

LA ATRACCIÓN FASCINANTE DE LOS FERROFLUIDOS

Por Brian Rohrig

¿Recuerdas que te fascinaban los imanes cuando eras niño? Usando un imán de su refrigerador, podrías recoger pequeños objetos metálicos, como clips de papel, como por arte de magia. Pero otros artículos de metal, incluyendo los centavos, no se moverían bajo la atracción de un imán.

Una idea que podrías haber intentado es atraer un líquido a un imán, que habría sido aún más genial de ver. Puede que no lo hayas logrado, ¡pero es posible! Y, sorprendentemente, estos líquidos se pueden encontrar en artículos familiares como billetes de un dólar, cajas de bolas y, cada vez más, en obras de arte. Estos intrigantes líquidos se llaman **ferrofluidos**.

Los ferrofluidos siempre son de color negro azabache y son fascinantes a la vista. Si sostiene un imán potente cerca de un ferrofluido, se forman picos de líquido. Los picos revelan las líneas de campo magnético invisibles que de otra manera rodean al imán.

Entonces, ¿qué son estas sustancias de todos modos? Puede notar que el término ferrofluidos es similar a la palabra latina para hierro, ferrum. De aquí proviene el símbolo Fe. Si bien no es hierro puro, los ferrofluidos contienen hierro, generalmente en forma de óxido de hierro (Fe_3O_4), comúnmente conocido como **magnetita**.

La magnetita se encuentra comúnmente en la naturaleza. La forma más fácil de encontrarla es hacer una lechada de tierra y agua y luego removerla con un poderoso imán. Los trozos de material duro que se acumulan en el imán probablemente sean magnetita. La piedra imán, un mineral magnético natural, es un tipo de magnetita que se utilizó en las primeras brújulas conocidas del mundo.

LA NATURALEZA DE LA ATRACCIÓN

Para entender por qué la magnetita es atraída por un imán, primero debemos observar la **configuración electrónica** del hierro.

Una configuración electrónica es el arreglo de los electrones alrededor del núcleo de un átomo. Los electrones ocupan **capas** alrededor de un núcleo que corresponden a niveles de energía específicos. Las capas más cercanas al núcleo tienen menos energía que las que están más lejos del núcleo.

A cada capa se le asigna un número y

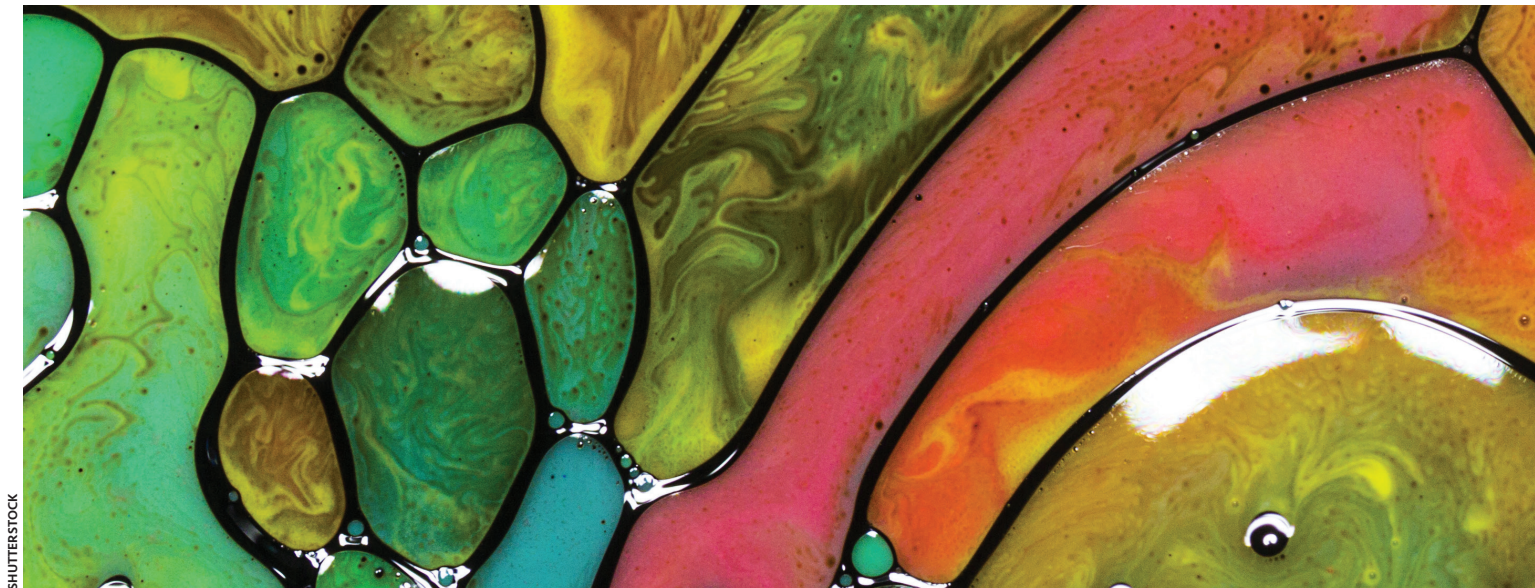
1s		1s
2s		2p
3s		3p
4s	3d	4p
5s	4d	5p
6s	5d	6p
7s	6d	7p
	4f	
	5f	

