

FIRMA INVITADA**NANOMATERIALES Y NANOTECNOLOGÍA:
UNO DE LOS RETOS MÁS IMPORTANTES
PARA ESTOS COMIENZOS DE SIGLO****LÓPEZ-QUINTELA, M. Arturo¹****RIVAS, José²***Laboratorio de Nanomateriales - ITS**Dptos de ¹Química Física y ²Física Aplicada - USC***RESUMEN**

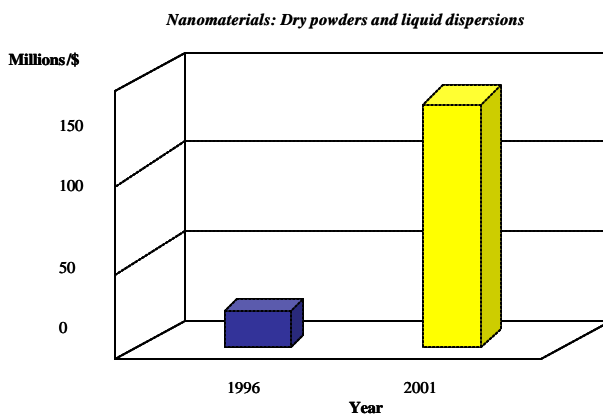
Utilizando como ejemplo la técnica de microemulsiones, en este artículo se describen algunos de los aspectos más sobresalientes en la actual tecnología de nanomateriales. Las microemulsiones se han convertido en un medio de reacción especialmente interesante para la obtención de nanomateriales, fundamentalmente por dos razones: Por una parte, y al contrario que sus hermanas mayores (las emulsiones), son sistemas termodinámicamente estables y, por otra parte, los tamaños de las gotas que están presentes en estos sistemas se encuentran en el rango de los nanómetros. Estas nanogotas pueden entonces usarse como auténticos nano-reactores y sus tamaños pueden utilizarse para controlar el tamaño final de los materiales sintetizados en su seno. Después de una breve descripción de la técnica de microemulsiones, en el presente artículo se comentarán algunas de las reacciones más utilizadas en la producción de nanopartículas así como los logros más importantes conseguidos en los últimos años. En particular, se mostrará cómo cambian algunas propiedades de estos sistemas por el hecho de cambiar el tamaño del material en el rango nanométrico. Finalmente se mostrará un ejemplo de las enormes posibilidades que ofrece esta técnica consistente en la síntesis de partículas multicapas que muestran propiedades magnetorresistivas gigantes y que, por lo tanto, poseen interés especial como sensores magnéticos en múltiples aplicaciones, siendo utilizados ya en campos de tanta importancia como la microelectrónica en la preparación de cabezas lectoras como las del propio ordenador con el que se ha escrito el presente artículo.

I. INTRODUCCIÓN

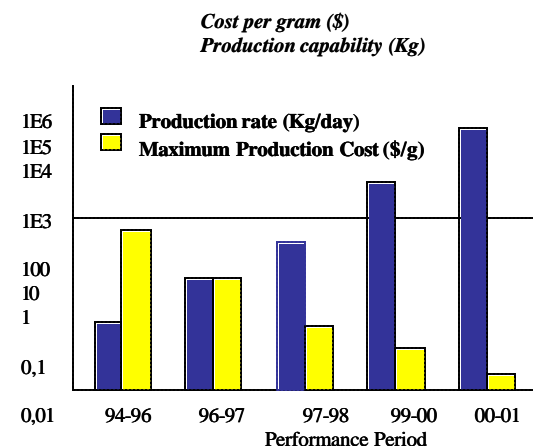
En el pasado siglo XX el hombre dio un gran paso en su lento, pero continuo y bello caminar, por el sendero de su inseparable destino: entender el mundo que lo rodea y, al mismo tiempo, entenderse a si mismo. El átomo nos desveló sus hermosos secretos y pudimos al fin entrar en contacto con la verdadera “esencia” de la materia. La química y la física despertaron así de un largo letargo invernal constreñido por los estrechos márgenes de la física clásica. Pero, nada más entrar a este nuevo mundo atómico-molecular, se vieron sorprendidas por el descubrimiento de un nuevo reino, el mundo cuántico, donde la razón muchas veces es necesaria dejarla a un lado y debemos conformarnos únicamente con los resultados que emergen espontáneamente de las complejas ecuaciones que rigen los sistemas. Sabemos que la ecuación de Schrödinger es capaz de predecir el comportamiento de átomos o moléculas, pero la complejidad de los hamiltonianos al tratar de estudiar sistemas con un número elevado de átomos, ha hecho que su solución exacta pueda ser sólo conocida para átomos o moléculas individuales. Podemos decir así que el siglo XX ha venido a desvelarnos fundamentalmente el comportamiento de los átomos y moléculas individuales. Pero la naturaleza que nos rodea y los sistemas que el hombre normalmente maneja se componen de un número elevadísimo de átomos/moléculas (normalmente del orden del número de Avogadro, es decir, 6×10^{23} /g mol). Este hecho en lugar de jugar en contra, como en principio pudiera pensarse, juega a nuestro favor, pues la presencia de un número muy elevado de átomos/moléculas en los sistemas objeto de estudio permite la utilización de la estadística para predecir su comportamiento. Es más, en muchos casos, las propiedades individuales “se diluyen” en las colectivas y un comportamiento puramente clásico es suficiente para explicar a los sistemas.

