

## Cerámica magnética\*

J. ESPINOSA DE LOS MONTEROS  
Colaborador Científico  
Instituto de Cerámica y Vidrio

### RESUMEN

*Tras de exponer abreviadamente la naturaleza, estructura cristalina y tipos de magnetismo que pueden presentar las ferritas. se discuten los métodos de preparación de estos materiales, dedicando especial atención a la preparación de las materias primas y a la sinterización de las piezas. Se comenta la importancia del control de calidad y se hace una revisión completa de las numerosas aplicaciones que presentan estos materiales, especialmente como matrices de memoria en las computadoras electrónicas.*

### SUMMARY

*After a brief introduction on the composition, structure and magnetism characteristics of ferrites, the manufacturing procedures are discussed, special attention is given to the preparation of the batch and to the thermal treatment which leads to the formation and sintering of the ferrites. The importance of quality control in the various steps of fabrication as well as in the finished products, is emphasized. The most relevant uses of ferrites are described.*

### Introducción.

El primer material magnético conocido por el hombre fue la magnetita, su descubrimiento se remonta al año 600 (a. J.), en tiempo del filósofo griego Thales de Mileto. La aparición del magnetismo y el desarrollo vertiginoso experimentado por la ciencia en los siglos XVIII, XIX y XX hizo preciso buscar materiales magnéticos cuya fuerza fuese muy superior a la que presentaba la magnetita, lo cual se consiguió a base de emplear determinados metales y aleaciones.

\* Conferencia pronunciada en la VIII Semana de Estudios Cerámicos. Barcelona, junio de 1966.

A partir de la última guerra mundial, el mundo científico volvió de nuevo sus ojos sobre los óxidos magnéticos, los cuales comenzaron de nuevo a salir del olvido en el que se les había tenido durante larguísimos años. Estos materiales son, en gran parte, responsables de la gran revolución electrónica que se ha producido en los últimos años, especialmente en el campo de las microondas, de las altas frecuencias y de los computadores electrónicos, permitiendo desarrollar nuevos y originalísimos circuitos cuya concepción parecía en principio violar las leyes fundamentales del magnetismo.

Al igual que ocurre con los productos dieléctricos cerámicos, las ferritas son compuestos de óxidos metálicos, tales como níquel, manganeso, cobalto y óxido férrico, preparados de acuerdo con las técnicas cerámicas más típicas.

La importancia de las ferritas como materiales magnéticos, estriba en ocupar un lugar único en la escala de frecuencias, pues combinan las permeabilidades magnéticas con la alta resistividad de volumen característica de los óxidos.

Las ferritas responden a la fórmula general  $M_eFe_2O_4$ , en la cual el hierro se encuentra en su valencia tres y  $M_e$  representa un ión metálico bivalente cuyo radio iónico esté comprendido entre 0,6 y 0,9 Å, tal como el  $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Co^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$  o  $Cd^{+2}$ .

La fórmula general de una ferrita dice, por sí misma, muy poco acerca de sus interesantísimas propiedades, lo único que de ella puede deducirse es la causa por la cual estos materiales presentan una elevada resistencia. El carácter iónico de estos materiales, obliga a los átomos metálicos a transferir alguno de sus electrones a los átomos de oxígeno y como resultado de este intercambio se llenan completamente los niveles de energía más bajos en los cuales pueden colocarse los electrones de acuerdo con la teoría cuántica; al no poderse mover estos electrones libremente y estar separados del nivel más próximo disponible por una amplia banda de energía prohibitiva se requieren altos voltajes para conseguir que alguno de estos electrones salte a la zona conductora y de aquí la elevada resistencia que el material presenta.

### Tipos de magnetismo.

Para poder comprender perfectamente las propiedades magnéticas inherentes a las ferritas, se hace preciso describir, aunque sólo sea ligeramente, los diferentes tipos de magnetismo que suelen presentarse más corrientemente.

Es de sobra conocido que el carácter magnético que presenta una determinada sustancia, tiene su origen en el momento magnético creado por el giro de los electrones. Como se sabe, la mayor parte de los electrones de cualquier átomo se agrupan por parejas, de tal forma que cada par electrónico creado compensa entre

sí sus spines, neutralizando así sus efectos magnéticos; sin embargo, algunos átomos, especialmente los correspondientes a los elementos de transmisión, contienen electrones desapareados, los cuales al no poder compensar sus spines originan un efecto magnético propio no-nulo.

El magnetismo, que tiene su origen en el desapareamiento de los electrones, se manifiesta de muy diversas formas según sea la fuerza de unión que exista entre los átomos. Si la fuerza de enlace existente entre estos átomos magnéticos es débil, la temperatura ambiente les suministrará energía suficiente para vencer las fuerzas de unión existentes entre los átomos, lo cual representará que cada uno de ellos se orientará al azar (fig. 1) y en consecuencia el magnetismo

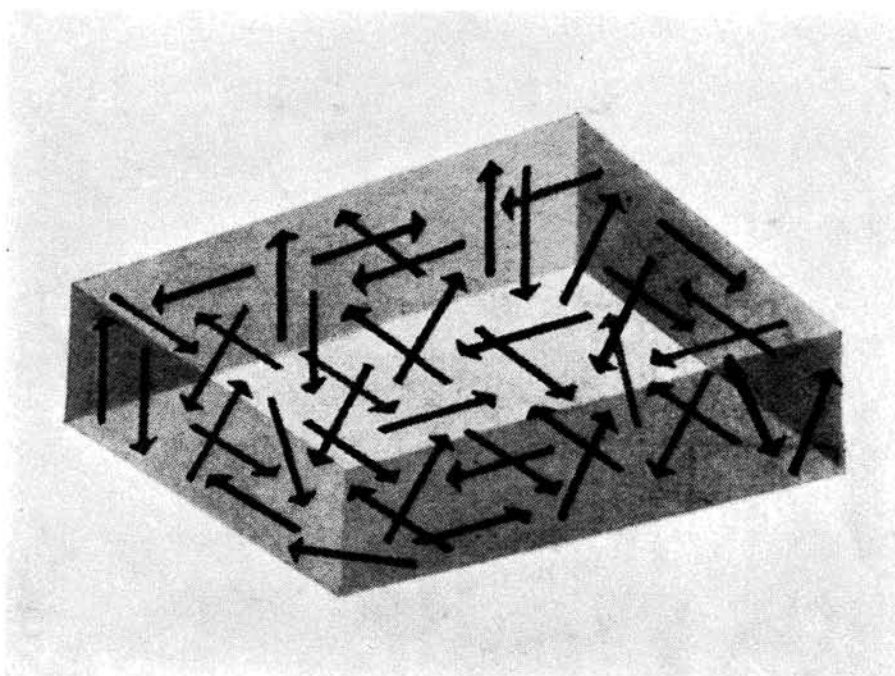


FIG. 1.—Representación esquemática del paramagnetismo.

que presentan será nulo; salvo en el caso de que exista un campo capaz de orientar a estos pequeños imanes atómicos. Las sustancias que presentan tal característica se denominan *paramagnéticas*.

