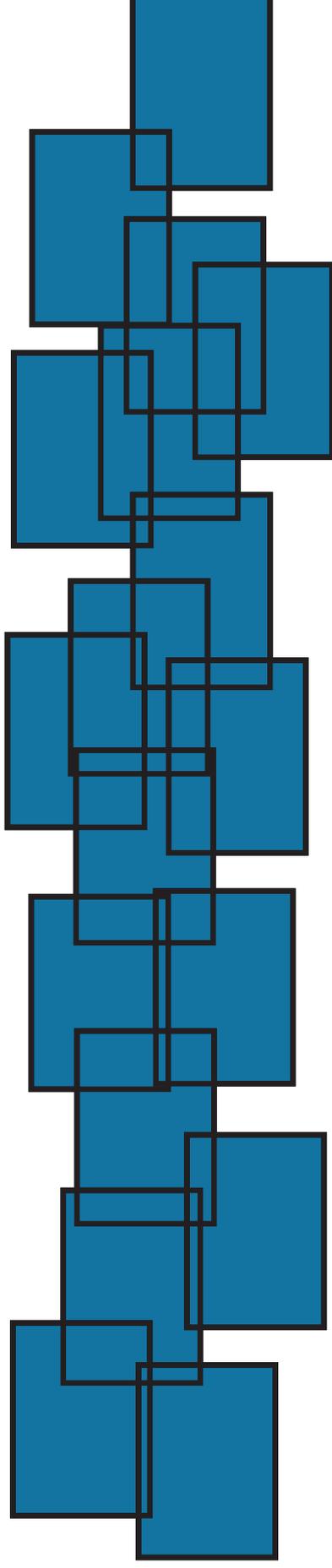


NANOELECTRÓNICA ELECTRÓNICA MOLECULAR





José Luis Costa-Krämer

Lugar y fecha de nacimiento: Sevilla, Mayo de 1963.

Formación: Licenciado en CC Físicas por la Universidad Complutense de Madrid, especialidad Física de Estado Sólido 1987. Doctor en CC Físicas por el Royal Inst. of Technology, Estocolmo, Suecia 1994. Doctor en CC Físicas por la Univ. Complutense de Madrid, España 2000

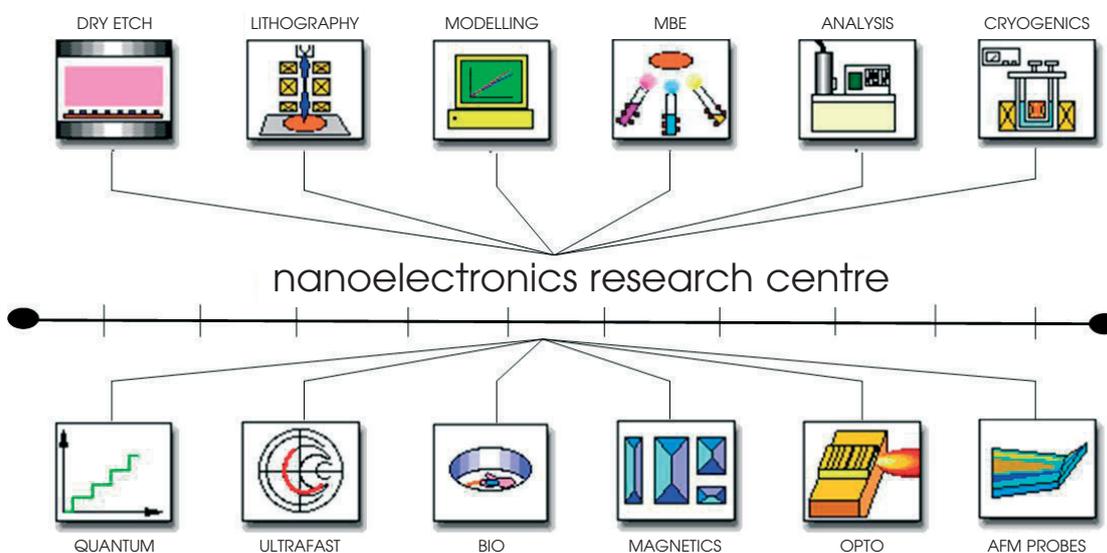
Carrera Profesional: Tras realizar la tesis en el Royal Inst. of Technology en Estocolmo, Suecia, realiza un posdoc en el laboratorio de Física de Sistemas Pequeños y Nanotecnología del CSIC. Posteriormente se incorpora al Instituto de Microelectrónica de Madrid como Científico Titular. Su especialidad es el magnetismo y el transporte en nanoestructuras.



1. Introducción

La nanoelectrónica estudia los fenómenos de transporte y distribución de carga y espín en la escala del nanómetro. Avances instrumentales en las últimas décadas han permitido la visualización en el espacio real y la manipulación controlada de los átomos. En paralelo las técnicas de litografía han ido reduciendo el tamaño de los motivos que se pueden fabricar, llegando en la actualidad la industria semiconductor a pistas de 90 nm en obleas de 300 mm de diámetro. Las dos aproximaciones científicas al mundo que separa lo atómico de lo macroscópico se conocen como "bottom-up" y "top-down". Éste es un mundo mesoscópico, donde las propiedades físicas no escalan con el tamaño y los efectos cuánticos como el confinamiento y la coherencia propician que añadir o quitar un átomo, haga que cambien drásticamente las cosas; es decir, un mundo donde el tamaño realmente importa. La implementación de la nanoelectrónica en la tecnología actual será un proceso gradual, sustituyendo componentes individuales y eventualmente sistemas complejos. La microelectrónica, incluso con tamaños de puerta de transistor por debajo de los 50 nm, no es estrictamente una implementación de la nanoelectrónica, ya que no hay una propiedad física relacionada con la reducción de tamaño que esté siendo utilizada. Aun así, la necesidad de la nanotecnología, y de la nanoelectrónica en particular, se justifica a menudo por el hecho de que la ley de Moore — relacionando la mejora de prestaciones con el tamaño más pequeño de los dispositivos — llega a su fin. Las razones son tanto económicas como físicas. Sin embargo este es un argumento debatible. La tecnología del Silicio avanzará con dificultad por este camino durante una década o más. Se espera mantener la tendencia integradora usando dieléctricos de alta K basados en Hafnio y puertas metálicas. Se prevé también que las prestaciones continuarán mejorándose durante 15 años optimizando el diseño del chip, haciendo un uso más eficiente del área de la oblea de Silicio. En el futuro se desplazará la tecnología de dispositivos actuales a dispositivos de superficie, como en los dispositivos tipo *trigate*.

