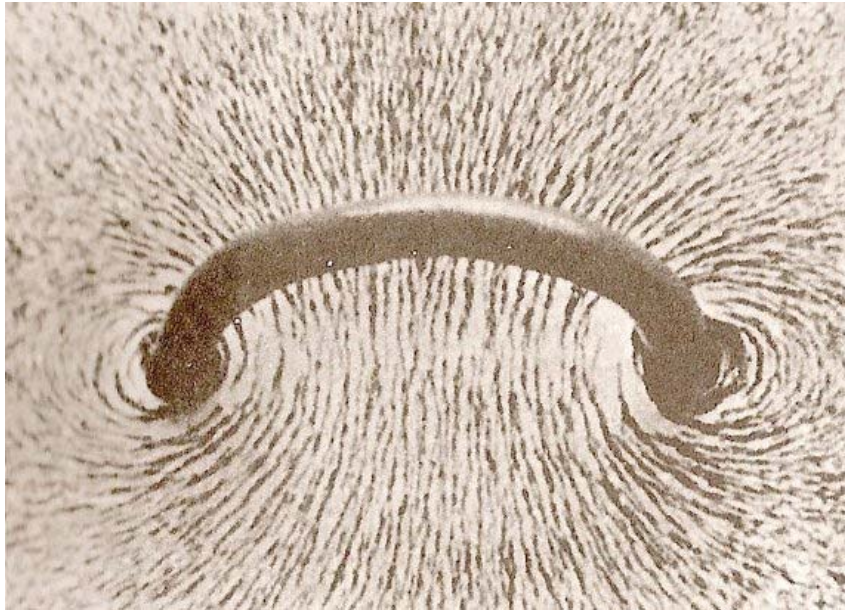


ELETROMAGNETISMO

Prof. Eng° Luiz Antonio Vargas Pinto
© 2004

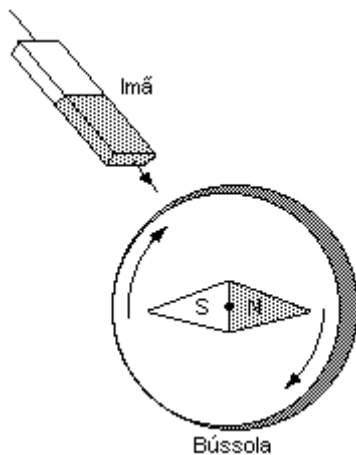
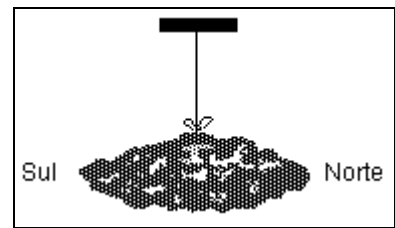


Experiência I - Teoria do magnetismo e espectro magnético de ímã

Objetivo: Verificar a disposição de um campo magnético em torno de um ímã.

Teoria:

Os antigos chineses sabiam que pedaços de certas ligas de ferro natural, como a magnetita (Fe_3O_4), quando suspensos por um barbante, assumiam uma posição definida, com uma extremidade apontando aproximadamente para o norte e outra para o sul da Terra. Estes materiais eram chamados ímãs.

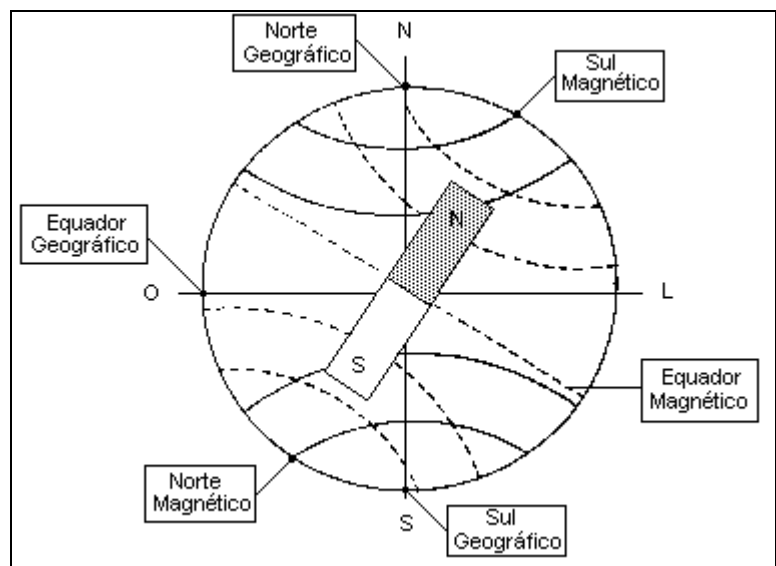


Se aproximarmos dois ímãs em forma de barra, Percebemos que as extremidades que apontavam para o mesmo lugar se repelem e notamos que, se um dos ímãs for virado, as extremidades se atraem. Tal comportamento revela que um ímã em forma de barra apresenta suas propriedades, denominadas propriedades magnéticas, mais acentuada nas regiões próximas às suas extremidades, chamadas pólos do ímã. Revela também que pólos semelhantes, isto é, que apontam para o mesmo lugar se repelem, e pólos diferentes se atraem.

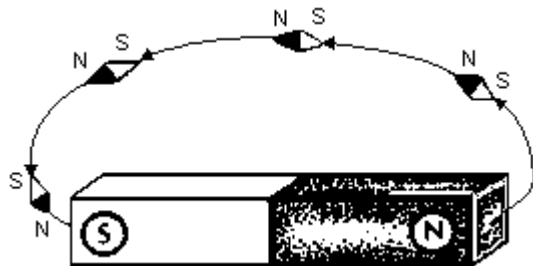
O ímã passou a ser usado para a construção da bússola, aparelho para orientação na superfície da Terra. Nela, um ímã em forma de losango, denominado agulha magnética é apoiado sobre um eixo e pode mover-se em um plano horizontal.

Essa utilização do originou a denominação de seus pólos: o que se orienta para o norte geográfico da Terra é o pólo norte do ímã; o outro, apontando para o Sul geográfico, é chamado pólo sul do ímã. É comum pintar-se mais escuro o pólo norte.

É interessante notar que, considerando a denominação acima e o fato de pólos diferentes se atraírem, podemos associar a Terra a um grande ímã, cujo pólo está localizado próximo de seu pólo norte geográfico, que é na verdade um pólo sul magnético e vice-versa.