Cuando la fuerza de unión de estos átomos magnéticos es elevada y la temperatura no es muy alta, cada átomo se orienta en una dirección determinada con respecto a los demás dando lugar a un magnetismo, pero si la temperatura

se eleva lo suficiente, puede ocurrir que las vibraciones térmicas venzan, eventualmente, a las fuerzas de unión, originando con ello una desordenación de los átomos. La temperatura a la cual un material deja de manifestar sus propiedades magnéticas se denomina temperatura o *punto de Curie*.

Según sea el tipo de fuerza interatómica, los pequeños imanes atómicos vecinos pueden orientarse entre sí de forma paralela, es decir, en la misma dirección y sentido, o antiparalela, es decir, con igual dirección pero sentidos contrarios. En el primer caso, los efectos magnéticos producidos por cada uno de los átomos se suman entre sí dando lugar a un magnetismo intenso, se dice entonces que el material es *ferromagnético* (fig. 2). Los materiales ferromagnéti-

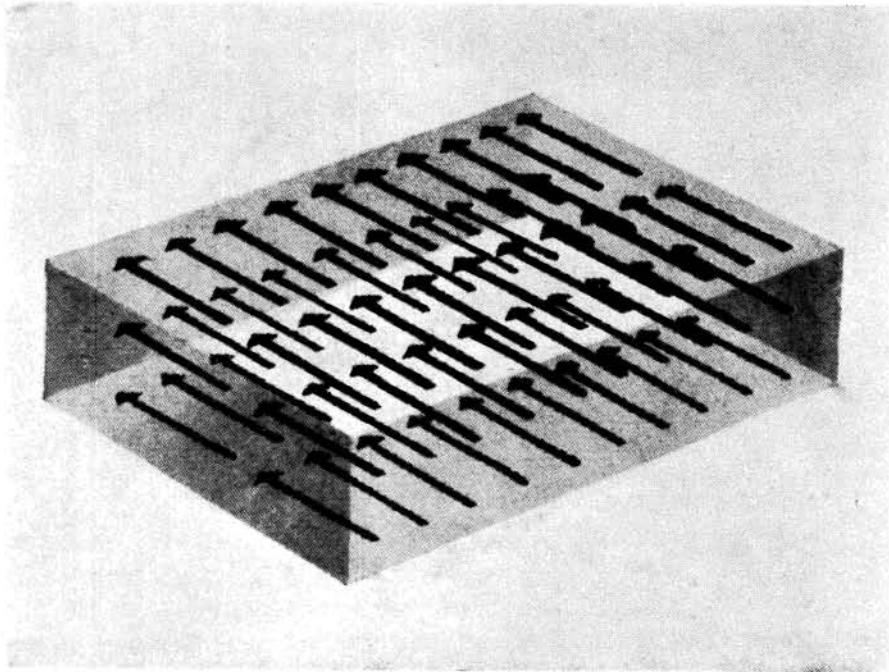


FIG. 2.—Representación esquemática del ferromagnetismo.

cos muestran su magnetismo más elevado cuando, como consecuencia de un campo magnético externo, todos los *dominios* o *zonas* en los que se considera dividido un cristal se colocan en línea, diciéndose entonces que el material está saturado.

Si el tipo de enlace es tal que los átomos magnéticos están orientados de forma antiparalela y todos ellos presentan la misma fuerza magnética, es decir,

el mismo número de electrones desapareados, el magnetismo resultante es nulo y la sustancia se denomina *antiferromagnética* (fig. 3).

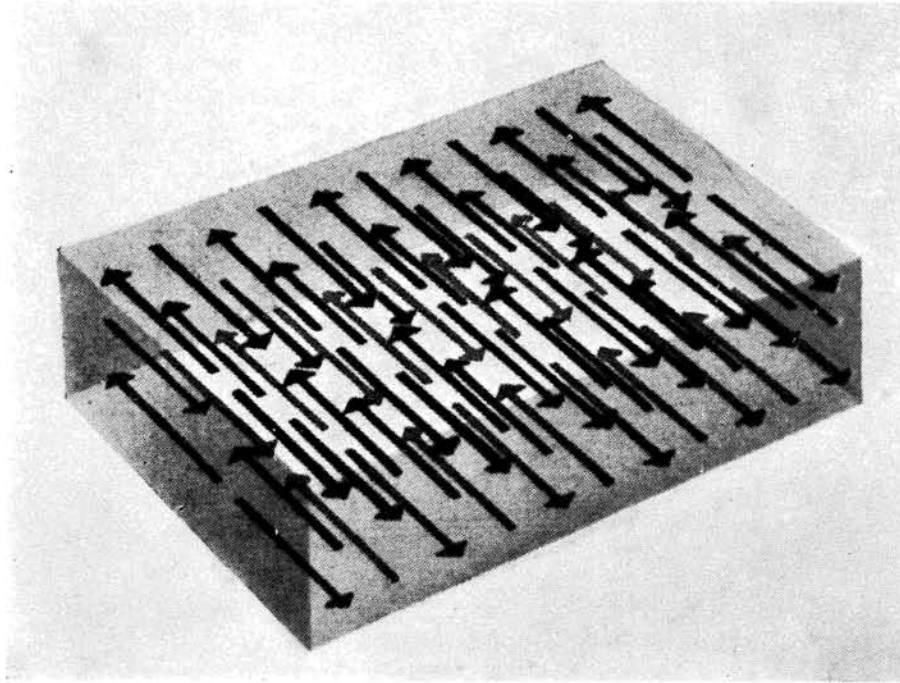


FIG. 3.—Representación esquemática del antiferromagnetismo.

Por último, puede ocurrir que aunque la orientación sea antiparalela, los átomos no sean todos de la misma naturaleza, con lo que el número de electrones desapareados será distinto de unos átomos a otros; si esto ocurre, los campos magnéticos antiparalelos mostrarán diferente intensidad entre sí, lo que dará lugar a un magnetismo resultante no nulo. Los cristales que presentan esta particularidad se denominan *ferrimagnéticos* (fig. 4), y en este grupo se clasifican las ferritas y otros óxidos magnéticos.