El arreglo de la tabla periódica está basado en configuraciones electrónicas y se divide en bloques que corresponden al tipo de subcapa que se está llenando.

una letra. El número, o coeficiente, se refiere al nivel de energía principal. La letra (s, p, d y f) se refiere a la subcapa dentro del nivel de energía.

Un superíndice se refiere al número de electrones dentro de una subcapa. Entonces, una configuración de $1s^2$ significa que hay dos electrones en la subcapa s del primer nivel de energía principal. Los átomos de hierro tienen una configuración electrónica de $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$.

En la magnetita, Fe_3O_4 , algunos de los electrones del hierro se han donado al oxígeno para formar óxido, O^{2-} . Para equilibrar los ocho



SHUTTERSTOCK

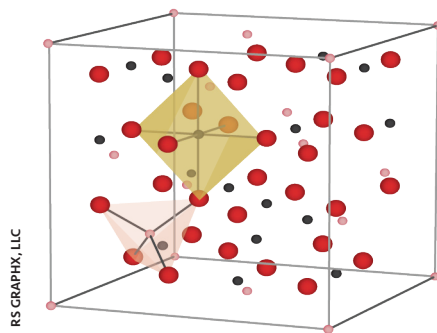
Los ferrofluidos no solo son útiles, sino que también son cautivadores a la vista. Los artistas usan los fluidos y los imanes, junto con mezclas coloridas de otros líquidos como leche y colorantes alimentarios, para crear obras de arte abstractas.

electrones recibidos por los cuatro oxígenos en Fe_3O_4 , uno de los átomos de hierro ha cedido dos electrones, para formar Fe^{2+} o $Fe(II)$, mientras que los otros dos átomos de hierro han cedido tres electrones cada uno para formar Fe^{3+} o $Fe(III)$. $Fe(II)$ pierde sus electrones 4s y tiene una configuración de $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6$, mientras que $Fe(III)$ pierde un electrón 3d adicional y tiene una configuración de $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$.

Cada subcapa se divide en orbitales, que son regiones del espacio en las que es más probable que se encuentren los electrones. Cualquier orbital puede contener un máximo de 2 electrones. La subcapa d contiene 5 orbitales y puede contener un máximo de 10 electrones.

Dentro de un orbital, los electrones crean pequeños campos magnéticos como si estuvieran girando. Un electrón crea un campo magnético orientado en una dirección y el campo magnético del otro electrón está orientado en la dirección opuesta. Las dos direcciones opuestas, llamadas espines, se denotan con una flecha hacia arriba o hacia abajo.