Una nueva tecnología sólo reemplaza una existente con éxito si mejora las prestaciones (incluyendo el coste efectivo) ordenes de magnitud, o si suministra características que la tecnología existente es físicamente incapaz de suministrar. Este es el reto, la búsqueda de nuevas propiedades, paradigmas y arquitecturas para crear la nueva nanoelectrónica.



<http://www.elec.gla.ac.uk/groups/nano>

2. Estado del arte

La nanoelectrónica es el punto de reunión donde la física, la ciencia de materiales, la química, la biología y la ingeniería electrónica se topan irremediablemente. Los circuitos integrados tradicionales consisten en una serie de interruptores eléctricos y cables tan pequeños y económicos como sea posible, idénticos y reproducibles en serie. Parece muy difícil -si no imposible- para la fabricación tradicional de semiconductores, producir circuitos con la exactitud necesaria a escalas atómicas. Es en la búsqueda de soluciones a estos problemas donde los investigadores intentan remplazar algunos conceptos básicos acerca de los dispositivos y sus interconexiones. En paralelo, los científicos intentan descifrar cómo la naturaleza se las arregla para almacenar y transmitir un conjunto de instrucciones que permiten desarrollar nanomáquinas que cumplen tareas de construcción avanzadas en el ámbito celular, una espectacular ilustración es el video *The Inner Life of the Cell* (Biovisions en la Universidad de Harvard), un extracto se puede ver:

<http://www.youtube.com/watch?v=kxSLw1LMvgk>

La Unión Europea ha clasificado (ENIAC, 2005 SRA) las necesidades de la sociedad en términos de dispositivos en 5 grupos: Salud, Movilidad y transporte, Seguridad, Comunicaciones, Educación y Entretenimiento. Todas ellas están englobadas conceptualmente en la Inteligencia del Entorno (Ambient Intelligence), en el sentido que los dispositivos reconozcan usuarios, y que ajusten sus funciones a los usuarios individuales. La nanoelectrónica juega un papel primordial en todos ellos, por poner algunos ejemplos: biosensores, bioimplantes, sistemas de navegación y de seguimiento de vehículos, energías alternativas, sistemas biométricos, baterías, etc.

Un material que ha recibido mucha atención recientemente es el grafeno. Esta monocapa de grafito, que hasta ahora ha sido muy popular en su versión cortada y enrollada (el nanotubo de carbono) es fascinante, y posiblemente más manejable como material. Esto ha sido señalado recientemente por Claude Berger (Berger, C. *et al.* Science 312, 1191–1196 (2006)), que ha estudiado el transporte en grafito ultrafino crecido en carburo de silicio. Ella encontró que la resistencia del grafito en un campo magnético exhibe el comportamiento peculiar del grafeno. Esto puede parecer sorprendente considerando que el grafito tiene varias monocapas. La explicación es que sólo la capa interfacial con el substrato está cargada apreciablemente, y que ésta intercara domina la conducción (Phys Rev Lett. 2007 Sep 21;99 (12):126805 17930540.). Es de resaltar que el substrato usado es compatible con las técnicas de litografía estándar usadas por la industria semiconductor.

He subdividido el estado del arte de la nanoelectrónica en 6 apartados diferentes: Electrónica Molecular, Nanotubos de Carbono, Nanoestructuras semiconductoras, MEMS y NEMS, Interconectores, Espintrónica, y Computación Cuántica. Al final de cada apartado menciono alguna referencia general. Dejo fuera, por motivos de complejidad y espacio, todos los esfuerzos que se están realizando en el desarrollo de técnicas de litografía avanzadas: óptica, ultravioleta extremo, rayos X de proximidad, *e-beam projection* y el sistema SCALPEL, *ion beam projection*, nanolitografía por e-beam, *nanoimprint* y métodos SPM.

➤ Electrónica Molecular

Es el estudio de propiedades moleculares que pueden llevar al procesado de la información. Desde principios de los años noventa, se está dedicando un gran esfuerzo científico al desarrollo de una nueva electrónica basada en la utilización de *materiales*

moleculares electroactivos. Estos materiales son de naturaleza orgánica, incluyendo desde moléculas de pequeño tamaño (10 átomos) hasta polímeros (macromoléculas), y son capaces de responder a estímulos eléctricos y luminosos de forma similar a los conductores y semiconductores inorgánicos. Sin lugar a dudas, el acontecimiento que más ha contribuido al desarrollo de los materiales moleculares electroactivos fue el descubrimiento de los polímeros conductores (plásticos que conducen la electricidad), merecedor del premio Nobel de Química del año 2000. Nos encontramos, por tanto, ante nuevos materiales que nos ofrecen las propiedades eléctricas y ópticas de los metales y semiconductores, junto con las atractivas propiedades mecánicas, las ventajas de procesado y el bajo coste económico de los polímeros. A estas ventajas hay que añadir el gran potencial de la síntesis química para modificar las propiedades del material mediante cambios en la estructura química de los sistemas componentes. Los materiales moleculares electroactivos están siendo desarrollados industrialmente para su utilización en aplicaciones tan diversas como baterías orgánicas, músculos artificiales, pantallas de teléfonos móviles, células solares, "narices" electrónicas, etc.