#### **Estructura cristalina de las ferritas.**

Las ferritas se caracterizan por presentar una estructura cristalina similar a la que tiene la espinela de magnesio ( $MgAl_2O_4$ ). La malla elemental o celdilla unidad de la red, presenta simetría cúbica compacta y contiene 8 grupos  $MFe_2O_4$ ,

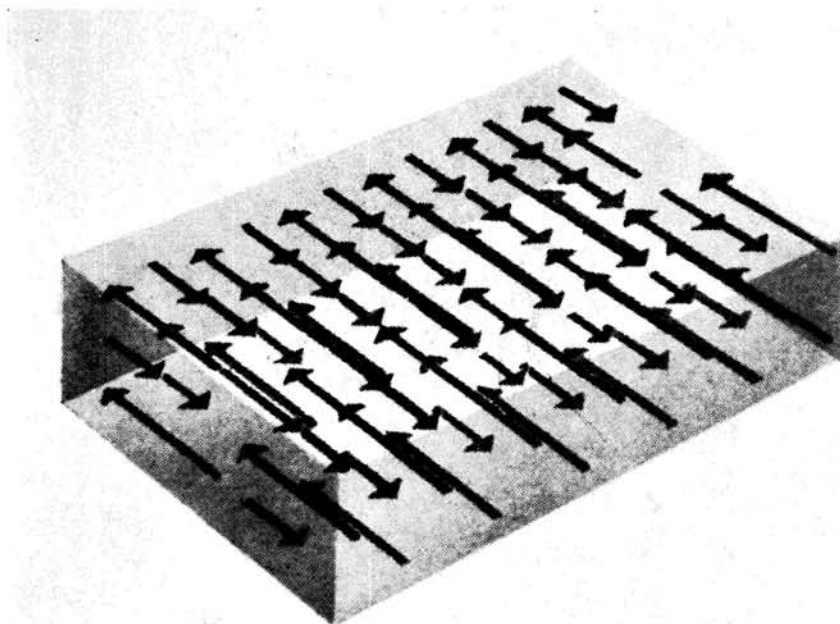


FIG. 4.—Representación esquemática del ferrimagnetismo.

es decir, 8 iones metálicos bivalentes, 16 iones trivalentes y 32 oxígenos. Los iones oxígeno forman por sí mismos una red cúbica centrada en las caras, en cuyo interior existen dos clases de huecos o lugares intersticiales, los tetraédricos limitados por cuatro átomos de oxígeno y los octaédricos limitados por seis.

La celdilla unidad posee 64 lugares tetraédricos de los que sólo 8 están ocupados por los iones metálicos, y 32 lugares octaédricos de los que sólo 16 están ocupados (fig. 5).

En un principio se pensó que los 8 iones bivalentes al distribuirse dentro de la red, lo harían en las 8 cavidades tetraédricas disponibles y que los 16 iones trivalentes lo harían en las 16 cavidades octaédricas. Esta hipótesis se vio confirmada en numerosos casos, pero, sin embargo, Barth y Posnjak demostraron que si bien la hipótesis anterior es correcta en la mayor parte de los casos, existen determinadas ferritas en las cuales los 8 iones bivalentes ocupan 8 de los 16 lugares octaédricos disponibles, en tanto que los 16 iones trivalentes se distribuyen uniformemente al azar, en los restantes lugares tetraédricos y octaédricos.

La existencia de estos dos casos, ha hecho preciso diferenciar claramente el

tipo de estructura que pueden presentar las ferritas, por lo que aquellas ferritas que se caracterizan por poseer una distribución de sus iones metálicos, como la descrita en el primer caso, se denominan ferritas con estructura de espinela nor-

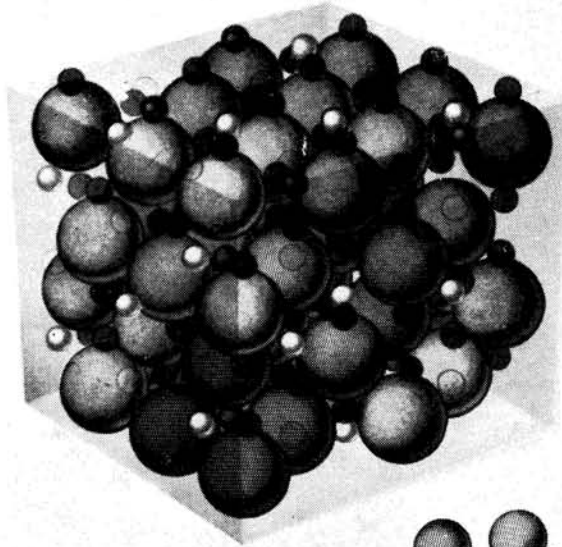
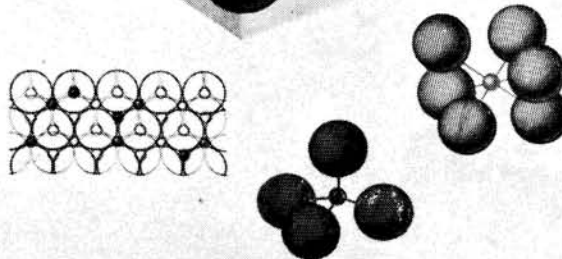
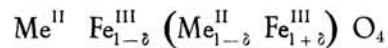


FIG. 5. — Estructura cristalina de las ferritas. Las esferas grandes representan átomos de oxígeno, y las pequeñas los átomos metálicos en sus posiciones tetraédricas (esferas pequeñas oscuras) u octaédricas (esferas pequeñas claras).



mal, en tanto que si su distribución iónica corresponde a la descrita en segundo lugar, se denominan ferritas con estructura de espinela inversa, o simplemente ferritas inversas.

Los casos de una ferrita con estructura completamente normal y el de una ferrita con estructura totalmente inversa, constituyen casos extremos. La distribución más general de los cationes se puede representar por medio de la fórmula:



en la que los iones que se encuentran ocupando lugares tetraédricos se representan, junto con sus valencias, colocados delante del paréntesis, mientras que los que ocupan lugares octaédricos se representan dentro del paréntesis; de esta forma una ferrita con estructura completamente normal presentará un valor de  $\delta=1$ , mientras que si es completamente inversa tendrá  $\delta=0$ . El valor de  $\delta$  constituye una medida de la inversión producida en la estructura; el valor de  $\delta$  que puede obtenerse en una determinada ferrita, depende, además de otros factores, del proceso de preparación y de la velocidad de calentamiento a que se haya sometido el material.

Mediante las técnicas de difracción de rayos X, difracción de neutrones y el estudio de las propiedades magnéticas, se puede conocer el tipo de ordenación estructural que corresponde a una determinada ferrita. Se ha comprobado que, normalmente, la distribución de los iones metálicos obedece a una ley de distribución de Boltzman, según la expresión :

$$\frac{\delta(1+\delta)}{(1-\delta)^2} = e^{-E/kT}$$

Aparte de por las técnicas de fabricación empleadas, la distribución de los iones metálicos en el interior de la red estructural, se encuentra afectada principalmente por el radio iónico, la configuración electrónica de los iones y la energía electrostática de los iones en la red, o energía de Madelung.