Según la **regla de Hund**, cada orbital dentro



RS GRAPHX, LLC

La magnetita contiene átomos de hierro en dos diferentes ambientes. Algunos (en rosa) son rodeado por cuatro átomos de oxígeno que forman los vértices de un tetraedro. Otros (en negro) están rodeados por seis átomos de oxígeno en un entorno octaédrico.

de una subcapa debe estar lleno por un electrón antes de que se pueda agregar un segundo electrón. Dado que los electrones están cargados negativamente, se repelen entre sí, por lo que es más favorable energéticamente que un electrón ocupe su propio espacio que dos electrones se agrupen en un solo orbital.

Un **diagrama de llenado de orbitales** muestra el arreglo de los electrones dentro de sus orbitales.

Por ejemplo, el siguiente diagrama muestra las orientaciones y la distribución de los electrones en la subcapa d del hierro en un ion $Fe(II)$:



En el diagrama, cada línea horizontal representa un orbital. Con seis electrones encajando en cinco orbitales, solo un orbital está completamente lleno, mientras que los otros están parcialmente llenos. Este arreglo influye en el magnetismo de un material porque cuando dos electrones están en el mismo orbital, tendrán espines opuestos que anulan los campos magnéticos del otro. Los otros electrones desapareados de un átomo se alinean todos en la misma dirección, por lo que sus campos magnéticos se refuerzan entre sí.

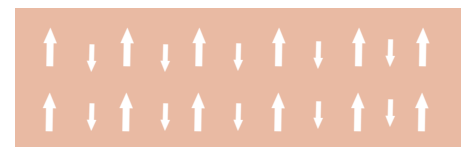
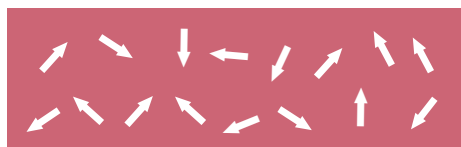
El hierro(III) tiene un electrón menos que el hierro(II), por lo que en realidad tiene un electrón más desapareado y, por lo tanto, un campo magnético más grande:

PARAMAGNÉTICO

FERROMAGNÉTICO

FERRIMAGNÉTICO

KELSEY CASSELBURY



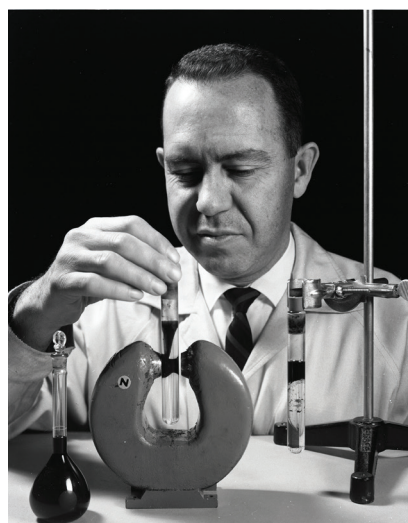
En las sustancias paramagnéticas, los espines de los electrones se orientan aleatoriamente. En materiales ferromagnéticos, los espines son paralelos. Y en el ferrimagnetismo, los espines son paralelos y en direcciones opuestas, pero no se cancelan entre sí.



En la mayoría de los materiales que contienen hierro(II) o hierro(III), los átomos actúan como pequeños imanes, pero el campo magnético de cada átomo está orientado aleatoriamente en relación con los átomos cercanos. Si lo coloca cerca de un imán permanente, solo hay una ligera tendencia a alinear los campos de los átomos en relación con el imán externo, lo que resulta en una ligera atracción hacia el imán (generalmente demasiado pequeña para darse cuenta si sostiene el imán contra el material). Una atracción tan débil por los campos magnéticos se llama **paramagnetismo**.

Pero en la magnetita, está sucediendo algo más. Los espines de los átomos de hierro contiguos en la magnetita no están orientados al azar, sino que están determinados por las direcciones de los espines de los átomos contiguos. Un tercio de los átomos de hierro (que son Fe^{3+}) en la magnetita están cada uno rodeado por cuatro átomos de oxígeno, adquiriendo la forma de un tetraedro. Los otros dos tercios de los átomos de hierro (el otro Fe^{3+} y el Fe^{2+}) están rodeados por seis átomos de oxígeno cada uno, formando la forma de un octaedro.

