

Monografías 142

Nanociencia, nanotecnología y defensa

Escuela de Altos Estudios de la Defensa



MINISTERIO DE DEFENSA



Monografías 142

Nanociencia, nanotecnología y defensa

Escuela de Altos Estudios de la Defensa





MINISTERIO DE DEFENSA

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES
http://publicacionesoficiales.boe.es/

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

http://publicaciones.defensa.gob.es/

© Autor y editor, 2014

NIPO: 083-14-241-X (edición papel)
ISBN: 978-84-9091-009-2 (edición papel)

Depósito Legal: M-31597-2014
Fecha de edición: diciembre 2014
Imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

NIPO: 083-14-242-5 (edición libro-e)
ISBN: 978-84-9091-010-8 (edición libro-e)

Las opiniones emitidas en esta publicación son exclusiva responsabilidad del autor de la misma.
Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del © Copyright.

En esta edición se ha utilizado papel 100% reciclado libre de cloro.

EU Ecolabel www.ecolabel.eu
100%

ÍNDICE

Página

Introducción
Jesús Ildefonso Díaz Díaz

A modo de prólogo 9

Sobre la gestación de esta monografía..... 15

Una anticipación de lo que se ofrece: resumen de los diferentes capítulos.. 17
- Sobre el capítulo I 17
- Sobre el capítulo II 26
- Sobre el capítulo III 35
- Sobre el capítulo IV..... 43

Capítulo primero

De Maxwell al mundo de la Nanociencia..... 51
Antonio Hernando

Introducción..... 51
- La escala nanométrica..... 52
- Cómo nace la NC 53

La energía necesaria para la vida y la información almacenada en el ADN.
- Dos ejemplos naturales de nanotecnología..... 55
- Influencia de la NC y la NT en la evolución y la aparición de la vida 55
- Un nanomotor diseñado y construido por la evolución para suministrar la energía requerida para la vida 57
- La información: reguladora de la evolución. El núcleo de la célula y el ADN como nano-códigos..... 59

El electromagnetismo como primer fundamento de la NC y la NT..... 64
- Las interacciones fundamentales conocidas a día de hoy..... 64
- Las ecuaciones de Maxwell y el paradigma del método científico..... 65
  - **Las etapas del método científico..... 65**
  - **La obra de Maxwell como síntesis de los experimentos de electricidad y magnetismo..... 66**

Página

La tecnología como base y consecuencia de las ecuaciones de Maxwell. La transmisión de la energía y de la información define un mundo económico «electromagnético» ... 70
Los campos magnéticos producidos por la actividad de la corteza cerebral ... 72
Consideraciones finales ... 76
La mecánica cuántica como fundamento de la NC ... 76
Los átomos ... 76
La contribución del Instituto Rockefeller de Madrid ... 80
Las reglas de cuantificación ... 81
La cuantificación de estados y la NC ... 84
La temperatura y la NC ... 86
La función de onda y la ecuación de de Broglie y su evolución con los campos magnéticos. Partículas y Ondas ... 89
Las propiedades eléctricas y magnéticas de nanocristales y nanopartículas. 92
Las longitudes características: anisotropía magnética, longitud de correlación de canje. Superparamagnetismo y memoria magnética .. 92
Las longitudes características y la conducción eléctrica: recorrido libre medio, penetración túnel. Efecto túnel y NC ... 101
El papel relevante de las propiedades de la superficie en la física de las nanopartículas. Emergencia de magnetismo en nanopartículas de materiales que no son magnéticos en la escala ordinaria ... 105
Un ejemplo de NC en futuras terapias: hipertermia ... 111
Bibliografía ... 115

Capitulo segundo

Nanotecnología en evolución ... 117
Fernando Briones
Introducción ... 117
De la microelectrónica a la nanoelectrónica ... 120
Ciencia y tecnología en la escala nano ... 122
Nano-bio-ciencias ... 137
La información cuántica y las proteínas ... 139
Nanomáquinas ... 143
La investigación española en nanotecnología ... 150
Bibliografía ... 152

Capítulo tercero

Desarrollo de nanotecnologías capacitadoras para seguridad y defensa ... 155
Julio Plaza del Olmo
Introducción ... 155
El desarrollo de tecnología ... 156
Optoelectrónica y estructuras de baja dimensionalidad ... 160
Tecnología fotónica. La tecnología habilitadora transversal ... 165
Los cristales fotónicos ... 166
La plasmónica y la transmisión extraordinaria ... 170
Fotónica y optoelectrónica para sensores de agentes químicos y biológicos 172
Fotónica para telecomunicaciones ... 176
Terahercios, en tierra de nadie ... 179
Materiales de gap ancho: nitruro de galio ... 180
Carbono: del nanotubo al grafeno ... 182

