

F 609A – Tópicos de Ensino de Física

**Modelo tridimensional das linhas de
campo magnético**

Aluno: Marcelo Baldin Marco RA: 062694
baldinmarco@ig.com.br

Orientador: Professor doutor Ennio Peres da Silva
lh2ennio@ifi.unicamp.br

Coordenador da disciplina: Professor doutor José Joaquim Lunazzi
lunazzi@ifi.unicamp.br

Índice

| | |
|---|----|
| Resultados atingidos | 3 |
| Expectativas..... | 3 |
| Referências | 4 |
| Dificuldades encontradas..... | 13 |
| Fotos da experiência | 14 |
| Data e horário programado para apresentação do evento:..... | 15 |

Resultados atingidos

Começamos a pesquisa e a montagem do experimento não atingiu sua totalidade. Meu orientador está ciente do que tenho feito e passou como orientação utilizar um líquido viscoso para fazer as partículas ficarem mais tempo no modo que possibilita visualmente verificar as linhas de campo em três dimensões.

Não obtive-se êxito na remoção da limalha através da acetona, dispôs-se de uma lixa para remover a limalha da fita K7. Falta conseguir o ímã e o líquido viscoso.

Expectativas

Falta terminar a montagem e definir os materiais que mais irão caracterizar de melhor maneira visual as linhas de campo. Espero até o dia da apresentação finalizar o experimento.

Referências

1/5/2009 21:33

http://www.pion.sbfisica.org.br/pdc/index.php/por/multimedia/videos/eletrmagnetismo/campo_magnetico

The screenshot shows the website 'Pion Ligado na Física!' with a navigation menu including Home, Artigos, Links, Destaques, Blog, Você sabia?, Eventos, Multimídia, Material didático, and Fale Conosco. A sidebar on the left contains a section titled 'ENQUETE' with the question 'Por que muitas aulas no Ensino Médio ainda seguem o modelo tradicional e são pouco motivadoras?' and three radio button options. The main content area features a video player titled 'Campo magnético 3D' with a 5-star rating and a play button. The video description states: 'Experimento que utiliza fita cassete "descartável" ilustra o campo magnético tridimensionalmente.' Below the video, the location is given as 'Assistir ao vídeo no site original'.

Vídeo ilustrativo que mostra de maneira literal como realizar este experimento.

1/5/2009 22:15

<http://educacao.uol.com.br/fisica/campo-magnetico-representacao-geometrica.jhtm>

CAMPO MAGNÉTICO - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA

Linhas e pólos magnéticos

João Freitas da Silva*

Especial para a Página 3 Pedagogia & Comunicação

Os efeitos de um **campo magnético** não podem ser vistos. Mas podem ser percebidos, o que permite fazer seu desenho - uma representação geométrica -, no qual estampamos os **pólos e linhas magnéticos**.

Todo campo magnético está associado a uma carga elétrica em movimento. Basta uma carga elétrica em

movimento para, simultaneamente, termos um campo magnético. Mas uma carga em movimento não gera um campo magnético. Na verdade, podemos pensar essas duas grandezas (**carga em movimento e campo magnético**) como uma só, pois a partir do momento que temos uma, temos também a outra.

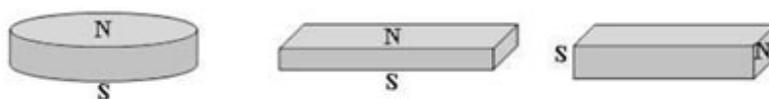
Um campo magnético pode - da mesma forma que um campo elétrico - ser representado geometricamente por figuras denominadas **linhas de campos**, também chamadas de **linhas de indução** ou **linhas de força do campo magnético**. O local onde o campo magnético tem maior intensidade é representado por uma concentração maior de linhas.

É importante lembrar que o conceito de um **campo de força** que surge a partir de **linhas de força** foi desenvolvido por **Faraday**, quando ele relacionou o magnetismo com a eletricidade.

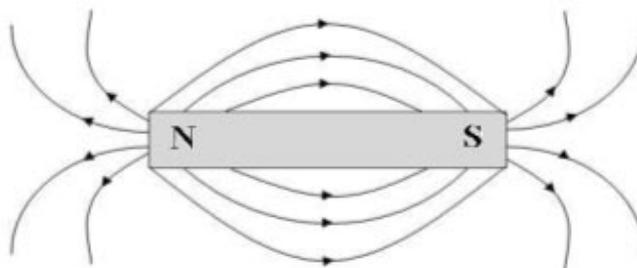
Lei de Gauss

Os ímãs apresentam regiões onde o campo magnético é mais intenso e que são denominadas **pólos magnéticos**. Essas regiões são denominadas, arbitrariamente, de **pólo sul** e **pólo norte**. Esses pólos são representados, geralmente, por cores diferentes nos ímãs.