Hasta finales del siglo XX casi nadie le prestó atención a esa “zona de nadie” o zona mesoscópica de transición entre el mundo atómico/molecular y el mundo macroscópico. En casi todo el mundo científico se daba por sentado que las propiedades variarían de forma continua y monótona entre las propiedades de los átomos/moléculas y las de los sistemas formados por un número elevado de ellos. Aunque ya en la década de los 80 un gran número de pruebas se habían acumulado que indicaban que esa zona mesoscópica era mucho más rica y compleja que lo que se podía esperar, no fue hasta la última década del siglo XX que ese hecho adquirió relevancia. Dos fueron los hechos que llevaron a ese “despertar” de la zona mesoscópica. En primer lugar, la aparición de nuevas técnicas que, como las microscopías de fuerzas atómicas y efecto túnel, permitieron por fin “ver” realmente las moléculas y

los átomos. Y, en segundo lugar, aunque de tanta importancia, el hecho de que la tecnología, en su intento de miniaturización comienza a aproximarse a esa “zona mesoscópica” y necesita conocer entonces de forma precisa sus propiedades. Dado que esa zona mesoscópica se encuentra en la escala de tamaños nanométricos (digamos 1-100 nm), el interés por el estudio de los nanomateriales ha surgido así en estos últimos años de forma quasi-espontánea. En la figura 1 se puede observar la evolución del mercado americano en nanopartículas donde queda claro el aumento



exponencial del interés por los mismos. Este aumento no hubiera sido posible sino hubiera estado correspondido por un desarrollo paralelo de los métodos de síntesis, fundamentalmente químicos, que han permitido una disminución



continua de los costes y un aumento paralelo de la velocidad de producción, tal como se puede observar en la figura 2.

La aparición de la “Nanociencia” no ha hecho más que empezar y así, en estos últimos años, hemos visto aumentada la riqueza (¡y complejidad!) de nuestro vocabulario con la aparición de “Nano-cosas”. Nanopartículas, Nanotubos, Nanohilos, Nanomateriales, Nanomagnetismo, Nanomáquinas, Nanobiología,

Nanotecnología molecular, Integración a nanoescalas, etc. han brotado en este recién florecimiento de la era Nanotecnológica. EEUU, Japón y con unos años de retraso ahora también en Europa, conscientes de la importancia de este nuevo campo científico -claramente interdisciplinar-, han introducido programas especiales para fomentar las investigaciones en Nanotecnologías.

Sin embargo, hay un hecho adicional que contribuye a aumentar enormemente el interés por este recién nacido campo. Si las propiedades de los materiales en esta zona mesoscópica intermedia (nanomateriales) fueran únicamente “algo” intermedio entre las de los átomos/moléculas y las de los materiales masivos —como sería en principio esperable—, no se habría despertado este inusitado interés en el mundo científico y hubiera sido otra área más, de gran importancia tecnológica -eso sí-, pero nada más. No. La razón fundamental es que -tal como ha apuntado U. Landman del Georgia Institute of Technology, de Atlanta, en el reciente congreso de Nanotecnología celebrado en Santiago de Compostela [1]- las propiedades de los Nanomateriales no son únicamente -muchas veces- el reflejo de un mero escalado con el tamaño del material. Propiedades nuevas y totalmente diferentes pueden “emerger” en este nuevo reino de lo mesoscópico. Y estas propiedades resultan ser **esencialmente** diferentes porque la dimensión física del material se aproxima a la escala de longitud característica del fenómeno físico implicado en la propiedad objeto de estudio. Como los diferentes fenómenos físicos están caracterizados por diferentes escalas de longitudes, estas nuevas propiedades se manifiestan para tamaños diferentes dependiendo del material y la propiedad física investigada.