Essa é uma estrutura mais ou menos da seguinte forma:



Onde cada pequena partícula constituinte da linha de força ao ser analisada percebemos que, como a orientação é de norte a sul, a linha entra na partícula de um lado e sai pelo outro (veja a figura). Ora, a linha que chega é sempre no SUL e a linha que sai é sempre do NORTE, por essa razão, da mesma forma, o ímã se alinha com as linhas de força.

A magnetita (Fe_3O_4) mantém uma polaridade permanentemente devido ao fenômeno da polarização que estudaremos adiante juntamente com histerese. Sabemos que isto é um fato decorrente do campo magnético da terra, que mantém a magnetita, rica em Ferro, que é um elemento da família dos metais e que oferece bastante facilidade na manipulação de seus elétrons da última camada adquirindo polaridade quando associado com oxigênio na proporção (Fe_3O_4). Entretanto fica uma dúvida: Ora, se a terra mantém a polarização da Magnetita, quem gera e mantém o campo magnético da terra? A resposta mais interessante para esta questão vem acidentalmente de uma análise da Nasa sobre Marte.

Os cientistas já haviam detectado a presença de um campo eletromagnético no planeta Marte, porém ninguém sabia que ele fosse tão forte como foi revela-

do pelo magnetômetro da sonda. As explicações técnicas foram dadas pelo Dr Mario H. Acuna, diretor das pesquisas eletromagnéticas do Centro Espacial Goddard, em Greenbelt, EUA. "As atuais observações", disse ele, "mostram um campo com polaridade semelhante à da Terra e oposta ao de Júpiter. As próximas medições vão permitir saber exatamente sua força e sua geometria". A presença de um campo eletromagnético é muito importante no estudo global de qualquer planeta. Planetas como a Terra, Júpiter e Saturno têm campos eletromagnéticos gerados a partir de seu centro por uma espécie de dínamo natural.

Os metais derretidos existentes no miolo desses planetas são auto-condutores de eletricidade. O movimento dos planetas faz com que esses metais também se movimentem e gerem correntes elétricas (Princípio de Foucault) que por sua vez, geram os campos eletromagnéticos.

Além de gerar campos eletromagnéticos, esses metais sugerem a existência de fontes internas de calor. Elas geralmente são as causas da existência de vulcões e da flutuação de continentes, como aconteceu na Terra.

Neste simples procedimento vamos explorar o conhecimento das forças que envolvem campos

magnéticos naturais utilizando simples imãs de magnetita. Con- | repulsão que estes apresentam
vém observar a extrema força de | mesmo em pequenas partículas.

Procedimento experimental:

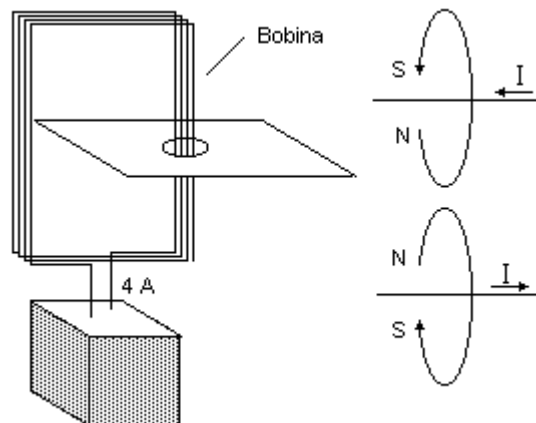
- Visualizar as linhas de força do campo magnético com limalha de ferro para cada uma das amostras de imã disponível;
- Observar com mais atenção o imã em "U" (note que as linhas ligam os dois pólos) e Observe a predominância das linhas perto das extremidades;
- Utilizar a bússola para verificar a orientação das linhas magnéticas.

Questão:

Por quê as limalhas de ferro se alinham em relação as linhas de campo magnético dos imãs ?

Experiência 2 - Campo magnético produzido pela corrente elétrica

Objetivo: Verificar a existência do campo magnético e relacionar o sentido do campo magnético com a intensidade da corrente elétrica.



Procedimento 1:

1. Aplicar $I_c = 4A$ na bobina retangular;
 2. Espalhar limalha de ferro sobre a placa de papelão e observar as linhas de campo induzidas;
 3. Colocar a bússola em volta da bobina e observar o seu sentido;
 4. Inverter o sentido da corrente na bobina e repetir o ítem 3;
 5. Faça uma regra que relacione o sentido do campo magnético com o sentido da corrente.
- Verificar que o vetor i é perpendicular as linhas do campo magnético.

Procedimento 2:

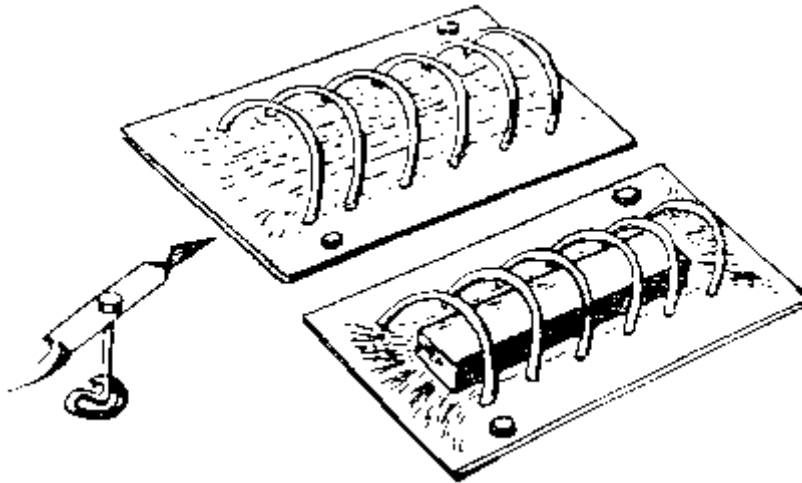
1. Utilizar 2 bobinas de 140 espiras com núcleo de ferro inserido;
2. Espalhar limalha de ferro sobre a placa de papelão e observar as linhas de campo induzidas;
3. Aplicar corrente elétrica I_c nas duas bobinas independentes;
4. Identificar sentidos de correntes e campos provocados;
5. Identificar resultantes dos campos quando as duas bobinas funcionam simultaneamente;
6. Faça uma regra que relacione o sentido do campo magnético com o sentido da corrente.