Ímãs diferentes podem ter esses pólos em regiões diferentes:



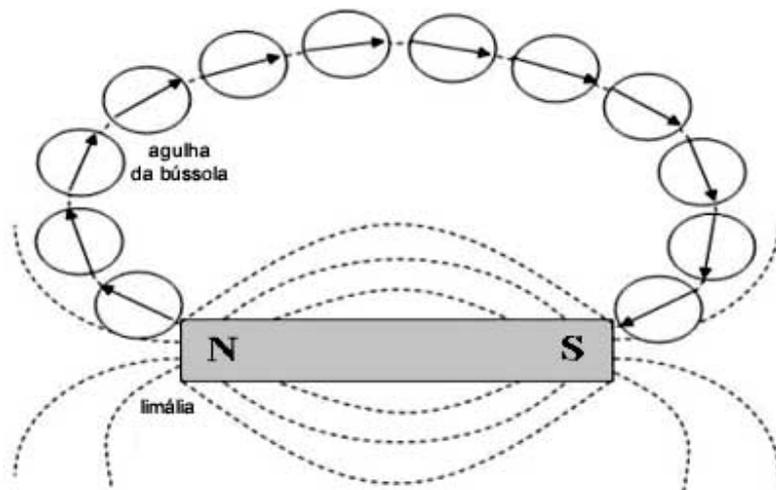
Por convenção, dizemos que as linhas de campo são orientadas do pólo norte para o pólo sul; e é comum ouvirmos que elas "saem" ou "nascem" no pólo norte e "entram" ou "morrem" no pólo sul.



Linhas de campo de um ímã em barra.

Mas é importante sabermos que essa é uma linguagem figurada, pois as linhas de campo magnético na verdade são fechadas (sem começo ou fim), e não existe lugar onde essas linhas possam "nascer" ou "morrer". Tal fato representa a **lei de Gauss magnética**.

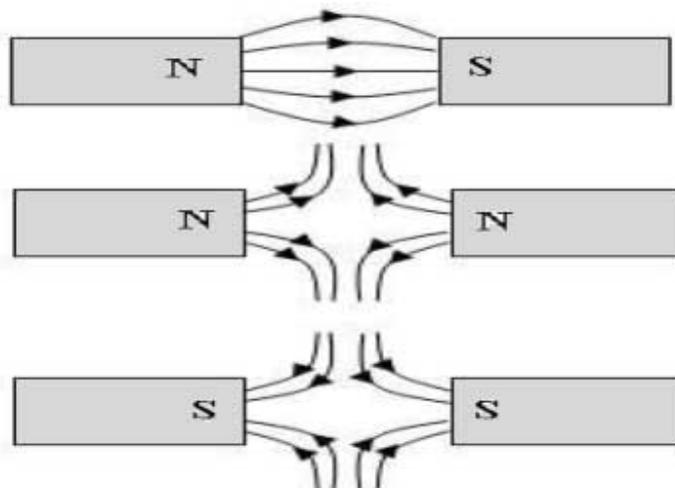
Outro aspecto importante da linha de campo é que, se colocarmos uma bússola sobre qualquer ponto dela, a agulha magnética da bússola assumirá uma posição tangente em relação à linha. O sentido do campo magnético é dado pelo sentido da reta que contém os pólos da agulha magnética em repouso.



Mapeamento de um campo magnético com a agulha de uma bússola, aqui representada pelas setas.

A reta que contém os pólos de uma agulha magnética é a direção de um vetor denominado **vetor indução magnética** (\vec{B}) - e o sentido é do sul para o norte da agulha. A unidade de \vec{B} no SI é o **tesla (T)**. Também é utilizada a unidade **gauss (G)**.

Existe uma relação de interação entre esses dois pólos: quando aproximamos o pólo de um ímã do pólo oposto de outro ímã podemos constatar uma **atração** entre eles. Mas quando aproximamos um ímã com um de seus pólos voltado para o mesmo pólo de outro ímã percebemos uma forte **repulsão** entre eles.



