

§6. Electroimanes sin núcleo de hierro

Capítulo dedicado a los imanes cuyo campo es medio millón de veces superior al campo magnético de nuestra Tierra, a las cataratas y la separación del uranio, y a las fuerzas que se anulan mutuamente.

En la historia de la creación de potentes electroimanes, un lugar de honor le corresponde al físico norteamericano Francis Bitter. Nació en la ciudad de Weehawken del Estado de Nueva Jersey, en 1902. A la edad de veintiocho años obtuvo el título de doctor en filosofía por sus investigaciones de las propiedades magnéticas de los gases. Después entró a trabajar en el consorcio eléctrico Westinghouse, donde estudió los problemas teóricos y técnicos del magnetismo. Más tarde pasó a trabajar de profesor en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, donde construyó solenoides "de Bitter", que se hicieron luego famosos. Toda su vida estuvo consagrada al estudio del magnetismo y de los imanes. Incluso durante la guerra no quiso abandonar su profesión favorita y se ocupó de minas magnéticas y de la protección contra las mismas.

Bitter logró construir los electroimanes más potentes de su tiempo.

En los años treinta, para investigar sutiles fenómenos magnéticos en los gases, Francis Bitter necesitó un intenso campo magnético de unos 100 mil Oe. Tenía que construir en breve plazo un imán que, en el curso de un largo tiempo, durante varias horas, aseguraba ese grandioso campo, 20 mil veces mayor que el campo magnético de la Tierra.

Antes de abordar la solución del problema, Bitter decidió estudiar todo lo que se había hecho anteriormente en la esfera de intensos campos magnéticos.

En aquel tiempo funcionaban ya electroimanes para investigaciones científicas muy potentes con núcleo de hierro en Belleville, en las afueras de París (con el campo hasta 60 mil Oe) y en la universidad de Upsala, en Suecia, con el campo de unos 70 mil Oe. Eran enormes construcciones con circuito magnético de acero y culata: imanes clásicos de unas 100 t. Al mismo tiempo, Bitter sabía perfectamente que el aumento del campo hasta 60-70 mil Oe costó bastante. En comparación con los compactos imanes corrientes, con el campo de 30-40 mil Oe y el peso de 1 t, aproximadamente, los de Upsala y de París, por sus dimensiones, se parecían a unos monstruos desaparecidos. Ni pensar se podía siquiera en obtener un campo de 100 mil Oe por medio de un electroimán con núcleo de hierro, aunque teóricamente era fácil mostrar que, pese a la saturación, en los sistemas magnéticos con acero era posible obtener un campo tan grande como se quiera. El campo resultará infinito en el caso de que todo el Universo, a excepción del punto en que se crea el campo magnético, esté ocupado por el hierro imantado...

Francis Bitter comprendía perfectamente que, para lograr 100 mil Oe, tendría que llenar de acero saturado, si no el Universo, por lo menos su laboratorio. La variante con el núcleo de hierro no era apropiada.

El otro camino se conocía desde el descubrimiento por los científicos franceses Arago y Ampère del electroimán sin núcleo de hierro, denominado más tarde solenoide: espiral por la cual circula corriente eléctrica. Las propiedades negativas de ese método fueron formuladas por el electrotécnico francés Fabry y expresadas en la "fórmula de Fabry" publicada en 1898, en la revista "Alumbrado eléctrico".

He aquí esta fórmula, que resistió la impetuosa ofensiva del siglo XX:

$$H = G \sqrt{\frac{W\lambda}{\rho\alpha}}$$

donde H es la intensidad del campo magnético del solenoide, en Oe; G , el coeficiente, igual a 0,1-0,29; W , la potencia consumida por el solenoide en watt; λ , la relación entre el volumen de los alambres desnudos y el volumen global del devanado; ρ , la resistencia eléctrica específica del material de arrollamiento, en $\Omega\text{-cm}$; α , el radio interior del solenoide, en cm.