Experiência 3 - *Análise qualitativa de um eletroímã*

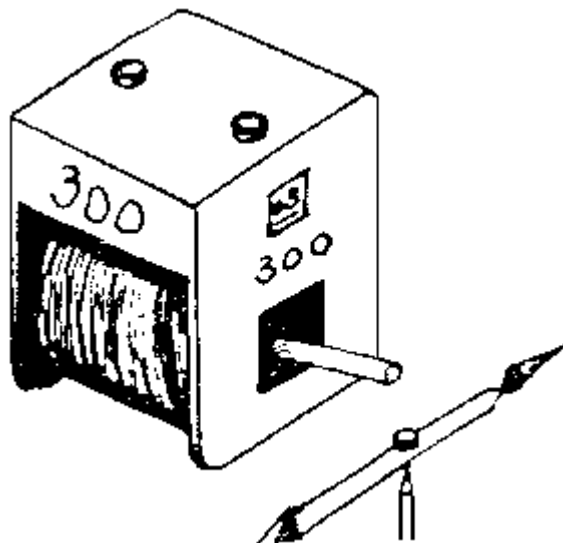
Objetivo: Verificar como uma bobina funciona como eletroímã.

Procedimento experimental :

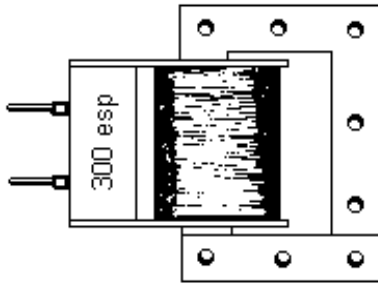
1. Alimentar a bobina com $I_c = 4A$ observando o espectro de campo;
2. Insira um núcleo de ferro e repita o procedimento;



1. Ligar a bobina de 300 esp no Gerador CC com $I_c = 3,5A$;

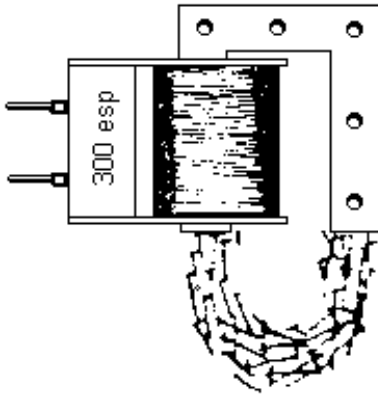


2. Observe como a bússola é afetada e a lâmina de ferro é atraída por ele;
3. Tente empurrar a lâmina de um lado para outro e observe o que acontece;
4. Coloque a bobina em um ferro laminado em "U" e aproxime a barra de ferro maciço;



5. Repita o procedimento com a barra laminada;
• Verifique que a barra é “puxada” pela bobina.

6. Repita o procedimento com pregos;

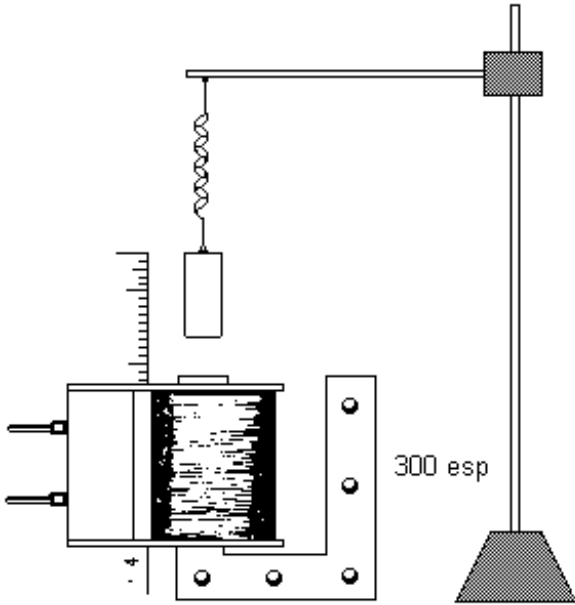


Experiência 4 - Análise quantitativa de um eletroímã

Objetivo: Medir a força de atração de uma bobina funcionando como eletroímã.

Procedimento experimental:

1. Monte o circuito abaixo:

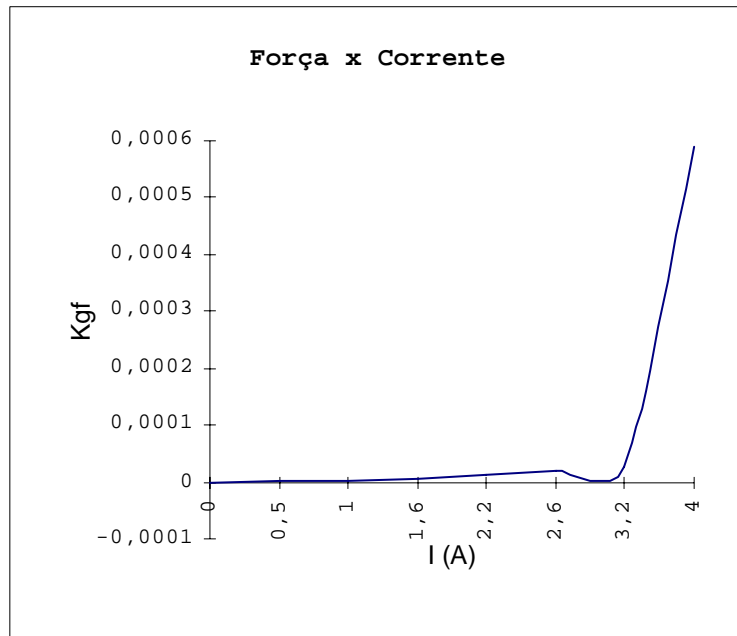


2. Alimente a bobina de 300 esp com corrente contínua até 4A variando a tensão de 0,5 á 3,0 V de 0,5 em 0,5 V e calcule a força F para cada um dos valores de corrente usando o K dado de:

$$F = \frac{k \cdot x^2}{2} \quad k \approx 15 \text{ gf/m}$$

Dados experimentais:

V	I	L	Varição	F
0,5	0,5	2,7	0,1	
1,0	1,0	2,6	0,2	
1,5	1,6	2,5	0,3	
2,0	2,2	2,4	0,4	
2,5	2,6	2,3	0,5	
3,0	3,2	2,2	0,6	
3,5	4,0	0,0	2,8	