Página

Los metamateriales. O cuando la luz se curva al revés 184
Metamateriales para radiofrecuencia 186
Metamateriales ópticos 189
Óptica de transformación 190
Metamateriales acústicos 193
Energía en el mundo nano 194
Células solares 194
Células de combustible y baterías 195
Comunicaciones seguras y la criptografía cuántica 195
La paradoja EPR y la desigualdad de Bell 198
Comunicación cuántica 199
Conclusiones 201
Bibliografía 202

Capítulo cuarto

Aplicaciones de la nanotecnología en Sistemas Militares 205
Jesús C. Gómez Pardo
Introducción 205
El entorno de la batalla del futuro 208
La estrategia de tecnología e innovación de la defensa. Líneas de actuación funcional 209
Armamento 211
Munición 212
Municiones complejas 212
Materiales no energéticos 213
Materiales energéticos 213
Logística de municiones 215
Municiones complejas 215
Espoletas, sensores y dispositivos de activación 218
Señuelos pirotécnicos 219
Sistemas de Armas 220
Medios no letales 221
Tecnologías de aplicación general 221
Sistemas de Inteligencia, Vigilancia, Adquisición de Objetivos y Reconocimiento (ISTAR) 222
Adquisición de datos. Sensores 222
Sensores radar 223
Sensores mecánicos 225
Sensores electromagnéticos 225
Sensores químicos y biológicos (QB) 225
Otros sensores 227
Proceso de explotación de datos, análisis de la información y producción de inteligencia 227
Distribución de información e inteligencia 227
Dirección del ciclo de inteligencia 228
Arquitectura ISTAR 228
Plataformas 229
Comunes-plataformas 229
Materiales 229
Carburo de boro nanocristalino 231
Superhilos de nanocompuestos 231
Fulerenos inorgánicos 232
Acero transparente 232

Página

Nanoblindaje líquido **232**
Energía 232
Plataformas terrestres 234
Plataformas navales 237
Plataformas aéreas 239
Plataformas espaciales 243

Protección personal 245
Lucha contra IED 247
Protección NBQ 248
Tecnologías del combatiente 250
Subsistemas Ss1 «armamento» y Ss3 «eficacia de fuego» **252**
Subsistema Ss2 «Fuente de alimentación» **253**
Subsistema Ss4 «Información y comunicación» **258**
Subsistema Ss5 «Supervivencia» **263**
Subsistemas Ss6 «Sostenimiento» y Ss7 «Preparación» **266**

Protección de plataformas e instalaciones 269
Sistemas ESM y ECM de guerra electrónica 269
Armas de energía dirigida 271
Sistemas de autoprotección 272
Simulación y adiestramiento sobre sistemas de guerra electrónica 274
Sistemas de protección de instalaciones y despliegues 274

Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Simulación (TIC) 275
Sistemas de Información para mando y control (C2) 276
Comunicaciones 279
NEC 281
Seguridad CIS 281
Simulación 282
CD&E 282

Conclusiones 282

Bibliografía 285

Abreviaturas y acrónimos 287

Composición del grupo de trabajo 291

Relación de Monografías del CESEDEN 293

Jesús Ildefonso Díaz Díaz
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Introducción

A modo de prólogo

El progreso de la sociedad humana, en todas sus acepciones, ha estado siempre jalonado por los avances científicos y tecnológicos. El ritmo con el que esos avances han venido irrumpiendo en la sociedad, marcando nuevas etapas de progreso, cambiando los usos y costumbres de los habitantes de cada época, ha ido aumentando cada vez más. De un enorme espaciamiento entre ellos, de la escala de siglos (como fue el caso del descubrimiento y control del fuego, la talla de piedras, la agricultura, la construcción, la cerámica, la metalurgia, los tejidos, etc.) hemos pasado a cambios que se producen a escalas cada vez más cortas: apenas se han asimilado los cambios de una nueva tecnología cuando irrumpe otra nueva aún más impactante que la mejora. Es lo que a veces se denomina secuencia de tecnologías disruptivas.