A figura mostra campos magnéticos entre pólos de dois ímãs. Na primeira dupla de ímãs, no alto, temos o pólo norte de um ímã com a face voltada para o pólo sul de outro (há uma interação atrativa entre eles). Nos outros dois casos, temos interações repulsivas.

Bibliografia

BECHARA, Maria José; DUARTE José Luciano Miranda; ROBILOTTA, Manoel Roberto; VASCONCELOS, Suzana Salém - *Apostila de Física 3 para o curso de Eletromagnetismo* - Instituto de Física USP - São Paulo 2002.

CARRON, Wilson; GUIMARÃES Oliveira. - *Física Volume Único* - Editora Moderna - Coleção Base - 2ª edição - São Paulo - 2003.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO de FÍSICA - *Física 3: Eletromagnetismo/GREF*. 3ª edição - Edusp/Editora da Universidade de São Paulo - São Paulo - 1998.

HAMBURGER, Ernst. W. - *O que é física* - Editora Brasiliense - Coleção Primeiros Passos - 3ª reimpressão da 6ª edição - São Paulo 2007.

PIETROCOLA, Maurício P. - *Projeto para melhoria do Ensino Público - Atualização dos Currículos de Física no Ensino Médio de Escolas Estaduais: A Transposição das Teorias Modernas e Contemporâneas para Sala de Aula* - 2003 - Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo e FAPESP 2003 / 00146 -3.

UENO, Paulo T. - *Física no cotidiano - leituras e atividades* - Volume 3 - Editora Didacta.

1/5/2009 22:15

<http://www.if.ufrj.br/teaching/fusao/cap4.html>

O CONFINAMENTO DOS PLASMAS POR CAMPOS MAGNÉTICOS

(* Preparado por [C.A. Bertulani](#) para o projeto de **Ensino de Física a Distância**)

Tipo de configuração magnética

Abandonado a ele próprio, um plasma ocupa, tal como qualquer gás, todo o espaço geométrico disponível, devido às colisões entre partículas. O plasma pode ser confinado por campos magnéticos, visto que as trajetórias dos íons e dos elétrons que o constituem são hélices que se enrolam em torno das linhas de força do campo magnético.

Se um recipiente está mergulhado num campo magnético retilíneo, as partículas do plasma não podem atingir as paredes laterais, mas vão colidir com as extremidades do recipiente. Para evitar este contato das partículas com as paredes materiais, foram estudados dois tipos de configuração magnética:

- **as configurações lineares** onde a intensidade do campo magnético é reforçada nas extremidades do recipiente para que a partícula se possa refletir no 'espelho magnético' antes de qualquer contato material. Este movimento de vai-vem das partículas é no entanto sujeito a perdas nos espelhos devido às colisões entre partículas; devido a estas perdas estas configurações não são considerados para os reatores;
- **as configurações toroidais** que suprimem as perdas nas extremidades devido ao fecho das linhas de força sobre elas próprias. O estudo teórico das trajetórias das partículas mostra que para o seu confinamento é necessário sobrepor ao campo toroidal uma componente do campo que lhe seja perpendicular (campo poloidal). As

linhas de força do campo total são então hélices em torno das quais evoluem as partículas do plasma.

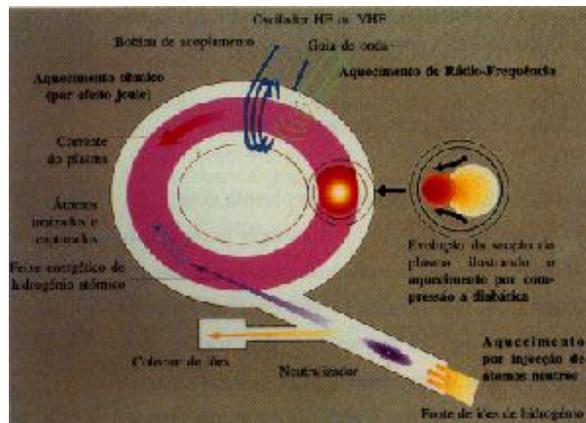
Distinguem-se várias classes de sistemas de confinamento toroidal de acordo com a maneira como a helicidade das linhas do campo magnético é obtida, sendo as principais:

- os tokamaks,
- os stellarators,
- os RFP ("reverse field pinch" , com 'constricção' do campo magnético).

No **tokamak**, o campo toroidal é criado por um conjunto de bobinas espaçadas regularmente em torno do toro e é muito superior ao campo poloidal criado por uma forte corrente que circula no plasma.