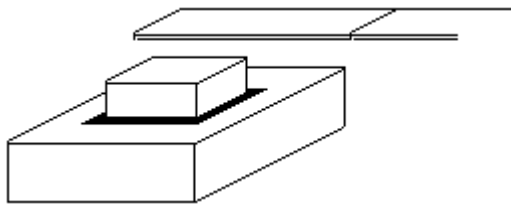


Experiência 5 - *Aplicação de eletroímã:*

Objetivo: Verificar as aplicações do eletroímã

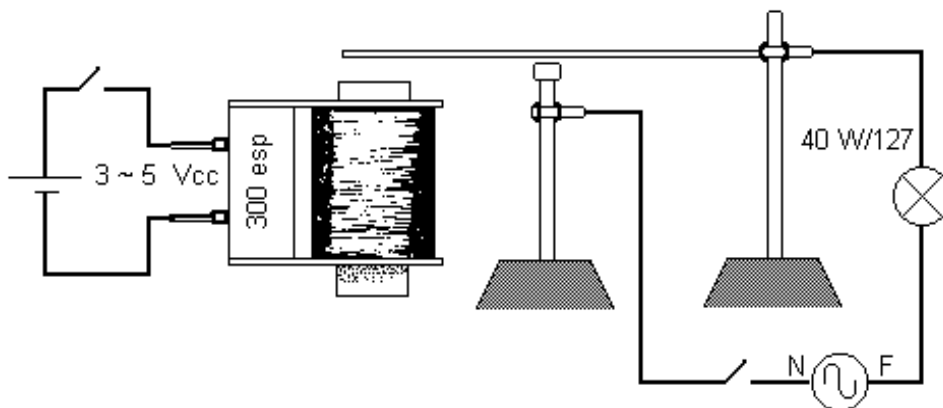
Procedimento 1: *A cigarra*

1. Monte o circuito abaixo;
 2. Aplique corrente alternada de 2A na bobina de 300esp;
 3. Aproxime a barra da bobina até que encontre uma posição onde a barra comece a vibrar;
- Verifique a ressonância com a corrente alternada (n° de vibrações n° de alternações CA);



Procedimento 2: *Circuito com relê*

1. Circuito, o qual podemos utilizar como relê para acionar um dispositivo á distância



Experiência 6 - *Variação do campo magnético produzido por uma bobina em função da corrente, número de espiras e comprimento*

Objetivo: Verificar a variação do campo magnético produzido por uma bobina.

Procedimento :

1. Aplicar uma tensão de 2,0 V_{CC} a 8,0 V_{CC} em uma bobina com 140esp;
2. Fazer as leituras de tensão e corrente;
3. Verificar o comportamento do campo magnético;
4. Repetir para 300esp e tensão de 2,0 V_{CC} a 15,0 V_{CC};
5. Repetir para 1200esp e tensão de 2,0 V_{CC} a 20,0 V_{CC};

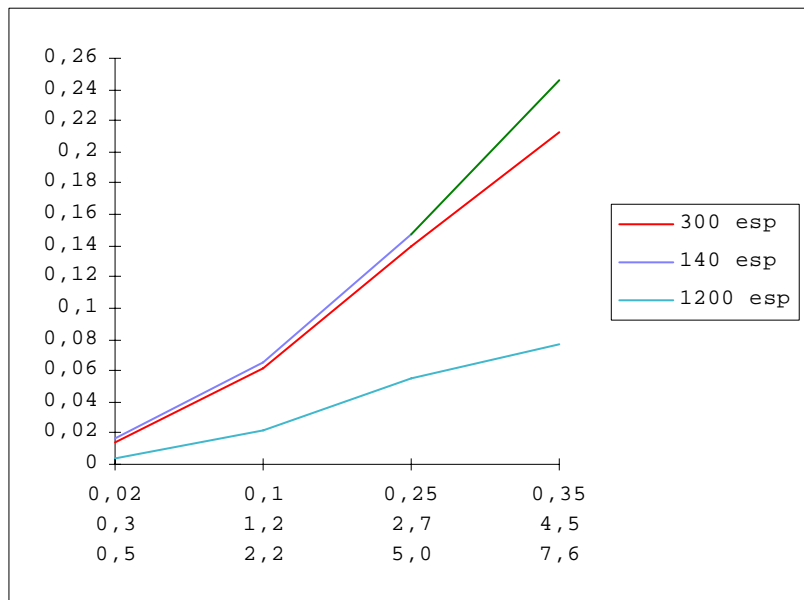
Dado:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l}$$

onde: μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [Wb/m.A]}$$

	0,063m	0,069m	0,069m
	140 esp	300 esp	1200esp
V	I B	I B	I B
2	0,5	0,3	0,02
4	2,2	1,2	0,10
6	5,0	2,5	0,25
8	5,0	2,5	0,25



Experiência VII - Histerese Magnética

Objetivo: Verificar a ocorrência da histerese no núcleo de transformadores.

Definição:

A Histerese representa parte das perdas do núcleo por efeito de polarização de suas moléculas. Materiais como o Ferro apresentam a propriedade de, uma vez polarizado, suas moléculas não mais voltarem a posição inicial, originando uma perda representada por uma curva que mostra o ponto de saturação do material ferromagnético. Quando retiramos totalmente a corrente, permanecerá no material um magnetismo residual.

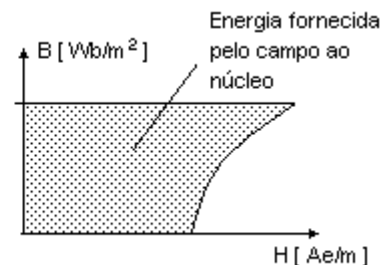
Teoria da magnetização:

Na natureza todos os elementos, salvo algumas exceções, são eletricamente estáveis. Existe um mineral encontrado até na superfície da terra e que impressiona desde o princípio da história da humanidade pelo seu poder de atrair o Ferro e suas ligas. A magnetita (Fe_3O_4) quimicamente é um composto estável porém suas moléculas podem se orientar quando submetidas a um campo magnético apresentando força de atração. No caso específico da magnetita, o próprio campo magnético da terra o polariza. Na realidade essa é uma propriedade do ferro, embora todos os materiais possam ser polarizados. O ferro possui uma estrutura atômica que permite a conservação de parte dessa energia fornecida no processo de magnetização. A essa capacidade chamamos histerese.

