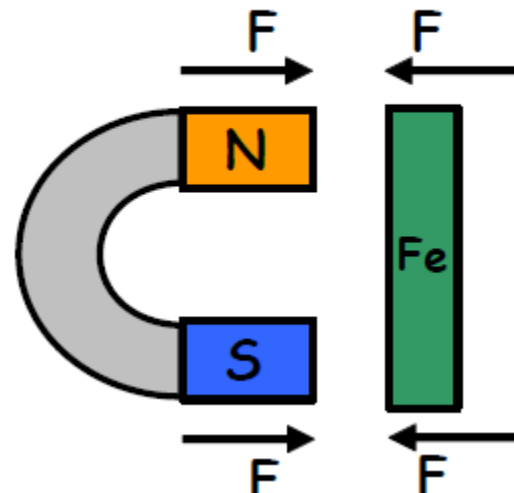
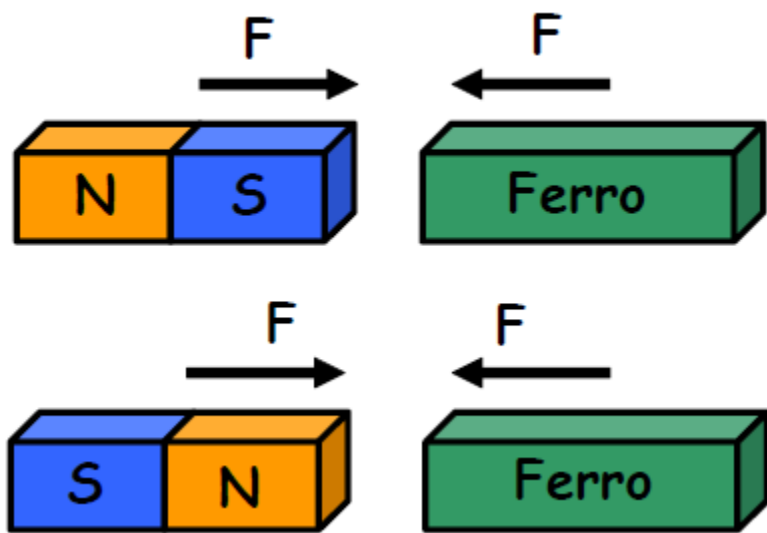


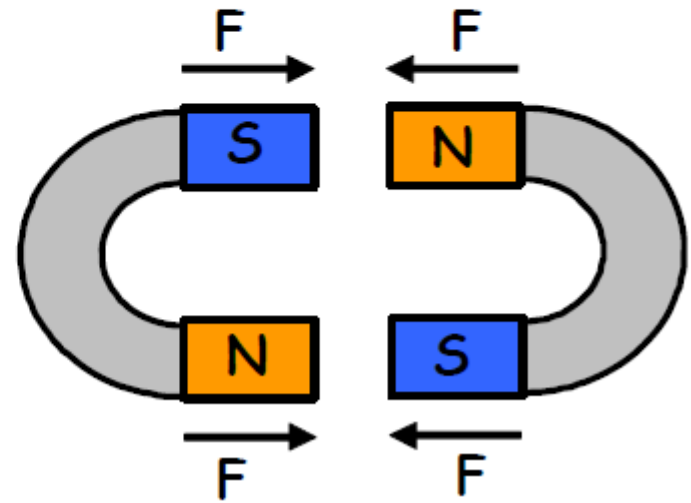
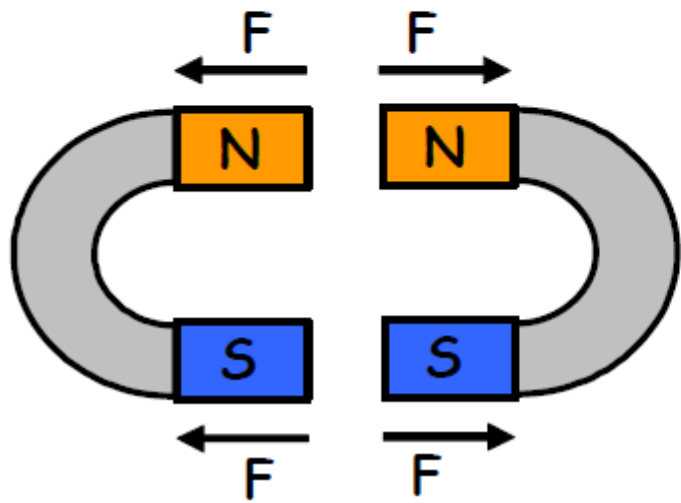
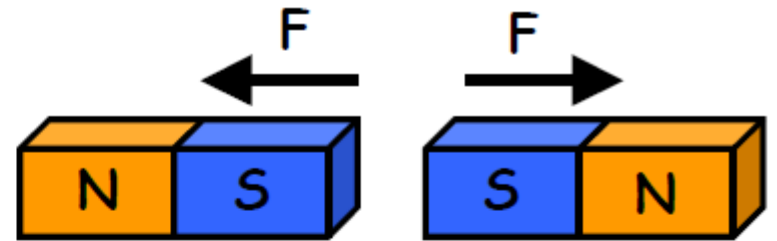
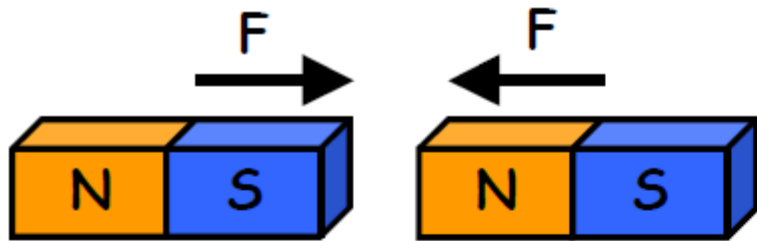


Conversão de Energia I

Capitulo 1 – Revisão
Eletromagnetismo e
Materiais Magnéticos

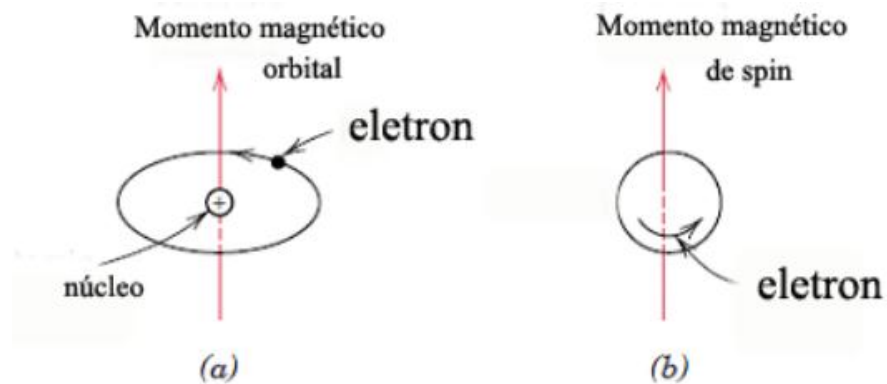
1. O princípio do Imã





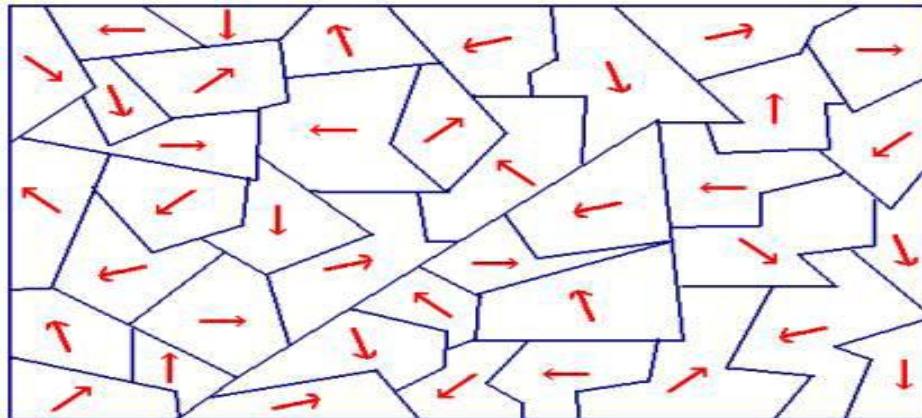
- As propriedades magnéticas dos materiais têm sua origem na estrutura eletrônica dos átomos;
- Do ponto de vista clássico, são de dois tipos os movimentos, associados ao elétron que podem explicar a origem dos momentos magnéticos: o momento angular orbital do elétron, e o momento angular do “spin” do elétron;
- Lembrando: Momento é a medida de quanto uma força que age em um objeto faz com que ele gire.

- Se, durante a formação do material, as moléculas assumem uma orientação única ou predominante, os efeitos magnéticos de cada ímã molecular se somam, dando origem a um **ímã com propriedades magnéticas naturais**.
- Na fabricação de ímãs artificiais, as moléculas desordenadas de um material sofrem um processo de orientação a partir de forças externas.



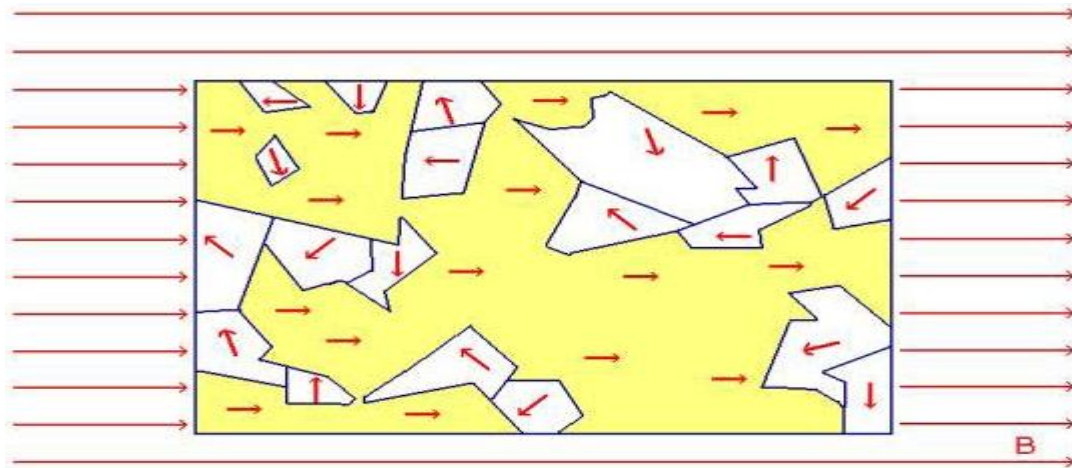
- A observação de um ímã ao microscópio, revelaria a composição por pequenas regiões, na sua maioria com 1mm de largura ou comprimento, que se comportam como um pequeno ímã independente, com os seus dois pólos.
- Em materiais desmagnetizado os domínios estão desalinados, ou seja, estão numa disposição aleatória.

- Os efeitos de um domínio cancela o de outro e o material não apresenta um efeito magnético resultante



- Quando submetidos a campos magnéticos externos estes materiais têm a maioria de seus **domínios alinhados** ao campo externo.
- Aumento dos domínios que se encontravam Alinhados à direção do campo em detrimento daqueles domínios que apresentavam direções opostas.

- O material com os seus domínios alinhados age como um ímã

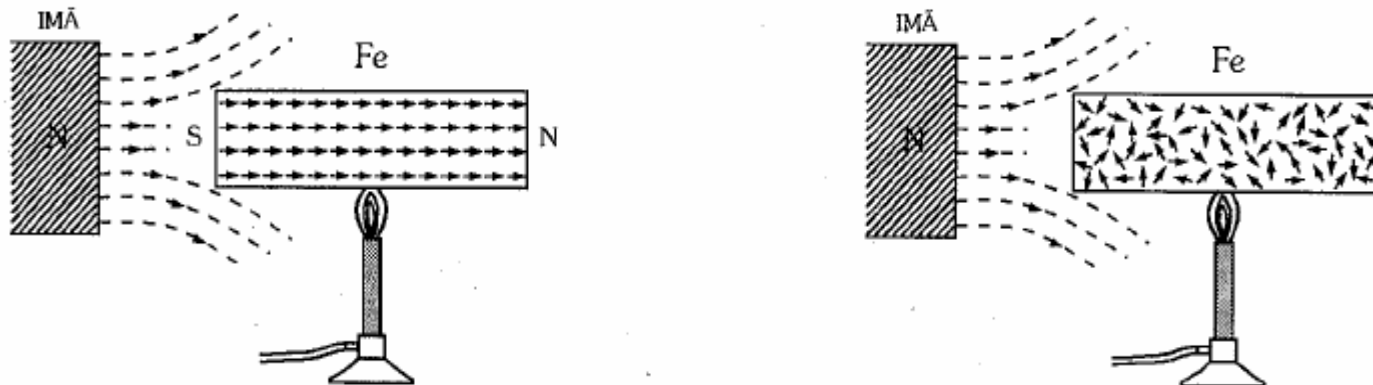


Uma vez conseguida a orientação dos domínios magnéticos de um metal, afastando a fonte magnética, podemos ter basicamente dois fatos:

- A maioria dos domínios magnéticos do metal retorna ao estado de orientação desorganizado, → **material Magneticamente Mole**
- A maioria dos domínios magnéticos do metal mantém o estado de orientação adquirido da fonte magnética → **material Magneticamente Duro**

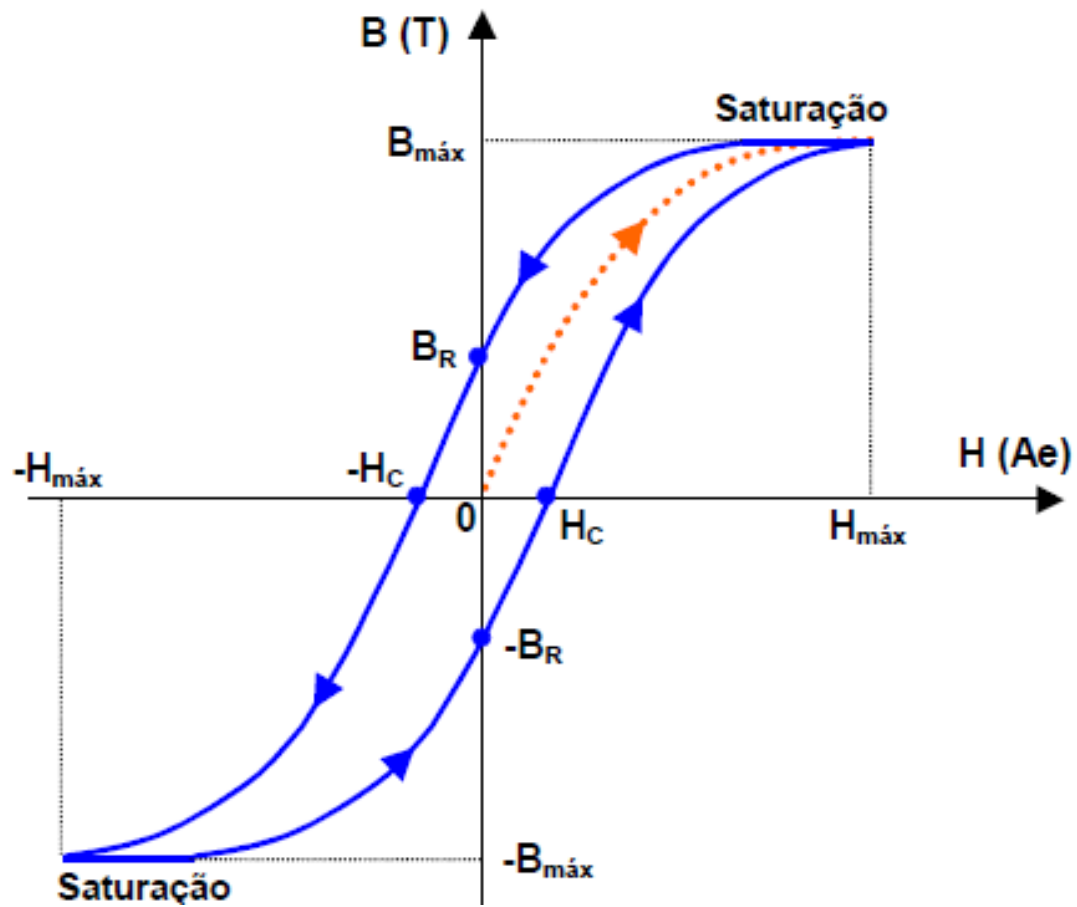
Perda das propriedades magnéticas:

- Por temperatura (aprox. 770°C)
- Choque mecânico



Dependendo da força da indução magnética que o imã promove sob o metal, este pode ter os seus átomos orientados até um determinado limite.