¿De qué habla la fórmula de Fabry? Que si se quiere aumentar el campo magnético, por ejemplo, 10 veces, se debe aumentar 10^2 , es decir, 100 veces, la potencia eléctrica, consumida en el solenoide. Para obtener campos magnéticos fuertes, se necesitarán centrales eléctricas enteras. El académico P. Kapitsa, quien ya en los años 1923-1927 obtuvo un campo de 500 mil Oe, no tuvo que superar esa dificultad: creaba campos que duraban sólo 0,001 s. Mas tampoco el método encontrado por P. Kapitsa convenía a Bitter, por cuanto él necesitaba campos de larga duración.

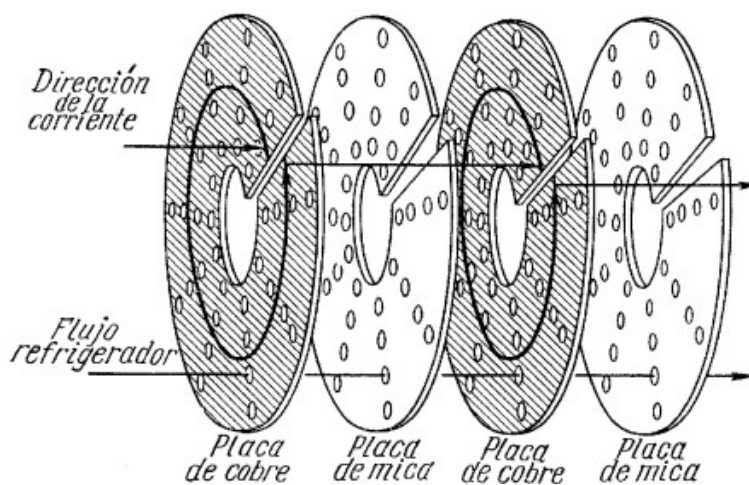


Figura 9. Principio de construcción de los solenoides de Bitter.

Bitter no tenía otra salida: un potente solenoide sin acero fue la única solución posible. El científico se dirigió a la central eléctrica de Boston. Logró acordar con la dirección de la Compañía de electricidad de Edison que, en las horas cuando la ciudad durmiera tranquilamente y, por consiguiente, se librara cierta potencia eléctrica, Bitter la aprovecharía para alimentar su voraz imán. El imán, de tamaño de una rueda de automóvil (a costa de intensa refrigeración logró reducir sus dimensiones) fue instalado en uno de los locales de la central eléctrica. En 1937, al ser conectado por primera vez, en la sala comenzó algo inconcebible: fino polvo de hierro, limaduras, clavos y pequeños tornillos, desde todos los lados del local, se precipitaron hacia la pequeña funda de bronce a la que estaban conectadas dos grandes tuberías, por las cuales se suministraba agua para refrigeración desde el intercambiador de calor, bañado por las aguas fluviales. Si no se lo hubiera suministrado al imán agua refrigeradora a velocidad de 50 l/s, se habría quemado.

En efecto, el imán consumía una potencia de 1,7 Mw. Casi toda esa potencia se convertía en calor que era necesario evacuar inmediatamente para evitar la elevación de la temperatura del imán. Bitter creó un imán de original construcción propia. Resultó tan acertada que a los solenoides, fabricados a base de un principio análogo, los denominan hasta hoy día imanes de Bitter. El original solenoide de Bitter, por medio del cual se obtuvo por primera vez un campo magnético duradero con la intensidad de 100 mil Oe, representaba discos de cobre estampados con ranura radial y 600 orificios para el agua refrigeradora. Las ranuras servían para unir los discos que, previamente doblados algo, formaban una espiral continua por la cual pasaba la corriente.

El primer solenoide de Bitter con el campo de 100 mil Oe, siendo en aquel entonces el más potente del mundo, trabajó ininterrumpidamente "para la ciencia" hasta que se precisaron campos más grandes aún y de mayor volumen. El único intervalo se hizo para realizar el proyecto de Manhattan, cuando por medio de un imán de Bitter se realizaron en Oak Ridge experimentos de separación de isótopos del Uranio. Para la bomba atómica se necesitaba el U^{235} , cuyo contenido en el uranio natural llega tan sólo al 0,7%. Para separarlo de la mezcla natural se utilizó el potente imán de Bitter.