En el año 2001 se construyeron los primeros circuitos moleculares, utilizando unas moléculas llamadas rotaxanos, capaces de funcionar como un transistor. Aún se está muy lejos de poder ensamblar un chip utilizando estos materiales, pero las posibilidades son asombrosas¹.

➤ Nanotubos de Carbono

Los nanotubos de carbono son moléculas tubulares de carbono, con propiedades que los hacen muy atractivos y potencialmente útiles para aplicaciones como componentes eléctricos y mecánicos extremadamente pequeños. Exhiben una dureza inusual, propiedades electrónicas únicas y son unos conductores de calor extremadamente eficientes. Las buenas propiedades eléctricas, mecánicas, y químicas de los nanotubos de carbono les hacen candidatos para fabricar dispositivos tales como transistores a escala nanométrica, pantallas de emisión de campo, actuadores, etc.

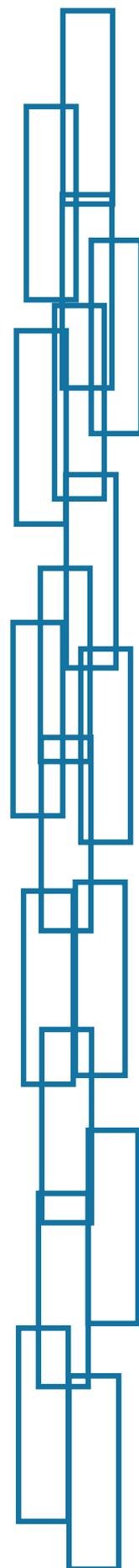
Investigadores del Rensselaer Polytechnic Institute, junto a un equipo internacional de colaboradores, han descubierto cómo soldar entre sí nanotubos de carbono. También se ha descubierto recientemente que las propiedades semiconductoras de los nanotubos de carbono cambian en presencia de campos magnéticos, un fenómeno único, y que podría causar su transformación en metales a incluso mayores valores de campo magnético

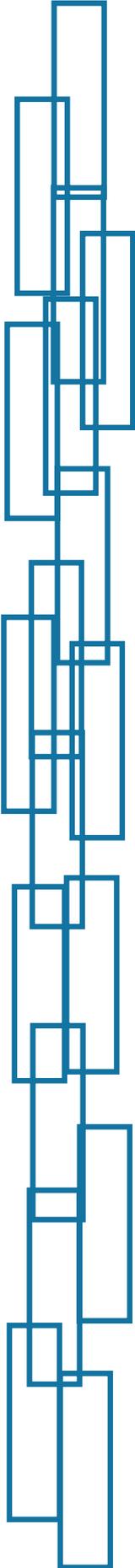
En el 2004 se crecieron nanotubos de carbono de unos 4 cm. de longitud, y recientemente se han visualizado por TEM los átomos de Carbono individuales de SWT, demostrado la capacidad de soldarlos uno a continuación de otro y también de crecerlos sobre sustratos metálicos².

Ver también el informe de vigilancia tecnológica "Nanotubos de Carbono: aplicaciones" en <http://www.madrimasd.org/cimtan/Informes/default.aspx>

¹ Projecting the nanoworld: Concepts, results and perspectives of molecular electronics by Giuseppe Maruccio, Roberto Cingolani and Ross Rinaldi. J. Mater. Chem., 2004, 14, 542-554, DOI: 10.1039/b311929g.

² Carbon nanotube electronics and optoelectronics. Avouris P. Mrs Bulletin 29 (6): 403-410 Jun 2004.





➤ Nanoestructuras Semiconductoras

Existen dispositivos tipo diodo y transistor que tienen el potencial de operar en la escala de los nanómetros, a velocidades ultra altas y con una densidad ultra alta de circuitos. Algunos de estos dispositivos pueden ser especialmente útiles debido a sus inéditas características de "output", permitiendo realizar operaciones con menos componentes de los usuales. Esta clasificación englobaría: Resonant Tunneling Hot Electron Transistor RHET, Resonant Tunneling Bipolar Transistor RTBT, Quantum Effect Devices QED, ElectronWaveguide Devices, Quantum Well Modulation Base Transistors, Lateral Quantum Devices, Coulomb Blockade Devices, etc.

Estructuras de dimensiones nanoscópicas capaces de confinar electrones (incluso uno sólo) en niveles de energía discretos. Nanocristales de semiconductores muestran propiedades ópticas y electrónicas que dependen de su tamaño. Esto los hace extremadamente atractivos en aplicaciones como catálisis, celdas fotovoltaicas, láseres, transistores, etc.³

➤ NEMS y MEMS

Una derivación actual de la tecnología microelectrónica es el desarrollo de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) chips de silicio y otros materiales en los que se integran no sólo funciones de tipo electrónico convencional (microprocesadores) sino también nuevos elementos funcionales de todo tipo (microsensores, microactuadores, microfluídica, micromotores, microcomponentes ópticos) fabricados mediante técnicas litográficas y de micromecanización por ataque químico anisótropo, similares a las ya conocidas en microelectrónica. Este campo no ha hecho más que nacer y ya se prevé su evolución inmediata, a partir de un desarrollo natural de ingeniería (top-down) no sólo reduciendo aún más su escala sino introduciendo aspectos y procesos típicos de la nanotecnología para dar lugar a los denominados NEMS. En algunos de ellos, por ejemplo, se integran dispositivos nanomecánicos, en otros, utilizando técnicas litográficas o de auto-ensamblado de moléculas orgánicas complejas como proteínas o fragmentos de ADN se integran funciones de reconocimiento bioquímico o biosensores. Importantísimo y relacionado con este, es el campo de los Biochips o "DNA Microarrays" que se ha desarrollado ya enormemente, permitiendo la identificación rápida y económica de grandes sectores del genoma. Actualmente existen ya unas 30 empresas fabricando y comercializando estos "Genome arrays" capaces de identificar del orden de 10.000 fragmentos en un solo chip. Se cree que no está lejos el momento en que se pueda comercializar un chip personal que analice todo el genoma y permita obtener un informe detallado de los condicionantes genéticos más relevantes de cada persona.