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 N I}{l}} \quad \text{ou} \quad \boxed{B = \mu H} \quad \text{e} \quad \boxed{H = \frac{N I}{l}}$$

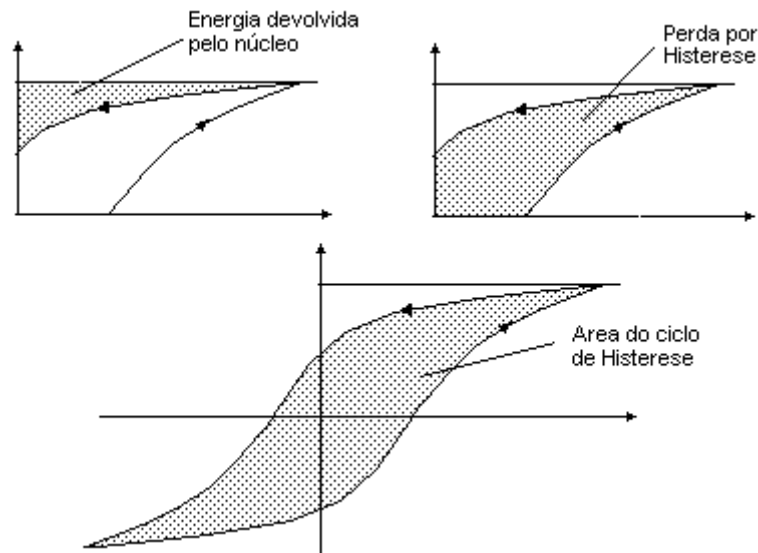
que em função do tempo

$$H(t) = \frac{B(t)}{\mu} \quad I(t) = \frac{l B(t)}{\mu N} = \frac{l}{N} H(t) \quad P(t) = V \int H dB$$



onde a

integral representa a área da curva.



- A perda total é \approx ao número de ciclos/segundo (frequência).
- Empiricamente: $P_H = \gamma B_{\max}^n$ γ e n dependem do material

A curva B x H define as características do material magnético. São encontradas em manuais e usadas em projetos, sendo chamadas de normas de magnetização.

- Perdas por ciclo



Comentar:

- 1.0 que define a curva B x H;
2. Como ocorre perdas por histerese;
3. Como é seu comportamento;
4. relacione as perdas por histerese com a frequência da rede.

Procedimento :

1. Aplicar uma corrente de 2,0 A em CA na bobinade 300esp com a barra de aço no seu interior causando uma confusão nas moléculas da barra;
2. Reduzir a corrente a zero;
3. Confirmar a baixa imantação da barra de aço;
4. Após constatar a anulação do magnetismo remanescente aumentar a tensão de 0,5 Vcc em 0,5 Vcc respeitando o limite de 2A;
5. Sempre acompanhe a polarização com a bússola;
6. No limite máximo de Vcc iniciar uma redução de de 0,5 Vcc em 0,5 Vcc até zero;

7. Inverter a polaridade da bobina e repita o procedimento sempre supervisionando com a bússola para verificar a inversão da polaridade.

Dados obtidos :

ida		Volta	
V	I	V	I
0,5	0,03	7,5	0,51
1,0	0,07	7,0	0,48
1,5	0,11	6,5	0,45
2,0	0,14	6,0	0,42
2,5	0,17	5,5	0,37
3,0	<u>0,21</u>	5,1	0,33
3,5	0,24	4,5	0,31
4,0	0,27	4,0	0,27
4,5	0,31	3,5	0,24
5,0	0,35	3,0	<u>0,20</u>
5,5	0,37	2,5	0,18
6,0	0,42	2,0	0,14
6,5	0,44	1,5	0,10
7,0	0,47	1,0	0,07
7,5	0,51	0,5	0,04

Aplicação: Determinar as características magnéticas de cada material.

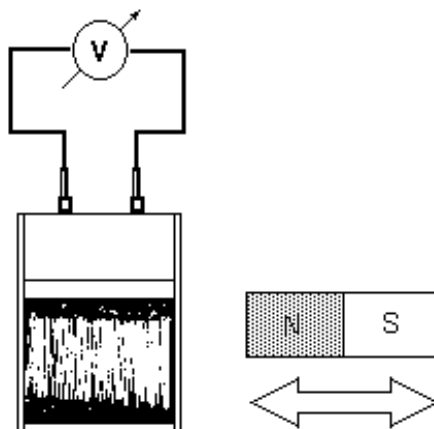
Experiência 8 - *Influência de um ímã sobre uma bobina*

Indução eletromagnética

Objetivo: Verificar a influência de um ímã sobre uma bobina gerando f.e.m. induzida.

Procedimento:

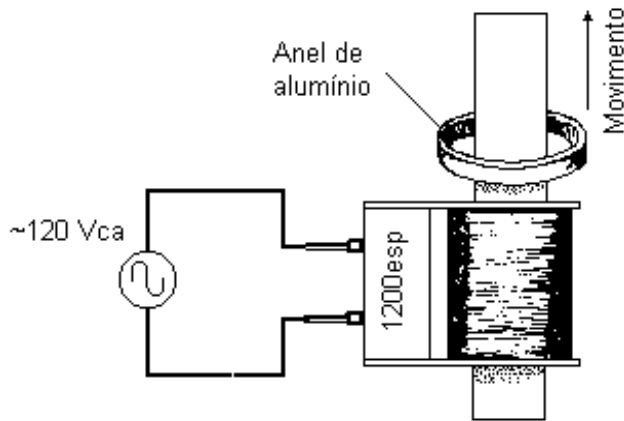
<i>Valores de corrente induzida</i>					
Movimento do ímã		nº de espiras			
		140	300	600	1200
Lento	ao introduzir				
	ao retirar				
Rápido	ao introduzir				
	ao retirar				



Experiência 9 - *Anel de Thompson - corrente induzida*

Objetivo: Verificar o comportamento de uma corrente induzida em uma espira fechada e em duas espiras fechadas ao serem submetidas a um campo de indução.

Procedimento :



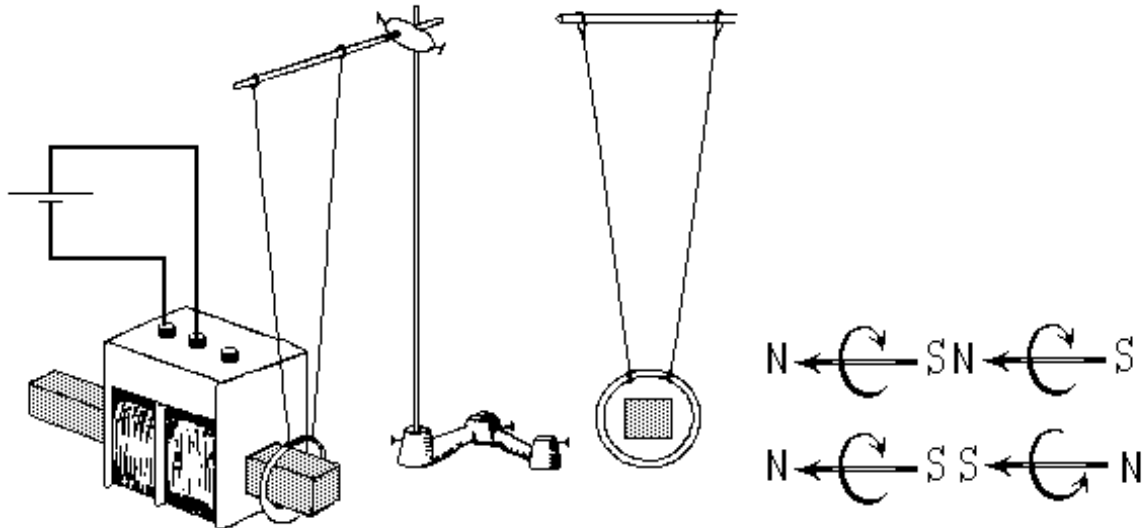
1. Utilizando uma bobina de 1200esp alimentada com 120 Vca;
2. Ligue a fonte com o anel no núcleo de ferro e observe o que acontece;
3. Repita utilizando uma bobina de 600esp e observe o que acontece;
(Condutores com mesmo sentido de corrente induzida tendem a se atrair)
4. Insira um segundo anel no núcleo de ferro e explique porquê os dois são atraídos;
5. Observe que tanto o núcleo de ferro quanto o anel aquecem muito.