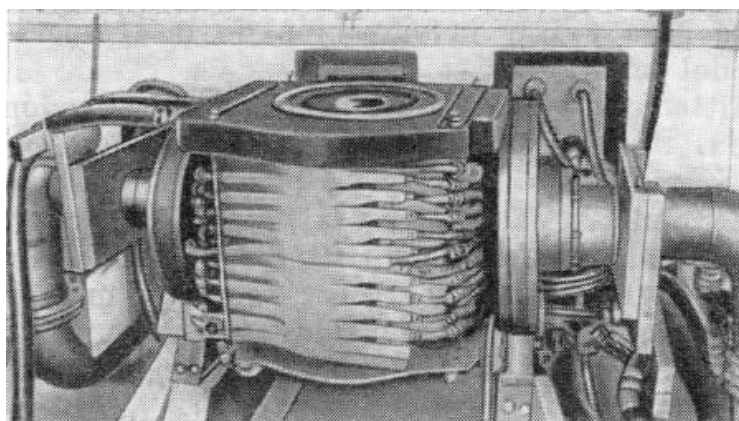


Figura 10. Electroimán más potente del mundo.

El impetuoso desarrollo de muchas ramas de la física en los años 60 del siglo XX, en particular, tales como el encerrado del plasma, las investigaciones de la superconductividad, del antiferromagnetismo, de la óptica cuántica y de las partículas elementales, condujo a que los campos magnéticos superpotentes se hicieran vitalmente necesarios, y, para obtenerlos, se abrieron varios laboratorios e institutos de investigación científica en la Unión Soviética, EE.UU. e Inglaterra.

En 1965 los científicos obtuvieron un campo magnético de 250 mil Oe, es decir, 0,5 millones de veces mayor que el de la Tierra, 100 veces mayor que el de las manchas solares y sólo cuatro veces menor que el campo que, según los cálculos, debía existir en el núcleo atómico.

Un campo de 250 mil Oe fue obtenido en el Laboratorio Magnético Nacional de EE.UU. por medio de un solenoide triple, construido por Kolm según los cálculos de Montgomery. El imán, con diámetro interior de 10 cm, consta de tres solenoides coaxiales. Consume en total 16 mil kw. La sección exterior está devanada con una barra hueca de cobre de sección cuadrada. Las secciones interiores están hechas de discos de cobre en cuya superficie fueron decapadas químicamente ranuras radiales para la refrigeración.

Para construir este imán se gastaron más de 3 t de cobre, y la presión del campo magnético sobre las secciones interiores era tan grande que el cobre empezaba a "fluir". Esa presión supera más de tres veces la del agua en el fondo de la sima oceánica más honda.

Es interesante el sistema de refrigeración de ese imán. En él se utilizaron los últimos logros de la técnica de construcción de reactores atómicos. En el solenoide calculado por Montgomery fue utilizado el principio de "ebullición en capas". En este caso la temperatura de la espiral de cobre a enfriar superaba los 100°C, lo que tuvo por efecto la aparición de numerosas burbujas de vapor que, en milésimas fracciones de segundo, se disolvían en la enorme cantidad de agua relativamente fría que caía de catarata sobre el solenoide¹. Dado que el calor específico de vaporización del agua es muy elevado, al aparecer burbujas en la superficie de la espiral, el metal

pierde una energía considerablemente mayor de la que perdería simplemente a costa del calentamiento del agua refrigeradora. Este principio de ebullición "local" o "en capas" se utilizó por primera vez en un pequeño imán de Kolm, que engendraba un campo de 126 mil Oe. En comparación con el solenoide de Bitter de 100 mil Oe, este imán parecía un enano (su volumen era 25 veces menor).

En este mismo principio de enfriamiento se basan los proyectos del imán norteamericano de 400 mil Oe, y del soviético, de 700-1000 mil Oe. La potencia que consumirá este último será enorme: 1 millón de kw, es decir, la potencia de dos generadores de la central hidroeléctrica de Krasnoyarsk.

El campo de enorme magnitud, obtenido por Kolm en su imán de 250 mil Oe, ocupaba un volumen relativamente pequeño, a pesar de que su diámetro superaba 1 m. En ese solenoide era difícil realizar investigaciones de gran escala, por tanto los constructores buscaban nuevos caminos de obtener intensos campos en volúmenes considerables.

¿Tal vez habría que utilizar otra sustancia refrigeradora?

