

**Campos magnéticos cuasiestacionarios en laboratorios:**

En la aproximación cuasiestacionaria, el campo magnético está determinado por la distribución de corrientes en el espacio. Controlando y diseñando una distribución de corrientes es posible por lo tanto controlar el campo magnético aplicado  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ . El campo magnético total  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$  dependerá sin embargo de las corrientes inducidas en la muestra y de la geometría del experimento (condiciones de contorno entre muestra y entorno) y por lo general no se controla. Se puede calcular o, mejor aún, medir.

***Unidades:***

En la mayoría de las publicaciones científicas experimentales, verán el campo aplicado  $\mathbf{H}$  expresado en Oe y el campo  $\mathbf{B}$  expresado en G o T.

$$1 \text{ T} = 10000 \text{ G}$$

$$\text{A/m} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$$

Un campo aplicado de  $H = 1 \text{ Oe}$  equivale a un campo  $B = 1 \text{ G}$ .

De todas maneras en este apunte expresaremos los campos en G (o T)

independientemente de que nos estemos refiriendo al campo aplicado o medido.

***Generación y control de campos magnéticos:******Imanes permanentes***

En los imanes permanentes la distribución de corrientes está determinada por corrientes microscópicas permanentes, cuya distribución se prepara y/ o diseña al fabricar el imán y queda determinada por su forma e historia magnética (proceso por el que fue imantado). Se usan materiales magnéticos con altos campos coercitivos, y durante el proceso de fabricación se los somete campos muy altos para alinear los dominios internos.

Un imán comercial común puede generar campos cercanos a 5000 G cerca de su superficie.

Se usan mayormente en dispositivos, que van desde los más sencillos motores y parlantes hasta sofisticados diseños electrónicos.

En algunos experimentos se usan cilindros huecos construidos y diseñados con imanes permanentes que generan campos magnéticos en su interior de cientos a algunos miles de G. La ventaja obvia de estos imanes es que generan campos relativamente altos sin necesidad de aplicar corrientes externas. La mayor desventaja es justamente la imposibilidad de regular distintos valores de campo aplicado. Por otro lado el diseño y fabricación de imanes permanentes con buenas prestaciones no es sencillo.

En la web pueden encontrar numerosos ejemplos de empresas que fabrican y comercializan este tipo de imanes para diversos usos.

***Electroimanes y bobinas:***

En la mayoría de los experimentos los campos magnéticos se generan y controlan haciendo circular corriente a través de un circuito. En general se busca aplicar un campo homogéneo en las muestras, por lo que se diseñan circuitos que garanticen homogeneidad en el área del experimento. Verán que en la mayoría de las publicaciones

se hace referencia a *bobinas* cuando el circuito es en aire o vacío, y a *electroimanes* cuando el bobinado es alrededor de un núcleo de hierro.

*Bobinas conductoras:* Por lo general son solenoides o pares de Helmholtz. Se usan para generar campos magnéticos bajos y son las más utilizadas en experimentos con campos alternos. En Labo 4 las usarán en los experimentos de ferromagnetismo y efecto pelicular. La intensidad de campo está limitada por el auto calentamiento debido a la potencia disipada por corriente circulante a través de la resistencia interna de la bobina.

*Electroimanes:* Por lo general son toroides bobinados alrededor de un núcleo de hierro, que termina en un entrehierro con piezas polares entre las cuales se ubica el experimento. Suelen estar refrigerados con agua. Pueden generar campos hasta aproximadamente 15000 G (1.5 T), limitados por la saturación del núcleo ferromagnético.

Los electroimanes actuales están diseñados con baja resistencia y usan corrientes altas (hasta 50 A aprox). El electroimán de Labo 4 es un diseño antiguo, más resistivo (con más vueltas de conductor) y utiliza corrientes moderadas (algunos A).

*Bobinas superconductoras:* Son solenoides construidos con alambres superconductores. Los más utilizados actualmente se bobinan con alambres de aleaciones metálicas, que son superconductoras a temperaturas por debajo de los 20K, por lo que tienen que estar permanentemente refrigerados con He líquido.