La forma de distribuirse los iones metálicos en los huecos de la red, condiciona factores de tanta importancia como son la fuerza de enlace entre los átomos y el comportamiento magnético de la ferrita; así, por ejemplo (fig. 6), en la ferrita de Zn, los iones  $Zn^{+2}$  se encuentran alojados en lugares tetraédricos y los iones férricos, alojados en las cavidades octaédricas, tiene electrones desapareados, éstos no se pueden orientar con respecto a los iones tetraédricos, lo cual origina un enlace tan débil entre sí que temperaturas por encima de los  $4^{\circ}C$  producen vibraciones térmicas lo suficientemente intensas como para originar un desordenamiento de los átomos, y de aquí que esta ferrita sea paramagnética.

Por el contrario, en la ferrita de níquel, los iones níquelosos ocupan lugares octaédricos, mientras que los férricos se encuentran distribuidos por igual entre los lugares tetraédricos y octaédricos de forma antiparalela, es decir, compensando sus efectos magnéticos entre ellos mismos, lo cual es causa de que el carácter ferrimagnético de este material se deba exclusivamente a los iones de níquel, cada uno de los cuales tiene dos electrones desapareados.

Si a una ferrita de níquel se le incorporan tres átomos de Zn por celdilla unidad, estos iones se localizan en los lugares tetraédricos y obligan a que tres



de los ocho iones férricos que existían en estos lugares se desplacen a ocupar tres lugares octaédricos; este desplazamiento lleva consigo una inversión de la

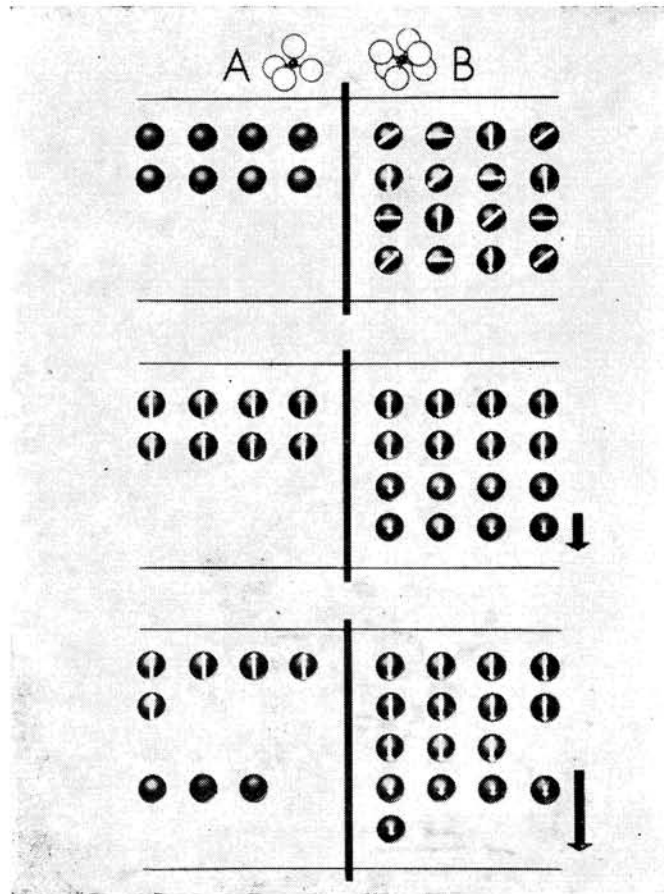


FIG. 6.—Distribuciones de los iones metálicos en la red de una ferrita. Los círculos con flechas grandes representan iones  $Fe^{+3}$ , los marcados con flecha pequeña, iones de níquel y los oscuros, iones Zn.

orientación magnética de estos iones, lo cual produce un reforzamiento del magnetismo que producían los iones de níquel, de aquí que la ferrita de níquel y cinc sea mucho más ferrimagnética que la de níquel.

#### Clasificación de las ferritas.

Hasta el momento, se ha centrado nuestra atención en aquellas ferritas cuyo ion bivalente es único, y sólo al hablar de la ferrita de Zn y Ni se ha dejado entrever la posibilidad de que existan ferritas con varios iones bivalentes di-

ferentes; el símbolo Me dado en la fórmula general de las ferritas con estructura de espinela, no sólo representa un ion metálico bivalente, sino que también puede emplearse para representar a una combinación de iones cuya valencia media sea dos; como, por ejemplo, una combinación de  $\text{Li}^{+1}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ , como ocurre en la ferrita  $\text{Li}_{0.5} \text{Fe}_{2.5} \text{O}_4$ . Si además de esta circunstancia se tiene en cuenta la posibilidad de que algunos de los iones férricos contenidos en la ferrita, puedan estar parcialmente reemplazados por otros iones metálicos bivalentes, como  $\text{Al}^{+3}$  o  $\text{Cr}^{+3}$ , se puede comprender fácilmente el gran número de ferritas con estructura de espinela normal o inversa que pueden formarse. De todas las ferritas teóricamente posibles, algunas no tienen existencia real por sí mismas, pero pueden existir en solución sólida con otras ferritas, tal es lo que ocurre con la ferrita de fórmula  $\text{Na}_{0.5} \text{Fe}_{2.5} \text{O}_4$ , la cual si bien no existe por sí misma, puede formar una solución sólida con la  $\text{Li}_{0.5} \text{Fe}_{2.5} \text{O}_4$ .

Las ferritas simples, conteniendo un sólo ion metálico bivalente, no suelen emplearse comercialmente, pues las propiedades magnéticas que la industria electrónica requiere, normalmente no puede conseguirse con ferritas simples. Quizás una de las características más útiles de las ferritas la constituya la propiedad de formar soluciones sólidas entre ellas, pues los cristales de las diferentes ferritas son similares en estructura y tamaño.

La casa Philips ha conseguido desarrollar últimamente un nuevo tipo de ferritas con estructura cristalina hexagonal, que responden a la fórmula general  $\text{Me Fe}_{12} \text{O}_{19}$ , en la que el símbolo Me, también representa a un ion metálico bivalente, el cual suele ser normalmente Ba, y cuya característica fundamental es la de presentar un carácter magnético permanente. También, como consecuencia de los últimos trabajos de investigación, se ha conseguido formar un nuevo tipo de ferritas cuya estructura cristalina es similar a la del granate ( $\text{Mn}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{12}$ ) y que responden a la fórmula general  $\text{Me}_3 \text{Fe}_5 \text{O}_{12}$ , en la que Me suele representar un ion de los elementos de las tierras raras.