- Esse limite é denominado de **Saturação Magnética**
- Mesmo aumentando a força de indução, não aumenta o número de domínios orientados



2. Comportamento Magnético

SUBSTÂNCIAS FERROMAGNÉTICAS:

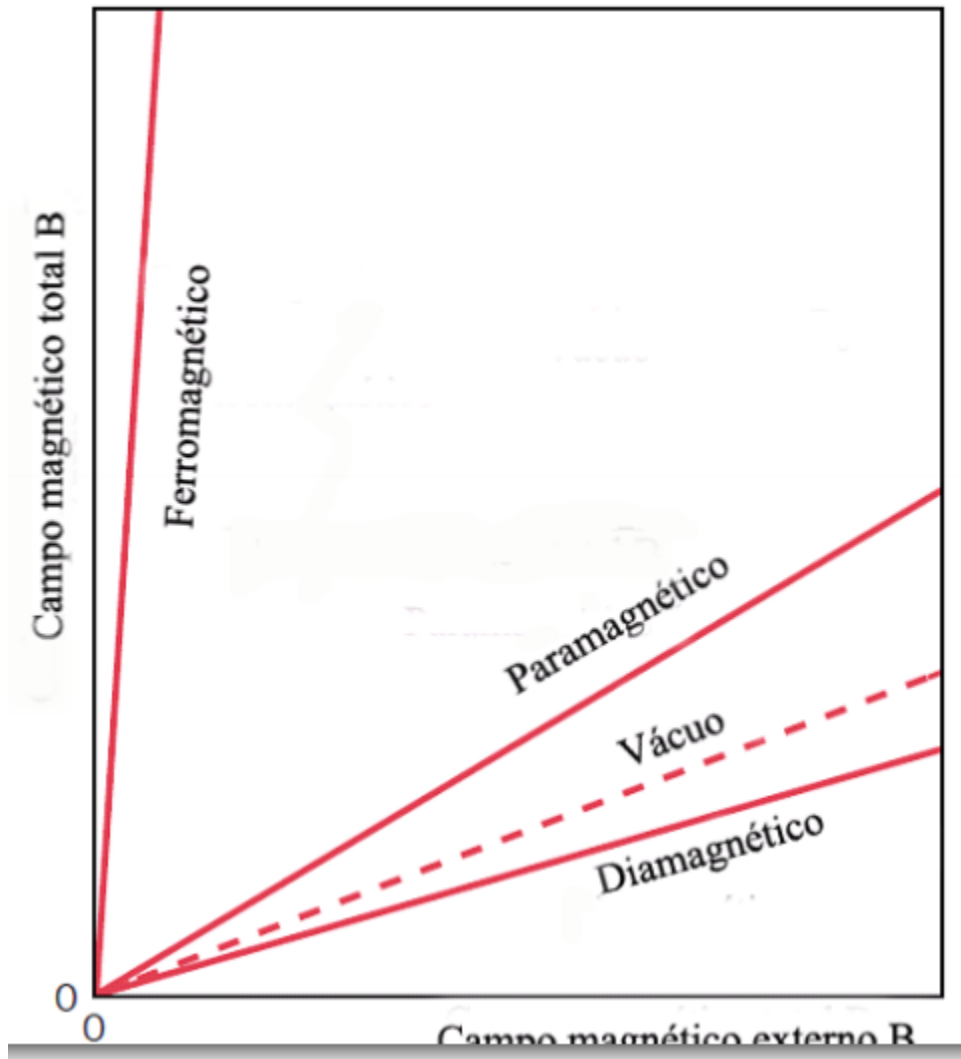
- os domínios magnéticos são fortemente influenciados pela presença de ímãs;
- Os domínios ficam majoritariamente orientados no mesmo sentido do campo aplicado
- São fortemente atraídos por um ímã
- Exemplos: ferro, aços especiais, cobalto, níquel, e algumas ligas (alloys) como Alnico e Permalloy, entre outras;

SUBSTÂNCIAS PARAMAGNÉTICAS:

- Os domínios magnéticos ficam fracamente orientados no mesmo sentido do campo magnético aplicado
- Força de atração entre a substância e o ímã é muito fraca
- Exemplos: alumínio, sódio, manganês, estanho, cromo, platina, paládio, oxigênio líquido, etc.

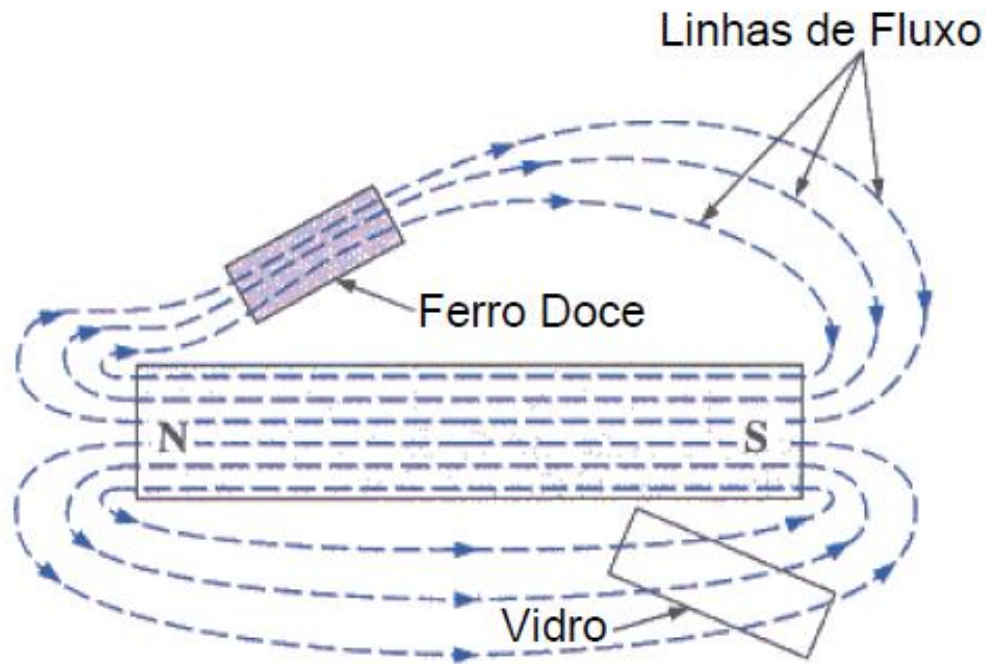
SUBSTÂNCIAS DIAMAGNÉTICAS:

- Os domínios magnéticos sofrem uma pequena influência do campo magnético, ficando fracamente orientados no sentido contrário ao campo aplicado
- Possuem um efeito magnético tão pequeno que se torna difícil precisá-lo.
- Surge uma força de repulsão fraca entre o imã e a substância diamagnética
- Exemplos: cobre, água, mercúrio, ouro, prata, bismuto, antimônio, zinco, cloreto de sódio (NaCl), etc.;
- O bismuto é a substância mais altamente diamagnética que se conhece
 - A permeabilidade magnética do bismuto é de 0,9998

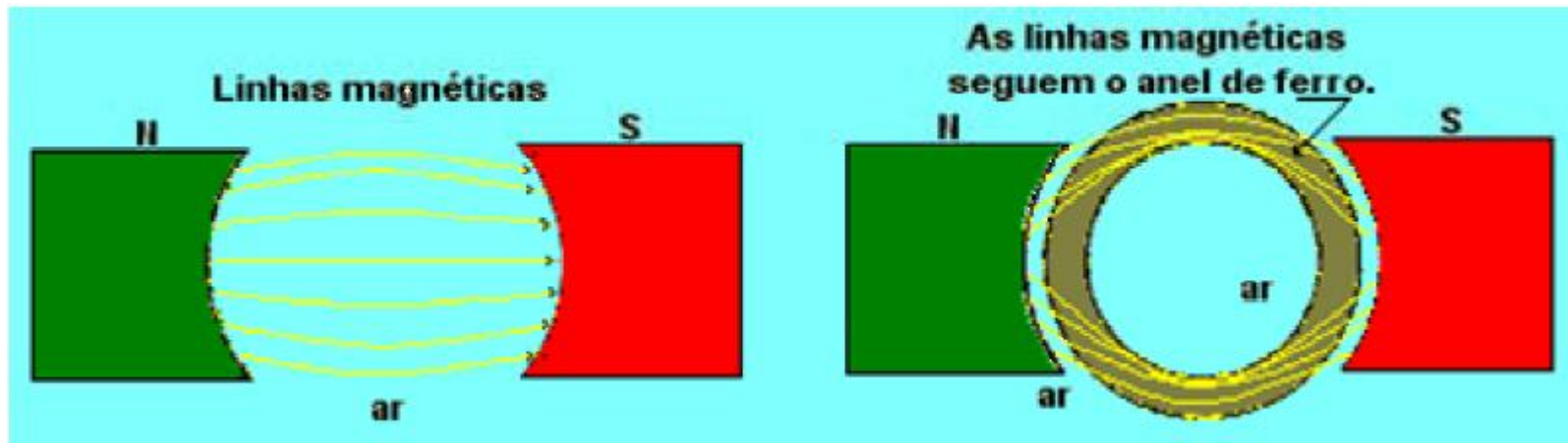
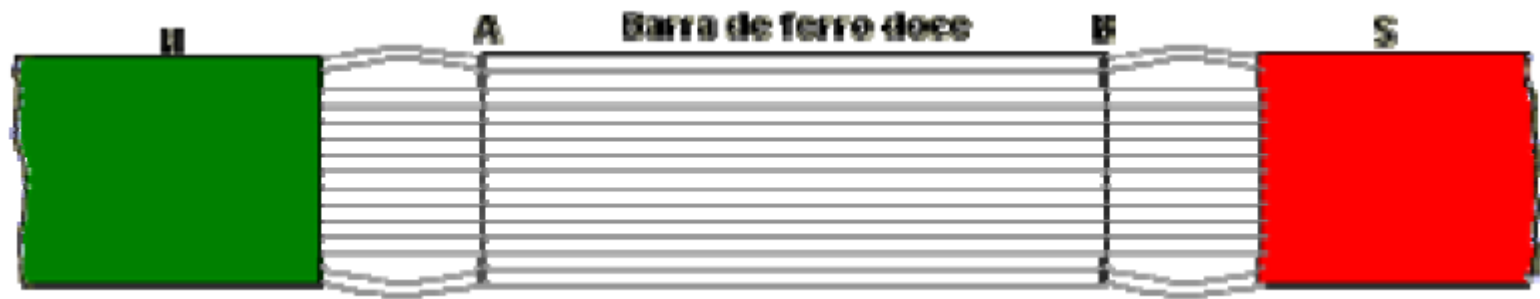


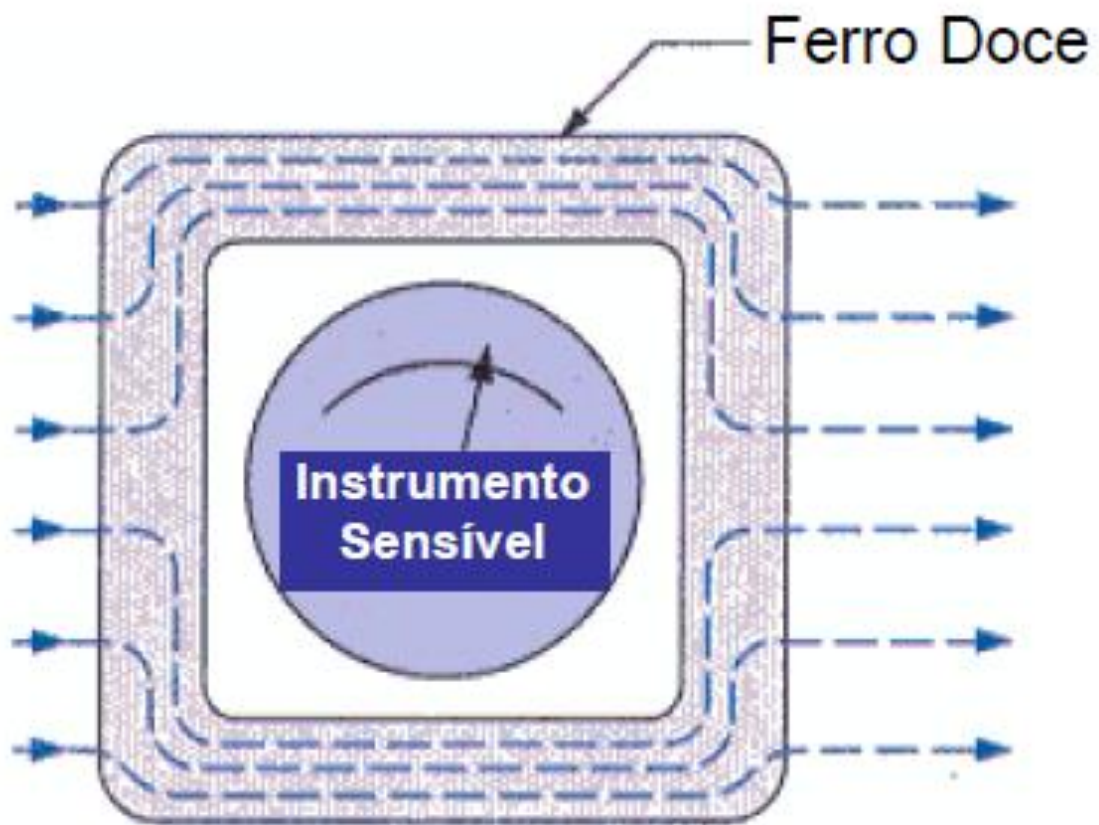
- Se uma substância não magnética for colocada sob a presença de um campo, haverá uma alteração imperceptível na distribuição das linhas de campo;
 - Seu comportamento será parecido ao do vácuo ou o do ar
- Contudo, se um material, como o ferro, for submetido a presença de um campo, as linhas de força passarão preferencialmente pelo ferro ao invés do ar.
 - As linhas de força se concentram com maior facilidade nos materiais magnéticos Maior Permeabilidade Magnética

Portanto, a presença de um material magnético na região de um ímã, pode alterar a distribuição das linhas de campo



Essa perturbação na distribuição das linhas de campo é utilizada para blindar instrumentos





3. Permeabilidade Magnética

A capacidade que os materiais possuem de perturbar a distribuição das linhas de força é uma característica do material e é denominada de PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

- Permeabilidade magnética (μ): é uma medida da facilidade com que as linhas de campo podem atravessar um dado material está relacionada com a intensidade de magnetização.
- A intensidade de magnetização varia em função da intensidade do campo aplicado
- A permeabilidade do vácuo é tomada como referência $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [henry/m] ou [Wb/A.m]
- A permeabilidade de materiais magnéticos lineares é expressa em relação ao vácuo e a μ_r , permeabilidade relativa: $\mu_m = \mu_r \mu_0$
- Valores típicos de μ_r variam de 2.000 a 80.000 – para os materiais utilizados em transformadores e máquinas rotativas

Permeabilidade Magnética

Material	Permeabilidade magnética relativa (μ_R)	Classificação magnética
Bismuto	0,999833	diamagnética
Água	0,999991	diamagnética
Cobre	0,999995	diamagnética
Ar	1,000000	paramagnética
Oxigênio	1,000002	paramagnética
Alumínio	1,000021	paramagnética
Cobalto	170	ferromagnética
Níquel	1.000	ferromagnética
Ferro	7.000	ferromagnética
Permalloy ¹	100.000	ferromagnética

(1) Liga composta por ferro (17%), molibdênio (4%) e níquel (79%).

- Permeabilidade Relativa de Materiais Ferromagnéticos

Tipo de Material	Permeabilidade Relativa, μ_R
Ferro Comercial	9.000
Ferro Purificado	200.000
Ferro Silício	55.000
Permalloy	1×10^6
Supermalloy	1×10^7
Permendur	5.000
Ferrite	2.000

Imãs ou magnetos podem ser classificados em duas categorias principais:

- **PERMANENTES:** têm a propriedade de conservar seu magnetismo indefinidamente e não precisam ser excitados por ampére-espiras (ampére-voltas);
- **ELETROMAGNETOS:** o efeito magnético depende da presença e ação de correntes elétrica.