Los átomos de hierro tetraédricos tienen sus espines orientados estrictamente opuestos a los átomos de hierro octaédricos, formando una especie de tablero de ajedrez tridimensional de espines que van en direcciones alternas. Pero debido a que el hierro tetraédrico tiene solo 5 espines, mientras que los hierros octaédricos tienen un total de 9 espines, eso significa que, por cada tres átomos de hierro, hay un exceso de cuatro espines apuntando en la misma dirección. Multiplique eso por los billones de



NASA
El inventor de los ferrofluidos, Stephen Papell, demuestra los efectos de un campo magnético en un propulsor magnético mezclado con agua en 1963.

átomos en incluso el trozo más pequeño de magnetita (como las partículas diminutas en los ferrofluidos) y esos espines se suman a una pequeña barra magnética macroscópica. Este tipo de ordenamiento global de espines para producir una sustancia que ahora es fuertemente atraída por un campo magnético se llama **ferrimagnetismo**.

Si todos los espines están orientados de la misma manera (en lugar de solo un exceso de un tipo), se llama ferromagnetismo y produce efectos similares. El hierro metálico, el cobalto y el níquel son todos ferromagnéticos.

¿Qué pasa con los átomos de oxígeno en la magnetita? Los átomos de oxígeno neutrales tienen la configuración electrónica $1s^2 2s^2 2p^4$, por lo que con tres orbitales en cada subcapa p tienen dos electrones desapareados. Pero los iones de óxido en la magnetita tienen dos

electrones añadidos y todas sus subcapas están llenas ($1s^2 2s^2 2p^6$). Hay un número igual de espines de electrones en direcciones opuestas, por lo que los iones de óxido no contribuyen de una forma u otra al magnetismo. Si todos los átomos de una sustancia son así, la sustancia es débilmente repelida por los campos magnéticos (por lo general, demasiado débil para notar) y se dice que es **diamagnética**. Tanto el papel como el plástico son diamagnéticos.

¿QUÉ SON LOS FERROFLUIDOS?

Ahora que tenemos la parte del magnetismo abajo, echemos un vistazo más de cerca a lo que son los ferrofluidos. Los ferrofluidos no son verdaderas soluciones, que siempre son transparentes, ni son meras suspensiones temporales, que se sedimentan con el tiempo. Más bien, son suspensiones coloidales—generalmente conocidas simplemente como coloides—cuyas partículas permanecen permanentemente suspendidas.

Los coloides siempre tienen dos fases—la fase dispersa y la fase continua. En los ferrofluidos, las partículas de magnetita se dispersan en un líquido a base de aceite como fase continua.

Los coloides suelen tener tamaños de partículas de hasta 100 nanómetros (nm), una milésima parte del diámetro de un cabello humano. En un ferrofluido, una partícula de magnetita típica tendrá un diámetro de aproximadamente 10 nm. Estas partículas pueden ser molido de magnetita o químicamente sintetizadas.

Un ferrofluido típico tiene aproximadamente un 5% de magnetita y un 85% de líquido a base de aceite en volumen. Lo que constituye que el 10% de la mezcla es un surfactante. El surfactante es un compuesto que recubre

el exterior de las partículas de magnetita y ayuda a mantenerlas dispersas en el aceite. Esto evita que se aglutinen en trozos que se desprenderían de la solución. El ácido oleico (un ácido graso, $C_{18}H_{34}O_2$) y la lecitina de soja (un emulsionante alimentario común, $C_{35}H_{66}NO_7P$) son dos surfactantes comunes que se utilizan en los ferrofluidos.