Existen muchas otras aplicaciones de los biochips. Por ejemplo, los microarrays de proteínas que se están introduciendo en el campo de la investigación en proteómica, permiten cuantificar todas las proteínas expresadas en una célula. El marcado de los fragmentos que hasta hace poco tiempo se hacía mediante sustancias fluorescentes ha progresado enormemente mediante la adopción de una técnica procedente del campo de los semiconductores y la optoelectrónica: el marcado, casi un código de barras óptico, mediante nanopartículas de semiconductores, los llamados puntos cuánticos. Es un caso paradigmático de interacción interdisciplinar entre la

³ Handbook of Semiconductor Nanostructures and Nanodevices by Alexander A. Balandin, Kang L. Wang. American Scientific Publishers (December 20, 2006).

bioquímica y la física cuántica que ha resultado extraordinariamente fructífero, pues estos nuevos marcadores son muy selectivos, estables y no interaccionan ni modifican químicamente las proteínas marcadas.

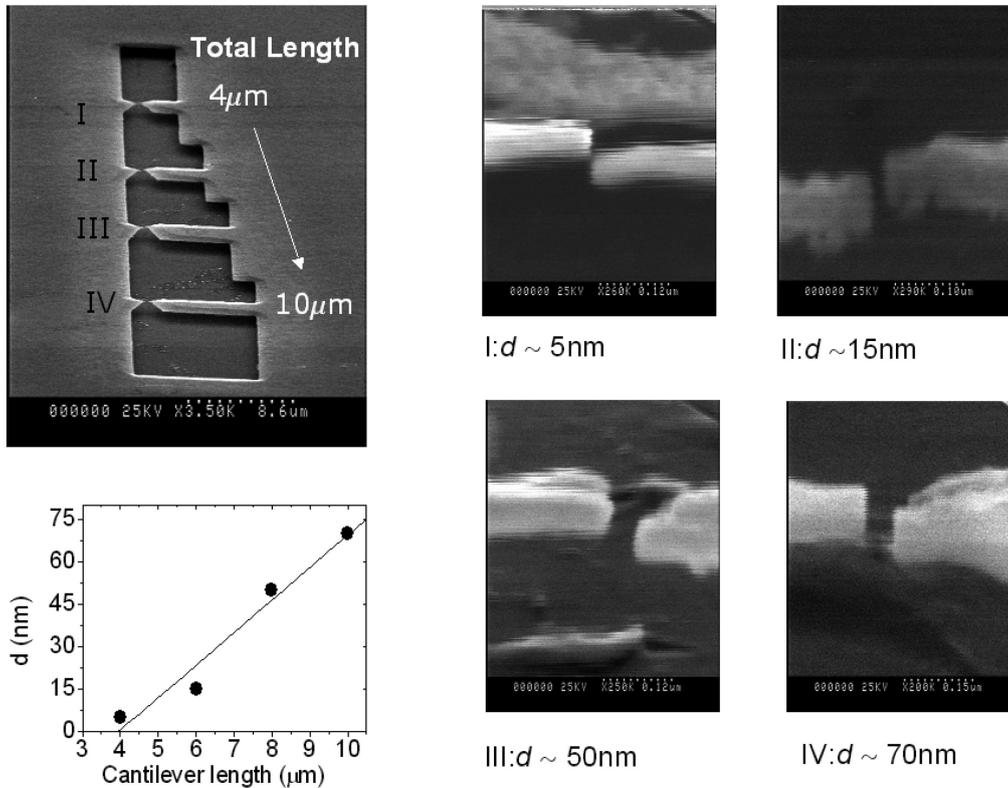
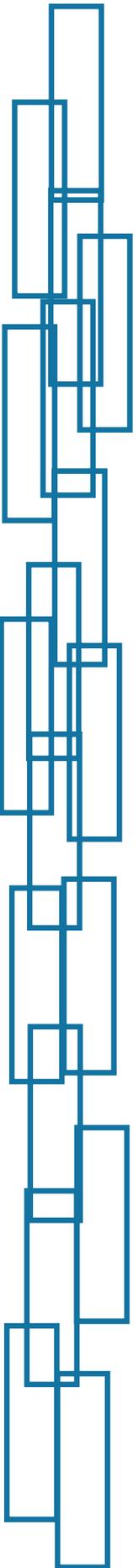


Figura 1. Nanogaps controlados fabricados en el IMM-CNM-CSIC (cortesía de Iván Fernández)

En este sentido, destacaría el campo de los NEMS actuados magnéticamente, con aplicaciones muy prometedoras en biotecnología, en instrumentación y en estudios fundamentales⁴.

⁴ MEMS and NEMS: Systems, Devices, and Structures. Sergey Edward Lyshevski Rochester Institute of Technology. CRC Press (2002). Principles and Applications of NanoMEMS Physics. Series: Microsystems, Vol. 15 De Los Santos, Héctor J. Springer (2005).



➤ Interconectores

Uno de los principales retos en la fabricación de dispositivos nanoelectrónicos es la conexión entre diferentes componentes. Para esto hay varios candidatos (Fig. 2).

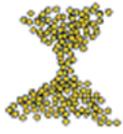
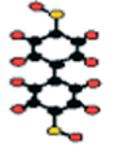
MATERIAL					
GEOMETRY	-Au, Cu, Ag,.. Undefined	-C Tubular	-C,N,O,... Defined by chemistry	-Au 2D, planar	C,H,O,N,P,... Double helix
SCALE	Atomic	1-40 nm	1 nm	Some nm	1 nm
LENGTH	Nanometers	1-2 microns	Nanometers	Nanometers	1-2 microns
WIRING	Easy	Difficult	Difficult	Easy	Difficult
FABRICATION	Mechanical contact...	Arc discharge laser	Test tube	Lithography	Test tube
CONDUCTION MECHANISM	Quasiballistic transport	¿?	¿?	Ballistic transport	¿?