- Os ímãs permanentes são construídos de aço endurecido e suas ligas, tais como: cobalto e o alumínio.
 - Estes metais, quando isolados possuem um pobre coeficiente magnético.
- Os eletromagnetos, são fabricados de ferro doce ou de aço da mesma natureza

Imãs Permanentes:

- Pedra Imã ou Pedra Guia
- compostos de um minério de ferro, conhecido em metalúrgica por MAGNETITA que é um óxido de ferro Fe_3O_4

Imãs Artificiais Permanentes:

- Podemos imantar uma peça de AÇO TEMPERADO de duas formas:
 - Contato com um imã natural;
 - Influência de uma corrente elétrica.
- Na imantação o material adquire uma quantidade de magnetismo que fica retido indefinidamente
 - É o que se denomina de imã permanente

- Se uma peça de AÇO ou FERRO DOCE for posta em contato com um ímã permanente ou eletroímã, a mesma só conservará uma pequena quantidade do magnetismo que foi aplicado

RESUMO:

- Efeito magnético durável → AÇO TEMPERADO (e suas ligas);
- Efeito magnético curto → AÇO DOCE ou FERRO
 - O FERRO e o AÇO DOCE respondem às variações da força magnetizante

4. Pólo Magnético e Campo Magnético

- PÓLO MAGNÉTICO: é qualquer superfície da qual saiam ou entrem linhas de força;
- A força magnética exercida sobre uma pequena peça de ferro é proporcional à densidade das linhas de força e atua na direção destas, tomando-se o valor da densidade, segundo um plano perpendicular à direção das linhas
- Na determinação experimental das linhas de força, observa-se que o fluxo parece surgir do pólo Norte para penetrar no pólo Sul da barra

- As linhas continuam seu percurso no interior do imã, de S para N, fechando o circuito
 - Essas linhas recebem o nome de linhas de indução
 - O trajeto completo, percorrido pelas linhas de indução, recebe o nome de CIRCUITO MAGNÉTICO
- A ação do imã se estende até uma região bastante afastada, como pode ser verificada pela influência sobre o ferro ou sobre a corrente elétrica situada nesta região.
- Essa zona de ação magnética é denominada de CAMPO MAGNÉTICO
 - As linhas representam o campo magnético do imã
 - A intensidade do Campo Magnético, em qualquer ponto, está representada pela densidade destas linhas

5. Relutância Magnética

- RELUTÂNCIA (R): é a medida da oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético

$$R = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

Onde:

R – relutância magnética, Ae/Wb (ampére espira por weber);

L – comprimento médio do caminho magnético das linhas de campo, m;

μ - permeabilidade magnética do meio, Wb/A.m;

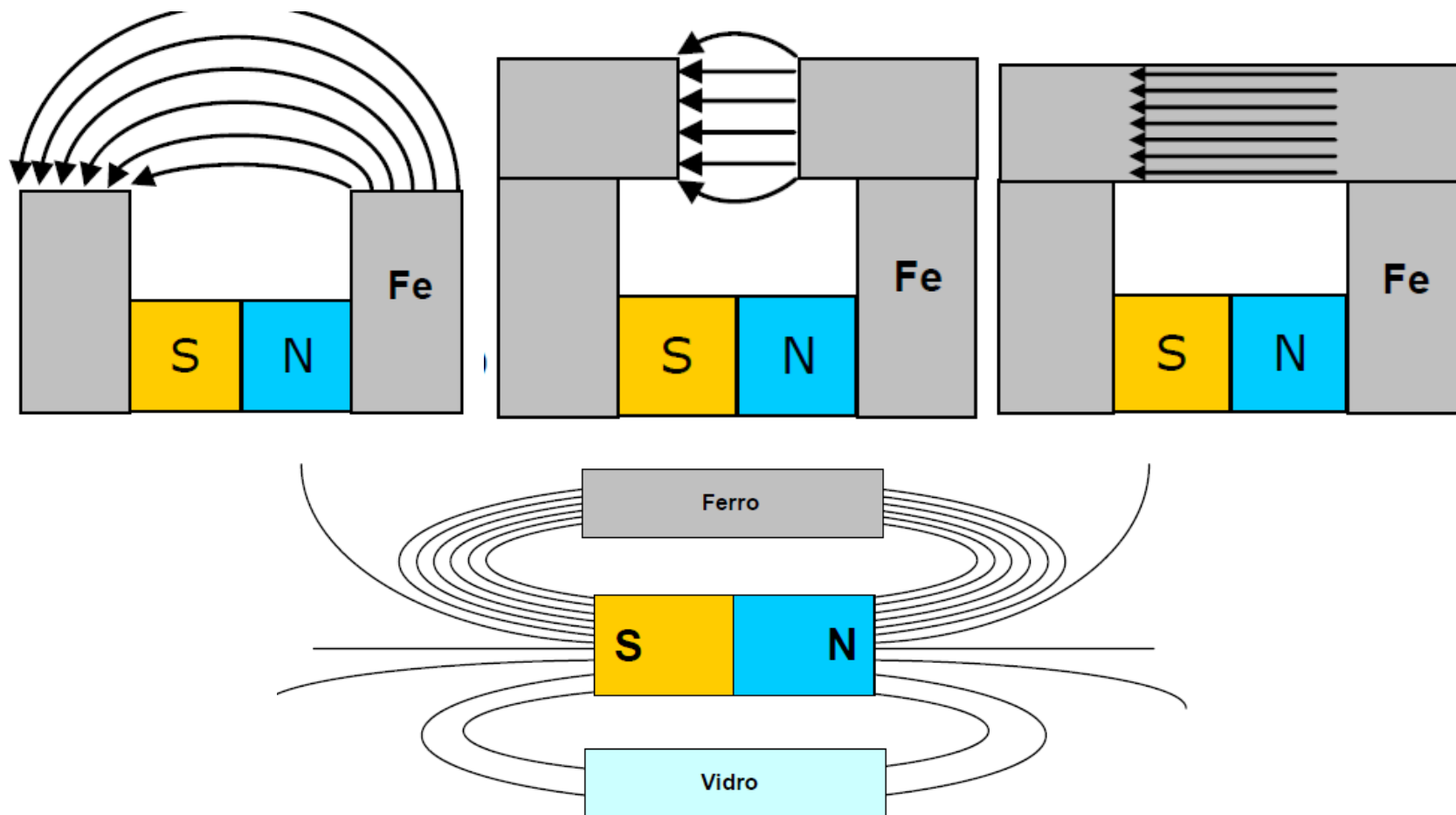
A – área da seção transversal, m².

$R = \rho \frac{l}{A}$ - resistência elétrica

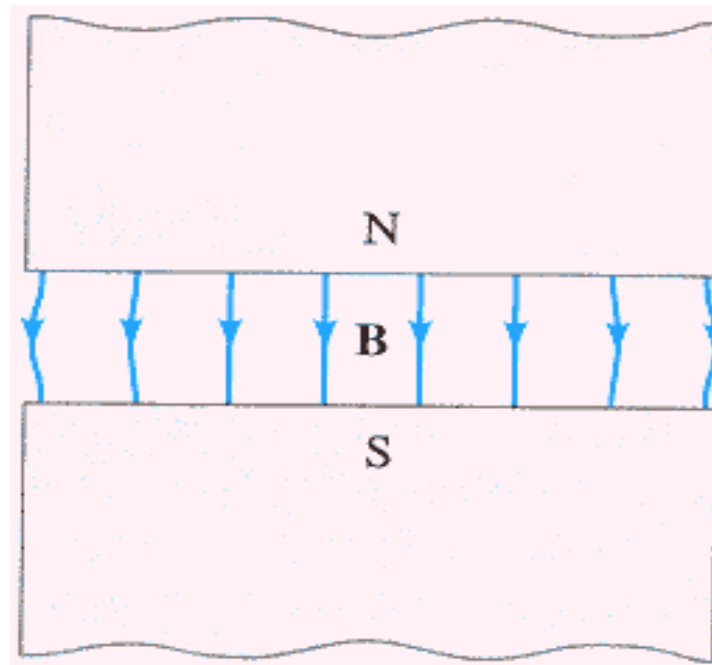
6. Permeância (P)

- É a recíproca da Relutância ($P=1/R$).
- Pode ser definida como sendo aquela propriedade do circuito que permite a passagem do fluxo ou das linhas de indução
- Corresponde a condutância do circuito elétrico

Princípio da Relutância Mínima



- Nas bordas de um elemento magnético há sempre algumas linhas de campo que não são paralelas às outras.
- Estas distorções são denominadas de **“espraiamento”**

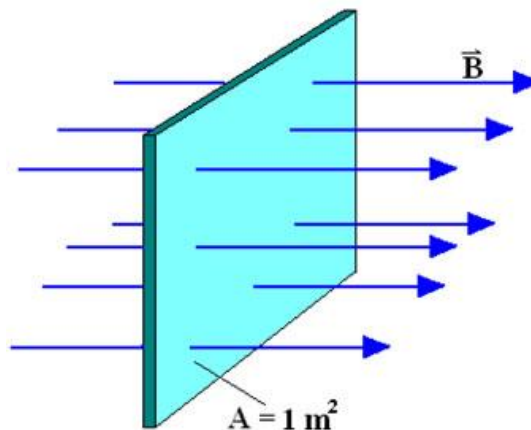


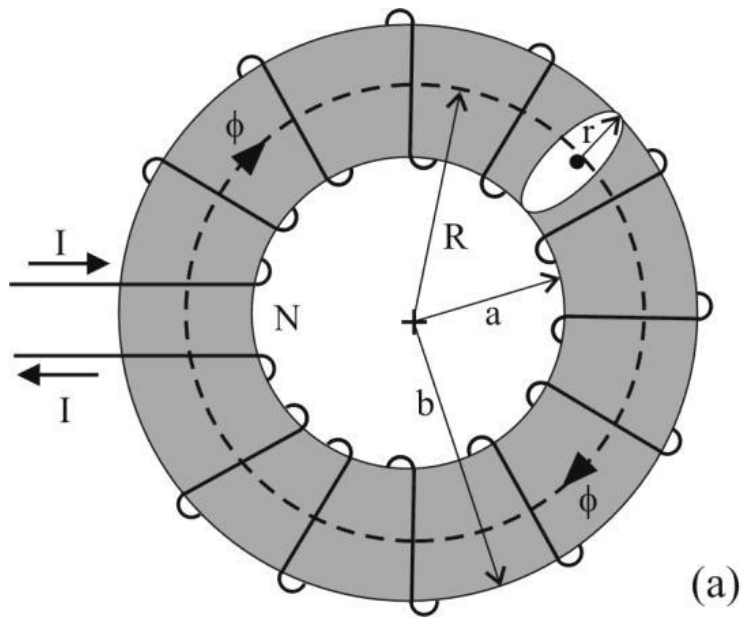
7. Unidades magnéticas/definições

- AMPÉRE-ESPIRA (NI): os ampére-espira que atuam num circuito, são dados pelo produto do número de espiras do condutor e a intensidade de corrente em ampére que passa por ele.
 - Se houver um certo número de ampéres-espiras em oposição aos demais, sua quantidade deve ser subtraída
- FORÇA MAGNETO MOTRIZ (f.m.m.): símbolo F – tende a impulsionar o fluxo magnético através do circuito
 - Comporta-se como a f.e.m. do circuito elétrico;
 - É diretamente proporcional ao número de ampéres-espiras do circuito;
 - Sistema CGS: produto NI por uma constante, o fator $0,4\pi=1,257$
 - $F= 0,4\pi NI=1,257NI$
 - Sistema Internacional: $F=NI=H2\pi R$

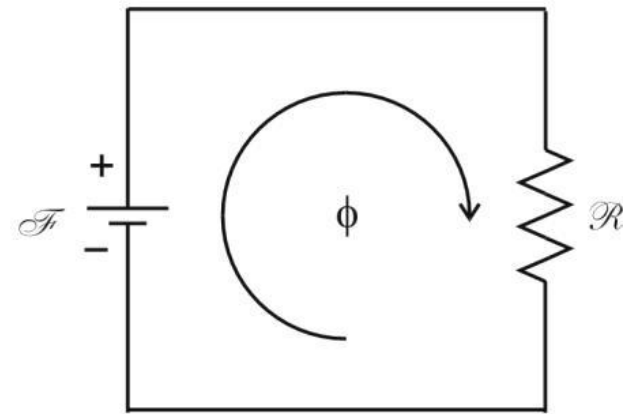
8. FLUXO MAGNÉTICO (Φ)

- É igual ao número total de linhas de indução existentes no circuito magnético
 - É corresponde magnética à corrente no circuito elétrico (analogia)
 - SI: Weber (Wb)
 - Tesla-metro quadrado (Tm^2)
 - Um Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo magnético





(a)



(b)

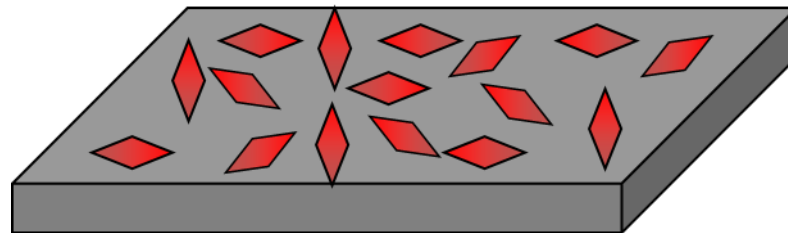
Fenômenos do Eletromagnetismo

São três os principais fenômenos eletromagnéticos e que regem todas as aplicações tecnológicas do eletromagnetismo:

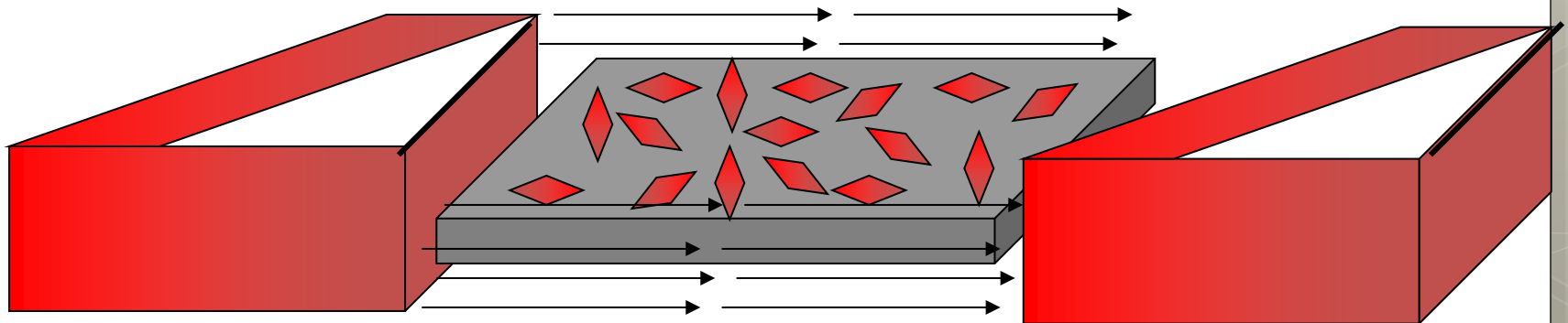
- Condutor percorrido por corrente elétrica produz campo magnético;
- Campo magnético provoca ação de uma força magnética sobre um condutor percorrido por corrente elétrica;
- Fluxo magnético variante sobre um condutor gera (induz) corrente elétrica.