DE COMBUSTIBLE DE COHETES A MÁS USOS TERRESTRES

Los ferrofluidos fueron desarrollados originalmente por científicos de la NASA en la década de 1960 que se enfrentaron a un desafío: cómo mover el combustible del cohete desde el tanque a la cámara de combustión en gravedad cero. Un ingeniero propuso infundir el combustible con partículas magnéticas y luego usar un poderoso imán para atraer el combustible hacia la cámara de combustión. Por ingeniosa que fuera esta idea, finalmente sería rechazada. La adición de partículas magnéticas redujo la eficiencia del combustible. En la exploración espacial, cada parte del peso es significativa y el combustible menos eficiente significa que necesita más.

Pero el fracaso de una idea llevó al uso exitoso de ferrofluidos en una amplia gama de otras aplicaciones.

Uno de los usos más comunes que podría probar usted mismo es el uso de ferrofluidos en la moneda. Si sostiene un imán poderoso cerca del final de un billete de un dólar, será atraído hacia el imán. Este truco es posible porque la tinta usada para imprimir el billete contiene un poco de ferrofluido. La tinta magnética es una de las muchas características anti-falsificación que se encuentran en cualquier denominación de moneda estadounidense—un billete no magnético insertado en una máquina expendedora sería rechazado rotundamente.

Los ferrofluidos también se están probando para su uso en otras áreas. Por ejemplo, podrían ayudar a limpiar los derrames de petróleo.

Los ferrofluidos son a base de aceite y se adhieren fácilmente al petróleo ("lo similar atrae lo similar"), que luego puede extraerse del agua mediante potentes imanes. Los ferrofluidos también han mostrado un gran potencial en el campo médico. Un tipo prometedor de terapia contra el cáncer llamado hipertermia por nanopartículas magnéticas consiste en inyectar ferrofluido en un tumor canceroso y

DESDE EL COMBUSTIBLE DE COHETES FALLIDO HASTA LOS USOS DIARIOS Y MÁS ALLÁ

Los ferrofluidos se inventaron para el programa espacial de la NASA en la década de 1960, pero fallaron como aditivo de combustible para cohetes, la aplicación a la que estaban destinados inicialmente. Pero el ingenio del material estimuló a ingenieros y científicos a encontrar una variedad de otros usos para él.

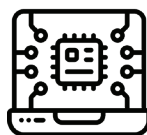


MONEDA

Como medida contra la falsificación, los dólares estadounidenses se imprimen con tinta que contiene pequeñas cantidades de ferrofluidos.

ALTAVOCES

Otro uso común de los ferrofluidos es en altavoces. El material magnético aleja el calor de las bobinas de voz y amortigua las vibraciones no deseadas para un sonido más claro.



CHIPS DE COMPUTADORA

Los ferrofluidos se han utilizado en la producción de chips semiconductores para electrónica. Los fabricantes usan el material para crear un sello alrededor de los componentes para mantener fuera el aire, el polvo y el vapor de agua.

TRATAMIENTOS MÉDICOS

Los científicos están investigando si pueden aprovechar las propiedades magnéticas de los ferrofluidos para dirigir la administración de medicamentos a sitios específicos del cuerpo—como dirigir medicamentos contra el cáncer a un tumor.



luego someterlo a campos magnéticos alternos de alta potencia. Esto calienta las partículas magnéticas en el ferrofluido y esa energía pasa a las células cancerosas y las mata.

Su versatilidad, junto con sus exclusivos picos de líquido, dificulta la resistencia a la atracción magnética de los ferrofluidos. Un tubo de ferrofluido y un imán no solo son divertidos para jugar, sino que también podrían salvar la vida algún día.

Brian Rohrig es un profesor de química que vive en Columbus, Ohio.

References

- Berger, Patricia. "Preparación y propiedades de un ferrofluido Acuoso." *Journal of Chemical Education*, 1999, 76(7), 943 – 948.
- Livingston, James D. *Fuerza impulsora: La magia natural de los Imanes*. Prensa de la Universidad de Harvard: Cambridge, MA, 1996.
- El auge de los ferrofluidos, <https://www.chemistryworld.com/features/the-rise-of-ferrofluids/4013756.article> [consultado en Julio de 2021]