Figura 2. Candidatos a interconectores en el nanomundo

El factor limitante de la tecnología semiconductor actual se debe a la disipación de energía. Esta disipación se acelera a velocidades de conmutación elevadas. En nanoestructuras metálicas, tamaño del orden de la longitud de onda electrónica (unos pocos Å) y longitud menor que el recorrido libre medio (distancia entre colisiones) el transporte es balístico. Esto quiere decir que los electrones no disipan energía en la nanoestructura. Dependiendo de los diseños nanoelectrónicos, y especialmente para la computación cuántica, es importante que se mantenga la coherencia electrónica, que el portador de carga no pierda memoria de su fase. El estado superconductor por ejemplo, es un estado coherente macroscópico, con innumerables aplicaciones hoy en día. Los diseños de circuitos nanoelectrónicos usarán estas propiedades para realizar operaciones de forma rápida y eficiente.

Dentro de este campo cabría destacar los trabajos en las supramoléculas unidimensionales conductoras. Los polímeros metal-metal-haluro (MMX) demuestran interesantes propiedades eléctricas y magnéticas y se perfilan como una posible alternativa a los nanotubos de carbono.⁵

➤ Espintrónica y nanoestructuras magnéticas

Los dispositivos activos actuales están basados todos, en mayor o menor medida, en la carga del electrón, que fue descubierto a finales del siglo XIX. Recientemente hemos aprendido a hacer uso selectivo de los dos canales de espín. El primer dispositivo espintrónico es el cabezal de lectura de información magnética basado en la magnetorresistencia gigante. El principio es la diferente tasa de

⁵ Interconnect Technology and Design for Gigascale Integration. Jeffrey A. Davis and James D. Meindl. Springer.

dispersión (*scattering*) a que están sujetos los diferentes canales de espín. Esto hace que una orientación antiparalela de la imanación en las capas magnéticas presente un estado de resistencia alta, y que la orientación paralela presente un estado de resistencia baja. Estos dispositivos se encuentran en los cabezales de los discos duros y el descubrimiento del fenómeno ha merecido el premio Nobel de Física del año 2007 a Albert Fert y Peter Grunberg. En las tecnologías de grabación magnética se desarrollan esfuerzos considerables en medios con anisotropías oblicuas, en medios con la imanación perpendicular y en medios litografiados. Las memorias magnéticas basadas en las uniones túnel ferromagnéticas MRAM han llegado al mercado recientemente (Freescale (4 Mbit MRAM, en el 2006) NEC, Micromem...).

En España hay una excelente comunidad de investigación en magnetismo, trabajando en varios problemas fundamentales y aplicados en la escala nanométrica.

Dentro de este campo cabe destacar los esfuerzos que se están realizando en:

- inyección de espín polarizados
- válvulas de espín
- transistores de espín
- túnel de espín
- efectos dinámicos y de precesión
- propiedades de redes de nanoelementos magnéticos
- nanopartículas magnéticas
- magnetismo en sistemas no convencionales
- biomagnetismo
- NEMS magnéticos

En este campo cabría destacar iniciativas como el Magnetic Race Track Memory, (S. Parkin et al. IBM) donde la información se graba en paredes magnéticas, un "viejo" empeño de la comunidad magnética (como la memoria de burbuja, *bubble memories* de los años 70) de crear memorias magnéticas en dispositivos sin partes mecánicas móviles.

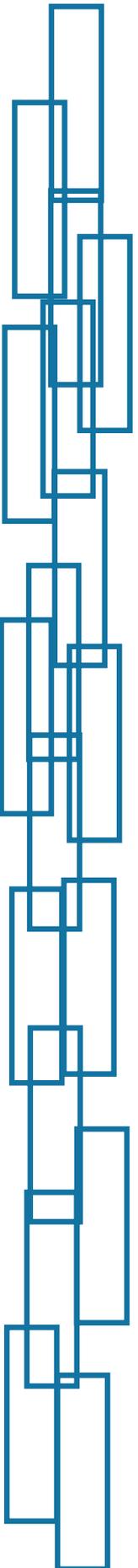
Aún compitiendo con tecnologías variadas (materiales de cambio de fase, memorias Flash....) en términos de velocidad de acceso, capacidad de información, fiabilidad, etc., se augura un buen futuro para el disco duro. Para terminar, hay que destacar que este año se ha "inaugurado" oficialmente la era del terabyte, pudiéndose adquirir en el mercado discos duros de esta capacidad⁶.

➤ Computación Cuántica

En 1948 Claude Shannon define matemáticamente el concepto de información: con su Teorema de Codificación sobre un Canal sin Ruido, su Teorema de Codificación sobre un Canal Ruidoso y los códigos de corrección de errores. Esto da lugar a la Teoría de la Información. La información y la lógica, el arte de manejar la información, no pueden existir desligadas de las leyes de la naturaleza. En el mundo cuántico la unidad de información es el "qubit" (bit cuántico). Además:

- La información cuántica no se puede copiar con fidelidad perfecta;

⁶ Magnetic Nanostructures in Modern Technology: Spintronics, Magnetic MEMS and Recording. Azzerboni, Bruno Asti, Giovanni Pareti, Luigi. Springer.