El objetivo principal de esta monografía es ilustrar el enorme impacto que la nanotecnología (NT) y la nanociencia (NC) están teniendo ya, y tendrán en los próximos años, en la sociedad y muy en especial en la defensa.

Esta idea de que los avances científico-técnicos modulan el progreso de la sociedad no es en absoluto reciente. Tal enfoque fue el objeto de una de las obras cumbres de un gran pensador, de uno de los economistas más influyentes del siglo xx, Joseph Alois Schumpeter (1883-1950), a quien bien podríamos calificar como «ciudadano del mundo»: nacido en

Moravia (actualmente República Checa), fue profesor de Economía durante varios años en las universidades de Viena, Czernowitz (actual Chernovtsi, Ucrania), Graz y Bonn, llegando a sus 36 años a ser nombrado Ministro de Economía de Austria. En 1932 se instaló en Estados Unidos, como profesor de la Universidad de Harvard donde permaneció hasta su fallecimiento.

Schumpeter sistematizó su teoría de la repercusión económica (y social) de los «ciclos de innovación» en su libro *Business Cycles: A theoretical, historical and statistical analysis of the Capitalist process de 1939*[1]. Desde la cristalización del método científico, que podríamos situar en el Renacimiento, el anterior «sueño de la razón», en la terminología de Goya, involucrando explicaciones del mundo basadas en mitos, religión o azar, fue sustituido por argumentos fundados en principios básicos elaborados mediante el uso simultáneo de la lógica y de la refutación mediante experimentos universales capaces de ser repetidos independientemente del lugar, de la época y de cualquier otra circunstancia subjetiva.

No cabe duda de que la máquina de vapor (la revolución industrial) significó una aceleración del progreso y del conocimiento. Tras ella aparecieron nuevas oleadas de tecnología relacionadas con el petróleo, la automoción, la industria química, la aeronáutica y la exploración espacial, por citar tan solo unas pocas hasta los años setenta del siglo pasado. Podemos apreciar fácilmente que esos impulsos, esas aceleraciones originadas por las innovaciones científico-técnicas, se producen cada vez tras periodos de vigencia más cortos. Han ido dando lugar a un caldo de cultivo que, según Schumpeter, fueron aprovechados por emprendedores que los convirtieron en nuevos bienes de consumo y servicios.

En la actualidad nos encontramos entre dos de esas inmensas olas tecnológicas: la de la informática (y telecomunicaciones) y la más reciente de la nanotecnología (y nanociencia). Antes de profundizar más en el tema quizás sea el momento de aclarar la razón de la bicefalia de este nuevo impulso científico-técnico.

Si se hiciese hoy día una encuesta en la calle es claro que habría bastante más gente[2] que tendría al menos algún conocimiento, por muy superficial e indirecto que fuese, sobre lo que el término nanotecnología encierra, en contraste al número reducido de los que pudiese decir algo coherente sobre lo que se conoce bajo el término de nanociencia. Y es que nos encontramos ante uno de los mejores ejemplos en los que los aspectos tecnológicos han precedido, incluso en popularidad, a los aspectos científicos y es que en realidad la relación entre ciencia y tecnología es recíproca.

[1] http://www.espiritodafenix.com/index_arquivos/Arquivo/50_Schumpeter_Ciclos_de_Negocios/schumpeter_business_cycles.pdf.

[2] Un 10% de la población europea (un 4% en el caso de España) según sondeos de la Comisión Europea.

Se suele aludir con frecuencia que el avance de conocimiento científico genera nueva tecnología pero, aunque no es tan habitual escuchar, hay numerosas pruebas de que el desarrollo de tecnología innovadora induce también el progreso del conocimiento científico más básico.

Comencemos por aclarar los términos. Lo nanométrico es característico de una escala comprendida entre la del átomo y la de la célula o, precisando con ejemplos, entre la escala de agregados de unos pocos átomos y la de las macromoléculas de proteínas citoplasmáticas. Podríamos decir que es nanométrico un trozo de materia que en alguna de sus dimensiones tienen menos de 100 átomos. Actualmente se admite como perteneciente al nanomundo cualquier sistema que tenga, en al menos una dimensión, un espesor inferior a 100 nm. Respecto de las unidades de longitud, recordemos que una micra es la milésima parte de un milímetro o, lo que es lo mismo, la millonésima parte de un metro y que una micra es el tamaño de una bacteria pequeña o el tamaño del núcleo de una célula animal. Pues bien, el nanómetro es la milésima parte de la micra, lo que equivale a la milmillonésima parte del metro. En general podemos considerar que el orden de magnitud de los átomos que entrarían en un nanómetro lineal sería de decenas de átomos.