Experiência 10 - Lei de Lenz

Sentido da corrente induzida

Objetivo: Verificar o sentido da corrente induzida em uma espira fechada.

Procedimento :



“Toda corrente induzida se opõe à causa que a produz”

1. Utilizando uma bobina de 600 esp alimentada com V_{cc} (limite de 2A);
2. Ligue a fonte com o anel no núcleo de ferro e observe o que acontece ao anel;
3. Aguarde algum tempo e desligue a fonte. Observe o que acontece com o anel;
4. Repita novamente o procedimento, observe e anote os resultados.

Experiência II - Correntes de Foucault

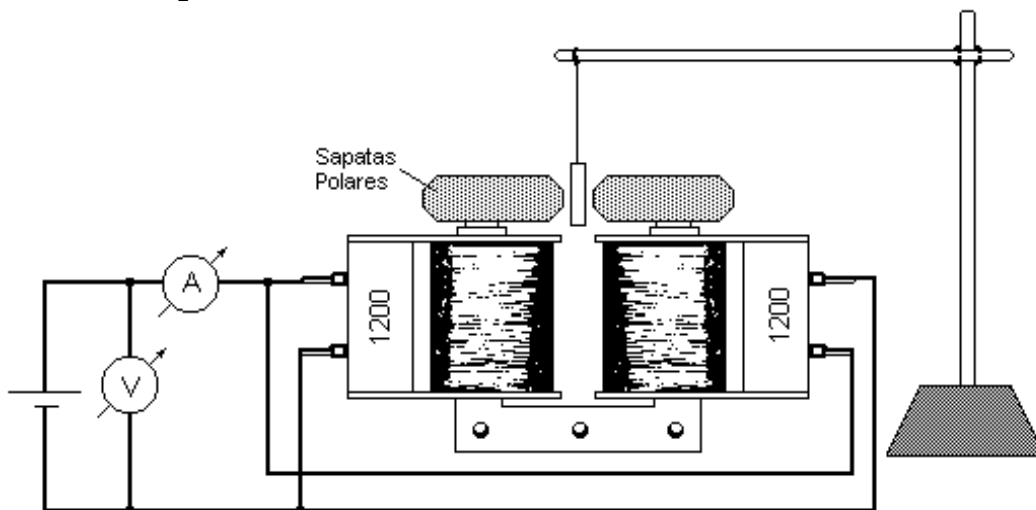
Objetivo: Verificar o comportamento de materiais ao serem submetidos a um campo de magnético.

Teoria:

Não é somente em bobinas que as correntes induzidas aparecem, mas em qualquer peça metálica em movimento relativo ao ímã. As fendas impedem a formação de corrente. Assim, ao entrar a peça é repelida e ao sair é atraída. Isto é utilizado como *freio eletromagnético* em instrumentos de medidas elétricas. Normalmente isto evita que o ponteiro de aparelhos analógicos oscilem.

Procedimento 1:

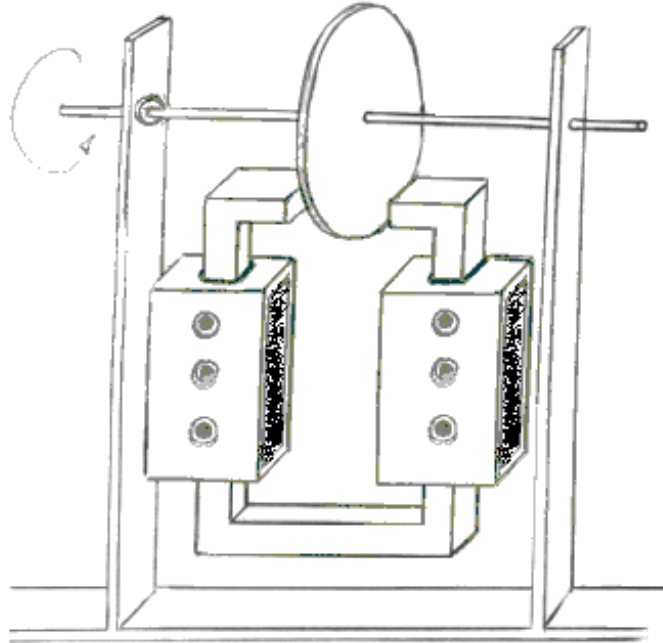
Monte o esquema abaixo:



1. Forme um eletroímã com 1200 esp;
2. Faça o pêndulo oscilar com campo desligado;
3. Faça o pêndulo oscilar com campo magnético ligado e observe;

Procedimento 2:

Monte o esquema seguinte:



1. Forme um eletroímã com 1200esp;
2. Faça o disco de alumínio girar com a fonte desligada;
3. Ligue a fonte com o disco de alumínio girando e observe como o disco para;
4. Tente girar o disco com a fonte de alimentação ligada, e observe a dificuldade para fazer isso.

Experiência 12 - Forno de indução

Objetivo: Observar os aspectos construtivos de um forno elétrico de indução e que funciona com base em eletromagnetismo.