- La información cuántica se puede *transferir* con fidelidad perfecta;
- La medida llevada a cabo en un sistema cuántico destruye la mayoría de la información contenida en él;
- Sólo se pueden hacer predicciones probabilísticas sobre la base en la que un estado cuántico acabará después de la medida;
- Ciertos observables no pueden tener simultáneamente valores precisos definidos;
- La información cuántica puede estar codificada (y generalmente lo está) en correlaciones no locales entre las diferentes partes de un sistema físico;

Los requisitos para fabricar un ordenador cuántico son:

- Un sistema físico escalable con qubits bien definidos.
- La habilidad de inicializar el estado de los qbits a un estado arbitrario como $|0000\dots\rangle$.
- Tiempos largos de coherencia, mucho más largos que el tiempo de operación de las puertas.
- Un conjunto "universal" de puertas cuánticas.
- Una medida específica de qubits.
- La capacidad de convertir qubits estacionarios a viajeros.
- La capacidad de transmitir fielmente qubits entre sitios específicos.

Se ha demostrado la fabricación de qubits en trampas de iones, cavidades de alto Q, RMN en líquidos y redes de uniones Josephson. Recientemente se ha demostrado experimentalmente que fotones únicos pueden transferir información cuántica entre qubits relativamente distantes⁷.

Me gustaría finalmente resaltar que hay una compañía canadiense (D-Wave Systems Inc.) que afirma que ha construido el primer ordenador cuántico de 16 qubits capaz de resolver problemas sencillos. Ver por ejemplo:

<http://www.nature.com/news/2007/070212/full/news070212-8.html>

En la página web de esa compañía -<http://www.dwavesys.com>- se afirma que en la conferencia de supercomputación SC07 el 20 de Nov de 2007 en Reno se ha mostrado uno de 28 qubits⁸.

3. Actuaciones a desarrollar en España 2008-2011

Las nanotecnologías, en su acepción más general, -técnicas de manipulación o control a escala nanométrica e incluso molecular o atómica- no tendrán aplicación propia práctica hasta dentro de unas décadas. Sin embargo, las previsiones apuntan a que estarán presentes en todos los campos de las ciencias y supondrán, según los expertos, una revolución sólo comparable a la que ha supuesto la microelectrónica. La nanoelectrónica como tal representa un pequeño, pero rápidamente creciente, mercado. Engloba desde el evolucionario "More of Moore" desarrollo de la tecnología actual de circuitos integrados microelectrónicos, al revolucionario "More than Moore" que son las actividades que ahora se pueden denominar nanociencia pero que alterarán significativamente el panorama tecnológico y los modelos de negocio y la

⁷ Mika A. Sillanpää et al. Nature 449, 438-442 Sept. 2007 y J. Majer et al Nature 449, 443-447 Sept. 2007).

⁸ Quantum Computation and Quantum Information by Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang. Cambridge University Press.

industria microelectrónica. Estos cambios demandan estructuras organizativas nuevas, equipo y material y una experiencia multidisciplinar. De la misma manera que la microelectrónica llevó a la creación del microchip, o circuito integrado, que disminuyó el tamaño de los ordenadores e incrementó el poder de cálculo, la nanoelectrónica llevará al 'nanochip'.

¿Qué se necesita?

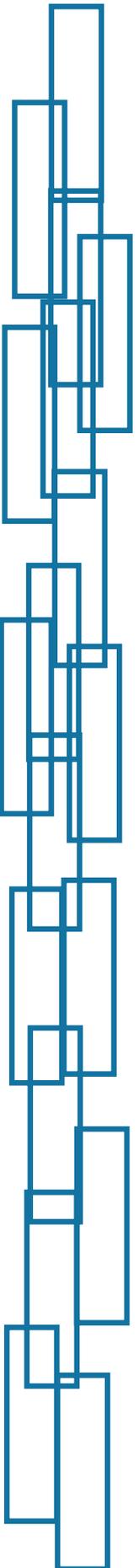
Lo primero que hay que tener en cuenta es que la nanoelectrónica es un campo muy abierto con un potencial enorme para logros transformadores que se originen en la investigación fundamental. Algunos de los temas principales son:

- Entender el transporte en la nanoescala (una buena interrelación teoría experimento es indispensable). Los experimentos DC, y aún más los dinámicos a frecuencias de THz, serán muy importantes.
- Desarrollar y entender las técnicas de autoensamblado. Algunos de los problemas pendientes es resolver el problema de las interconexiones entre elementos activos y encontrar un "sustituto" del transistor. Esto tiene el potencial de desplazar en el futuro una gran parte de las aplicaciones convencionales de los semiconductores, y, si se pudiera hacer por técnicas de autoensamblado, supondría una gran ventaja frente a la tecnología convencional del silicio. Las fábricas de circuitos integrados alcanzan hoy en día los miles de millones de dólares.
- Encontrar maneras nuevas de hacer electrónica y de implementarla (p.ej. computación cuántica, modelos electrónicos simulando sistemas vivos; sistemas híbridos Si-biológicos, autómatas celulares). ¡No intentar duplicar el transistor, sino investigar en nuevos paradigmas electrónicos!. El tema ha sido recientemente planteado de una manera provocadora, preguntando retóricamente que si realmente creemos que lo "nano" es diferente entonces porqué estamos intentando construir transistores una y otra vez.

Los campos de investigación más prometedores son:

- correlaciones en puntos hilos y anillos cuánticos;
- electrónica molecular y contactos atómicos;
- nanomagnetismo;
- transporte cuántico y ruido;
- transporte dependiente de espín y control del espín con corrientes;
- manipulación cuántica y la física de los qubits;
- efectos de proximidad y estructuras híbridas;
- nuevos materiales con propiedades acopladas, p.ej. multiferroicos;
- modelado del transporte, materiales e intercaras.

En España existe una comunidad científica altamente cualificada en estos temas. Sin una industria microelectrónica relevante propia se debe apostar por financiar iniciativas novedosas y favorecer el máximo posible las iniciativas empresariales fruto de las investigaciones. Se debe facilitar y potenciar la consecución de patentes. Se debe potenciar una colaboración real entre la industria, las universidades y los organismos públicos de investigación. En el ámbito industrial se debe exigir la contratación de doctores para realizar investigación.