CAMPO MAGNÉTICO

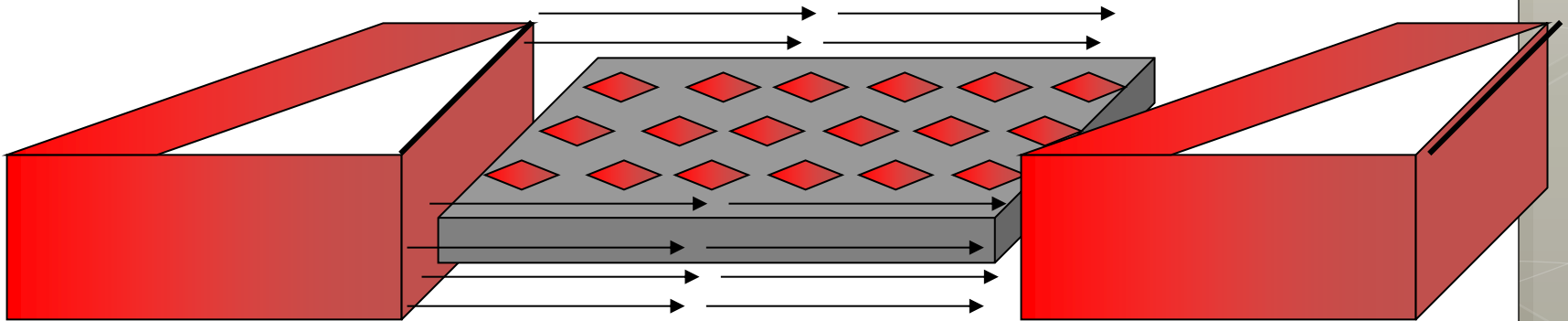
- O espaço ocupado pelas linhas de força é chamado:
- Uma barra de ferro sem magnetização pode ser considerada como tendo um grande número de pequenos ímãs dispostos de maneira desordenada

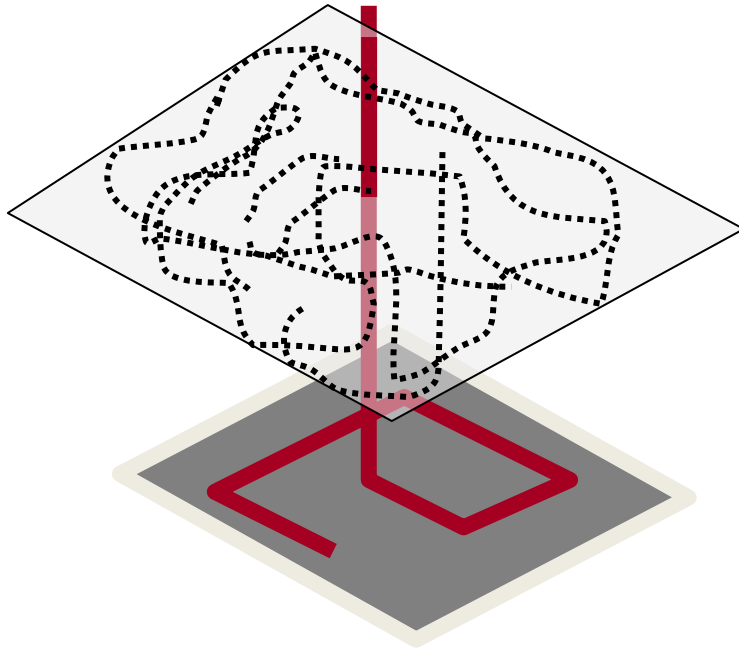


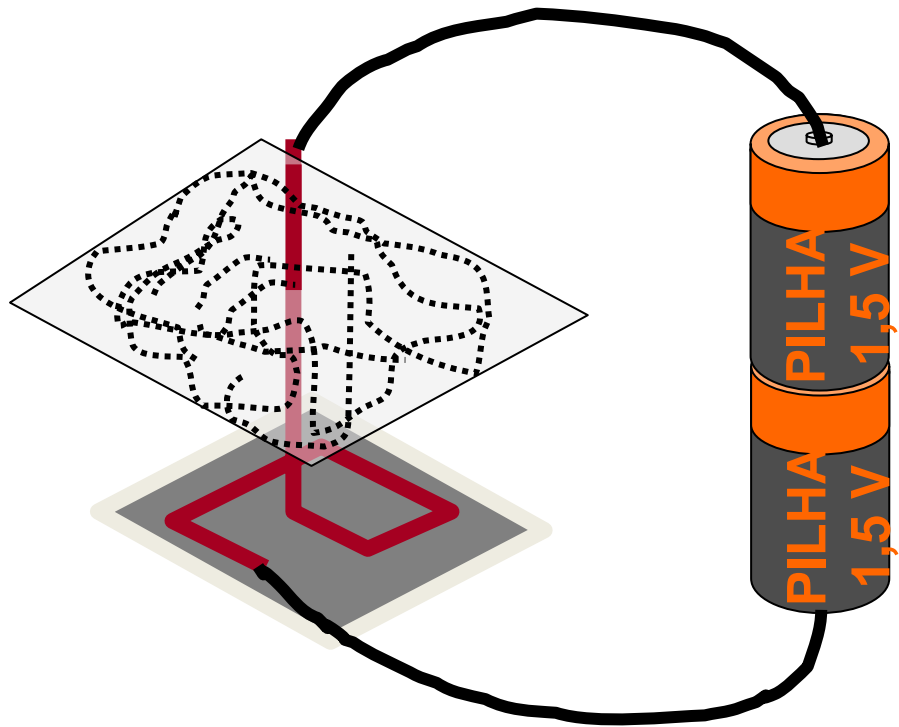
- Quando magnetizamos esta barra, os pequenos ímãs se alinham, polarizando o material



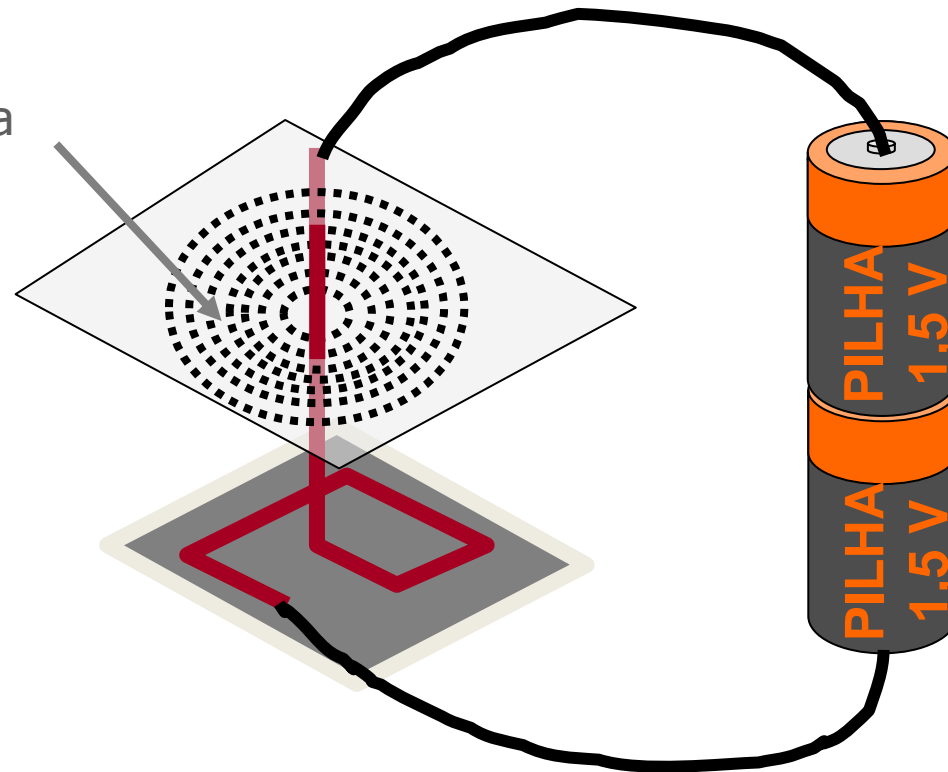
- Quando magnetizamos esta barra, os pequenos ímãs se alinham, polarizando o material





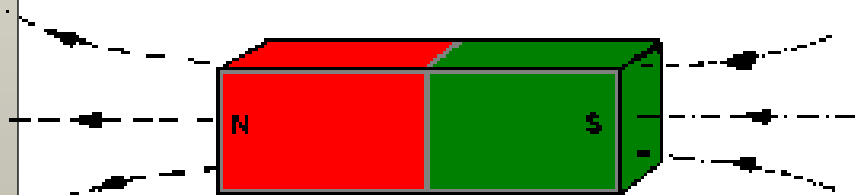


Linhas de força

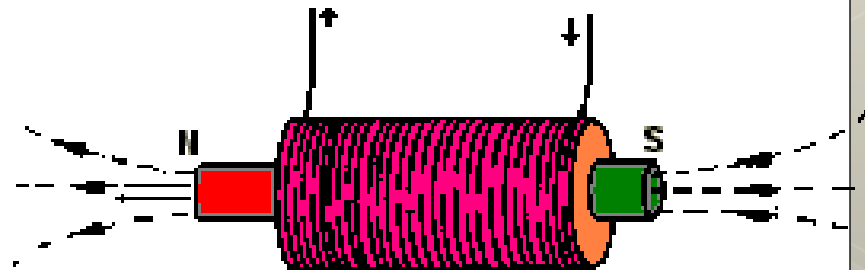


- Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, ela cria em torno deste um campo magnético.

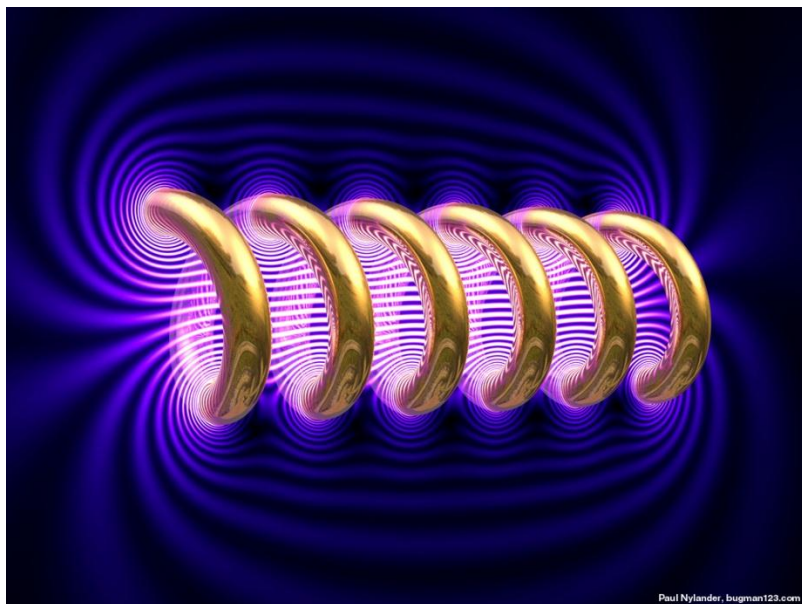
Imã natural e eletroímã.



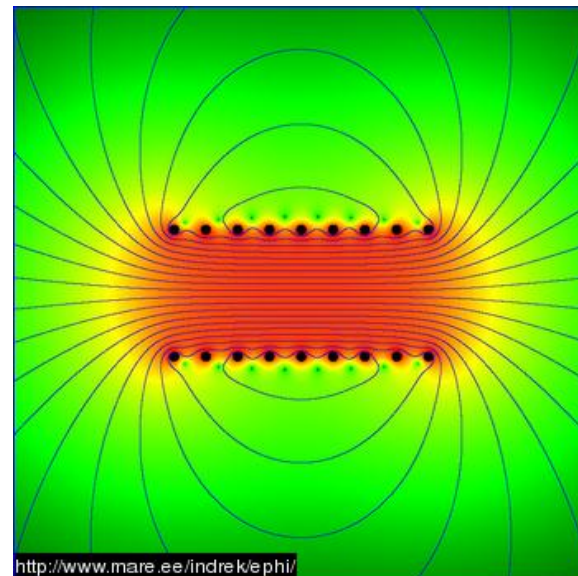
Ímã permanente



Eletroímã

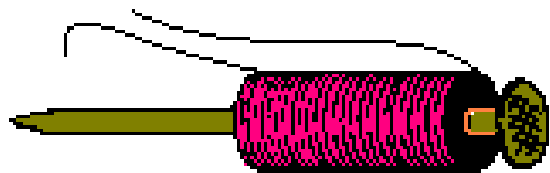


Paul Nylander, bugman123.com

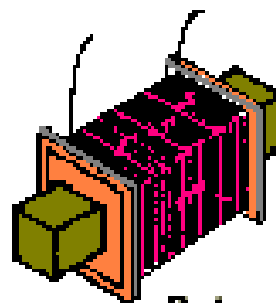


<http://www.mare.ee/indrekephi/>

Exemplos de eletroímã

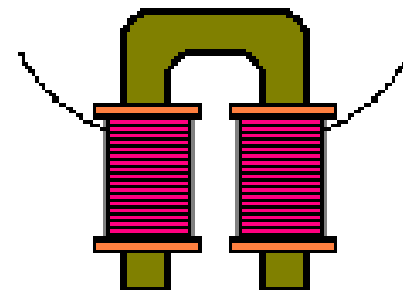


Toróide



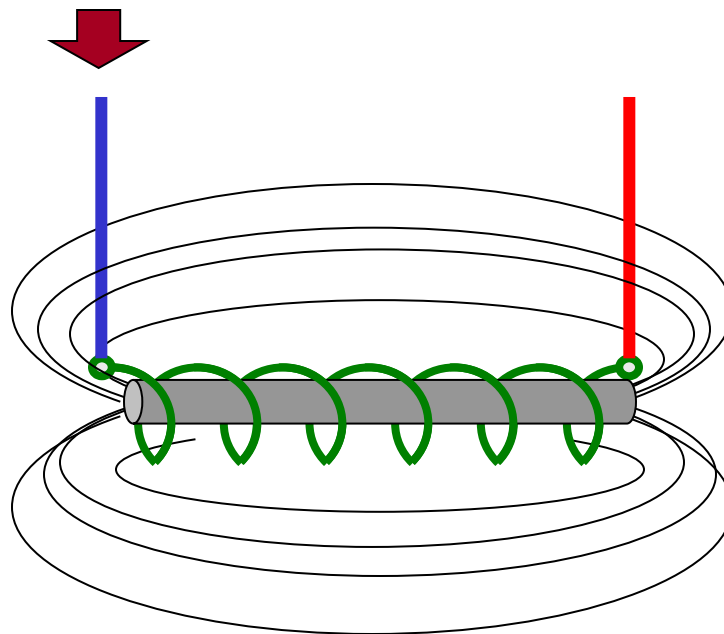
Reto

Ferradura



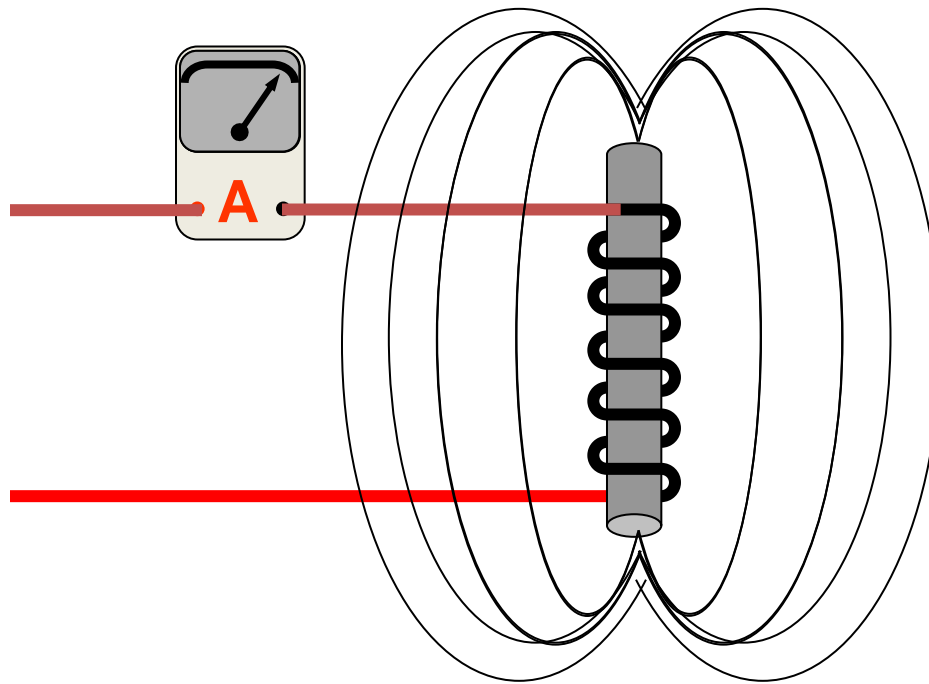
Como aumentar o
campo magnético de uma
bobina?