• Teoria :

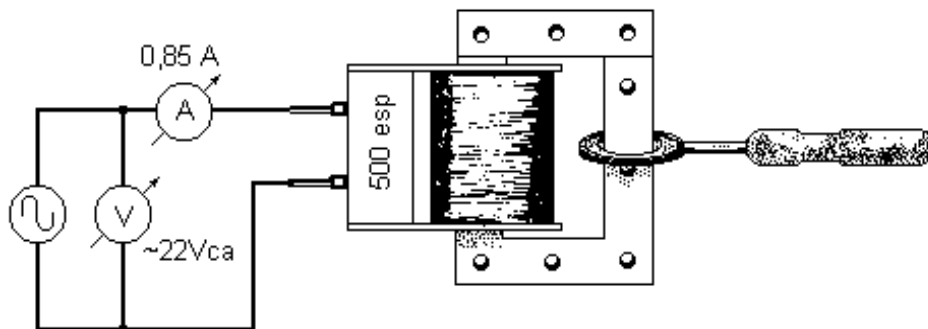
Usando um transformador cujo primário é constituído de N espiras e um secundário constituído de uma única espira em forma de anel com ranhura terminamos por construir um transformador de alta corrente que por sua vez constitui um forno de indução eletromagnético. Demonstramos o princípio de geração de calor com a ação de corrente induzida sobre a espira do secundário, que se aquece devido à alta corrente que passa por ela dissipando calor. O princípio é até simples: Como já sabemos, a pior condição para um transformador é quando temos um curto-circuito na saída deste. Assim, ao colocarmos uma única espira no secundário, fechada, esta representa esse curto-circuito. Por essa razão, aliada à relação de espiras:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

produzimos uma alta corrente no secundário e que fornece energia térmica tão elevada que pode ser utilizada em processos de fusão de metais. No nosso caso, em particular, fundiremos um pequeno pedaço de estanho utilizado para soldar componentes eletrônicos.

Procedimento :

Monte o circuito abaixo:



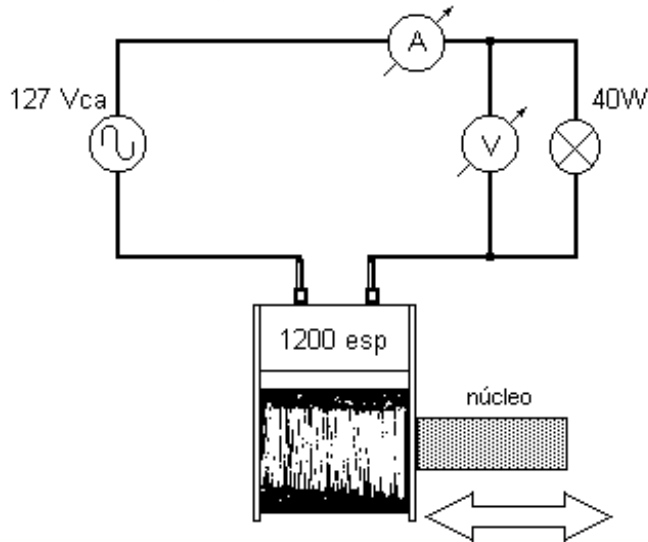
1. Coloque um pequeno pedaço de solda (estanho + chumbo) no secundário e observe até o momento em que a liga derrete com o calor.

Experiência 13 - Reostato indutivo

Objetivo: Verificar o comportamento indutivo quando o núcleo varia.

Procedimento:

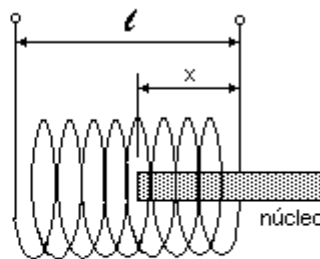
Monte o circuito seguinte:



1. Explicar o que ocorre quando introduzimos o núcleo;
2. Associar a queda de tensão a variação da reatância na bobina;

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_1} \frac{x}{\ell} + \frac{N^2}{\mathcal{R}_2} \frac{\ell - x}{\ell}$$

$$L = \frac{N^2}{\mu_0 \mu S} \frac{x}{\ell} + \frac{N^2}{\mu_0 S} \frac{\ell - x}{\ell}$$



$$L = \frac{\mu_0 S N^2}{\ell} \left[(\mu - 1) \frac{x}{\ell} + 1 \right]$$

Experiência 14 - Determinação de indutância

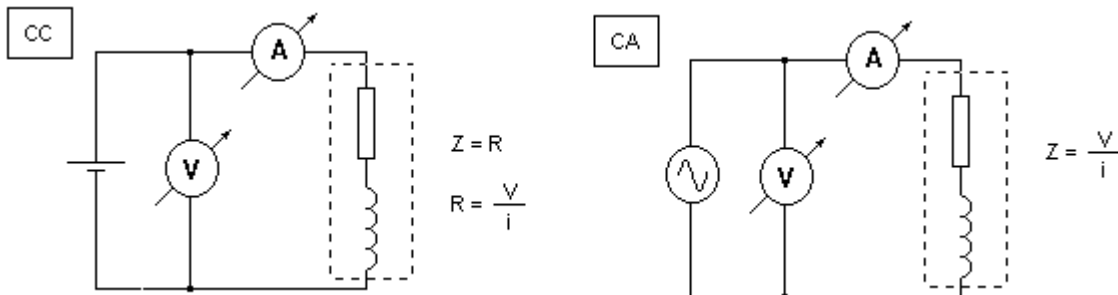
Objetivo: Determinar experimentalmente a indutância de bobinas e a influência do núcleo

Procedimento:

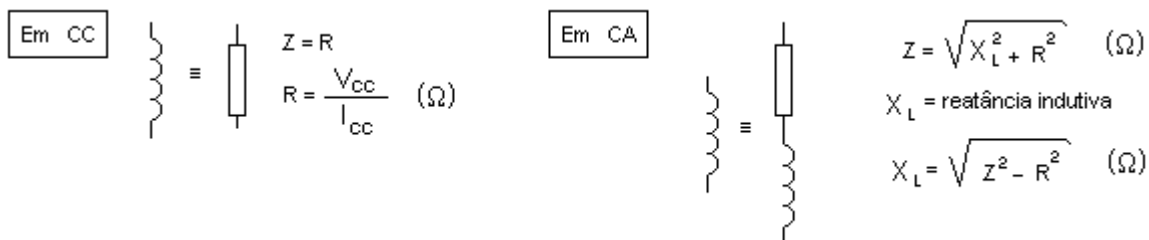
NÚCLEO DE AR

N	V_{CC} (V)	I_{CC} (A)	$\frac{V}{I}$	V_{CA} (V)	I_{CA} (A)	$\frac{V_{CA}}{I_{CA}}$	$\sqrt{Z^2 - R^2}$	$\frac{X_L}{2\pi 60}$
	V_{CC} (V)	I_{CC} (A)	R (Ω)	V_{CA} (V)	I_{CA} (A)	Z (Ω)	X_L (Ω)	L (H)
140	1,0	7,4		5	3			
300	0,5	3,8		3	1			
600	6,5	0,12						
1200	1,0	0,05						