Un experimento interesante fue realizado en la Universidad de California. Todavía en el año 1959, se construyó allí un solenoide con refrigeración por kerosene. ¿Por qué se eligió el kerosene? Resulta que el agua, sobre todo con impurezas, no es un aislador ideal y, a partir de cierta tensión, se dejan sentir sus propiedades electrolíticas. El devanado enfriado por agua se somete a la corrosión.

El análisis de otros líquidos, que podrían aprovecharse para el enfriamiento, mostró que, desde el punto de vista de la capacidad calorífica, del costo y de la necesidad para el devanado, lo mejor era el kerosene refinado, encerrado en un recipiente lleno de un gas neutral.

El solenoide de "kerosene" con diámetro interior de 10 cm y devanado de barra de cobre consumía 6 mil kw, 100 kg/s de kerosene refinado y engendraba un campo magnético de 100 mil Oe. El solenoide fue instalado en una galería especial de 2,5 m de ancho y 23 m de largo. Todas las sujeciones: los tornillos, tuercas, bastidores y otras piezas en el radio de 5 m del imán fueron hechos de materiales no magnéticos. Para evitar la explosión, toda la galería fue llenada de gas inerte.

El kerosene no era el único candidato al papel de mejor agente refrigerador. Todavía al principio del siglo XX, Kamerlingh Onnes y sus colaboradores del Laboratorio criogénico de Leiden estudiaron la dependencia entre la temperatura y la resistencia eléctrica de diversos materiales al bajar la temperatura. En una de las conferencias de aquel tiempo este grupo manifestó la seguridad de que en los años próximos se podría construir un solenoide con campo de 1 millón de Oe, aproximadamente, si se empleara la refrigeración profunda de los conductores. Desde entonces ha pasado más de medio siglo, no obstante, los científicos no han logrado aún obtener un campo estacionario de 1 millón de Oe.

¿Cómo razonaban Onnes y sus colaboradores? Estudiaban la resistencia eléctrica de diferentes metales a temperaturas muy bajas (-100 – -250°C , ó 170 – 20°K , aproximadamente) y descubrieron que al bajar la temperatura, la resistencia disminuía bruscamente. En cambio, en la fórmula de Fabry, conocida ya en aquella época, la resistencia eléctrica figuraba en el denominador. Si colocamos en la fórmula la resistencia nueva, más baja, resultará que el campo magnético, sin cambiar el consumo de potencia, aumentará. De esta manera Onnes y su grupo, al parecer, tenían pleno fundamento para suponer que el logro de un campo de 1 millón de Oe no estaba lejos.

Los investigadores subestimaron dos circunstancias: primero, no es fácil obtener temperaturas bajas, para eso se necesita consumir una energía considerable y, segundo, con el crecimiento del campo magnético a costa del fenómeno denominado reluctancia, aumenta también la resistencia

eléctrica del metal y, además, a temperaturas bajas se deja sentir sobremanera el efecto de reluctancia.

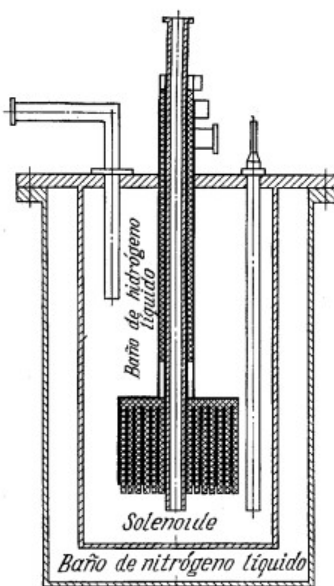


Figura 11. Se puede disminuir sustancialmente las pérdidas eléctricas en los solenoides, colocándolos en ambiente de temperatura baja. En este caso disminuye considerablemente la resistencia de los devanados del conductor.

En uno de sus artículos, el académico P. Kapitsa expuso los resultados de la comprobación de la idea formulada en su tiempo por Perrin: refrigerar los solenoides por aire líquido.

Resultó que, para enfriar un solenoide con el campo de 100 mil Oe, creado en la zona de 1 cm de diámetro, se necesitaría hacer pasar por éste 24 l/s de aire líquido. Para asegurar el funcionamiento del solenoide habría que construir una fábrica de producción de aire líquido. Quizá debido a esa circunstancia o, tal vez, por otras causas, el desarrollo de los imanes de temperatura baja, mas no superconductores o, como llamamos a veces, "criogénicos" se frenó sumamente.

