projeto físico de magnéticos.

3 – PROJETO FÍSICO DE INDUTORES

Seja um indutor L percorrido por uma corrente com a forma de onda mostrada na Fig. 2.

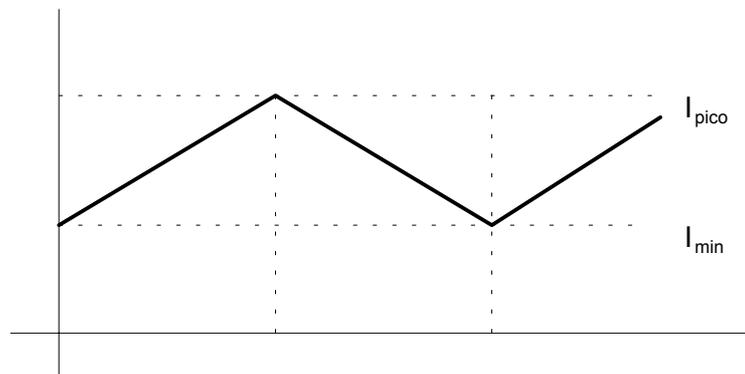


Fig. 2 – Corrente sobre o indutor.

3.1 – Escolha do Núcleo Adequado

O projeto físico do indutor é baseado nas Leis de Ampere e de Faraday:

$$\mathcal{S} = \oint H \cdot dl = H \cdot l = N \cdot i \quad (1)$$

$$v(t) = N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2)$$

Também são relações importantes a relação volt-ampere no indutor e a relação entre indução magnética e campo magnético.

$$v(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (3)$$

$$B = \mu_o \cdot H \quad (4)$$

Igualando (2) e (3) tem-se:

$$N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \Rightarrow N \cdot \Delta \phi = L \cdot \Delta i \quad (5)$$

Sendo:

$$\Delta \phi = \Delta B \cdot Ae \quad (6)$$

Considerando que, quando a corrente no indutor é máxima (I_{pico}) tem-se o máximo valor de B (B_{max}) e substituindo-se (6) em (5):

$$N \cdot B_{max} \cdot Ae = L \cdot I_{pico} \quad (7)$$

Desta forma:

$$N = \frac{L \cdot I_{pico}}{B_{max} \cdot Ae} \quad (8)$$

A máxima densidade de corrente é dada por:

$$J_{max} = \frac{N \cdot I_{eficaz}}{A_p} \quad (9)$$

Onde:

A_p : área transversal do enrolamento de cobre.

Sendo os fios com uma geometria circular, os enrolamentos ocupam apenas uma determinada área da janela disponível conforme pode ser observado na Fig. 3. Desta forma faz-se necessário definir uma constante k_w denominada “*fator de ocupação do cobre dentro do carretel*”. O valor típico da constante k_w para a construção de indutores é 0,7 (ou seja, a área ocupada pelos enrolamentos é de 70% da janela), porém este valor pode sofrer variações conforme a habilidade da pessoa responsável pela confecção dos enrolamentos e conforme a geometria dos condutores utilizados.

Assim, pode-se definir k_w como:

$$k_w = \frac{A_p}{A_w} \quad (10)$$

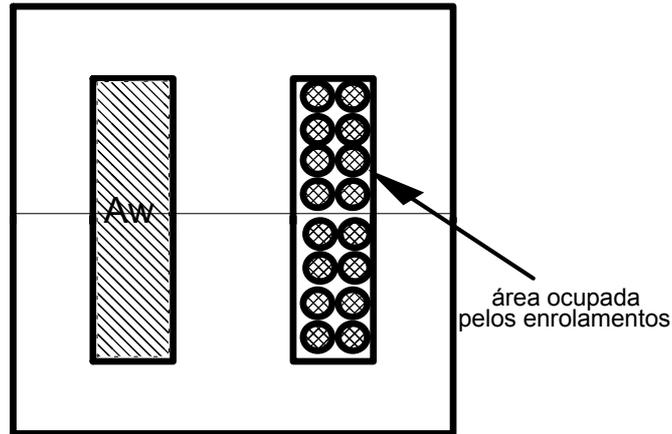


Fig. 3 – Ocupação dos enrolamentos na janela.