No **stellarator** , a helicidade das linhas do campo é produzida por um conjunto de bobinas, elas próprias tendo por vezes a forma helicoidal. Não é induzida exteriormente nenhuma corrente no plasma.

No **RFP**, as componentes toroidal e poloidal do campo são criadas como no tokamak, mas a corrente que circula no plasma é bastante mais intensa que num tokamak com o mesmo campo toroidal. O estabelecimento dos campos faz-se numa escala de tempo tal que daí resulta uma reorganização interna espontânea dos campos magnéticos conduzindo à inversão do sentido do campo toroidal no seio do plasma.



Esquema de princípio representando os vários métodos de aquecimento do plasma.

Aquecimento do plasma nas configurações toroidais

No caso do tokamak e do RFP, a corrente que circula no plasma e que cria a componente poloidal do campo poloidal do campo magnético serve também para aquecer o plasma por efeito Joule. Este processo é eficaz até uma temperatura da ordem de 10 milhões de graus, para além da qual a resistividade do plasma é demasiado baixa para que exista uma dissipação significativa. Por esta razão têm sido desenvolvidos sistemas de aquecimento adicional para permitir ao plasma atingir as temperaturas termonucleares. (Para os

stellarators estes meios de aquecimento serão os únicos a garantir a energia necessária, pois nesta configuração não é induzida corrente no plasma).

São utilizados três métodos de aquecimento adicional:

- **Aquecimento por injeção de neutrons:** Um feixe de ions, criado e acelerado fora da máquina de confinamento, é neutralizado antes de penetrar no espaço onde existe o campo magnético. Os átomos neutros são ionizados no plasma e confinados pelo campo magnético. As colisões redistribuem a energia e a temperatura do plasma aumenta.
- **Aquecimento por ondas de radiofrequência:** O plasma pode absorver a energia de ondas eletromagnéticas nas frequências de ressonância do meio (em particular as frequências ciclotrônicas dos ions e dos eletrons). As antenas revestem uma parte da parede e são alimentadas por potentes geradores de ondas. A escolha da frequência permite definir a espécie de partículas que será aquecida e a região onde se fará a absorção e o conseqüente aquecimento.
- **Compressão adiabática do plasma:** Este método assenta no deslocamento do plasma de uma região de campo magnético fraco para uma região de campo magnético forte; o deslocamento é obtido aumentando progressivamente a componente vertical do campo magnético. Como isto implica um funcionamento pulsado com fortes constrangimentos técnicos sobre a máquina, este método é pouco aplicado. Apenas o TFTR (Princeton,USA) o utilizou recentemente.

Investigação em tokamaks

A geração atual das grandes máquinas (TFTR nos Estados Unidos, JT60 no Japão, JET na Europa), completada por um grande número de máquinas de tamanho médio, concentram a sua investigação em vários grandes temas:

- **Confinamento:** O estudo do transporte da matéria e do calor através do campo magnético permite qualificar o confinamento. Este estudo exige o varrimento de um grande número de parâmetros (campo magnético, corrente, densidade, temperatura,...) e a medição de perfis espaciais e temporais de numerosas características do plasma.
- **Pureza do plasma:** As impurezas libertadas no contato parede/plasma aumentam as perdas por radiação e diluem o combustível. Na operação com um limitador magnético, o elemento material que assegura o contato pode ser afastado do plasma. O revestimento da parede por materiais leves (B,Be,C) é uma técnica comprovada e constantemente melhorada.
- **Funcionamento estacionário ou quase-estacionário:** A corrente no plasma só pode ser induzida por efeito transformador durante um tempo limitado. São, por isso, utilizados métodos não indutivos de geração de corrente (por feixes de neutros ou por ondas de rádio-frequência), os quais permitem manter a corrente no plasma.
- **Disrupções:** O Tokamak funciona num domínio limitado de parâmetros. Fora desse domínio, a corrente é interrompida bruscamente - ocorre uma disrupção. Daí resultam conseqüências mecânicas e térmicas importantes na estrutura e sobre as

paredes. O estudo dos sinais precursores dessas disrupções permitirá tomar medidas preventivas.

- **Aquecimento por partículas alfa** Até agora não foram realizadas experiências nas quais o plasma tenha sido aquecido principalmente pelas partículas-alfa. Na fase D-T do JET, em 1996, a contribuição das partículas-alfa deverá representar 20% da potência total de aquecimento.