Esta monografía versará pues sobre el mundo de lo invisible a simple vista. No es nada extraño que el ser humano haya canalizado su curiosidad y sus esfuerzos científicos, en primer lugar, hacia lo que convive con él a través de sus sentidos o incluso lo intuye por su contemplación más o menos inmediata. Así, por ejemplo, el hombre ha construido telescopios que nos han mostrado cómo son las estrellas, galaxias, y nebulosas. Sabemos hoy día que las distancias y tamaños en el universo son tan grandes que superan nuestra capacidad de comprenderlos. En el extremo opuesto de la escala de la longitud el hombre también ha construido hace mucho tiempo microscopios que alimentaron su curiosidad por el mundo fascinante de lo diminuto: células, bacterias, virus, e incluso átomos. Se entiende pues que al «hombre de la calle» le cueste imaginar y comprender la naturaleza de los objetos diminutos. Sin embargo, como muestran la nanotecnologia y la nanociencia, ese mundo invisible es tan infinito y fascinante como el universo.

A escala nanométrica, aparecen grandes sorpresas ya que las propiedades físicas y químicas de los llamados nanomateriales cambian y pueden ser muy diferentes a los que observamos en nuestro mundo macroscópico. En este nanomundo, algo sólido se puede volver líquido, un material aislante se puede convertir en conductor, algo inerte en un catalizador, etc.

Las nanopartículas están ahí desde el inicio de los tiempos: en partículas de humo, dentro de las bacterias, en los colorantes inorgánicos de antiquísimas porcelanas y vidrieras. Hoy día la nanociencia y la nanotecnología estudian cómo fabricar y controlar las estructuras de dichas nanopartículas. Esto nos permite crear materiales con las propiedades

deseadas que son de utilidad en electrónica, óptica, biomateriales, medicina, tecnología de la comunicación, materiales nanoestructurados para la exploración espacial, nanofibras para nuevos productos textiles y hasta en la producción de energía. Sabemos fabricar ya al nivel más eficiente posible, podemos verlo, simularlo, entenderlo y demostrarlo. Es una nueva revolución científica y tecnológica. Estamos en un punto en el cual la ciencia ficción comienza a confundirse con la realidad.

La nanotecnología, basada en la nanociencia, puede ser entendida como un nuevo tipo de ingeniería aplicable en la escala nano. Se trata del desarrollo de técnicas experimentales que permitan la observación, la medida, la manipulación y la fabricación de estructuras, objetos, dispositivos y sistemas nanométricos. Esta idea fue expresada públicamente por primera vez, ya en 1959, por el genial Premio Nobel de Física, Richard Feynman en su celebre conferencia *There is plenty of room at the botom*, coloquialmente «Al fondo hay sitio». Hoy día tenemos ya una capacidad científica e industrial insospechada al final del siglo pasado. En los últimos años han surgido gran número de patentes y publicaciones científicas asociadas al mundo nanométrico. La comunidad científica ha ampliado sus conocimientos sobre los materiales gracias a herramientas poderosas como los microscopios electrónicos y atómicos (que permiten a los investigadores observar los materiales, estudiar su estructura, su dinámica y sus propiedades) y superordenadores (que permiten realizar experimentos de forma virtual, fiable y, sobre todo, mucho más barata que en un laboratorio). En el límite de los átomos podemos sacar el máximo provecho posible del mínimo de material. El impacto social y económico de esta nueva revolución ya está siendo enorme y sin duda lo será en un futuro muy inminente. Existen miles de compañías diseminadas por todo el mundo trabajando en este campo así como multitud de especialistas en estas áreas en universidades e institutos de investigación.

Volvamos a la tarea de precisar los términos. Como en muchas otras ocasiones, definiciones precisas son muy difíciles de ser ofrecidas pues la nanotecnología y la nanociencia no nacieron como disciplinas separadas de sus tecnologías ni ciencias predecesoras. Fueron, y siguen siendo, construidas a medida que aparecieron (y lo siguen haciendo aún con mayor frecuencia) nuevos e insospechados descubrimientos. De manera general, podríamos decir que la nanotecnología se ocupa de la fabricación de materiales, estructuras, dispositivos y sistemas funcionales a través del control y ensamblado de la materia a la escala del nanómetro (de 0.1 a 100 nanómetros, del átomo hasta por debajo de la célula), así como la aplicación de nuevos conceptos y propiedades (físicas, químicas, biológicas, mecánicas, eléctricas...) que surgen como consecuencia de la consideración de esa diminuta escala.