Definida a constante k_w , pode-se rescrever a expressão (9) da seguinte forma:

$$N = \frac{J_{\max} \cdot k_w \cdot A_w}{I_{\text{eficaz}}} \quad (11)$$

Igualando (8) e (11):

$$\frac{J_{\max} \cdot k_w \cdot A_w}{I_{\text{eficaz}}} = \frac{L \cdot I_{\text{pico}}}{B_{\max} \cdot A_e} \quad (12)$$

Assim define-se o valor do produto $A_e A_w$ necessário para a construção do indutor:

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{\text{pico}} \cdot I_{\text{eficaz}}}{B_{\max} \cdot J_{\max} \cdot k_w} \cdot 10^4 \quad (13)$$

O fator 10^4 na expressão (13) foi acrescentado para ajuste de unidade (cm^4). Para núcleos de ferrite usuais o valor de B_{\max} fica em torno de $0,3T$ (este valor é devido à curva de magnetização dos material magnético). O valor da densidade de corrente, que indica a capacidade de corrente por unidade de área, depende dos condutores utilizados nos enrolamentos, tipicamente utiliza-se $450\text{A}/\text{cm}^2$. Os fabricantes de núcleos disponibilizam alguns tamanhos e formatos padrões de núcleos e, por este motivo, deve-se selecionar o núcleo com o $A_e A_w$ maior e mais próximo do calculado.

3.2 – Número de Espiras

É obtido diretamente da expressão (8).

$$N = \frac{L \cdot I_{\text{pico}}}{B_{\max} \cdot A_e} \quad (14)$$

3.3 – Entreferro

A indutância depende diretamente do número de espiras e da relutância total do circuito magnético, conforme pode ser verificado na expressão (15).

$$L = \frac{N^2}{R_{total}} \quad (15)$$

Por melhor que seja o material utilizado no núcleo sempre existe uma oposição à passagem de fluxo (relutância), que pode ser calculada pela relação (16):

$$R_{nucleo} = \frac{l_{nucleo}}{\mu_{nucleo} \cdot A_e} \quad (16)$$

Onde:

l_{nucleo} = comprimento do caminho magnético;

μ_{nucleo} = permeabilidade do núcleo.

Caso haja um entreferro aumenta-se a relutância total do circuito magnético, ou seja, existe maior resistência à passagem de fluxo magnético. Considerando um entreferro de ar, a relutância adicionada pode ser expressa por:

$$R_{entreferro} = \frac{l_{entreferro}}{\mu_o \cdot A_e} \quad (17)$$

Onde:

$l_{entreferro}$ = comprimento do entreferro;

μ_o = permeabilidade do ar.

Assim sendo, o entreferro aumenta a relutância total do circuito, diminuindo a indutância.

Os entreferros são utilizados em indutores por duas razões:

- Sem entreferro a indutância é proporcional apenas à permeabilidade do núcleo, que é um parâmetro extremamente dependente da temperatura e do ponto de operação. A adição do entreferro introduz uma relutância muito maior que a relutância do núcleo fazendo com que o valor de L seja praticamente insensível às variações na permeabilidade do núcleo.
- A adição de entreferro permite que o indutor opere com valores maiores de corrente no enrolamento sem que ocorra saturação do núcleo, conforme pode ser observado na Fig. 4.

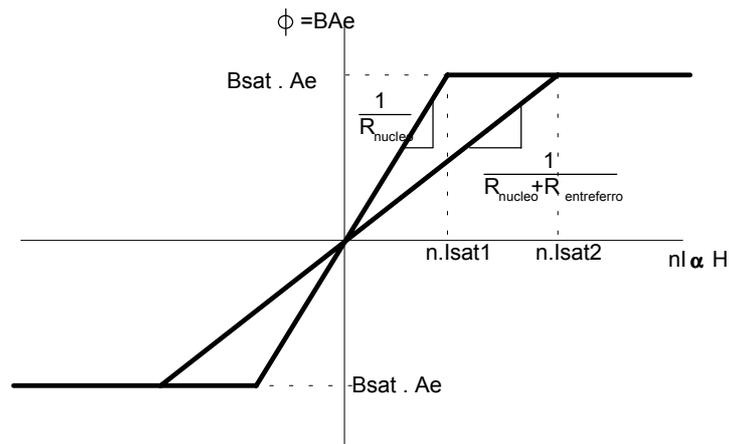


Fig. 4 – Efeito do entreferro na saturação do núcleo.