A presença de uma quantidade importante de partículas alfa pode ser a origem de novas instabilidades e do aumento da diluição do combustível. Será necessário um sistema eficaz de extração de resíduos de hélio.

Características atuais dos tokamaks

A máquina JET, que é o maior tokamak em operação (volume do plasma: 140 m^3) atingiu o melhor desempenho para o produto $n_0 T_{0E}$ com o valor $9 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{KeV} \cdot \text{s}$.

Para que a ignição possa ocorrer este produto deve ser seis vezes mais elevado.

Em Novembro de 1991, foram efetuadas no JET as primeiras experiências com uma mistura D-T (sendo a concentração de trítio limitada a 11%). A obtenção de uma potência de fusão de 1.7 MW, com uma produção total de energia de fusão de 2 MJ permite prever que em 1996, com uma concentração de trítio igual a 50%, o "Breakeven" será atingido. (Situação em que a potência de fusão iguala a potência de aquecimento do plasma).

Investigação em stellarators

Esta configuração magnética, produzida por bobinas externas colocadas em torno da câmara de vácuo, não tem simetria axial (a seção do plasma modifica-se ao longo do toro). Estudam-se diversos tipos de stellarators que diferem em particular na periodicidade das componentes toroidais e poloidais do campo.

As formas dos anéis dobrados helicoidalmente são difíceis de calcular e concretizar: só devido ao desenvolvimento de potentes computadores e a métodos de fabricação sofisticados, foi possível projetar e construir stellarators com bobinas tridimensionais e modulares.

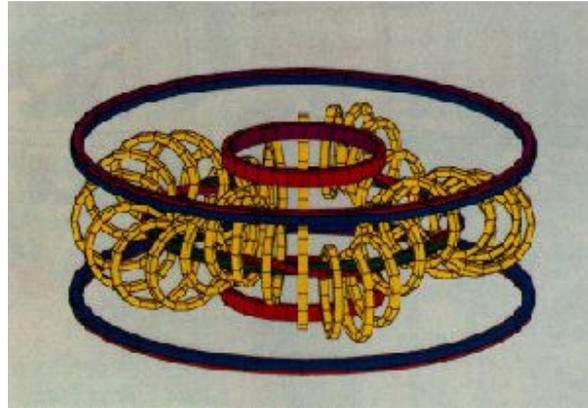
No stellarator W7-AS (Garching, RFA), o plasma é criado e aquecido por ondas com a frequência eletro-ciclôtrônica. A qualidade do confinamento é semelhante à dos tokamaks.

Um outro stellarator com bobinas modulares, Helic - TJ-II, está em construção (Madrid, Espanha). A câmara de vácuo tem igualmente uma forma muito complexa para acompanhar a forma do plasma e permitir o acesso de estruturas mecânicas e diagnósticos.



Projeto W7 - X, Stellarator do tipo HELIAS (ASS. EURATOM - IPP, GARCHING e GREIFSWALD - D). À esquerda, bobinas toroidais e criostato. À direita, Plasma e placas do divisor.

A vantagem intrínseca dos stellarators é a ausência de corrente toroidal (não existe transformador, não ocorrem disrupções), o que permite um funcionamento contínuo. Os temas de investigação são essencialmente os mesmos que existem para os tokamaks.



Esquema do stellarator do tipo Heliac TJ-II (Ass. Euratom-CIEMAT, Madrid-E)

Investigação sobre "Reverse Field Pinch" (RFP)

Tal como o tokamak, este sistema tem simetria axial. A diferença principal reside na distribuição espacial do campo magnético toroidal que muda de sinal na fronteira do plasma.

A máquina RFX de Pádua tem por objetivo o estudo dos problemas físicos de auto-reorganização do campo magnético, que é específico desta configuração. Além disso, o estabelecimento de leis de escala para o confinamento permitirá comparar esta configuração com outras toroidais que são hoje muito mais avançadas.

Projeto: Ensino de Física a distância
Desenvolvido por: [Carlos Bertulani](#)

Dificuldades encontradas

Como o experimento dispõe de materiais domésticos e recicláveis acredito que não terei dificuldades. Em conversa com o orientador, a primeira mudança que teria em relação ao projeto inicial seria utilizar um líquido mais viscoso.

Ao invés de utilizar acetona para remover a limalha utilizou-se uma lixa.

Fotos da experiência



**Data e horário programado para apresentação
do evento:**

Dia 18 de junho, quinta-feira das 17:00 as 19:00