Algunos de los aspectos en los que se reflejan estas nuevas propiedades son: ruptura espontánea de simetrías, autoensamblaje, autoselección, fluctuaciones, etc. Y desde un punto de vista químico-físico más aplicado: oscilaciones en el potencial redox dependiendo del número de átomos -véase más adelante-; fluctuaciones en nanoreactores, etc.

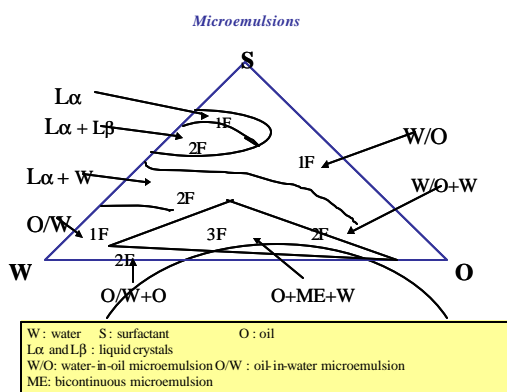
Por último, es necesario tener en cuenta que en esta zona mesoscópica, se encuentran las denominadas “interfases”. Interfases entre materiales inorgánicos, orgánicos; orgánicos-inorgánicos y orgánicos/inorgánicos-biológicos son en la actualidad uno de los campos de mayor interés científico-tecnológico. La integración de enzimas, proteínas, DNA, células biológicas, etc, en circuitos electrónicos formados por redes neuronales; transistores híbridos de materiales orgánicos/inorgánicos; etc., son algunos ejemplos donde el conocimiento de las interfases es crucial para lograr cualquier avance científico importante. Ello requiere evidentemente un gran esfuerzo interdisciplinar, eliminando -paradójicamente- las “interfases” que actualmente existen entre las diferentes disciplinas científicas (léase por ej., orgánica-inorgánica-fisicoquímica-biología).

Todo ello hace que la frase de Landau "...there is a lot of play room in the buttom" -de los años 50- sea totalmente de actualidad y haya un gran espacio de investigación en esta hermosa "tierra de nadie" donde la química, física, biología y tecnología, tienen que necesariamente aproximarse y entenderse para lograr comprender la materia a estas escalas nanométricas y, al mismo tiempo, saber cómo manipularla adecuadamente para conseguir los nanoensamblajes adecuados que se necesitarán en las nuevas tecnologías que han de aparecer en este recién estrenado siglo.

Al objeto de hacer algo más concreto este trabajo y presentar algunos de los resultados en los que los autores han participado de forma más directa, se comentará, en primer lugar, la técnica de microemulsiones para preparar nanomateriales. Después se comentarán algunas de las propiedades de los nanomateriales producidos por esta técnica. Por último se comentarán algunas de las técnicas que actualmente se están desarrollando para "crear" nanoestructuras a nivel macroscópico y se comentarán algunas de las tendencias previsibles en los próximos años.

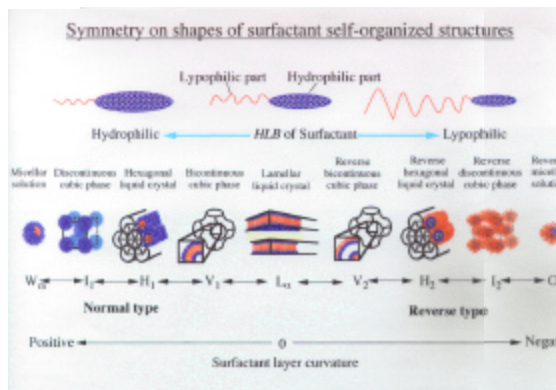
II. MICROEMULSIONES

Una microemulsión se puede formar cuando dos líquidos no miscibles (generalmente agua y un aceite) se mezclan en presencia de un detergente (también denominado surfactante o agente tensioactivo). En la figura 3 se



puede observar un diagrama de fases típico de un sistema de estas características. Se puede observar un rico comportamiento en el que, dependiendo de las condiciones (presión, temperatura y composición) una, dos o tres fases pueden presentarse en equilibrio termodinámico. Nosotros nos referiremos aquí únicamente a las zonas del diagrama de fases en donde existe una única fase termodinámica. Aún dentro de una fase, el número de estructuras posibles que se pueden obtener es enorme, tal como se puede observar en la figura 4. Micelas, fases cúbicas discontinuas y continuas, cristales líquidos hexagonales, fases lamelares y fases inversas, son algunos de los típicos ejemplos de este variado y emocionante mundo de los surfactantes. La razón de

posibles que se pueden obtener es enorme, tal como se puede observar en la figura 4. Micelas, fases cúbicas discontinuas y continuas, cristales líquidos hexagonales, fases lamelares y fases inversas, son algunos de los típicos ejemplos de este variado y emocionante mundo de los surfactantes. La razón de