La primera tentativa de aprovechar la temperatura baja para disminuir la resistencia eléctrica fue la construcción en 1961 de un solenoide de aluminio de 100 mil Oe, refrigerado por neón líquido (la temperatura de ebullición: 27°K). El diámetro interior del solenoide era de 30 cm y su largo, de 200 cm. Fue uno de los solenoides mayores del mundo, si no el más grande, teniendo en cuenta su campo colosal. Se destinaba a investigaciones termonucleares y, por tanto, estaba provisto en sus extremos de tapones magnéticos, en los cuales la intensidad del campo magnético llegaba a 200 mil Oe.

Mas, ese solenoide puede funcionar sólo durante 1 minuto, en el transcurso del cual, toda la reserva de neón líquido acumulado en los crióstatos se convierte en gas. Los devanados de aluminio pesan 5 t.

Después de haber construido ese solenoide, se hicieron numerosos intentos de superar su campo magnético utilizando otras sustancias refrigeradoras (por ejemplo, el nitrógeno o el hidrógeno líquidos), así como otros materiales para el devanado (por ejemplo, el sodio encajado bajo la presión en un fino tubo de acero). Pese a los resultados prometedores de esos experimentos, nadie ha logrado superar por ahora los logros mencionados.

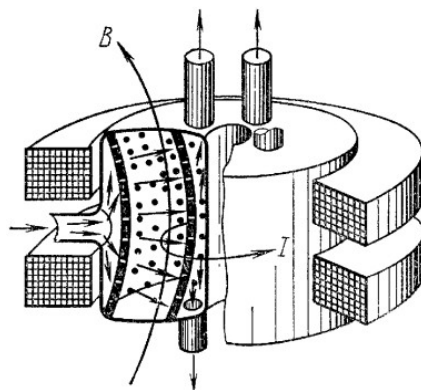


Figura 12. Imán no construido aún: el hidromán de Kolm. Como devanado se utilizará un chorro de plata o de sodio líquidos.

Con mayor frecuencia, tales imanes se alimentan de su propia instalación energética, que genera corriente continua con potencia de varios miles de kilovatios. Cuando esa potencia es insuficiente (como ocurrió con el solenoide récord de Kolm), sobre el eje de las máquinas se instalaba un volante. Al acumular en éste una energía suficiente, se puede, igual como lo hizo hace muchos años P. Kapitsa, en el transcurso de un tiempo corto obtener de los generadores una potencia varias veces mayor que la nominal.

En el Centro Real de Radares, en Inglaterra, sirven de fuente de alimentación de los solenoides potentes baterías de acumuladores, sacadas de un submarino.

Buscando nuevos caminos, Kolm construyó un modelo de solenoide, que denominó hidromán. Este solenoide consta de tubos coaxiales entre los cuales corre en sentido radial algún líquido de buena conductividad, por ejemplo, el sodio o la plata líquidos. Ambos tubos se hallan en un pequeño campo magnético de excitación.

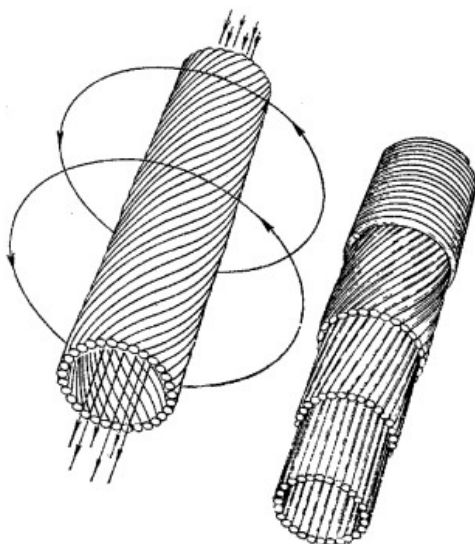


Figura 13. Devanados arrollados de este modo casi no sufren de la terrible plaga, de los electroimanes potentes: en ellos se disminuyen los esfuerzos que surgen debido a la presión del campo magnético.