Considerando a relutância do entreferro muito maior que a relutância do núcleo, a expressão (15) pode ser rescrita como:

$$L = \frac{N^2}{R_{entreferro}} \tag{18}$$

Substituindo (17) em (18) chega-se à:

$$l_{entreferro} = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e}{L} \cdot 10^{-2} \tag{19}$$

Novamente incluiu-se um fator 10^{-2} para ajuste de unidades, tornando o comprimento do entreferro em cm.

O valor calculado é referente ao comprimento total do entreferro, porém, no caso dos núcleos do tipo E-E onde o entreferro normalmente é colocado na pernas laterais, em cada perna lateral deve existir um entreferro com metade do valor calculado, uma vez o fluxo magnético, que circula pelo caminho mostrado na Fig. 5, percorrerá também o entreferro situado na perna central.

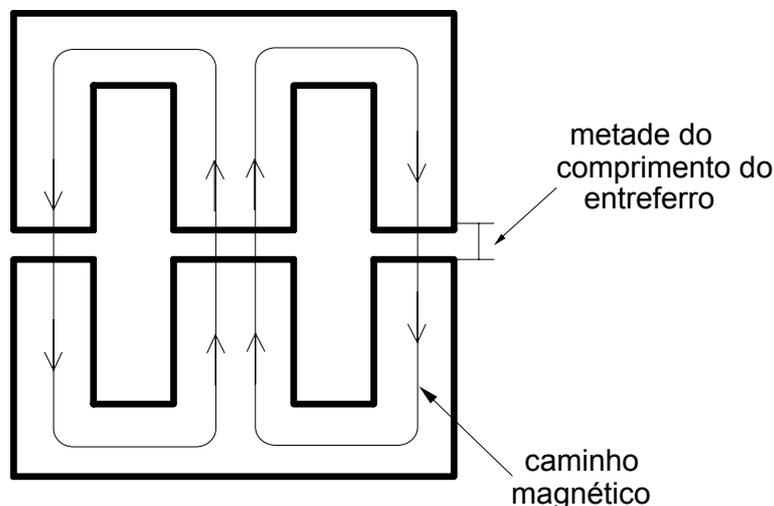


Fig. 5 – Distribuição do entreferro.

3.4 – Cálculo da Bitola dos Condutores

A utilização de condutores em altas frequências deve levar em conta o efeito pelicular (*skin effect*). É sabido que, a medida que a frequência aumenta, a corrente no interior de um condutor tende se distribuir pela periferia, ou seja, existe maior densidade de corrente nas bordas e menor na região central. Esse efeito causa uma redução na área efetiva do condutor. Em outras palavras, o efeito pelicular atua de maneira a limitar a área máxima do condutor a ser empregado.

O valor da profundidade de penetração pode ser obtido através da expressão abaixo:

$$\Delta = \frac{7.5}{\sqrt{f}} \quad (20)$$

Desta forma o condutor utilizado não deve possuir um diâmetro superior ao valor 2Δ .

O cálculo da bitola necessária para conduzir a corrente do enrolamento depende da máxima densidade de corrente admitida no condutor. Conforme pode ser verificado na expressão (21).

$$S_{fio} = \frac{I_{eficaz}}{J_{max}} \quad (21)$$

Geralmente o diâmetro do condutor é superior ao limite fixado pelo efeito pelicular. Assim, é necessário associar condutores em paralelo afim de que se possa conduzir a corrente sem superaquecimento dos fios condutores. O número de condutores pode ser calculado da seguinte maneira:

$$n_{condutores} = \frac{S_{cond}}{S_{skin}} \quad (22)$$

Onde:

S_{skin} = área do condutor cujo o diâmetro máximo é limitado pelo valor 2Δ .