La nanociencia, por el contrario, no pretende fabricar nada: tan sólo es el conjunto de conocimientos científicos necesarios para mover, mani-

pular y construir objetos de estos tamaños (es decir para la nanotecnología). Es claro que las ciencias más tradicionales, como la física o la química, compartieron ya casi desde sus inicios esos cometidos pero el diferente punto de vista que se subraya con la terminología de nanociencia reside en la forma en la que se manejan los objetos: mientras la química ha trabajado tradicionalmente desde un punto de vista macroscópico y global (por ejemplo, siguiendo las reacciones que ocurren en un tubo de ensayo mediante cambios en el color, temperatura o pH), la nanociencia sigue estos procesos a una escala atómica o molecular, pero de manera individual: entendiendo, manipulando y actuando sobre una molécula en particular, un átomo, una nanopartícula, o una proteína, por citar tan solo alguno de estos objetos. La nanociencia trata de entender y modelizar las propiedades de los nanoobjetos en los que las propiedades globales dependen acusadamente de su tamaño, de su superficie y de su forma. Acoge investigaciones multidisciplinares que requieren aportaciones de la física, la química, la biología, las matemáticas, la informática y, por supuesto, de especialistas particularmente dispuestos a interaccionar y conocer los métodos y los lenguajes de las demás disciplinas.[3]

Los avances en nanotecnología se pueden realizar bajo dos filosofías diferentes. Una primera responde a un enfoque «top-down» o de miniaturización, en el que a partir de microestructuras convencionales se desciende hasta conseguir nanoestructuras, lo que es más característico de la tecnología actual. Una segunda filosofía corresponde al enfoque *bottom-up* y permitirá la aparición de la ingeniería de los nanosistemas y de la nanoelectrónica cuando se dominen tecnologías sobre el control de procesos auto-organizativos y de crecimiento para el ensamblaje de subsistemas a nanoescala.

A lo largo de esta monografía ilustraremos como la nanotecnología está impulsando el cambio en los métodos de fabricación en las industrias y en nuestras actividades cotidianas. Su presencia en el ámbito de defensa (las Fuerzas Armadas, los Cuerpos de Seguridad del Estado, y la industria que comercializa y desarrolla los sistemas que finalmente entran en servicio) es ya un hecho consumado del que se poseen numerosos ejemplos prácticos. La sociedad ya está recibiendo este nuevo impulso siguiendo el vertiginoso ritmo de cambios que comenzó en el último tercio del siglo

[3] Este enfoque interdisciplinar moviliza a numerosos científicos de los más diversos campos. Permítaseme mencionar en concreto, en el ámbito matemático, a los miembros del Instituto de Matemática Interdisciplinar (IMI) de la Universidad Complutense de Madrid, instituto del que tuve el honor de ser su fundador y primer director en el año 2005, cargo que sigo desempeñando en la actualidad. Esta vocación se extiende a numerosos colegas de otros institutos matemáticos de investigación y así en octubre de 2014 se celebró en Zaragoza el congreso Nanomat 2014 que reunió a destacados especialistas en el tema.

pasado y que sin duda va a originar nuevos cambios trascendentes a lo largo de este siglo xxi.

Señalemos que el desarrollo de la tecnología en el ámbito de defensa tiene como objetivo obtener una superioridad respecto del adversario que puede darse en ámbitos tradicionales como pueda ser la potencia de fuego, pero también en áreas cada vez más importantes como la obtención de información, comunicaciones, furtividad, mitigación de daños, etc. Se ha pasado en poco tiempo, de conflictos en los que dos ejércitos en igualdad de condiciones se enfrentan de forma abierta, a una guerra asimétrica donde unas guerrillas operan de forma encubierta en entornos urbanos, mezclados entre la población civil, atacando de forma irregular, inesperada e indiscriminada. Frente a ellos, las fuerzas de paz que se despliegan en entornos internacionales como Afganistán, Líbano, océano Índico..., o los Cuerpos de Seguridad del Estado que deben hacer frente a ataques en suelo propio, requieren tecnologías capaces de prevenir, detener, mitigar y combatir este nuevo tipo de amenazas, pero que difícilmente son posibles de combatir con las tácticas y estrategias típicas de un conflicto abierto contra un enemigo claramente identificado y localizado.