4. Publicaciones más relevantes en el área (2004-2007)

Las 10 publicaciones que contienen los términos nano* y electr* y que han sido publicadas en este período y han recibido más citas por otros autores son, según el ISI Web of Knowledge, las siguientes:

Internacionales

- Michalet X., Pinaud F. F., Bentolila L.A., et al. Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics. *Science* 307 (5709): 538-544 Jan 28 2005. Times Cited: 509.
- Love J. C., Estroff L. A., Kriebel J. K., et al. Self-assembled monolayers of thiolates on metals as a form of nanotechnology. *Chemical Reviews* 105 (4): 1103-1169 APR 2005. Times Cited: 439.
- Burda C., Chen X. B., Narayanan R., et al. Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes. *Chemical Reviews* 105 (4): 1025-1102 APR 2005. Times Cited: 407.
- Zhang Y. B., Tan Y. W., Stormer H. L., et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in grapheme. *Nature* 438 (7065): 201-204 NOV 10 2005 Times Cited: 362.
- Novoselov K. S, Geim A. K, Morozov S. V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* 306 (5696): 666-669 OCT 22 2004. Times Cited: 321.
- Kong X. Y, Ding Y., Yang R., et al. Single-crystal nanorings formed by epitaxial self-coiling of polar nanobelts. *Science* 303 (5662): 1348-1351 FEB 27 2004. Times Cited: 319.
- Ozgur U., Alivov Y. I, Liu C., et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics* 98 (4): Art. No. 041301 AUG 15 2005. Times Cited: 309.
- Stone H. A, Stroock A. D, Ajdari A. Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annual Review of Fluid Mechanics* 36: 381-411 2004. Times Cited: 306.
- Katz E., Willner I. Integrated nanoparticle-biomolecule hybrid systems: Synthesis, properties, and applications. *Angewandte Chemie-International Edition* 43 (45): 6042-6108 2004. Times Cited: 303.
- Li D., Xia Y. N Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel?. *Advanced Materials* 16 (14): 1151-1170 JUL 19 2004. Times Cited: 256.

Con algún autor español

- Perez-Juste J., Pastoriza-Santos I., Liz-Marzan L. M, et al. Gold nanorods: Synthesis, characterization and applications. *Coordination Chemistry Reviews* 249 (17-18): 1870-1901 SEP 2005. Times Cited: 91.

- Fernandez-Garcia M., Martinez-Arias A., Hanson J. C, et al. Nanostructured oxides in chemistry: Characterization and properties. *Chemical Reviews* 104 (9): 4063-4104 SEP 2004. Times Cited: 85.
- Maspoch D., Ruiz-Molina D., Veciana J. Magnetic nanoporous coordination polymers. *Journal of Materials Chemistry* 14 (18): 2713-2723 2004. Times Cited: 78.
- Perez-Juste J., Liz-Marzan L.M., Carnie S., et al. Electric-field-directed growth of gold nanorods in aqueous surfactant solutions. *Advance Functional Materials* 14 (6): 571-579 JUN 2004. Times Cited: 75.
- Platero G., Aguado R. Photon-assisted transport in semiconductor nanostructures *PHYSICS Reports-Review Section of Physics Letters* 395 (1-2): 1-157 MAY 2004. Times Cited: 73.
- Liz-Marzan L. M. Tailoring surface plasmons through the morphology and assembly of metal nanoparticles. *Langmuir* 22 (1): 32-41 JAN 3 2006. Times Cited: 67.
- Bisquert J., Cahen D., Hodes G., et al. Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells. *Journal of Physical Chemistry B* 108 (24): 8106-8118 JUN 17 2004. Times Cited: 56.
- Loscertales I. G., Barrero A., Marquez M., et al. Electrically forced coaxial nanojets for one-step hollow nanofiber design. *Journal of the American Chemical Society* 126 (17): 5376-5377 MAY 5 2004. Times Cited: 56.
- Lopez N., Norskov J. K., Janssens T. V. W., et al. The adhesion and shape of nanosized Au particles in a Au/TiO₂ catalyst. *Journal of Catalysis* 225 (1): 86-94 JUL 1 2004. Times Cited: 55.
- Casas-Vazquez J., Jou D. Temperature in non-equilibrium states: a review of open problems and current proposals. *Reports on Progress in Physics* 66 (11): 1937-2023 Nov 2003. Times Cited: 51.

5. Proyectos

Los proyectos de investigación relacionados con la nanoelectrónica abarcan todas las convocatorias públicas de investigación, desarrollo e innovación.

España

Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología

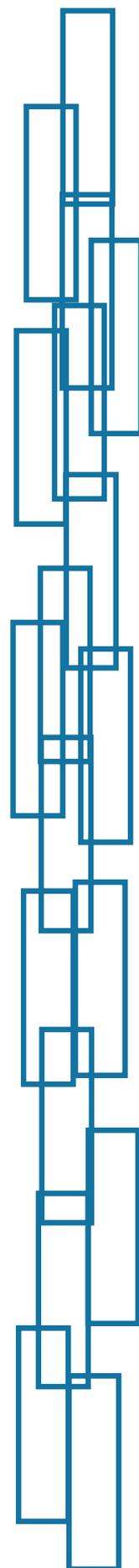
Dentro de esta acción los proyectos relacionados con la nanoelectrónica son los siguientes:

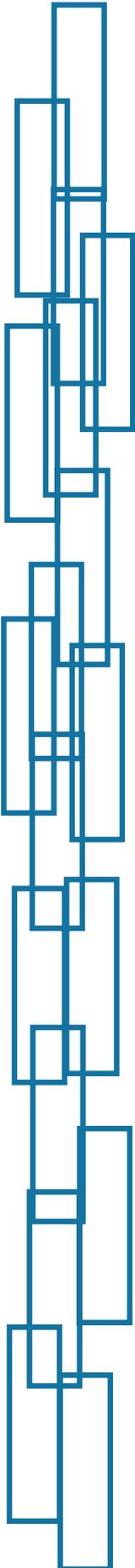
[NAN2004-09087-C03](#)

Investigador principal: José Luí́s Vicent López

Organismo: Universidad Complutense de Madrid

Título del proyecto: Nanofabricadores Superconductores basados en el efecto Ratchet.