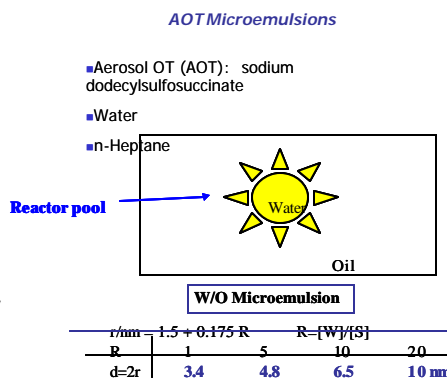
este interesante comportamiento reside en el carácter “dual” anfílico de las moléculas de surfactante que presentan una parte hidrofílica y otra hidrofóbica. Cuando estas moléculas se encuentran con una mezcla de líquidos hidrofílicos y lipofílicos, forman espontáneamente un filme para separar ambas regiones a nivel nanoscópico man-

teniendo al sistema en una sola fase macroscópica. Dependiendo entonces de la curvatura de este filme se originan diferentes estructuras ordenadas. Cuando la curvatura es positiva y grande se originan micelas esféricas que pueden disolver aceites en su hidrófobo interior formando microemulsiones “normales”. La formación de las micelas es un proceso energéticamente favorecido porque de esta forma se eliminan las interacciones repulsivas del agua con la parte hidrofóbica del surfactante (y también con el aceite, en las microemulsiones). Justo lo opuesto sucede cuando la curvatura del filme de surfactante es negativa. La formación de micelas inversas (y microemulsiones “inversas” en presencia de agua) elimina las interacciones repulsivas entre los aceites y la parte hidrófila del surfactante. Cuando se aumenta la concentración de estas “nanogotas” (micelas o microemulsiones) se pueden obtener espontáneamente estructuras cristalinas formando fases cúbicas discontinuas (denominadas I_1 –normales- e I_2 -reversas). Un aumento adicional de la concentración conduce a la formación de micelas cilíndricas que se organizan en empaquetamientos hexagonales compactos (denominados H_1 y H_2). En la región intermedia, cuando de curva es prácticamente cero, otras estructuras, como bicontinuas (V_1 y V_2) y lamelares (L_a) se pueden formar también en estos peculiares sistemas.

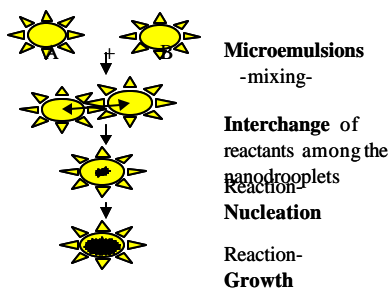
III. MICROEMULSIONES UTILIZADAS COMO PATRONES

Todas las estructuras mencionadas anteriormente, que se forman en presencia de moléculas anfílicas, pueden ser utilizadas como “patrones” para la formación de nanomateriales. Sin embargo, por brevedad, nosotros nos centraremos aquí únicamente en la utilización de microemulsiones inversas. Las nanogotas de estas microemulsiones pueden utilizarse como nano-reactores para la producción de nanopartículas de diferentes tipos de materiales. Su

estudio ha sido abordado de forma bastante exhaustiva en la última década y la técnica de formación de nanopartículas en estos medios es actualmente una técnica bien establecida [2-4]. La razón de su amplio uso actual es doble: en primer lugar y contrariamente a las emulsiones ampliamente utilizadas en la industria farmacéutica, estos sistemas son termodinámicamente estables y, en segundo lugar, el tamaño de las gotas se encuentra en el rango nanométrico. Pero es más, el tamaño de estos “nanoreactores” se puede cambiar de forma muy fácil variando el parámetro R definido como la relación, $R = [\text{agua}] / [\text{surfactante}]$. En la figura 5 se puede observar como varía el tamaño de las nanogotas con el parámetro R para microemulsiones de AOT en n-heptano.