Debido a que los superconductores son capaces de transportar altas densidades de corriente sin disipación, estas bobinas son utilizadas para generar altos campos, que pueden llegar hasta 20 T. Además de en numerosos experimentos, se aplican en tomógrafos y otros equipos que requieren altos campos. En el DF tenemos varias bobinas instaladas en laboratorios de investigación, algunas fabricadas por compañías especializadas y otras diseñadas y fabricadas acá.

*Bobinas para campos pulsados ultra-altos:* Los campos más altos, se generan sin embargo con bobinas hechas con conductores, con inductancias bajas que permiten la circulación de pulsos cortos de corrientes muy altas. Si bien las mediciones deben realizarse durante ese breve intervalo el desarrollo actual de la electrónica permite realizar una amplia gama de experimentos en campos hasta 100 T, que duran algunos milisegundos. Estos campos se alcanzan mediante sofisticados diseños en Laboratorios que son grandes facilidades destinadas a ese fin. En el extremo de ultra altos campos, se realizan experimentos “one-shot” con campos magnéticos aún mayores, en los cuales el pulso de corriente y su consecuente disipación provocan la destrucción de parte del dispositivo experimental.

#### *Apantallamiento del campo magnético:*

Para poder controlar campos magnéticos bajos, es necesario apantallar o anular los campos magnéticos presentes en el laboratorio. El campo terrestre es de alguna fracción de G y a este campo siempre presente se suman frecuentemente campos producidos de imanes o materiales ferromagnéticos cerca del entorno de trabajo. Por lo tanto, para regular campos por debajo de los 10 G, es imprescindible anular (o disminuir a un campo mucho menor que el de trabajo) el campo del laboratorio.

Si bien los campos alternos son fáciles de apantallar, simplemente rodeando el experimento con una carcasa metálica adecuada o jaula de Faraday (ver práctica de Efecto Pelicular), el apantallamiento del campo magnético continuo o de muy baja frecuencia requiere una disposición experimental más elaborada.

Los métodos más usados son:

*Apantallamiento con jaulas de  $\mu$  metal:* Los llamados  $\mu$  metal son aleaciones metálicas de permeabilidad muy alta que desvían las líneas de campo magnético hacia la pantalla.

*Compensación:* Mediante un conjunto de bobinas externas se aplica un campo que anula el existente. Este método requiere poder medir el campo con la precisión deseada.

***Medición de campos magnéticos:***

Hay muchas maneras de medir el campo magnético, basados en distintos principios físicos, que incluyen entre otros la frecuencia de precesión de protones en los núcleos, el efecto Josephson en superconductores, el efecto Hall o la simple inducción de Faraday.

*Los sensores Hall* (o puntas Hall) están entre los más usados, por su relativa sencillez y bajo costo. Son alimentados por una corriente y entregan una tensión proporcional a la componente de **B** perpendicular al sensor. Una introducción al efecto Hall y una descripción más detallada del funcionamiento de estos sensores puede encontrarse aquí.

*Métodos inductivos:* Estos métodos se basan en la ley de inducción de Faraday por lo que sirven para medir campos variables en el tiempo. Se mide la fem inducida en un bobinado a circuito abierto, debida a la variación temporal del flujo magnético que lo atraviesa. Dispositivos de este tipo son usados en las prácticas de Ferromagnetismo y Susceptibilidad alterna.

*SQUID* (*Superconducting quantum interference device*): Son dispositivos muy usados en los laboratorios de investigación, debido a su altísima precisión para medir flujo magnético. Están construidos en base a un anillo de material superconductor, que forma parte de un circuito electrónico, de mayor o menor complejidad de acuerdo al uso específico del SQUID. El principio de funcionamiento se basa en la cuantización del flujo y el efecto Josephson, dos fenómenos característicos de los superconductores. Los dispositivos de alta performance actuales pueden medir variaciones de flujo varios órdenes de magnitud menor que un cuanto de flujo  $\phi_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{G cm}^2$ .

Los interesados en el tema pueden leer una introducción en el material adicional de la página.