- Colocando um núcleo de ferro no interior da bobina

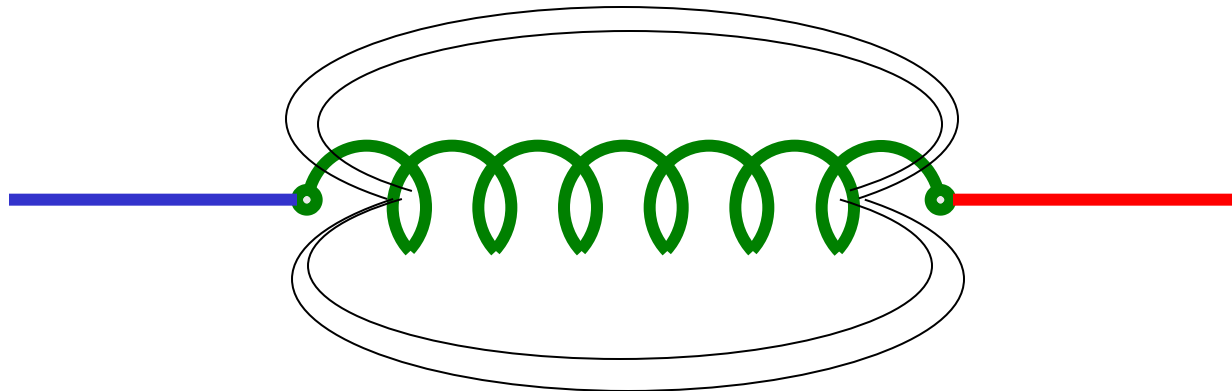


O núcleo de ferro concentra as linhas de força do campo magnético

Aumentando a corrente elétrica

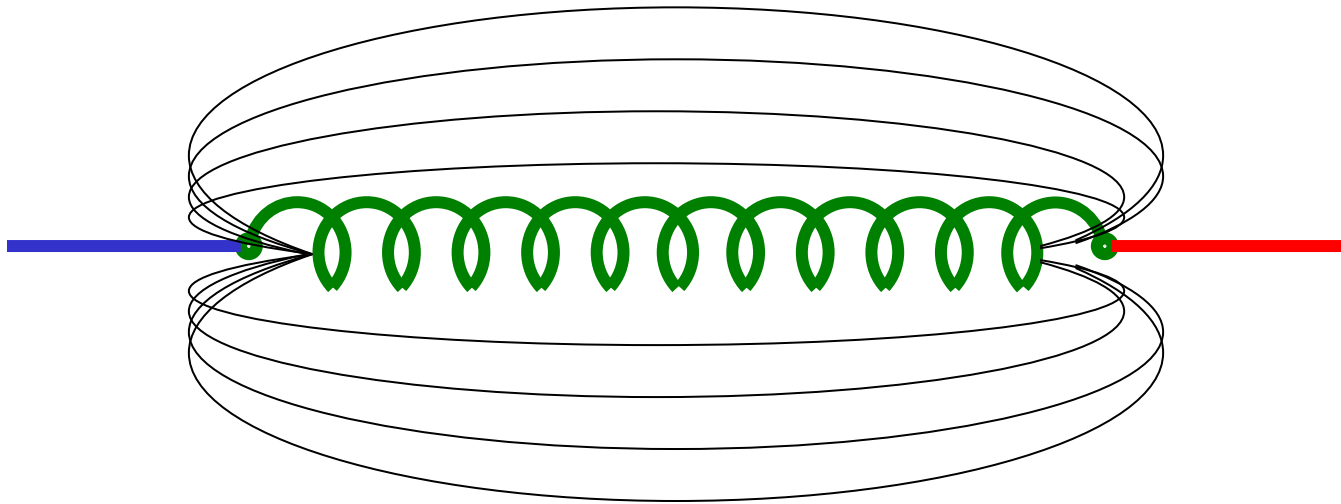


Aumentando o número de espiras da bobina



600 Espiras

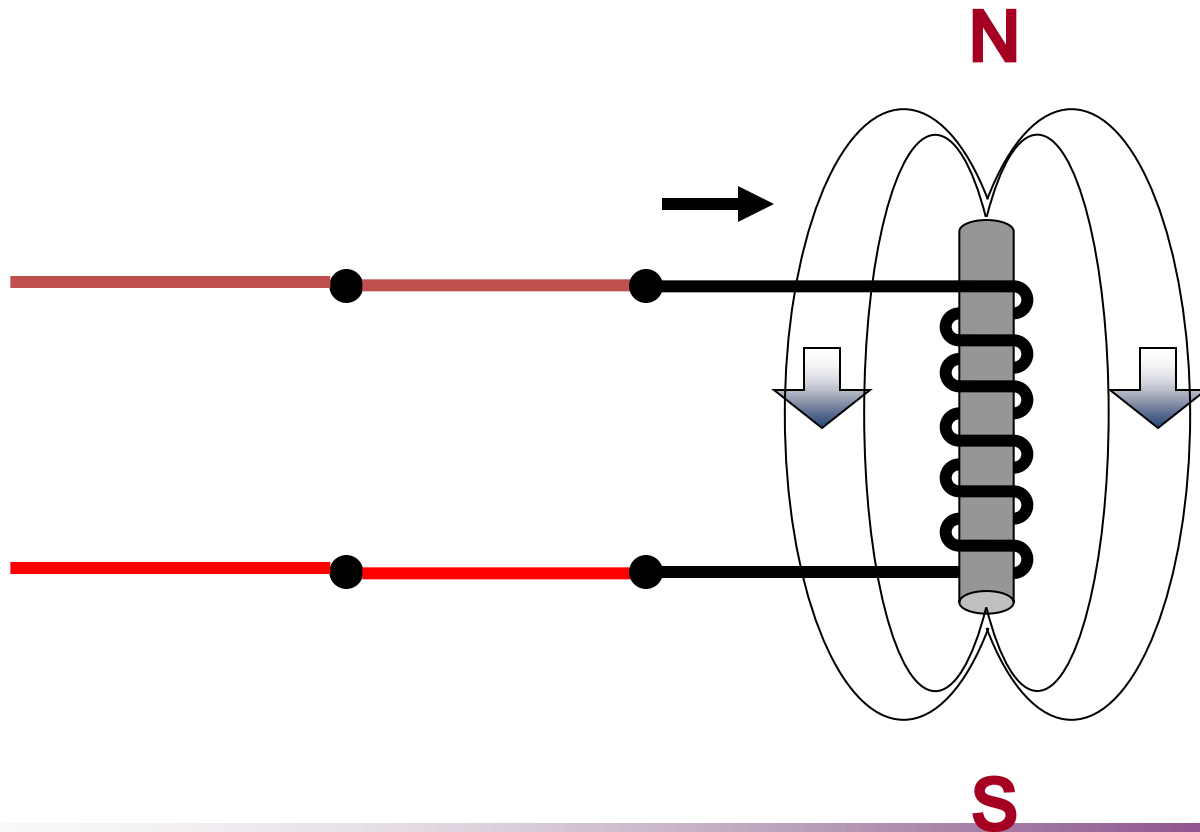
Aumenta o campo magnético

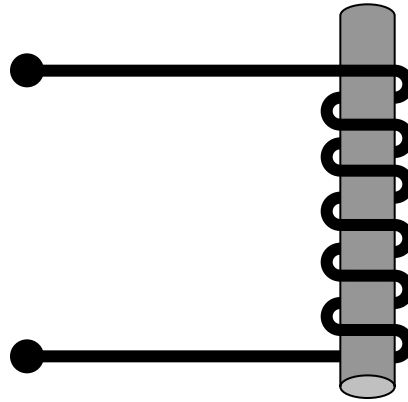


1.200 Espiras

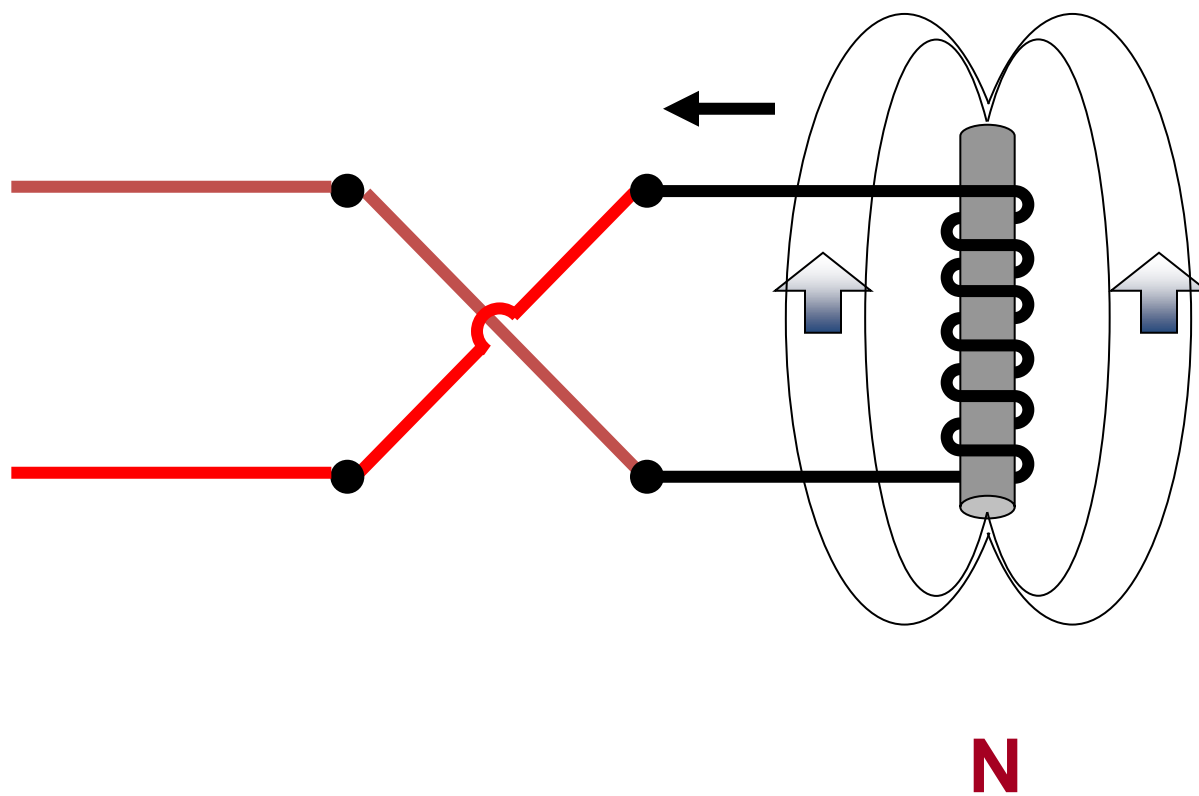
Polaridade do campo magnético

Sentido das linhas de forças

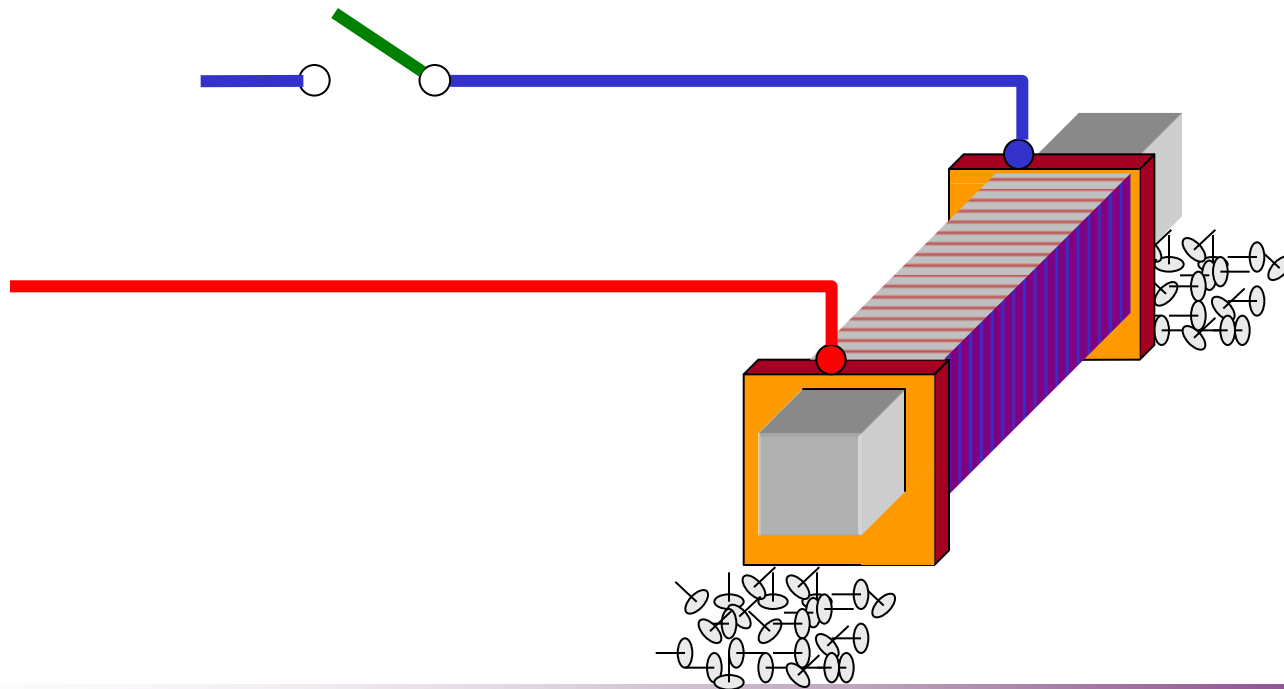




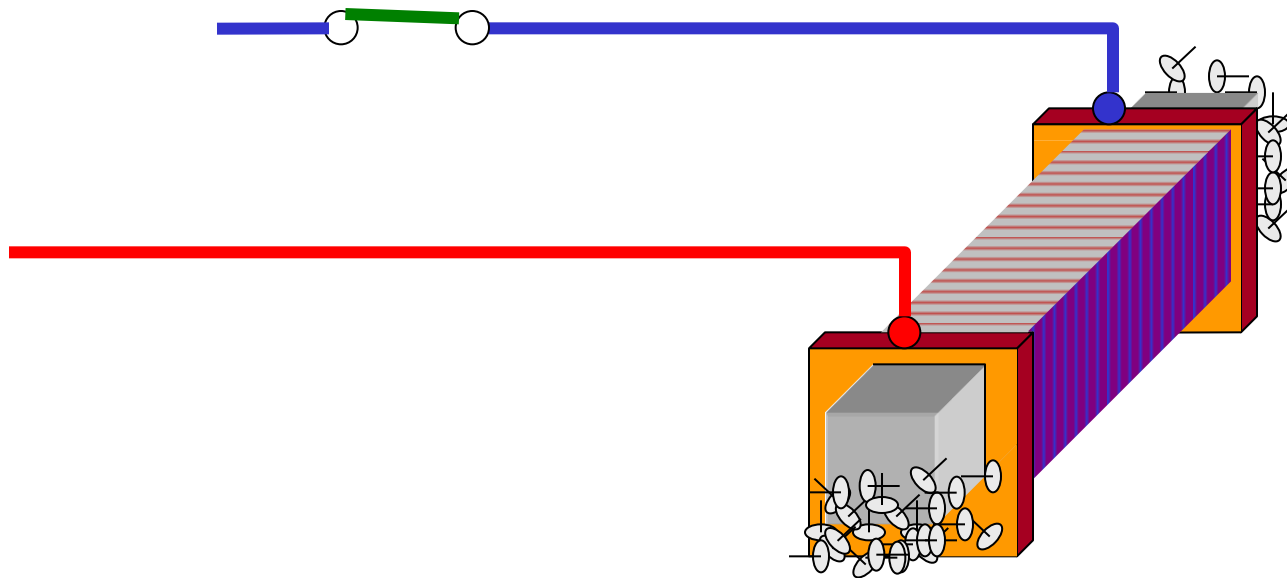
Invertendo o sentido da corrente



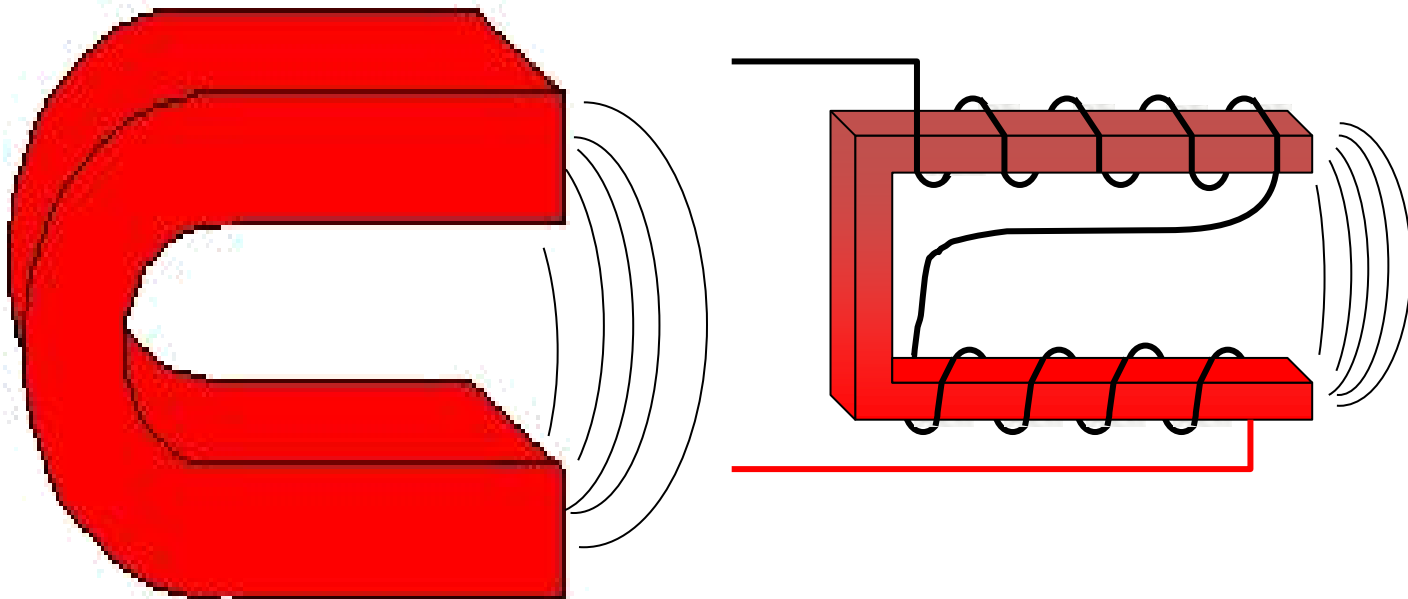
O eletroímã só age como ímã se percorrido por uma corrente elétrica