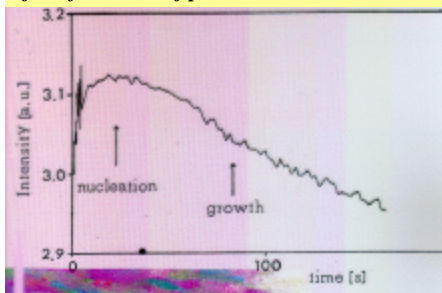
Nanoparticle synthesis in microemulsions



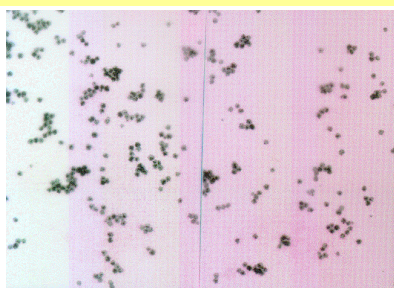
La formación de partículas en estos nanoreactores es, en principio, muy fácil (véase la figura 6). Esencialmente consiste en disolver, por separado, los reactivos necesarios para la producción del nanomaterial en dos microemulsiones y a continuación mezclarlas. Los reactivos comienzan entonces a intercambiarse debido a las colisiones entre las nanogotas en un proceso cuya cinética depende en gran parte de la flexibilidad del filme de surfactante. Una vez que los reactivos se encuentran en el interior de una nanogota

comienzan a reaccionar y cada gota se comporta como un auténtico “nanoreactor” individual, cuyo tamaño controla el tamaño final de las partículas que se forman mediante un proceso de nucleación y crecimiento. En la figura 7 se pueden observar ambos procesos en la formación de nanopartículas de Fe en microemulsiones de AOT, estudiando la cinética de su formación me-

Time-resolved small angle X-ray scattering of the formation of particles in microemulsions



Pt particles prepared in microemulsions
Size: 9 nm



diente difracción de rayos X de ángulo pequeño (SAXS) resuelto en el tiempo, utilizando radiación de sincrotrón. En la figura 8 se muestra un ejemplo de partículas de Pt obtenidas por la técnica de microemulsiones. De la figura se pueden extraer dos conclusiones: Primero, que las partículas obtenidas por esta técnica son realmente muy monodispersas en tamaños, debido fundamentalmente a la separación de los procesos de nucleación y

crecimiento. Segundo, que el tamaño de las partículas (9 nm) es comparable al tamaño de las microemulsiones utilizadas (10 nm). Este resultado muestra claramente la gran potencialidad de este, en principio, método sencillo. Sin embargo, no todos los intentos realizados en el pasado con esta técnica tuvieron igual éxito. Partículas polidispersas y mucho más grandes que las gotas utilizadas, así como también distribuciones bimodales se encontraron también en muchos casos. Simulaciones realizadas de los mecanismos cinéticos mediante la técnica de Monte Carlo [5-9] permitieron deducir que otros factores, como la concentración de los reactivos y la flexibilidad del filme de surfactante, influyen de forma decisiva en la distribución de tamaños finales obtenida. Generalmente, utilizando concentraciones reducidas y filmes rígidos se pueden obtener partículas monodispersas con tamaños similares a los de las nanogotas de las microemulsiones utilizadas, tal como los resultados reflejados en la figura 5. En la figura 9 se pueden ver algunos de los nanomateriales que se han obtenido por esta técnica en los últimos años.

Nanomaterials synthesized by the microemulsion technique

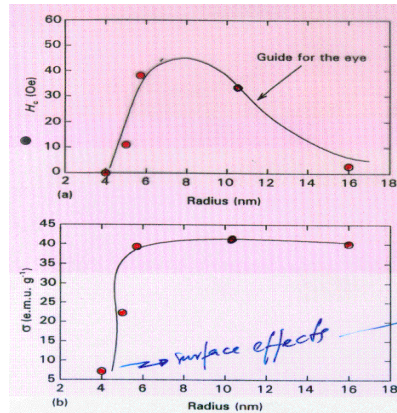
- Oxides:
 - γ -Fe₂O₃⁺, Al(OH)₃, α , β -FeOOH, SiO₂, TiO₂, V₂O₅, ZnO, ZrO₂, Fe₃O₄⁺, FeB⁺, BaTiO₃, Yttrium-iron garnets⁺, etc.
- Metals:
 - Fe⁺, Ni, Co⁺, Ag⁺, Au, Pt, etc.
- Perovskites:
 - La_{0.67}(Ca, Sr)_{0.33}MnO₃⁺, R₂CuO₄⁺, etc.
- Polymers:
 - Polystyrene, epoxides⁺, etc.
- Nanowires:
 - Co, Cu, Ni, etc.
- Superconductors:
 - YBaCuO⁺, etc.