[NAN2004-09094-C03](#)

Investigador principal: Josep Fontcuberta Griñó
Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Título del proyecto: Nanodispositivos para la fabricación de Spins.

[NAN2004-09109-C04](#)

Investigador principal: Luisa González Sotos
Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Título del proyecto: Nanoestructuras de semiconductores como componentes para la información cuántica.

[NAN2004-09125-C07](#)

Investigador principal: Soledad Penades Ullate
Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Título del proyecto: Gliconanopartículas magnéticas biofuncionales con aplicación en biomedicina.

[NAN2004-09133-C03](#)

Investigador principal: Francesc Javier Obradors Berenguer
Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Título del proyecto: Nanocomposites superconductores y magnéticos por vía química.

[NAN2004-09195-C04](#)

Investigador principal: José Rivas Rey
Organismo: Universidad de Santiago de Compostela
Título del proyecto: Nanoestructuras magneto-plasmónicas para biosensores de alta sensibilidad.

[NAN2004-09306-C05](#)

Investigador principal: Francesc Pérez Murano
Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Título del proyecto: Tecnología para sistemas sensores y electrodos basados en nanotubos de carbono.

[NAN2004-09380-C04](#)

Investigador principal: Alejandro Pérez Rodríguez
Organismo: Universidad de Barcelona
Título del proyecto: Síntesis de nanomateriales y estudio de su interacción con diferentes gases para su aplicación en dispositivos sensores.

[NAN2004-09415-C05](#)

Investigador principal: Josep Samitier Martí
Organismo: Parc Científic de Barcelona
Título del proyecto: Desarrollo de plataformas nanobioanalíticas basadas en reconocimiento molecular mediante detección óptica y/o electrónica.

Además, existen proyectos relacionados con la nanoelectrónica en las convocatorias:

- Proyectos Cenit
- Acciones CIBER
- Proyectos Consolider

UE

<http://cordis.europa.eu/improving/home.html>

6. Infraestructura necesaria para cumplir objetivos

Las infraestructuras necesarias dependerán de las líneas prioritarias de investigación que se establezcan. Siendo muy conscientes del estado actual de la industria microelectrónica, y de la situación de ésta en nuestro país, se deben apoyar las iniciativas de desarrollo de ideas novedosas y favorecer al máximo posible las iniciativas empresariales fruto de las investigaciones. En ese contexto, se debería definir estrategias claras y apostar decididamente en áreas de la nanoelectrónica donde, a nivel científico, se es competitivo.

7. Grupos españoles más relevantes

Una relación bastante completa de los grupos que actualmente trabaja en temas relacionados con la nanoelectrónica se puede encontrar en:

<http://www.nanospain.org/members.php>

Grupos europeos más relevantes

Una lista de compañías y actividades relacionadas con la nanotecnología en Europa se puede encontrar en:

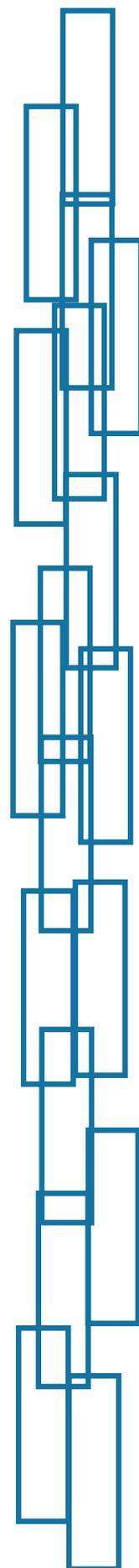
<http://www.nanovip.com/nanotechnology-companies/europe>

8. Iniciativas relevantes (plataformas tecnológicas etc.)

- CIC NanoGUNE, <http://www.nanogune.eu>
- IMDEA Nano, <http://www.imdea.org>
- CIN2, <http://www.cin2.eu>
- 20 Plataformas Tecnológicas Europeas (ETP's ENIAC-Nanoelectronics, en el desarrollo de materiales para la electrónica).

9. Conclusiones

La nanoelectrónica será, sin lugar a duda, la tecnología del futuro. Su implementación será un proceso gradual, sustituyendo componentes individuales y eventualmente sistemas complejos de forma íntegra. Las expectativas son grandes, aunque aún está por definir el heredero del transistor. Ése es actualmente el campo de investigación más activo, la fabricación y caracterización de componentes individuales que replacen a los de Si. Ejemplos son los diodos moleculares, interruptores





monoatómicos y el control del transporte en estructuras de punto cuántico. Un segundo campo, con bastante actividad, es la investigación en los posibles interconectores. Aquí, principalmente los nanotubos de carbono y estructuras metálicas u orgánicas auto-ensambladas, están siendo investigados. Muy poco trabajo se está haciendo en las arquitecturas, y el modelado con poder predictivo está en etapas incipientes. Esto es necesario para desarrollar reglas básicas ingenieriles para diseñar sistemas complejos. La situación de la computación cuántica es diferente. Hay mucha actividad en el desarrollo conceptual y de algoritmos. Las implementaciones experimentales de los qubits y del transporte de información entre qubits están comenzando. Quizá una excepción notable es el campo de la criptografía (transporte de información), donde la existencia de estados entrelazados de fotones viajando por guías convencionales ha sido demostrada experimentalmente.

A nivel más general, no está claro con toda certeza que sean los electrones el método elegido para procesar información a largo plazo. La nanoelectrónica debe ser entendida como un campo de investigación general, dirigido a desarrollar el entendimiento de los fenómenos característicos de los objetos nanométricos con la meta de explotarlos en el procesado de la información.