O eletroímã só age como ímã se percorrido por uma corrente elétrica



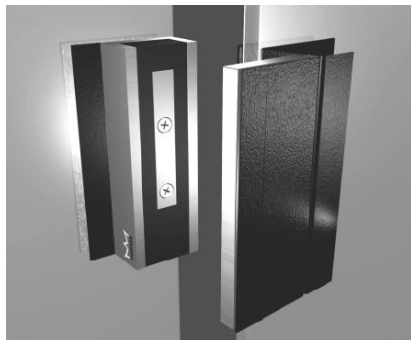
- Podemos conseguir com um pequeno eletroímã o mesmo campo magnético de um ímã natural possante



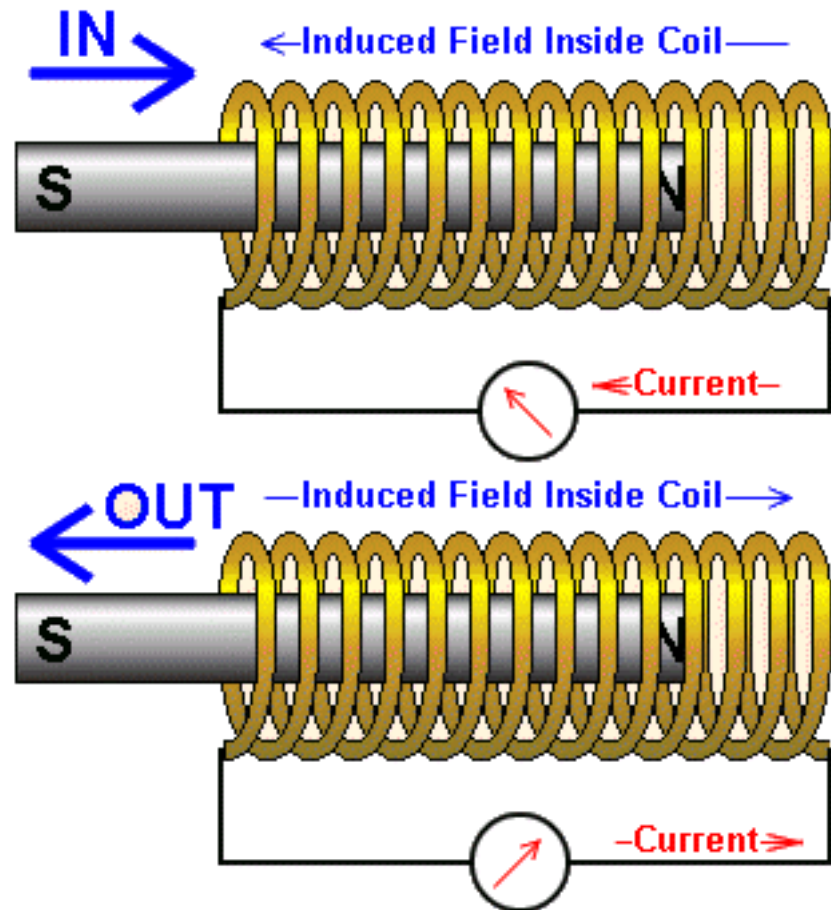
Aplicações...



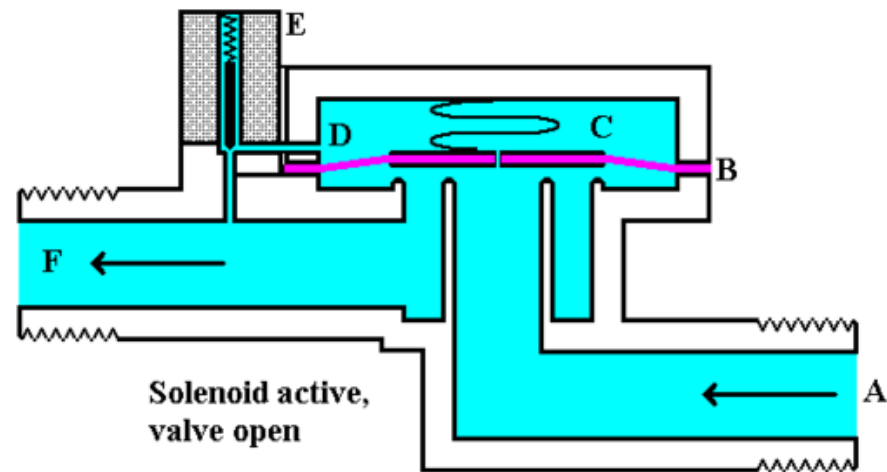
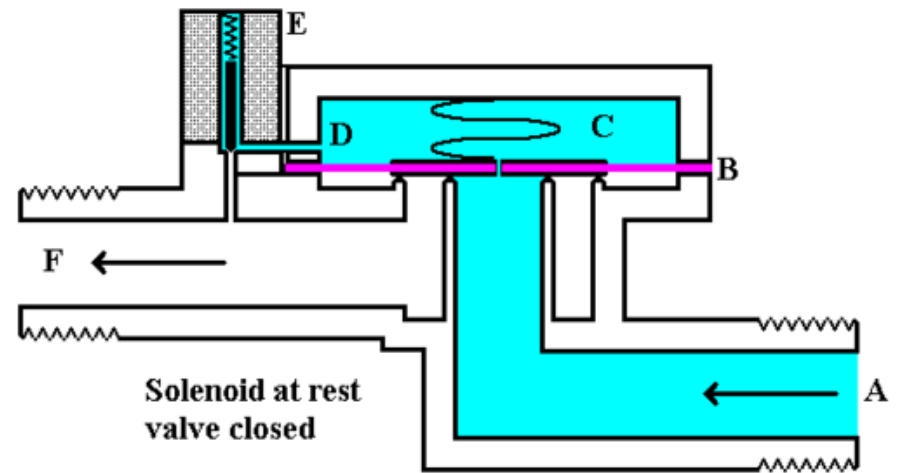
Aplicações...



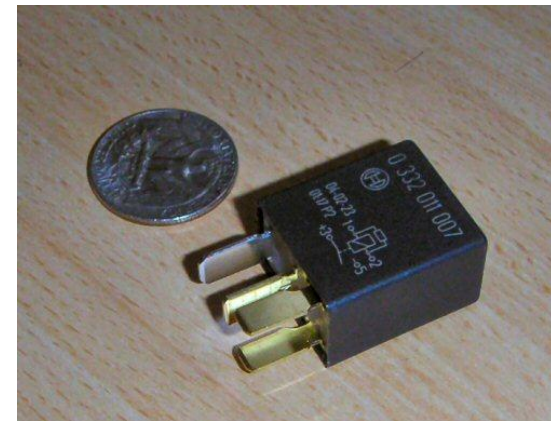
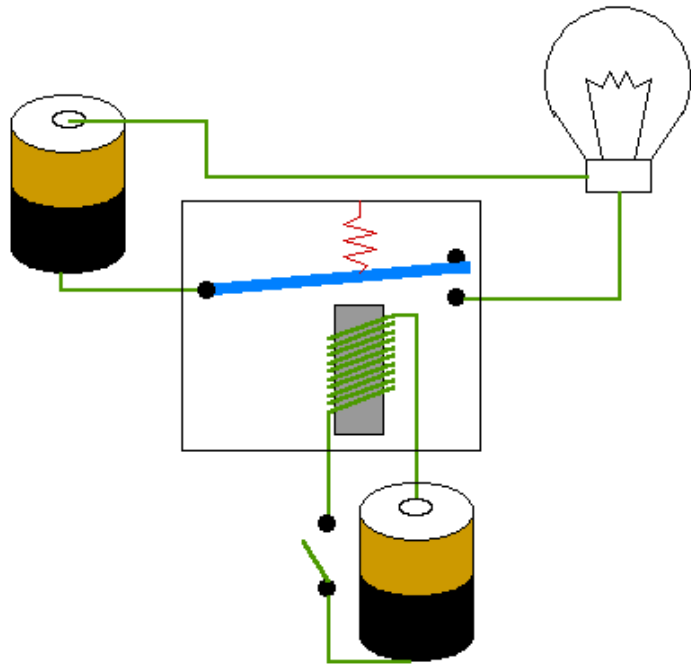
Solenóides



Válvulas Solenóides



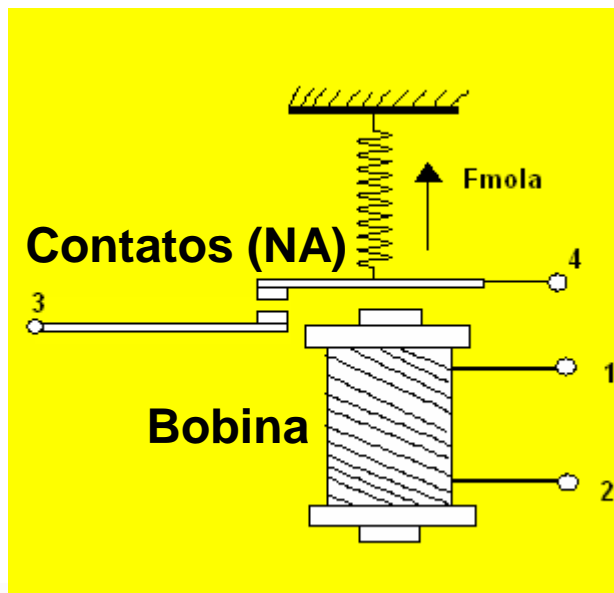
Relé



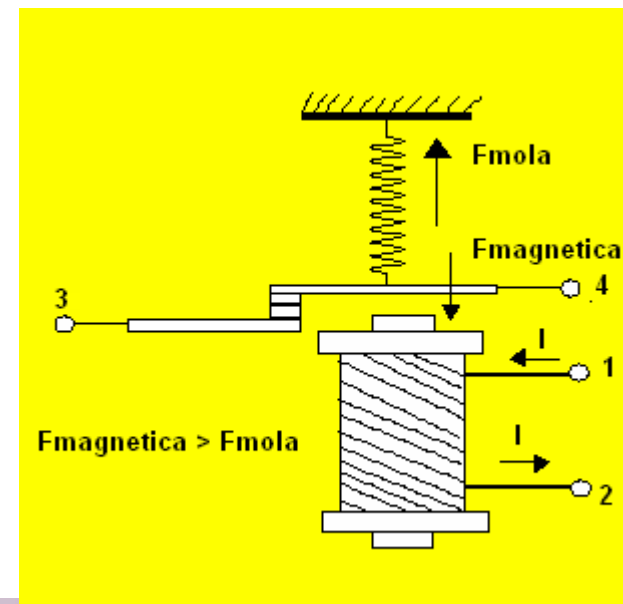
Relé

- Dispositivo eletromecânico que permite controlar uma corrente de grande valor a partir de uma pequena corrente;
- São constituídos de uma bobina e de um sistema de contatos que podem ser abertos (ou fechados) quando uma corrente passar pela bobina

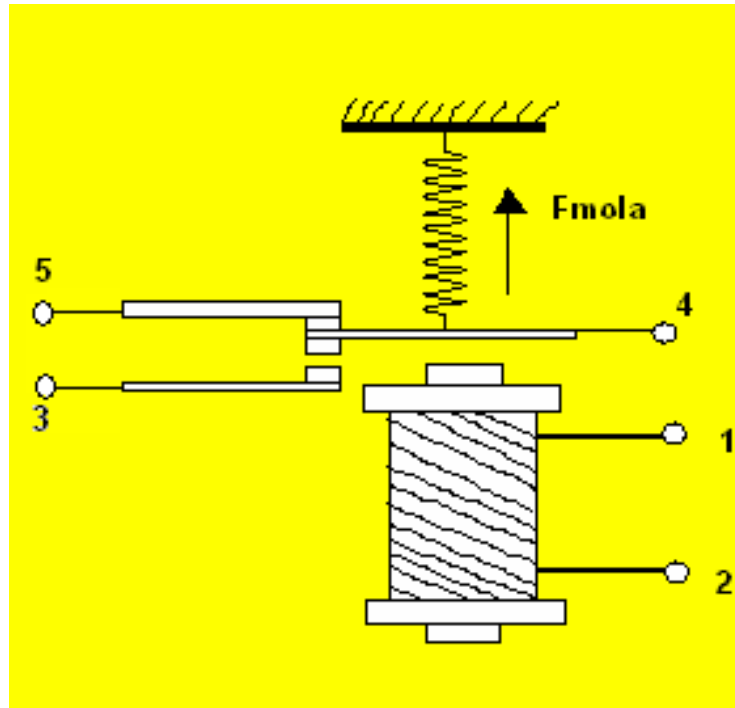
Condição Normal ($I=0$)



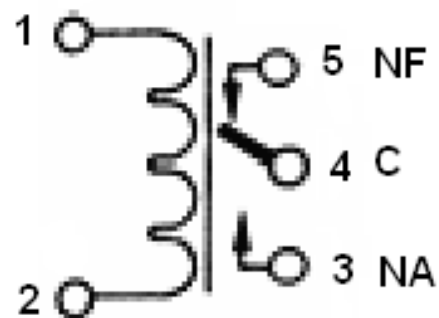
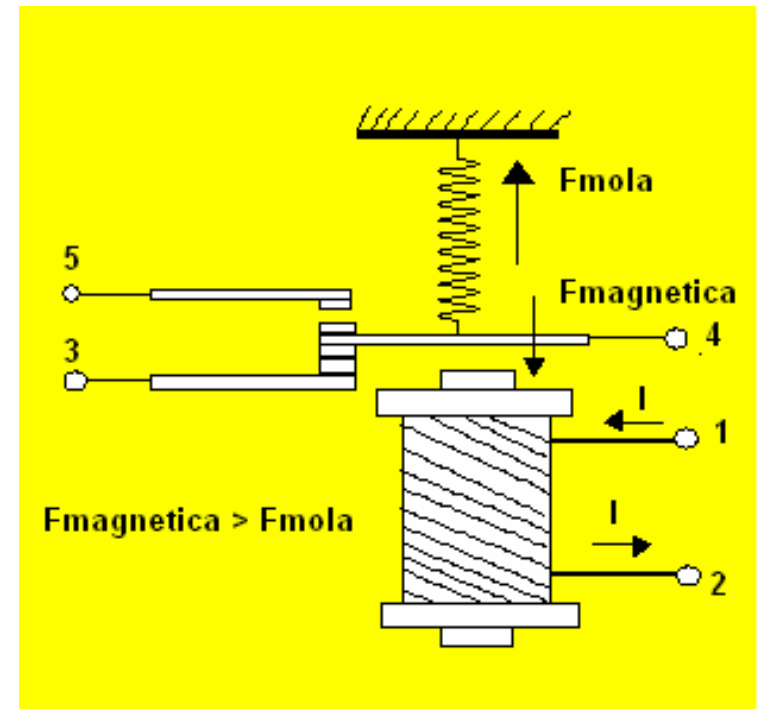
Relé Energizado ($I \neq 0$)