***prepared in our laboratory
(for a review see Osseo-Asare, 1999)**

IV. NANOMATERIALES

Mediante la técnica de microemulsiones que acabamos de describir se pueden obtener partículas del mismo material, pero con diferentes tamaños, en el rango nanométrico. Como se mencionó en la introducción, las partículas

generalmente exhiben comportamientos diferentes de las del material masivo. En la figura 10 se muestran las propiedades magnéticas, a temperatura ambiente, de partículas de magnetita de diferentes tamaños obtenidas mediante la técnica de microemulsiones. Se puede observar la presencia de un máximo en el campo coercitivo para partículas de aprox. 15 nm. Por debajo de este tamaño el campo



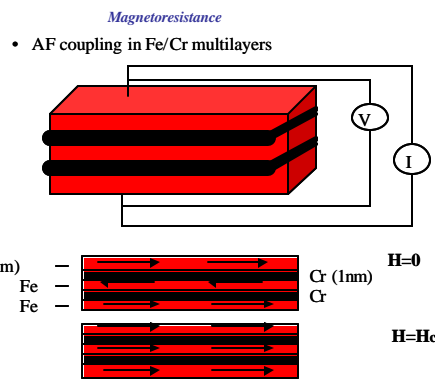
Dependence of the magnetic properties of magnetite on the particle size.

coercitivo decrece rápidamente al tiempo que se observa una reducción de la magnetización. Para partículas por debajo de aprox. 10 nm se observa un comportamiento típicamente superparamagnético a temperatura ambiente. Este comportamiento muestra, para este tipo de material, como mediante la reducción del tamaño de partícula se puede inducir una transición desde multidominios magnéticos a monodominios. Al mismo tiempo, los valores tan bajos obtenidos de la magnetización para las partículas más pequeñas muestran el importante efecto debido a los efectos “superficiales” de las partículas. Generalmente, el número de átomos localizados en la superficie de una partícula “macroscópica” (por ej. > 50 nm) es tan pequeño que su influencia en las propiedades fisicoquímicas de las partículas es despreciable. Sin embargo, este no es el caso de las partículas nanométricas en las que el número de átomos localizados en su irregular y asimétrica superficie es muy grande y comparable con el número de átomos localizados en su regular y simétrico interior. En el caso mostrado en la figura 10, los espines mal orientados de los átomos de la superficie son los responsables de la disminución observada en la magnetización. Con este ejemplo se muestra claramente como la reducción del tamaño de partícula viene acompañado generalmente de un cambio en sus propiedades fisicoquímicas [10]. Así, por ejemplo, las partículas de magnetita en forma de micro/macro-cristales son de color negro porque los niveles de energía poseen una distancia de separación de solamente 0.1 eV. Sin embargo, cuando el tamaño de partícula es muy pequeño, la distancia entre niveles aumenta (confinamiento cuántico) de forma que se pueden obtener partículas de magnetita de diferentes colores. Cuando el tamaño es inferior a aprox. 2 nm, la distancia entre los niveles de energía es tan grande (>aprox. 4 eV) que la absorción se desplaza a la zona UV y las partículas se hacen transparentes a la radiación visible.

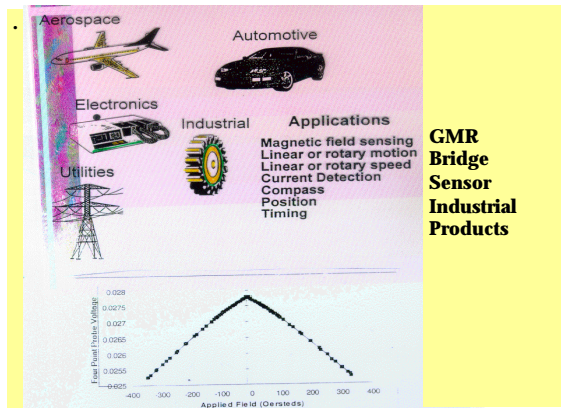
Como un ejemplo interesante de aplicación de las técnicas de síntesis mencionadas y al objeto de mostrar las enormes posibilidades de las mismas, mencionaremos por último la preparación de nanomateriales magnetorresistivos. El fenómeno de la magnetorresistencia gigante (GMR) fue descubierto en multicapas hace algo más de una década.

Este fenómeno se debe a la dispersión dependiente del espín y se origina en las interfaces ferromagnéticas/no magnéticas de las multicapas. En la figura 11 se muestra como aplicando un campo magnético ($H=H_c$) a una multicapa de Fe/Cr se puede lograr orientar los espines ferromagnéticamente. Este ordenamiento paralelo de los espines origina una conductividad eléctrica mayor que el ordenamiento antiferromagnético presente en la multicapas

en ausencia de campo magnético. El gran cambio que se observa en la conductividad eléctrica del material cuando se aplica un campo magnético relativamente pequeño es de un extraordinario interés ya no sólo científico