NÚCLEO DE FERRO:



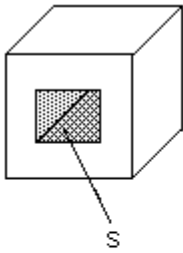
1) Cálculo das impedâncias:



2) E sendo:

$$X_L = 2\pi fL \Rightarrow L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad \text{e} \quad f = 60 \text{ Hz}$$

Outra forma:



$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

onde: \mathcal{R} = Relutância indutiva,
 μ = permeabilidade magnética
 l = comprimento do circuito magnético
 S = área de passagem do fluxo

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}$$

Seja: 1200 esp com núcleo de ar $l = 16,4$ cm
 140 esp com núcleo de ar $S = 9,61$ cm²

$$\mathcal{R}_{1200} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{16,4}{9,61} = 0,136 \cdot 10^7$$

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{1200}} = 7,35 \cdot 10^{-7} \Rightarrow L = 1,44 \cdot 10^{-6} \cdot 7,35 \cdot 10^{-7} = 1,06 \text{ mH}$$

N	V _{CC AR}	V _{CC Fe}	V _{CA AR}	V _{CA Fe}
140	1	6	5	7
1200	5	1	5	8

Núcleo	N	V _{CC} (V)	I _{CC} (A)	V _{CA} (V)	I _{CA} (A)	L (mH)
AR	140	1 0,5	7,4 3,8	5 3	3 1	4,4 7,9
	1200	5	0,11	5 6	0,09 0,11	84,7 80,0
Ferro	140	6	0,12	7	0,13	7,66
	1200	1	0,05	8	0,10	206,1

Comparar núcleo de ferro com núcleo de ar. Lembrando que $\mu_{FE} > \mu_{AR}$

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \text{ e } \mathcal{R} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \Rightarrow L = \mu N^2 \frac{S}{l}$$

de onde podemos perceber que L é diretamente proporcional a μ .

$$L = N \frac{d\phi}{di} \Rightarrow L = \frac{N}{i} \cdot \frac{N \cdot i}{\mathcal{R}} \Rightarrow L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \text{ e ainda } \phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

Compare:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$\text{com } L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

Dados:

$$\mathcal{R}_{140} = 1,61 \cdot 10^6 \Omega \quad \left| \text{Ferro} \right.$$

$$\mathcal{R}_{1200} = 48,8 \cdot 10^6 \Omega$$

$$L_{140} = \frac{140^2}{1,61 \cdot 10^6} = 12,18 \text{ mH} \quad L_{1200} = \frac{1200^2}{48,8 \cdot 10^6} = 29,51 \text{ mH}$$

Experiência 15 - *Determinação de polaridade de bobina*

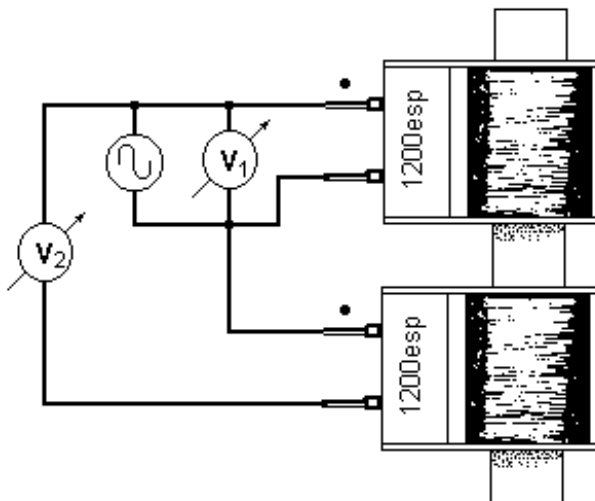
Objetivo: Determinar experimentalmente a polaridade de uma bobina

Teoria:

Uma bobina, embora seja apenas fio enrolado, induz ao erro de que tanto faz a forma como deve ser ligada por não possuir polaridade. O erro é que, na verdade, a corrente elétrica circulando pela bobina induz campo magnético, e quando associadas, se o fluxo não for concordante produz força resultante de baixa intensidade, sendo que uma anula o efeito da outra. Motores e máquinas elétricas em geral, podem inclusive, deixar de funcionar em razão de conexões invertidas. É padrão adotarmos o ponto decimal (.) para indicar o local da entrada da bobina. É claro que isto é arbitrário, porém se todas as bobinas utilizadas adotam o ponto de entrada como sentido horário, é mais simples identificar o sentido concordante dos campo gerados e conseqüentemente o correto aproveitamento da força gerada.

Procedimento :

1. Marque arbitrariamente o ponto de uma bobina;
2. Associe essa bobina com outra em série;
3. Aplique tensão V_1 nos terminais da associação e meça V_2 ;
4. Se $V_2 > V_1$ então a polaridade assumida está correta;
5. se $V_1 > V_2$ então a polaridade está errada e deve ser corrigida.

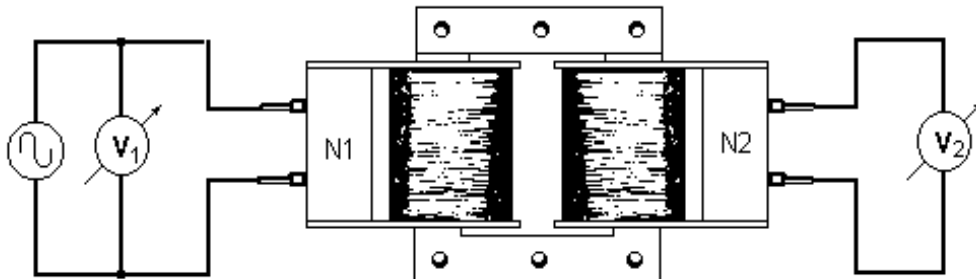


Experiência 16 - Transformadores

Objetivo: Estudar o comportamento de transformadores

Procedimento:

1. Monte o circuito da figura abaixo e preencha com os dados obtidos a tabela ;



Transformador				$A_{teórico} = N_1/N_2$	$A_{prático} = V_1/V_2$	% erro
V_1	N_1	V_2	N_2			
10	140	17	300			
10	126	19	300			
10	98	23	300			
10	300	15	600			
15	300	22	600			
20	300	29	600			
25	300	36	600			
30	300	43	600			