Condição Normal

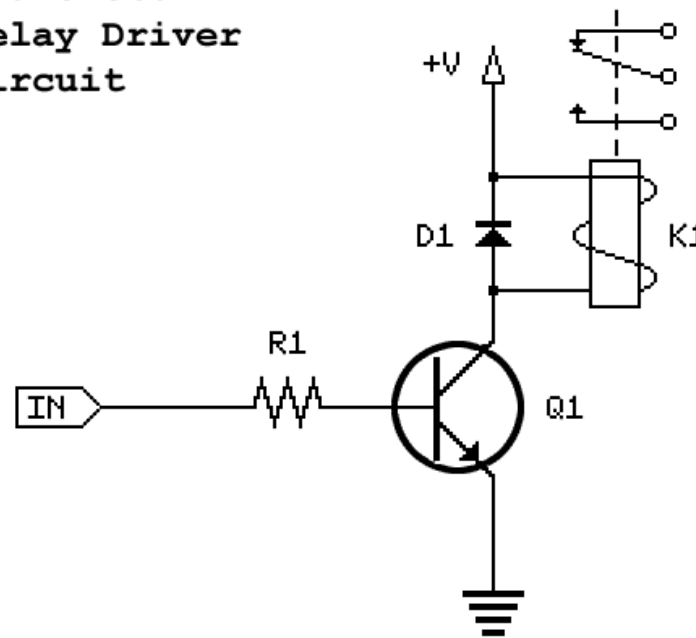


Rele Energizado



Relé - Circuito básico de acionamento

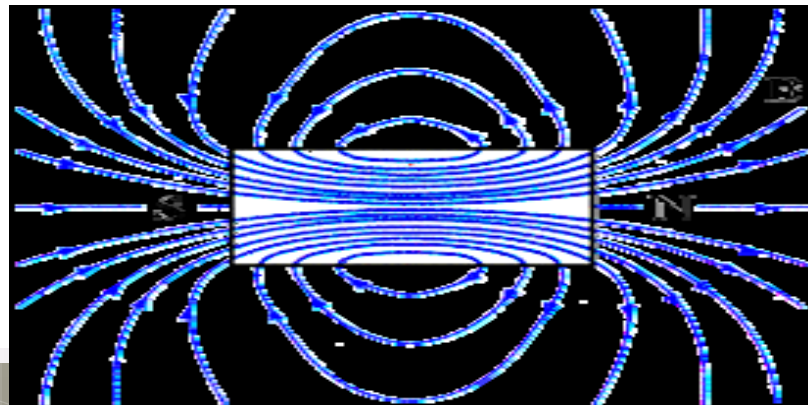
Basic
Transistor
Relay Driver
Circuit



CAMPO MAGNÉTICO

É a região ao redor de um imã, na qual se observa um efeito magnético

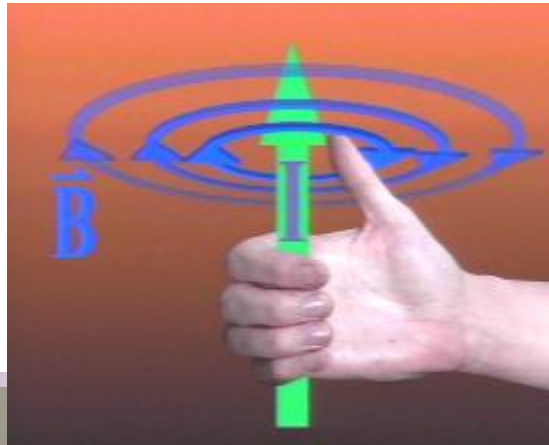
- Esse efeito é percebido pela ação de uma Força Magnética de atração ou de repulsão
- A representação visual do Campo Magnético é feita através de **Linhas de Campo Magnético**, também conhecidas por **Linhas de Indução Magnética** ou ainda por **Linhas de Fluxo Magnético**
- As linhas de campo magnético são linhas fechadas que saem do pólo norte e entram no pólo sul

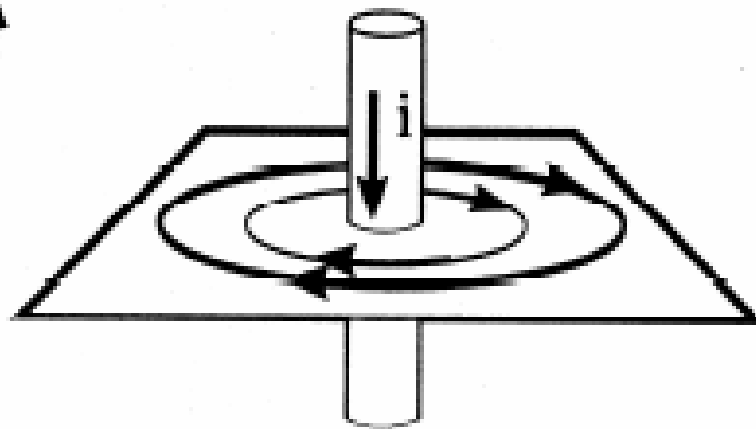
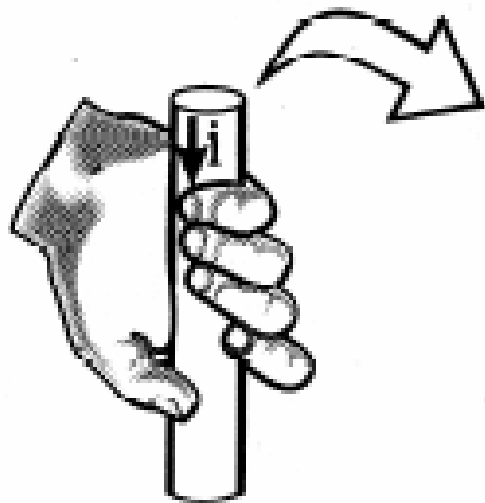


Regra de Ampère

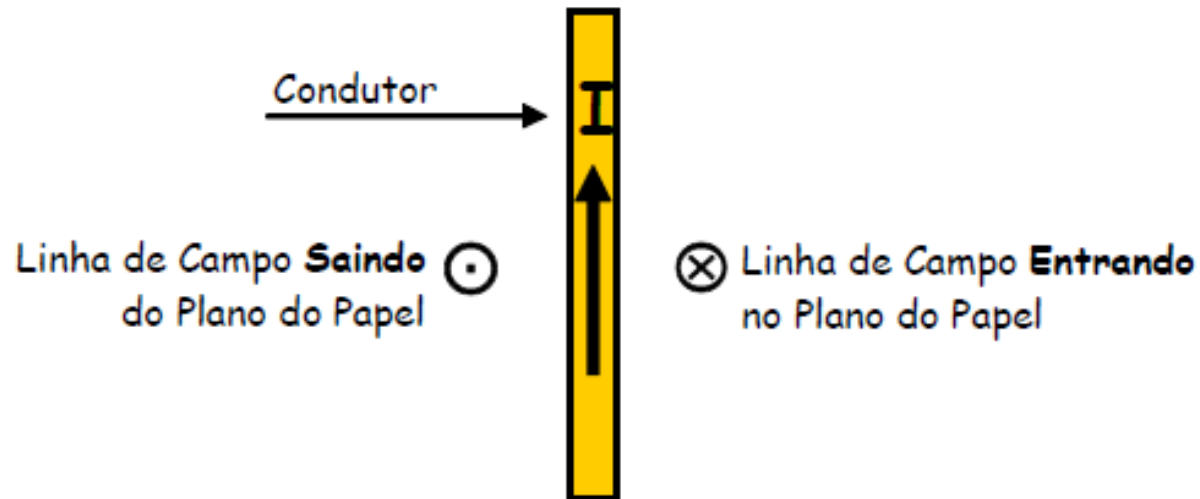
Regra da Mão Direita:

- Usada para determinar o **sentido das linhas do campo magnético** considerando-se o **sentido convencional da corrente elétrica**
- Com a mão direita envolvendo o condutor e o polegar apontando para o sentido convencional da corrente elétrica, os demais dedos indicam o sentido das linhas de campo que envolvem o condutor.





Simbologia para as linhas de campo

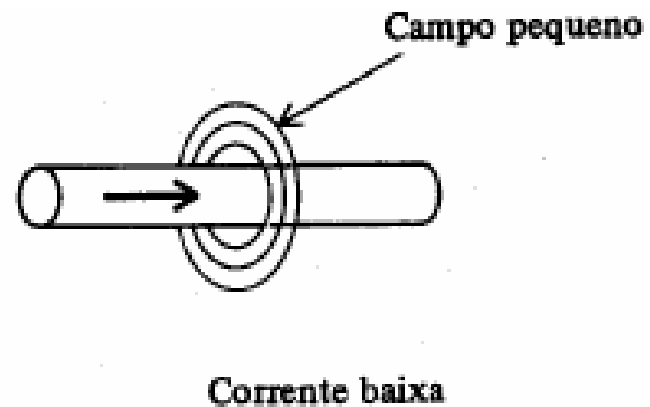
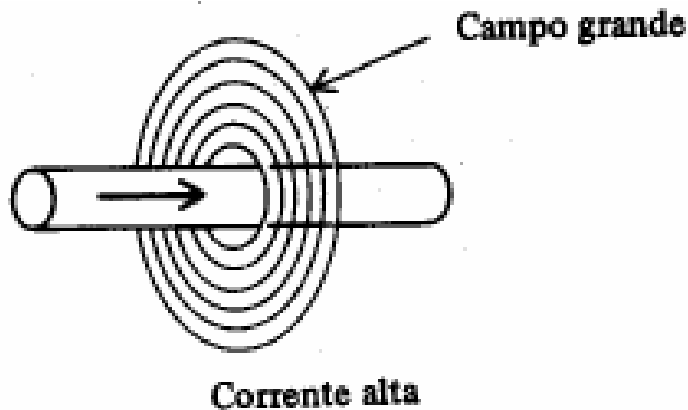


Campo Eletromagnético

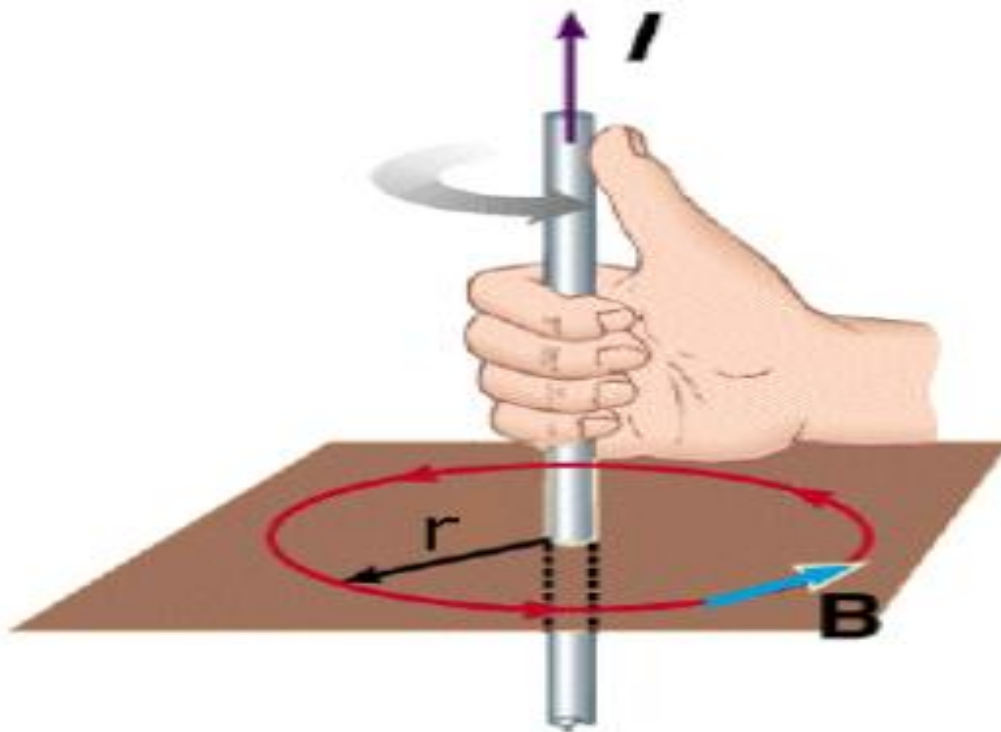
- Gerado em torno de um Condutor Retilíneo;
- Gerado no centro de uma Espira Circular;
- Gerado no centro de uma Bobina Longa ou Solenoide;
- Gerado por um toróide.

Campo Eletromagnético gerado em torno de um Condutor Retilíneo

- A intensidade do campo magnético gerado em torno de um condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica depende da intensidade dessa corrente



O Vetor Densidade de Campo Magnético B é sempre tangente às linhas de campo.



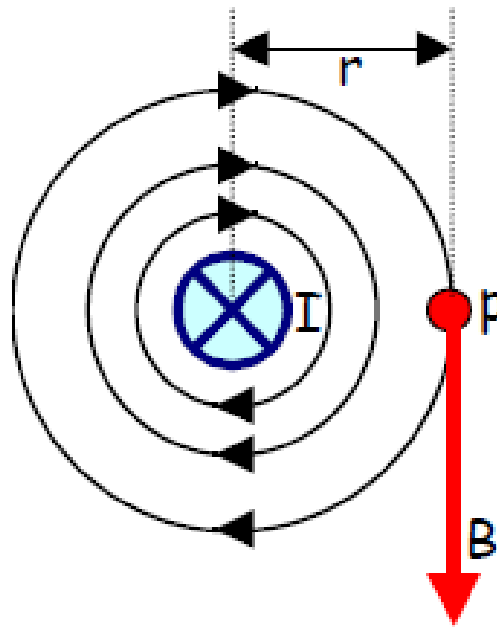
A Densidade de campo magnético B num ponto p considerado, é diretamente proporcional à corrente no condutor, inversamente proporcional à distância entre o centro do condutor e o ponto e depende do meio

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

onde:

- B = Densidade de campo Magnético (ou Densidade de Fluxo Magnético) num ponto p [T, Tesla];
- r = distância entre o centro do condutor e o ponto p considerado [m];
- I = intensidade de corrente no condutor [A];
- μ = permeabilidade magnética do meio [T.m/A];
- Válida para $r \ll l$ (comprimento do condutor).



$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

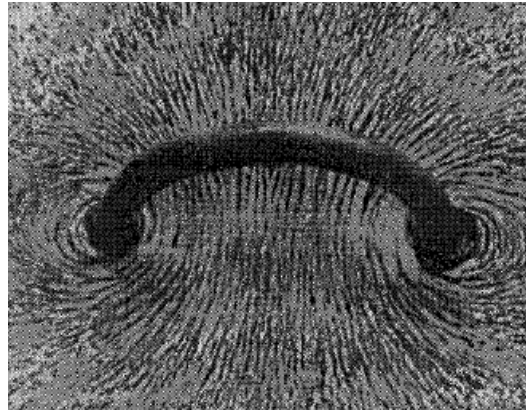
$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Exercício 1

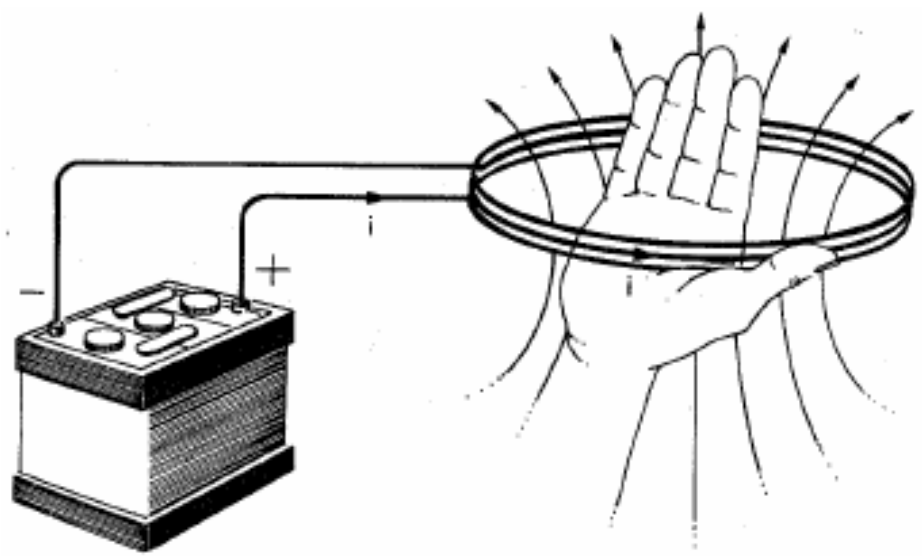
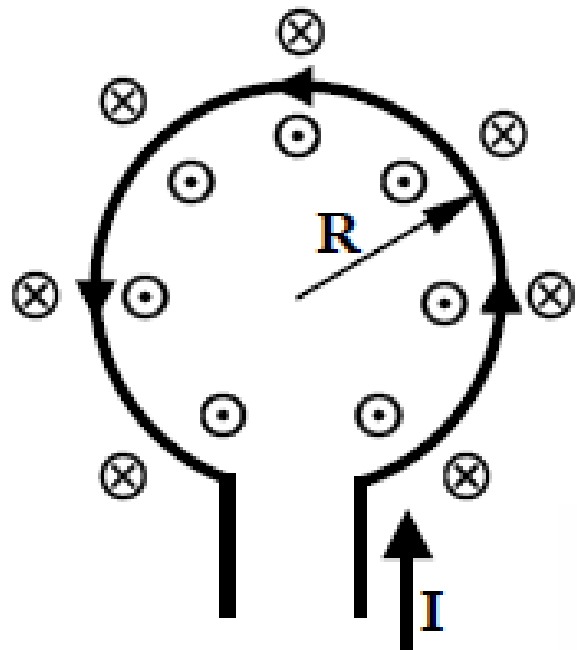
- Calcule a intensidade do campo magnético (H) a 50cm do centro de um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica de 3A.
 - R: 0,955 Ae/m.
- Qual a intensidade do campo magnético (H) em um ponto A que fica a 6cm do condutor 2 e mais 4 cm do condutor 1? A corrente que percorre o condutor 1 é de 2A e o condutor 2 é de 3A. R: 11,1 Ae/m.