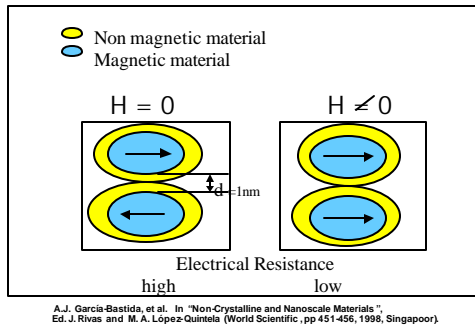


sino también tecnológico. A pesar de su corta vida, los materiales GMR se usan ya hoy en día como sensores magnéticos en una gran variedad de aplicaciones, tal como se observa en la figura 12. Dentro de estas aplicaciones debemos resaltar su uso como sensores en las cabezas magnéticas de lectura de los actuales ordenadores que ha supuesto un extraordinario avance en la capacidad de los



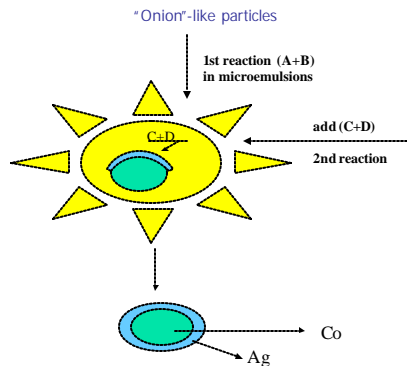
ordenadores en los últimos 5/6 años. Uno de los inconvenientes que poseen las multicapas GMR es que la magnetorresistencia no es isotrópica y se manifiesta únicamente en la dirección perpendicular a las capas. Por esta razón, en los últimos años ha habido un gran interés por desarrollar materiales GMR

“Onion-like Particles
(Magnetoresistance)



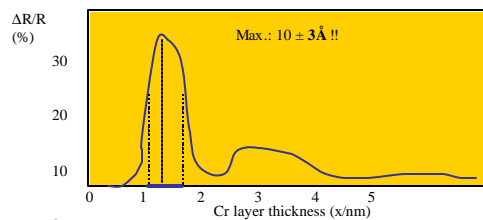
capa no magnética que rodea al núcleo magnético, porque tal como se muestra en la figura 14, la magnetorresistencia observada en multicapas muestra un máximo solamente para un intervalo muy pequeño de valores del espesor de la capa no magnética (aprox. 10 Å).

Para producir una partícula magnética rodeada de una capa nanométrica de un material no magnético se podría utilizar la técnica de microemulsiones antes mencionada.



isotrópicos. En la figura 13 se muestra una posible solución a este problema adelantada por los autores del presente artículo. En lugar de multicapas se podría pensar en partículas formadas por un núcleo magnético (por ej. Co) rodeado de una capa de un material no magnético (por ej. Ag). Este nanomaterial podría presentar propiedades GMR isotrópicas, tal como se muestra en la figura, si se pudiera controlar de forma muy precisa el espesor de la

Giant magnetoresistance (GMR) in Fe/Cr multilayers

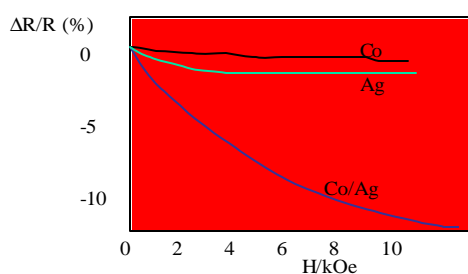


Magnetoresistance at 4.5K as a function of the Cr layer thickness in multilayers of Si(111)/(10nm) Cr/[2nm]Fe/(x nm) Cr/N/(5nm) Cr. (N = 20)

En la figura 15 se muestra el procedimiento que se ha seguido para la preparación de estas nanopartículas multicapas. Después de obtener partículas magnéticas monodispersas por el procedimiento antes descrito, se podría llevar a cabo una segunda reacción en el interior de los nanorreactores. Como la partícula puede actuar de centro de nucleación para la segunda reacción, el material no magnético crecerá preferentemente sobre la partícula previamente

te formada. La homogeneidad del recubrimiento que es necesario para obtener magnetorresistencia gigante (GMR) se podría alcanzar porque los núcleos del nuevo material a depositar están formados por muy pocos átomos y se ha

Magnetoresistance of Ag-covered Co nanoparticles



Magnetoresistance versus applied magnetic field at T = 297K.

demostrado teóricamente [11] que cuando un grupo pequeño de átomos se deposita sobre una superficie, los átomos se distribuyen uniformemente sobre dicha superficie. En la figura 16 se muestra como, en efecto, nanopartículas de Co recubiertas de Ag obtenidas por el método de microemulsiones muestran GMR, siendo esta magnetorresistencia totalmente isotrópica [12]. Nanopartículas de hasta tres capas sucesivas de diferentes mate-

riales ya han sido sintetizadas por la esta técnica en nuestro laboratorio. Estos resultados son una prueba del preciso control que se puede lograr hoy en día en la producción de nanomateriales mediante la técnica de microemulsiones.