En términos generales, las ferritas se clasifican en *duras* o *blandas*, según que presenten carácter magnético permanente, es decir, estructura hexagonal, o correspondan a una estructura cúbica de espinela. La Tabla I representa las características más importantes de ambos tipos de ferritas.

TABLA I

CARACTERÍSTICAS	FERRITAS	
	<i>Blandas</i>	<i>Duras</i>
Estructura cristalina	Cúbica (estruct. espinela)	Hexagonal
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	4,3 - 4,9	4,6 - 5,7
Resistencia específica	hasta 10 <sup>6</sup>	hasta 10 <sup>12</sup>
Temp. de Curie	hasta 600°C	hasta 450°C
Permeabilidad inicial	hasta 2.100	1,05 - 1,5
Fuerza coercitiva	0,7 - 10	1.600 - 2.600
Remanencia	hasta 2.250	1.800 - 4.200

### Materias primas.

En virtud de las rigurosas especificaciones que han de cumplir las piezas de ferrita, es necesario ejercer un rigurosísimo control, no sólo de las piezas terminadas, sino también de las materias primas y de las técnicas de preparación.

Las materias primas, sea cual fuere el método de obtención que se siga, han de presentar como condición indispensable una alta pureza, pues la presencia de pequeñísimas cantidades de impurezas en una materia prima condiciona que el producto acabado presente diferentes propiedades magnéticas. Independientemente del requisito de pureza química, especialmente en la fabricación de ferritas blandas, las materias primas deben presentar una alta reactividad y uniformidad, pues tales características condicionan factores de tanta importancia como son las técnicas de fabricación, las cuales repercuten, no ya sólo en la calidad de la ferrita, sino también en el costo de la misma.

### Métodos de preparación.

En términos generales, los diversos procesos de fabricación de ferritas, consisten en la mezcla de las materias primas, la presinterización o calcinación previa, la molienda del producto calcinado, la formación de la pieza, la sinterización y el desarrollo de las propiedades magnéticas deseadas.

En la Tabla II se pueden observar las materias primas más esenciales y sus respectivos procesos de homogenización y preparación; todos ellos presentan como característica común el tratar de conseguir la mayor homogeneidad posible, pues ésta afecta notablemente a las propiedades del producto acabado.

T A B L A II  
MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE FERRITAS

MATERIAS PRIMAS	Procesos de homogeneización
1. $\text{Fe}_2\text{O}_3$ con : MnO, CuO, NiO, ZnO, etc., o carbonatos, etc.	a) <i>En seco</i> : Mezclado-sinterizado, molienda en húmedo-secado.  b) <i>En húmedo</i> : Molienda-deshidratación-secado-calcinado-nueva molienda.
2. Oxidos.	Mezclado-fusión-ferrita fundida.
3. Solución salina de los metales formadores.	Precipitación en forma de $\text{Me}(\text{OH})_2$ o de $\text{CO}_3\text{Me}$ .   Eliminación de $\text{H}_2\text{O}$ y de $\text{CO}_2$ .
4. Carbonilos de hierro y carbonilos metálicos.	Calcinación en corriente de $\text{O}_2$ o de aire para formar ferrita y anhídrido carbónico.
5. Pentacarbonilos de hierro y tetra-carbonilos en fase gaseosa (metálicos).	Combustión de los carbonilos en corriente de aire o de $\text{O}_2$ para liberar ferrita y $\text{CO}_2$ .
6. Mezcla de los metales que forman la ferrita.	Introducción de $\text{O}_2$ en metales fundidos para formar ferrita.
7. $\text{Fe}_2\text{O}_3$ y $\text{CO}_3\text{Ba}$ o $\text{CO}_3\text{Sr}$ .	Homogeneizado-sinterizado-molienda.
8. Soluciones alcohólicas de hierro y nitratos metálicos bivalentes.	Oxidación-atomización-ignición del polvo de ferrita-reacción.

En la figura 7 se muestran esquematizados los dos procesos completos de fabricación más empleados en la actualidad.

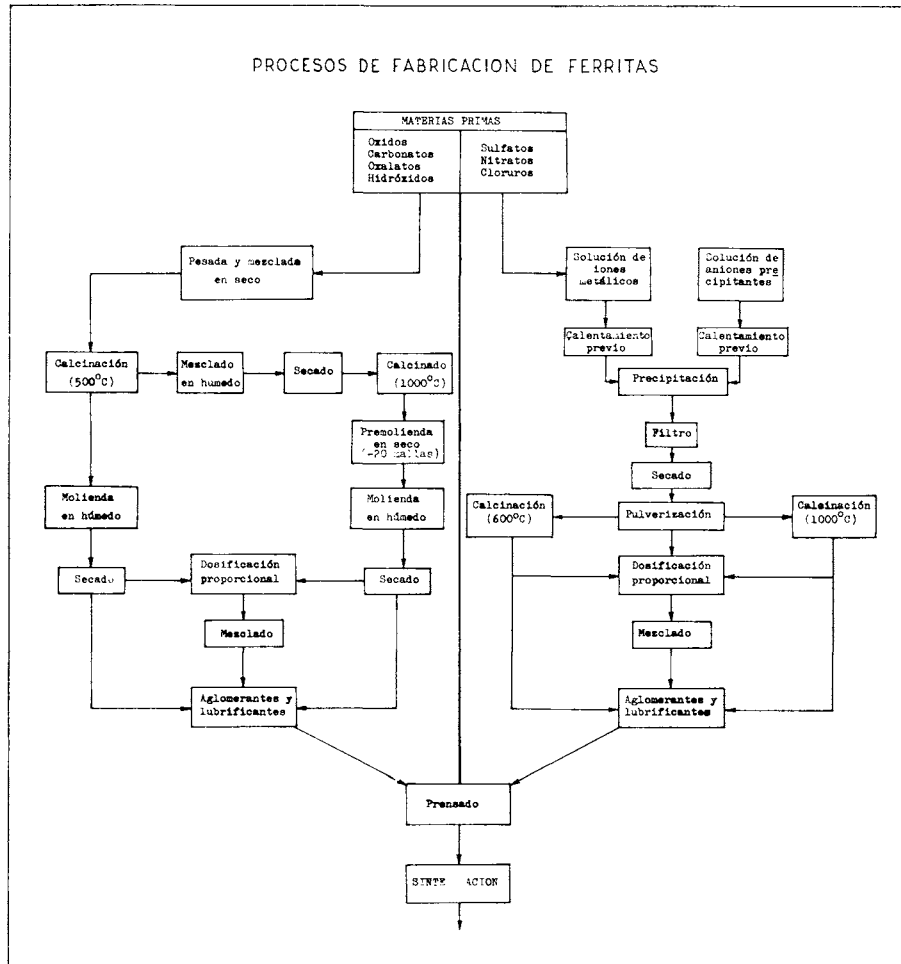


FIG. 7.