El líquido suministrado atraviesa las líneas de fuerza del campo de excitación, lo que tiene por efecto la inducción en el líquido de la fuerza electromotriz. Bajo la acción de esa f.e.m., en el líquido empieza a circular la corriente eléctrica en sentido que coincide con la corriente que crea el campo de excitación. De esa manera, el propio líquido se convierte en una especie de devanado del solenoide. La intensidad del campo magnético que se puede obtener por medio de ese "devanado" depende de la velocidad del líquido, de su electroconductibilidad y de la magnitud del campo de excitación. Kolm calculó que en el hidroimán, lleno de plata derretida, a temperatura de 1000°C, en el campo magnético de excitación de 60 mil Oe, con la potencia consumida de 70 mil kw y velocidad de suministro de plata igual a 200 l/s se podría obtener un campo magnético de 400 mil Oe.

Sin embargo, abstrayéndose de las demás dificultades, el logro de campos tan enormes lleva a que, bajo la presión del campo magnético, los materiales del devanado empiezan a fluir. En el solenoide de Kolm de 250 mil Oe, la presión, como se había dicho ya, superaba en el triple la existente en el fondo de la depresión oceánica más profunda. Se sabe que la presión crece en proporción al cuadrado de la intensidad del campo. Al aumentar la intensidad del campo algo más del triple, obtendremos una presión décupla.

Siendo el campo de 1 millón de Oe, los esfuerzos magnéticos equivalen a los que se desarrollan en la boca de un cañón al disparar. Mantener semejante campo es lo mismo que detener un proyectil, estallado en la culata del cañón, de tal manera que el proyectil no salga ni explote el cañón.

Pero, ¿acaso es obligatorio que el crecimiento de la intensidad del campo esté relacionado con el aumento de la presión? La fuerza electromagnética se crea siempre a costa del producto vectorial de la densidad de la corriente en el devanado por la inducción del campo magnético (es la misma fuerza de Lorentz que desvía las partículas en los aceleradores). El producto vectorial es máximo cuando el sentido de la corriente es perpendicular a la dirección del campo magnético e igual a cero cuando las direcciones del campo y de la corriente coinciden. Varios científicos, aprovechando esa ley, elaboraron una configuración de devanados y de solenoides casi sin esfuerzos. Tales devanados y solenoides se denominan "sin esfuerzos". Hace poco se ha construido un gran sistema sin esfuerzos, destinado a investigar las reacciones termonucleares, que funciona sobre la base de un principio algo distinto: los esfuerzos se trasladan de los arrollamientos del solenoide a un macizo pedestal de acero.

Al estudiar la posibilidad de crear devanados sin esfuerzos, los científicos soviéticos y norteamericanos llegaron a la conclusión de que ese problema no era de los que no tenían solución, ni mucho menos.

Examinemos, por ejemplo, un devanado hecho en forma de una larga espiral con paso grande. Tal arrollamiento crea dos campos (desde luego, hay un solo campo, mas para la comodidad, lo descomponen a menudo en componentes axial y radial, cuya suma forma el campo real): el campo sumario, orientado a lo largo del eje y el campo que rodea cada alambrito por separado. El campo axial del devanado tiende a desgarrarlo, mientras que el campo circundante, al contrario, trata de comprimirlo. De modo que los esfuerzos, actuando en sentidos contrarios, se eliminan recíprocamente.

Es posible que resulte más apropiado otro tipo de arrollamiento. Se puede hacerlo de varias capas de modo que el devanado en la capa interior sea casi paralelo al eje, mientras que en la exterior, casi perpendicular a éste. En tal devanado el paso del campo axial al campo anular se realiza gradualmente y los esfuerzos de compresión se desarrollan uniformemente en todas las capas. Este sistema es el prototipo de potentes sistemas del futuro, en los cuales los colosales campos magnéticos se combinarán con la construcción elegante y afiligranada.

¹ La expresión "catarata", utilizada aquí, no fue casual. Para refrigerar este imán se aprovecha el agua del río que corre en las inmediaciones del laboratorio. La energía que se desprende en el solenoide es tan grande que la temperatura del agua en el sector del río, más abajo del laboratorio, tiene medio grado más.