La nanotecnologia, con su enorme potencial de desarrollo, va a ser fundamental en el sector de la defensa y la seguridad. Señalemos que cuando nos referimos al impacto de la nanotecnología y de sus aplicaciones nos referimos muchas veces al desarrollo de los componentes que habilitan una serie de aplicaciones, que facilitan la resolución de ciertos problemas, pero que por sí solos no forman un sistema fácilmente distinguible de manera aislada.

Una reflexión que nos parece capital para enmarcar la relevancia del tema de esta monografía radica en la dualidad civil-militar que caracteriza a la industria y a los productos de defensa en la utilización de la nanotecnología (y de manera menos ambiciosa, también a las microtecnologías). La investigación básica y aplicada puede ser desarrollada en cualquier universidad, centro tecnológico, espín–off o PYME. La ciencia y la tecnología detrás de cualquier aplicación militar son las mismas que pueda haber detrás de una aplicación civil. De ahí el interés, cada vez más necesario, en el desarrollo de una tecnología dual que pueda ser usada indistintamente en aplicaciones de seguridad y defensa o en aplicaciones de ámbito civil. La orientación final de la aplicación la determina el usuario final, pero la tecnología y ciencia subyacentes son en esencia las mismas. El avance en esta tecnología capacitadora, con esta visión dual, sugiere optimizar los recursos necesarios una vez que se tiene una sinergia y se aprovechan los avances en ambos ambientes.

Se requiere una amplitud de miras. Nunca se insistirá bastante en la importancia de la ciencia básica. Creadores del mundo tecnológico de nuestros días como Planck, Einstein y Böhr al concebir la relatividad y

la mecánica cuántica sólo pretendían entender el mundo. En el ámbito estrictamente científico se insiste en algunos foros en que perseguir las aplicaciones prácticas puede estrangular la investigación, y que los grandes avances del conocimiento que transforman el mundo son producto de una ciencia libre, sin objetivos a corto plazo y movida en último término por la curiosidad intelectual. Todo esto es cierto. Pero, como ya advirtió Einstein, las cosas deben simplificarse todo lo posible, pero ni un milímetro más. Y aunque el avance del conocimiento es sin duda la clave del desarrollo tecnológico, también es obvio que no basta por sí mismo para transformar el mundo. Una parte esencial de la actividad científica, tal vez incluso la gran mayoría de ella, está dedicada a convertir las grandes ideas en grandes aplicaciones que generen crecimiento económico y, al final, mejoren la vida de las personas, o que tengan ese potencial en una sociedad decente. Los premios Nobel de Física y Química que acaba de conceder la Academia sueca en el 2014, en el momento en el que se escriben estas líneas, representan un reconocimiento explícito de esa labor de apariencia humilde pero tan importante en el fondo: un rayo de luz azul que le faltaba al LED (diodo emisor de luz en sus siglas inglesas) para complementar al rojo y al verde y producir una luz blanca de bajo consumo energético (y que también es el fundamento de los lectores de DVD y Blu-ray), y unas técnicas microscópicas de tal ingenio y poder de resolución que permiten penetrar en los secretos de la célula viva con una profundidad sin precedentes.

Como ha ocurrido en otras ocasiones, el crecimiento y el progreso tecnológico ha sido afianzado (y muchas veces motivado) por la estabilidad de los mercados militares. La mayoría de las tecnologías aplicadas a los grandes sistemas de armas son duales, como lo son los procedimientos de cálculo, los materiales, los procesos productivos y sobre todo, los equipos electrónicos. Esa dualidad permite que cuando los productos militares son más avanzados que los civiles, se produce la difusión en un sentido, y cuando lo son los civiles, en el sentido contrario. Los desarrollos específicamente militares no pueden permanecer lastrados por el cambio en el escenario geoestratégico, las penurias presupuestarias y sus especificidades frente a una sociedad en la que la miniaturización ha propiciado un dominio de las tecnologías de la información y de las comunicaciones con mercados civiles creciendo de manera exponencial.