La importancia del mezclado es tal, que influye notablemente en el proceso de calcinación previa o presinterización que le sigue. Durante la presinterización, las materias primas reaccionan parcialmente entre sí para producir ferrita, al mismo tiempo que se produce la descomposición de los carbonatos y de los óxidos superiores.

La presinterización es quizás uno de los estados de fabricación más esenciales, pues los efectos que durante ella se producen no sólo afectan a los estados posteriores de formación de piezas y de sinterizado, sino que además condiciona,

en gran manera, las propiedades magnéticas del producto acabado. La temperatura y la atmósfera del horno durante la calcinación, son también factores que deben ser controlados perfectamente.

Se han ideado muchos métodos de controlar las reacciones que se producen durante la presinterización; de todos ellos los más importantes parecen ser la medida de la superficie específica, mediante la absorción de cripton a baja temperatura, la difracción de rayos X y la magnetización a saturación.

### Formación de piezas.

La formación de las piezas, a base del material previamente calcinado, puede realizarse mediante las técnicas de extrusión de prensado, según sea el tipo de ferrita que se desee y la forma de las piezas. De ambos métodos el más usual es el de prensado, en el que caben dos posibilidades: el prensado en seco y el prensado en húmedo, los cuales se diferencian principalmente entre sí porque en el prensado en seco se emplea hasta un 15 % de  $H_2O$ , en tanto que en el prensado en húmedo el producto entra en el molde en forma de una barbotina. La mayor parte de las piezas de ferritas se obtienen mediante el prensado en seco, especialmente cuando se trata de piezas pequeñas, pues éste permite controlar mucho mejor la granulometría de los polvos.

El prensado en húmedo se reserva para la obtención de ferritas duras y se caracteriza porque durante él se emplean campos magnéticos para producir propiedades magnéticas anisótropas.

Las técnicas de prensado isostático y de inyección en moldes, así como las de colaje, también encuentran gran aplicación en la formación de piezas de ferrita.

Como consecuencia de la no-plasticidad que presentan las materias primas, se hace preciso añadir a éstas determinados agentes orgánicos, los cuales deben presentar como condiciones indispensables, el no producir reacciones con las materias primas y descomponerse fácilmente durante la sinterización de las piezas, sin dejar residuos que puedan impurificar el material.

Los agentes orgánicos más empleados se dividen en tres grupos, a saber:

a) Agentes de colaje. b) Agentes aglomerantes. c) Agentes plastificantes. Los primeros se emplean para disminuir las fricciones internas durante el prensado y para proporcionar una uniformidad de la presión en la pieza.

Los agentes aglomerantes se añaden para aumentar la solidez de la mezcla granular prensada y elevar su resistencia mecánica. Los plastificantes incrementan, como su nombre indica, la plasticidad de la mezcla, siendo su empleo preciso en los procesos de extrusión.

La dosificación que debe emplearse con estos productos, depende principalmente de la granulometría de la mezcla, de las dimensiones y formas de las piezas y de la presión que se emplee, y suele oscilar entre el 0,2-1 %. Su incorporación a las materias primas se suele hacer o en forma de polvo o como soluciones acuosas en las concentraciones adecuadas.

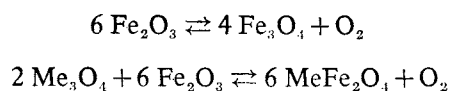
Las sustancias orgánicas más empleadas con estos fines son: los alginatos, los éteres de celulosa (metil-celulosa, carboximetilcelulosa, etc.) y el alcohol polivinílico.

### Sinterización.

El último paso en la obtención de ferritas es la sinterización de las piezas, la cual tiene su base en las reacciones en estado sólido que se producen entre los 1.100°C y los 1.450°C.

Muchos son los factores que influyen en la sinterización, pero quizás los más importantes sean la granulometría, la temperatura y la atmósfera del horno.

Si bien, como ya se ha indicado, la formación de ferritas comienza a temperaturas del orden de los 600°C, sólo cuando la temperatura alcanza los límites de la sinterización es cuando se producen las reacciones más importantes, las cuales pueden esquematizarse de la siguiente forma:



El exceso de óxido férrico que está presente en la mayor parte de las ferritas comerciales y la extensión en que se produce la primera de estas reacciones tiene una influencia enorme sobre la resistividad del material. La segunda de las reacciones antes citadas controla la cantidad de ferrita magnética formada. Ambas reacciones son reversibles y por ello la composición del producto final dependerá, de acuerdo con la ley de acción de masas, de la temperatura y de la presión parcial de oxígeno que exista durante la sinterización y de aquí la enorme importancia que tiene el control de las atmósferas del horno.

Para evitar la reoxidación, y que sobre las piezas sintetizadas se forme una capa no-magnética, se deben enfriar las piezas en una atmósfera con bajo contenido en oxígeno, hasta llegar a los 500°C. Como a partir de esta temperatura la velocidad de reoxidación se hace muy pequeña, es posible que los últimos estados de enfriamiento se realicen en atmósfera de aire.

La temperatura de sinterización es de tanta importancia como la atmósfera

del horno, pues de ella depende la contracción que han de sufrir las piezas, la cual suele variar entre el 15-25 %, según sea la densidad de la pieza en verde.

### Control de calidad.

Cuando un material ferromagnético se somete a la influencia de un campo magnético externo, las fuerzas de unión o enlaces que mantienen unidos a los dominios o zonas del cristal, se mueven de tal manera que tienden a orientarse dentro del campo externo aplicado. Cuando los *dominios* se encuentran completamente orientados en la dirección del campo se dice que el material está saturado.