V. CONCLUSIONES

Se puede concluir que acabamos de entrar en estos comienzos de siglo en una nueva era en la que la tecnología para controlar y manipular los materiales a nivel atómico están ya al alcance de la mano. Hemos visto como técnicas muy sencillas y relativamente económicas, como la descrita de las microemulsiones, se pueden usar ya hoy en día para controlar el crecimiento de materiales a nivel de unas cuantas decenas de átomos. Veremos, sin lugar a dudas, en los próximos años un rápido crecimiento del mercado en este campo con la aparición de nuevos procedimientos para preparar nanomateriales “ad hoc”, con las propiedades que demande la nanotecnología que ahora comienza

Como se mencionó al comienzo de este artículo, una de las razones para confiar en esta rápida expansión de la nanotecnología es la aparición en la última década de las técnicas de microscopía de efecto túnel y fuerzas (en todas sus variantes) que permiten, por una parte, “ver” realmente los materiales a nivel atómico y, en segundo lugar, que pueden ser utilizados no en condiciones extremas de alto vacío como en los convencionales microscopios electrónicos, sino directamente en las condiciones naturales de utilización de

los materiales. La posibilidad adicional de utilizar dichos microscopios para la producción y manipulación de los materiales a nivel atómico abre un sinfín de nuevas posibilidades que permanecen todavía para ser exploradas en los próximos años del siglo que comienza.

REFERENCIAS

- [1] Trends in Nanotechnology, TNT 2002, Santiago de Compostela, Septiembre 9-13, 2002.
- [2] M.A. López-Quintela, J. Quibén y J. Rivas, "Use of microemulsions in the production of nanostructured materials". "Industrial Applications of Microemulsions". Ed. por C. Solans y H. Kunieda, (Surfactant Science Series, Marcel Dekker, N.Y.) pp.247-264, 1996.
- [3] M.A. López-Quintela y J. Rivas, "Nanoscale magnetic particles: synthesis, structure and dynamics" *Current Opinions in Colloid and Interface Sci.*,1 (1996) 806-819
- [4] J.A.López Pérez, M.A.López-Quintela, J.Rivas, J.Mira y S.W.Charles. "Advances in the Preparation of Magnetic Nanoparticles by the Microemulsion Method" *J.Phys. Chem. B*, 101, 8045-8047 (1997)
- [5] C.Tojo, M.C.Blanco y M.A.López Quintela. "Preparation of nanoparticles in microemulsions: A Monte Carlo study of the synthesis variables" *Langmuir*, 13 (1997) 4527-4534
- [6] C.Tojo, M.C.Blanco, F.Rivadulla y M.A.López-Quintela. "Kinetics of the formation of particles in microemulsions". *Langmuir* 13 (1997)1970-1977
- [7] M.C. Tojo, M.C. Blanco y M.A. López-Quintela. "Microemulsions as microreactors: a Monte Carlo simulation on the synthesis of particles". *J. Non-Crystalline Solids* 235-237 (1998) 688-691
- [8] C. Tojo, M.C. Blanco y M.A. López-Quintela. "The influence of reactant excess and film flexibility on the mechanism of nanoparticle formation in microemulsions: A Monte Carlo simulation". *Langmuir* 14 (1998) 6835
- [9] S. Quintillán, C. Tojo, M.C. Blanco, M.A. López-Quintela. "Effects of the intermicellar exchange on the size control of nanoparticles synthesized in microemulsions". *Langmuir* 2001, 17, 7251-7254.
- [10] J.F.Rivadulla, M.C.Vergara, M.C.Blanco, M.A.Lopez Quintela y J.Rivas. "Optical properties of platinum particles synthesized in microemulsions" *J. Phys. Chem. B* 101(1997) 8997-9004

- [11] A. Antonelli, S.N. Khanna y P.Jena, "Thermal stability of supported metal clusters". *Phys.Rev.B* 48 (1993) 8263-8266
- [12] Sánchez R.D., López-Quintela, M.A., Rivas J., González-Penedo A., García-Bastida A.J., Ramos C.A., Zysler R.D., Ribeiro Guevara S. "Magnetization and electron paramagnetic resonance of Co clusters embedded in Ag nanoparticles". *J.Phys. Condens.Mater.* 11 (1999) 5643-5654.