Sobre la gestación de esta monografía

Desde que recibí la invitación a presidir el grupo de trabajo sobre nanotecnología y defensa del General Jefe de la Escuela de Altos Estudios de la Defensa (EALEDE), General Tomás Ramos Gil de Avalle, a mediados de noviembre de 2013, mi primera misión fue proponer el panel de expertos civiles que debía constituir tal grupo de trabajo, junto a los vocales designados por la vertiente militar: el TCol. CIP D. Jesús Gómez Pardo, D. Julio

Plaza del Olmo, de la Unidad de fotónica del Instituto Tecnológico la Marañosa y el coordinador y persona de contacto con la EALEDE, Col. D. José Tomás Hidalgo Tarrero. No tuve grandes dudas en canalizar la búsqueda de expertos civiles a través de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales a la que tengo el gran honor de pertenecer y en donde la excelencia e interdisciplinariedad de la institución confiere unas características especiales, como sucede en instituciones similares de otros países. En tan solo unas semanas trasladé mi sugerencia a la EALEDE para que fueran invitados en calidad de vocales civiles los académicos Prof. D. Fernando Briones Fernández-Pola y Prof. D. Antonio Hernando Grande.

Se mantuvieron reuniones de trabajo de periodicidad mensual y se realizaron visitas conjuntas a algunos centros estratégicos en el tema como son el Instituto Tecnológico la Marañosa (ITM), el Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM) y el IMDEA Nanoscience. Desde estas líneas manifestamos nuestro agradecimiento por las atenciones recibidas a sus responsables General D. Jose Luis Orts Pales, Prof. D. Jorge M. García y Prof. D. Rodolfo Miranda respectivamente.

Esta monografía se ha diseñado en dos partes claramente diferenciadas. La primera atañe a la presentación y reflexión sobre los aspectos científicos básicos de la nanociencia y nanotecnología. La segunda por el contario desciende más a detalles sobre el ámbito de las realizaciones y aplicaciones al mundo de la seguridad y la defensa. El enfoque ha sido distinto a otros trabajos de revisión muy meritorios realizados anteriormente. Quisiera mencionar en especial la interesante monografía «Nanotecnología para la Defensa» que bajo la coordinación de Héctor Guerrero, y figurando como coautores Remo Tamayo, Susana Martín, Braulio Tamayo y José Torres, fue publicada en 2004 por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en su calidad de organismo autónomo de investigación del Ministerio de Defensa. Aquel libro nació tras la celebración, el 5 de febrero de 2003, de una jornada monográfica en el INTA con el fin de analizar la incidencia que plantean las disciplinas emergentes como los microsistemas y la nanotecnología. Poseyendo actualmente una mayor perspectiva, tras ocho años de la publicación de aquella monografía, se ha querido dar un mayor peso y voz a actores distinguidos en el área, intentando subrayar las realizaciones que ya vieron la luz en nuestro país.

Obviamente, no entra en el cometido de un grupo de trabajo como éste el ofrecer un catálogo exhaustivo sobre todos y cada uno de los temas y enfoques que disciplinas tan amplias como la nanotecnología y la nanociencia abarcan ya en nuestros días. A mi juicio, cada uno de los vocales de este grupo de trabajo, ha realizado un trabajo de un altísimo nivel profesional, sintetizando presentaciones necesariamente muy complejas que se enmarcan entre un nivel difícilmente divulgativo por lo especializado de los temas y los aspectos de reflexión e información que son propios de estos foros de asesoramiento.

Una anticipación de lo que se ofrece: resumen de los diferentes capítulos

Lo que resta de esta Introducción no es más que un intento de presentar de manera muy esquematizada las valiosas, y necesariamente densas, contribuciones de los autores de los capítulos que siguen en esta monografía. La estructura y los mensajes que el texto pueda manifestar estará pues entresacado de sus líneas. En aras de una presentación más homogénea, he renunciado al comillado y sangrado de los textos que reproducen, a veces con similitud casi absoluta, lo que los autores exponen con tanta maestría. El lector verá recompensada su curiosidad si tras recorrer los párrafos de esta introducción acude al detalle de la presentación completa realizada en cada uno de los capítulos que siguen.

Sobre el capítulo I

En el primero de los capítulos de la primera parte, el académico y catedrático de la UCM, A. Hernando, aborda el complejo objetivo de encajar la nanociencia en el contexto de la física básica.

Comienza su capítulo, *De Maxwell al mundo de la nanociencia*, con una breve Introducción en la que nos recuerda la escala nanométrica y los comienzos históricos de la mano de A. Einstein, ya con su tesis doctoral y la famosa conferencia del Premio Nobel Richard Feynman en 1959. Anticipa ya su idea de enlazar el tema con los procesos de la vida en los que la nanoescala es absolutamente fundamental.