3.5 – Cálculo da Elevação de Temperatura

Devido às não idealidades tem-se perdas no indutor. As perdas totais são compostas de perdas no cobre (efeito Joule) e perdas magnéticas (ou perdas no núcleo). Tais perdas geram aquecimento e conseqüentemente uma determinada elevação de temperatura do indutor acima da temperatura do ambiente ao qual este está submetido.

3.5.1 – Perdas no Cobre

As perdas no cobre dependem diretamente da resistência do enrolamento, que pode ser facilmente calculada com auxílio da expressão (23):

$$R_{cobre} = \frac{\rho_{fio} \cdot l_{espira} \cdot N}{n_{condotores}} \quad (23)$$

Onde:

l_{espira} = comprimento médio de uma espira;

ρ_{fio} = resistividade do fio por cm.

As perdas Joule são:

$$P_{cobre} = R_{cobre} \cdot I_{ef}^2 \quad (24)$$

3.5.2 - Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas são devidas basicamente à histerese. A expressão empírica abaixo permite determinar com boa aproximação o valor das perdas no núcleo:

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_h \cdot f + K_f \cdot f^2) \cdot V_{nucleo} \quad (25)$$

Onde:

K_h = coeficiente de perdas por histerese;

K_f = coeficiente de perdas por correntes parasitas;

V_{nucleo} = volume do núcleo.

Para núcleos da Thornton:

$$K_h = 4 \cdot 10^{-5};$$

$$K_f = 4 \cdot 10^{-10}.$$

3.5.3 – Resistência Térmica do Núcleo

É definida como:

$$Rt_{nucleo} = 23 \cdot (A_e A_w)^{-0,37} \quad (26)$$

3.5.4 – Elevação de Temperatura

É dada por:

$$\Delta T = (P_{cobre} + P_{nucleo}) \cdot Rt_{nucleo} \quad (27)$$

3.6 – Possibilidade de Execução

A última etapa no projeto físico de um indutor é verificar a possibilidade de execução, ou seja, verificar se é possível colocar os enrolamentos na janela do núcleo (A_w).

Para acondicionar o enrolamento calculado anteriormente é necessária uma janela mínima dada por:

$$Aw_{\min} = \frac{N \cdot n_{\text{condutores}} \cdot S_{\text{fito}}}{K_w} \quad (28)$$

A Possibilidade de execução é definida como:

$$Exec = \frac{Aw_{\min}}{Aw_{\text{núcleo}}} < 1 \quad (29)$$

Caso não seja possível construir o enrolamento na janela disponível, deve-se ajustar os parâmetros B_{\max} , J_{\max} , e $n_{\text{condutores}}$ ou ainda escolher outro núcleo.

4 – PROJETO FÍSICO DE TRANSFORMADORES

Partindo das mesmas expressões iniciais usadas no projeto do indutor pode-se facilmente chegar ao dimensionamento físico do transformador, porém, no caso dos transformadores não há a necessidade da utilização de entreferro (com exceção do transformador do conversor Flyback, que na verdade não funciona como transformador, mas sim como indutores acoplados.), pois, idealmente, em um transformador não há armazenamento de energia (toda a energia é instantaneamente transferida do primário para o secundário).

5 – BIBLIOGRAFIA

- [1] BARBI, Ivo. **Projetos de fontes chaveadas**. Florianópolis: Edição do Autor, 2001.
- [2] ERICKSON, Robert W. **Fundamentals of power electronics**. New York: Chapman & Hall, 1997.
- [3] UNITRODE CORPORATION. **Unitrode seminars**. Disponível em: http://focus.ti.com/docs/analog/support/training/seminar.jhtml?templateId=2&navigationId=156&tfsection=Seminar_Materials.
- [4] MAGNETICS INC. **Catálogos e softwares para projeto de magnéticos**. Disponível em: <http://www.mag-inc.com>.