La orientación que van adquiriendo los dominios magnéticos con respecto al campo externo aplicado, son la base de la llamada curva de histéresis, la cual caracteriza a todo material ferromagnético. Si a una probeta, en forma de anillo cerrado, se le aplica un campo magnético creciente  $H$ , se genera dentro del material un campo magnético inducido  $B$ , el cual es considerablemente mayor

que el campo magnético aplicado. El cociente que existe entre  $\frac{B}{H} = \mu$  se de-

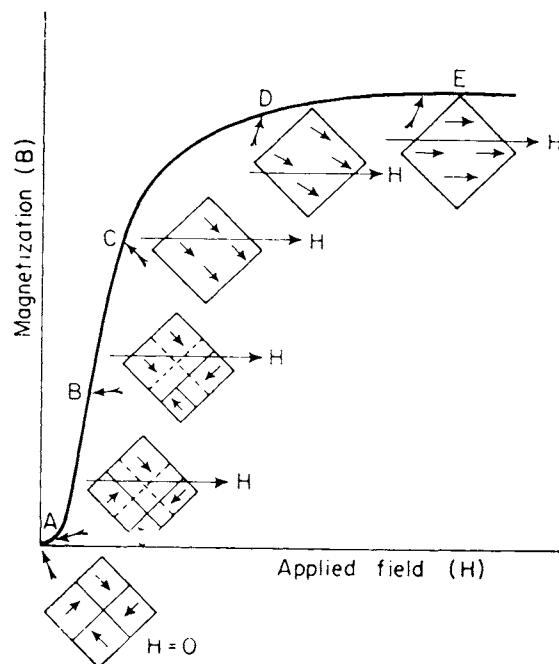


FIG. 8.—Movimiento de los dominios magnéticos en función del campo aplicado.



nomina permeabilidad magnética ( $\mu$ ) y representa el movimiento de los dominios magnéticos en cada momento, por lo que sus valores dependen principalmente de la intensidad del campo aplicado (fig. 8).

Cuando la intensidad de campo es baja, los dominios se mueven de forma reversible, definiéndose entonces una permeabilidad magnética inicial ( $\mu_0$ ), que en las ferritas puede variar entre 5 y 1.500 gauss/oersted y que puede alcanzar valores más elevados si se controla cuidadosamente la composición y el proceso de fabricación. Cuando el campo magnético externo aumenta, la curva de magnetización experimenta una curvatura hacia arriba, durante la cual los movimientos de los dominios se hacen irreversibles, como consecuencia de la rotura de los enlaces que existían entre los dominios cristalinos y las impurezas que retardaban su movimiento. La permeabilidad máxima ( $\mu_{mx}$ ) se define como la pendiente de la tangente a la curva en su punto de máxima curvatura y suele variar entre 40 a 50 u 8.000 a 9.000 gauss/oersted, según sea la ferrita.

Las permeabilidades inicial y máxima de un material son propiedades íntimamente relacionadas con su estructura cristalina; la pendiente de la curva de magnetización depende de las fricciones internas existentes en el material, las cuales proceden de las irregularidades estructurales e impiden el movimiento de los dominios.

Cuando a partir del punto de saturación, el campo magnético externo disminuye hasta hacerse nulo, el campo magnético inducido en el material decrece hasta un valor no-nulo denominado intensidad magnética coercitiva. Si a partir

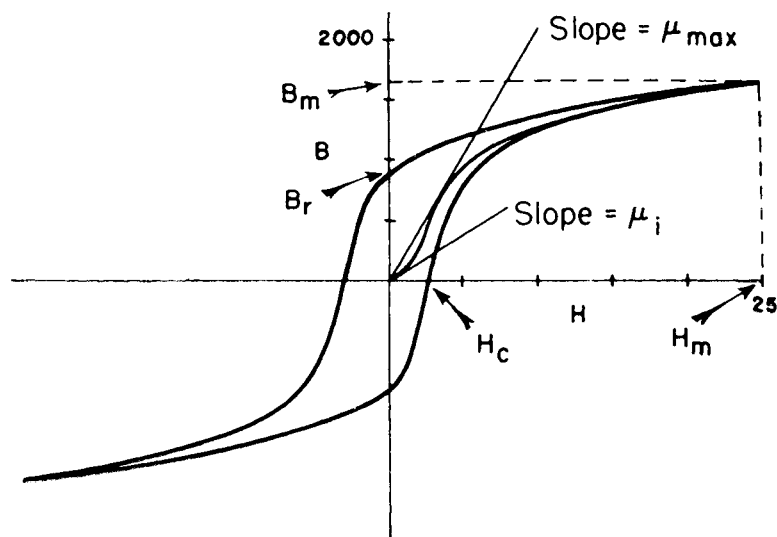


FIG. 9.—Curva de histéresis de un material ferromagnético.

de este punto el campo externo alcanza valores cada vez más negativos, el material comienza a saturarse en sentido contrario, por lo que al final de un ciclo completo la magnetización habrá originado una curva simétrica. El área comprendida dentro de ambas curvas, representa la pérdida de histéresis o la energía desarrollada durante el ciclo (fig. 9).

Una propiedad que condiciona el uso de una determinada ferrita, es su comportamiento con la temperatura. En todo material magnético existe una temperatura por encima de la cual el material se hace paramagnético, es decir, pierde sus propiedades magnéticas, y que se denomina temperatura de Curie, la cual marca el momento en el cual la agitación térmica impide la orientación de los momentos magnéticos con respecto al campo aplicado. Mediante un control de la composición se pueden obtener ferritas cuya temperatura de Curie oscile entre 600°C y 0°C.

#### **Aplicaciones de las ferritas.**

Son tan numerosos los casos en los que las ferritas encuentran aplicación, que se hace imposible, dado el carácter general de este trabajo, describirlas con detalle, por lo que nos limitaremos a exponer en líneas generales los campos en que encuentran aplicación.

La mejor forma de ver el inmenso campo aplicativo de las ferritas consiste en citar sus usos a tenor de las propiedades que presentan, para lo cual se hace indispensable citar por separado las aplicaciones de las ferritas blandas de las densas o duras.

##### *A. Aplicaciones basadas en la alta permeabilidad y bajas pérdidas en altas frecuencias.*

1. Transformadores para alta frecuencia.
2. Transformadores de impulsos.
3. Bobinas de deflexión para televisión o radar.
4. Antenas para radios y transistores.
5. Transformadores de barrido para TV.
6. Hornos de inducción.
7. Apantallamientos.
8. Bobinas para circuitos de sintonización.
9. Bobinas para teléfonos.
10. Bobinas de ignición.

J. ESPINOSA DE LOS MONTEROS

11. Pequeñas dinamos y motores (servomecanismos, centrífugas de alta velocidad, etc.).
12. Sintonizadores de permeabilidad por movimiento mecánico de un núcleo.

B. *Aplicaciones basadas en la sensibilidad de la permeabilidad a la permagnetización.*

1. Moduladores para transmisores (equipos militares).
2. Amplificadores magnéticos (servomecanismos).
3. Control automático de frecuencias.
4. Máquinas aceleradoras de partículas de altas energías cinéticas.

C. *Aplicaciones basadas en sus características lineales.*

1. Medidores de aceleración y pickups.
2. Filtros mecánicos.
3. Generadores electromecánicos para ultrasonidos.
4. Hidrófonos.
5. Estabilizadores de frecuencia.