Campo Eletromagnético gerado no centro de uma Espira Circular

- Um condutor em forma de espira circular quando percorrido por corrente elétrica é capaz de concentrar as linhas de campo magnético no interior da espira



- Usa-se a regra da mão direita para a determinação do campo magnético no **centro** de uma espira circular
 - O polegar indica o sentido da corrente elétrica na espira e os demais dedos da mão direita, o sentido das linhas de campo magnético que envolvem o condutor da espira circular.



A densidade de campo magnético no centro de uma espira circular pode ser calculado por:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot R}$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I}{2 \cdot R}$$

Onde:

- B = é a densidade de campo magnético no centro da espira circular [T, Tesla];
- R = raio da espira [m];
- I = intensidade de corrente na espira circular [A].
- μ = permeabilidade magnética do meio [T.m/A]

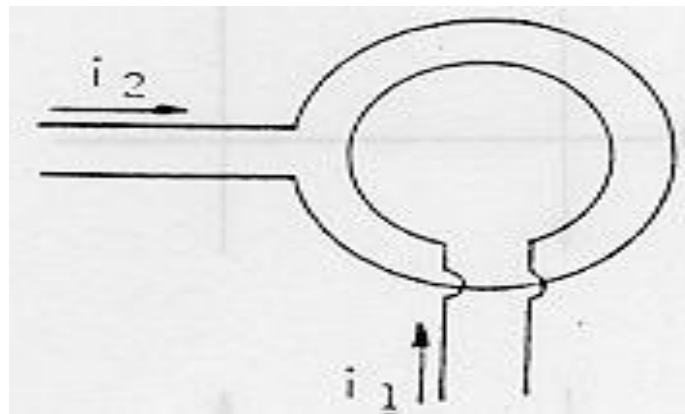
Exercício 2

- Qual é o valor do campo magnético indutor H no centro de uma espira circular feita com um condutor de 1m de comprimento e percorrida por uma corrente de 2 A ? **R: 6,28Ae/m**

Exercício 3

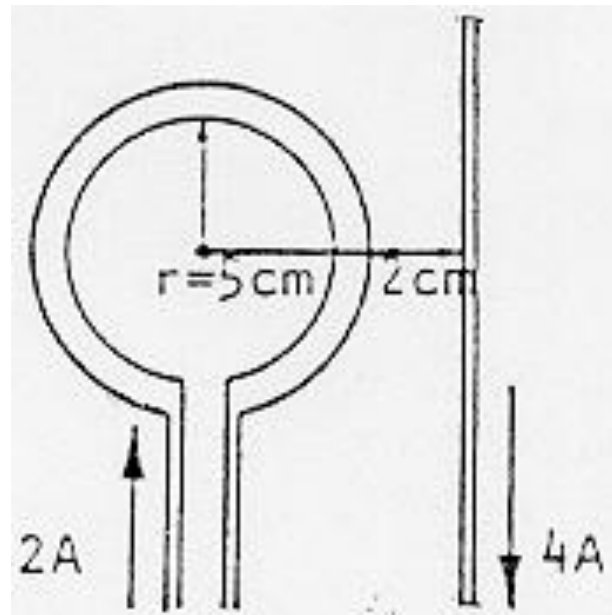
- Qual é o valor do campo magnético indutor H no centro comum às duas espiras de raio 7 cm e 10 cm, dado que $I_1 = 3$ A e $I_2 = 4$ A ? Qual o sentido do campo magnético resultante ?

R:41,4Ae/m



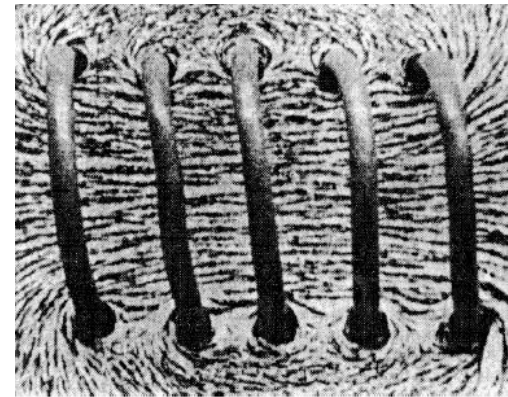
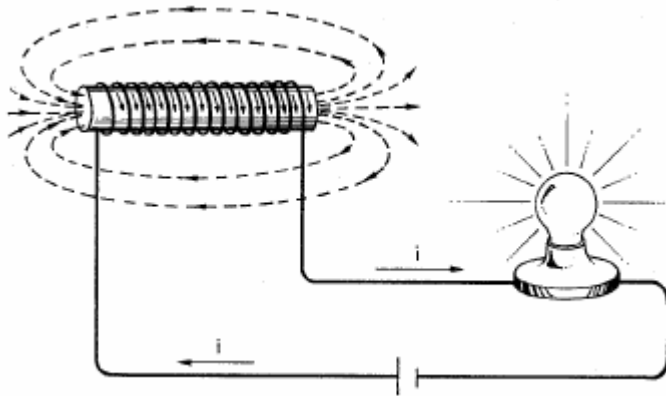
Exercício 4

- Calcular o valor do campo magnético no centro da espira da figura acima (a direita). **R:** **$29,1 \text{ Ae/m}$**



Campo Eletromagnético gerado no centro de uma Bobina Longa ou Solenóide

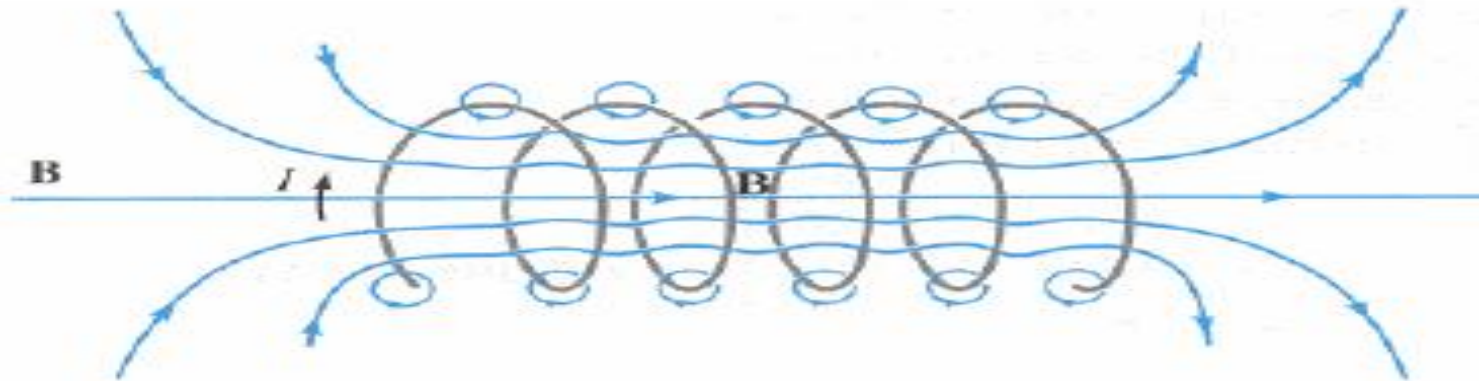
- Um Solenoide é uma bobina longa obtida por um fio condutor isolado e enrolado em espiras iguais, lado a lado, e igualmente espaçadas entre si



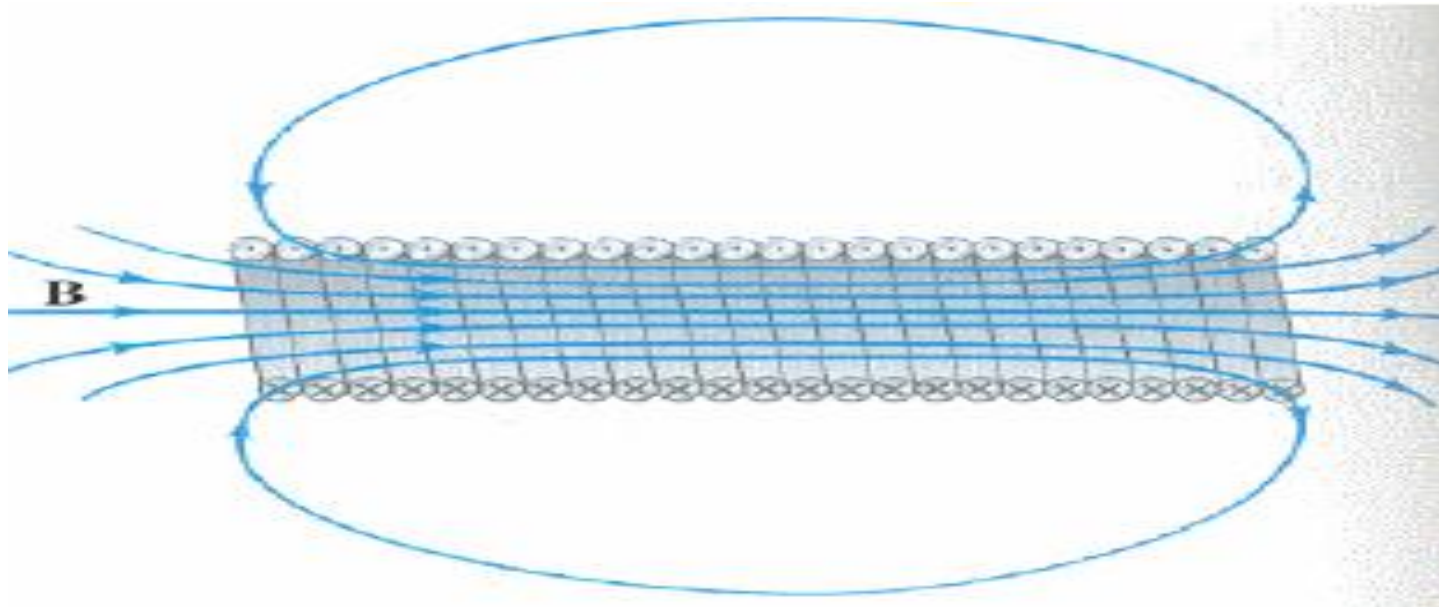
- no interior do solenoide, as linhas de campo estão concentradas e praticamente paralelas Isso caracteriza um campo magnético praticamente uniforme.

Uma bobina em que suas espiras estão afastadas umas das outras.

- Entre duas espiras os campos anulam-se pois têm sentidos opostos. No centro do solenoide os campos somam-se.

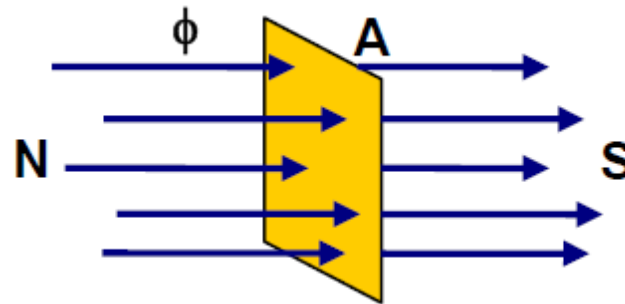


- Quanto mais próximas estiverem as espiras umas das outras, mais intenso e mais uniforme será o campo magnético



INDUÇÃO MAGNÉTICA ou DENSIDADE DE FLUXO (B):

- Conjunto de todas as linhas de campo que atingem **perpendicularmente** uma dada área
 - Tomando-se esta área perpendicularmente à direção do fluxo



- Fórmula: $B = \frac{\Phi}{A}$
- Por ter uma dada orientação (direção e sentido), o fluxo magnético é uma grandeza vetorial

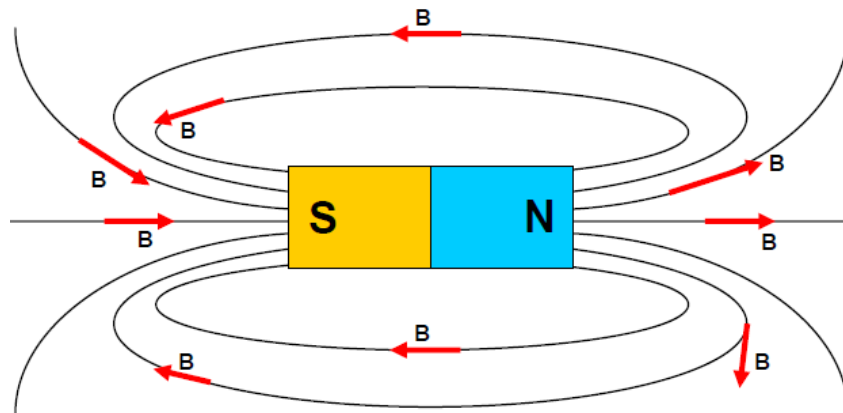
A Densidade de Campo Magnético também conhecida como Densidade de Fluxo Magnético ou simplesmente Campo Magnético

- É uma **grandeza vetorial** representada pela letra **B**
- A unidade é o **Tesla (T)**
- É determinada pela relação entre o Fluxo Magnético Φ e a área de uma dada superfície perpendicular à direção do fluxo magnético

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

- onde:
 - B – Densidade de Campo Magnético ou Densidade de Fluxo Magnético, Tesla (T);
 - Φ - Fluxo Magnético, Weber (Wb);
 - A - área da seção perpendicular ao fluxo magnético, m².

- A direção do vetor Densidade de Campo Magnético B é sempre **tangente** às linhas de campo magnético em qualquer ponto



- O número de linhas de campo magnético que atravessam uma dada superfície **perpendicular** por unidade de área é proporcional ao módulo do vetor B na região considerada

- No interior de um ímã as linhas de campo encontram-se mais concentradas do que fora e, portanto, a intensidade do campo magnético é mais elevada
- o número de linhas de campo no interior do ímã e no exterior é exatamente o mesmo, já que são linhas fechadas
- Assim o fluxo magnético total no interior e no exterior de um ímã é exatamente o mesmo,
 - Diferencie o Fluxo da Densidade de Fluxo Magnético.
- A densidade de fluxo magnético também pode ser medida em **Gauss** no sistema CGS:
 - $1\text{T} = 10^4 \text{ Gauss}$ 1 Wb/m^2

- O conjunto de todas as linhas de campo numa dada superfície é denominado Fluxo Magnético.
- Assim o Fluxo Magnético pode ser determinado pela integral da Densidade de Campo Magnético numa dada área, pois

$$B = \frac{d\Phi}{dA} \quad d\Phi = B \cdot dA$$

$$\int d\Phi = \int B \cdot dA \quad \Phi = \int B \cdot dA$$

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Exercício 5

Exercício

- Um fluxo magnético de $8 \cdot 10^{-6}$ Wb atinge perpendicularmente uma superfície de 2 cm^2 ($2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$). Determine a densidade de fluxo B no SI.