Las ferritas duras encuentran enorme aplicación en :

1. Altavoces.
2. Imanes permanentes.
3. Teléfonos (timbre, micrófonos electrodinámicos, etc.).

4. TV.  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Enfoque magnético.} \\ \text{Atrapaiones de pantalla.} \\ \text{Centrador de imagen.} \\ \text{Corrección de deformaciones.} \\ \text{Control de linealidad.} \end{array} \right.$

5. Sistemas para tocadiscos y cintas magnetofónicas.

6. Motores.  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Motores para ventiladores.} \\ \text{Rotores para dinamos de bicicletas.} \\ \text{Rotores para platos magnéticos de motor.} \\ \text{Motores síncronos para radiorrelojes.} \\ \text{Motores para limpiaparabrisas.} \\ \text{Generadores de baja potencia de c. a.} \\ \text{Dinamos.} \end{array} \right.$

7. Generales. { Acoplamientos magnéticos.  
 Cuñas magnéticas.  
 Imanes para grúas.  
 Separadores de partículas de hierro.  
 Cierres magnéticos de puertas.  
 Juguetería.  
 Fijadores de objetos.  
 Orientadores de lámparas.

Por la enorme importancia que han adquirido en los últimos años los cerebros electrónicos, se ha creído oportuno describir, aunque sólo sea someramente, el papel desempeñado por las ferritas en las computadoras electrónicas.

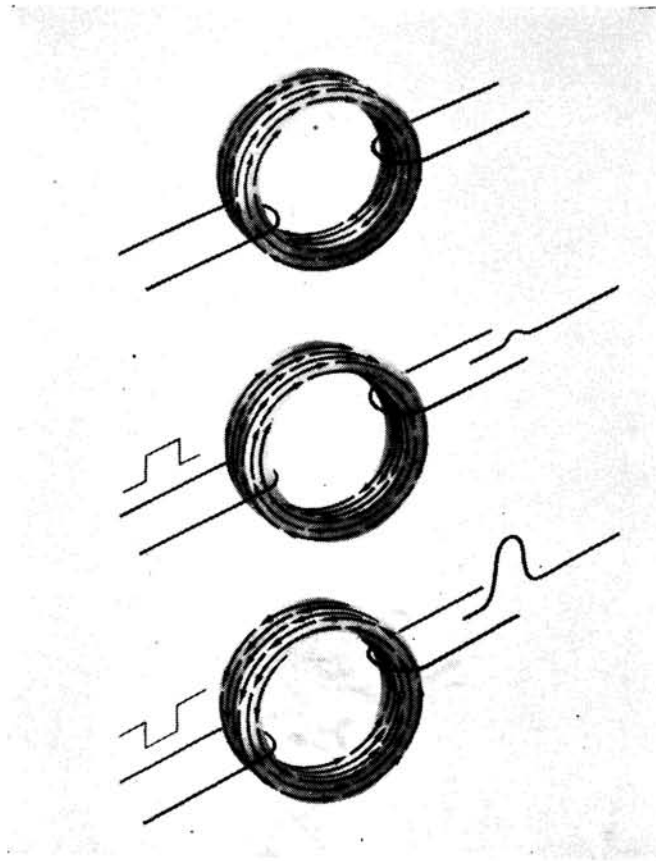


FIG. 10.—Elemento de memoria de ferrita para computadoras.

Si se opera en un sistema binario, en el cual todos los números se expresan en la forma de 0 y 1 y toda la información se traduce en los términos *si - no*, las máquinas computadoras necesitan elementos de circuito que tengan dos estados alternos. Las ferritas cumplen esta condición, pues se pueden magnetizar tanto en el sentido de las agujas del reloj como en sentido contrario; de esta forma uno de los tipos de magnetización puede representar el 0 y otro el 1.

Imaginemos un núcleo de transformadores pequeño en forma de anillo (figura 10), en el cual se hayan embobinado un primario y un secundario. La información, llega procedente de los circuitos computadores, en forma de un pulso de corriente al primario y como consecuencia magnetiza al anillo, por ejemplo, en el sentido de las agujas del reloj; operando así, el núcleo retiene su magnetización y "memoriza" la información recibida. Si posteriormente se le quiere interrogar bastaría enviar una nueva corriente a través del embobinado; si la corriente enviada es tal que está en dirección opuesta a la que se envió en un principio, el anillo se magnetizará en sentido contrario al de las agujas del reloj. La reversibilidad experimentada por el campo magnético produce una corriente de gran voltaje en el secundario, indicando así que la magnetización primitiva era opuesta a la enviada.

Si, por el contrario, la corriente original y la interrogante están en la misma dirección, no se produce ningún cambio en la magnetización, con lo que el campo creado en el secundario cambiará muy poco. El débil voltaje de corriente que se origina en este caso indicará que el anillo estaba magnetizado en el mismo sentido.

Las matrices de memoria de las grandes computadoras electrónicas constan de miles de pequeños núcleos de ferrita. Su embobinado es bastante más complicado que el descrito, pero el principio por el que operan es el mismo.

Es digno de hacer constar, por la gran influencia que tiene en el vertiginoso desarrollo de la ciencia, que el empleo de las ferritas ha sido uno de los factores que más han contribuido a la miniaturización de los aparatos y circuitos hoy en día empleados.

#### BIBLIOGRAFIA

1. LASTER HOGAN, C.: "Ferrites". *Sci. American*, 202 (6), 92-104 (1960).
2. CLEVINGER, TH., R.: "Advances in Ferrite Technology". *Am. Ceram. Soc. Bull.* 44, 216-220 (1965).
3. ALLEN, A. C.: "Ferrites". *Ceram. Ind.* 85 (1), 35-74 (1965).
4. RIES, H. B.: "Technology of the ferrites". *Interceram*, marzo, 84-92 (1966).
5. *IBID*: *Interceram*, julio, 177-179 (1966).
6. SMIT, J. y H. P. J., WIJN: "Ferrites". *Biblioteca Técnica Philips* (1965).

7. SCHOENBERG, E. A.: "Ferrites". Jour. Am. Ceram. Soc. 4 484 (1958).
8. SWALLOW, D.: "Magnetic Ceramics". Jour. Brit. Ceram. Soc. Vol. 2, núm. 2, 243-48 (1965).
9. REMDE, H. F.: "Properties and uses of ferrites". Ceram. Age. 64 (3), 16-18, 59 (1954).
10. BLACKMON, L. C. F.: "Some factors involved in the preparation of a reproducible magnesium - manganese ferrite." Trans. Brit. Ceram. Soc. 56 (11), 624-35 (1957).
11. "Progress in dielectrics. Vol. 5, 39-89 (1963).
12. "Modern Materials". Vol. 3. 259-341 (1962). Academic Press N. Y. y Londres.