Presenta el enfoque de los procesos de la vida en el ámbito de la nanotecnología con dos ejemplos concretos: el de la energía necesaria para la vida, en primer lugar y la información almacenada en el ADN como segundo ejemplo.

Analizando la influencia de la NC y la NT en la evolución y la aparición de la vida, Hernando sitúa las aportaciones de Eduard Buchne, en 1895, en el estudio de las enzimas y las de Stanley Miller y Harold Urey, a mediados del siglo pasado, sobre la síntesis de aminoácidos en laboratorio mediante descargas eléctricas como primeros jalones sobre la tesis de que la materia involucrada en los procesos biológicos y sus leyes químico-físicas son las mismas que rigen el comportamiento de nuestro entorno. Descendiendo a la escala nanométrica, comienza con unas consideraciones generales sobre el proceso de conversión de energía que nos llega del Sol en forma de ondas electromagnéticas o flujos de las partículas energéticas que denominamos fotones. Una parte de esta energía es utilizada por los seres vivos para construir las moléculas de alta energía libre que necesitan para vivir: es el proceso de la fotosíntesis. Si bien esto solo requiere una milésima parte de la energía solar total que nos llega, es un orden de magnitud superior al que gasta toda la civilización

actual para locomoción, calefacción e industria. La evolución tiende a que la fracción de energía absorbida convertible en otra energía (química, eléctrica o mecánica) sea la máxima posible. Los mecanismos moleculares que participan en la construcción de moléculas con una gran energía como son las de azúcar, son motores nanométricos que ha creado la evolución que superan a los más eficaces nanomotores de última generación que el hombre haya podido producir.

A continuación Hernando se detiene con más detalle en la molécula química ATP, siglas del nucleótido adenosina trifosfato, que recorre todo el organismo de los seres humanos suministrando la energía local para cada proceso como un nanomotor diseñado y construido por la evolución para suministrar la energía requerida para la vida. Su papel puede compararse al de los generadores que podemos encontrar en los saltos y presas hidráulicos para convertir la energía potencial almacenada en energía eléctrica capaz de ser transportada a otros lugares. En el caso del anterior símil, la presa es la membrana de la mitocondria y el nanomotor (ATP) viene alimentado por el gradiente electroquímico de la membrana dado por la diferente concentración de protones (núcleos de átomos de hidrógeno). Como en el caso de los sistemas mecánicos conservativos, estudiados en la Mecánica Clásica y en la Matemática Aplicada, la fuerza que puede ejercer su flujo es proporcional al gradiente de la concentración. Es un ejemplo único de nanotecnología producida por la naturaleza que se describe con detalle en este capítulo.

Respecto del segundo ejemplo, de los muchos procesos de la vida que se pueden enmarcar en el ámbito de la nanotecnología, Hernando profundiza en la teoría de la información como reguladora de la evolución, y en particular ilustra los casos del núcleo de la célula y el ADN como nano-códigos. El punto de partida esta vez tiene una formulación matemática de la mano de los trabajos de Shannon de mediados del pasado siglo. Codificando cualquier número entero arbitrario Ω en base dos, se puede demostrar que la cantidad de información requerida para expresar Ω es $K\ln\Omega$ bits, con $K=1.442695$ bits y denominando bit a todo dígito binario (es decir 0 o 1). Shannon calculó cuanta información falta para conocer el resultado de un experimento del que solo sabemos sus posibles resultados sin una certeza total. Tras recordar las experiencias de Maxwell, Hernando nos muestra que, de acuerdo con la definición de «información perdida» de Shannon y con la expresión de la entropía de Boltzmann, se puede decir que el segundo principio de la termodinámica establece que la evolución espontánea de cualquier sistema aislado tiende a disminuir la información almacenada en el sistema. En otras palabras, la entropía de un sistema es opuesta a la información que contiene. Desde la perspectiva de la información, el proceso evolutivo general está orquestado por un flujo enorme de información contenido en la energía libre que atraviesa la biosfera. La mayoría de la información recibida a través de la energía solar se pierde degradada en calor, pero una fracción

de ella se preserva y estabiliza como información cibernética (es decir asociada con la emisión y recepción de señales, con las comunicaciones, con códigos o idiomas y con la complejidad biológica y cultural) que, en los sistemas vivos se recoge a escala molecular en la que la secuencia de ADN juega un papel fundamental.

Hernando abandona el ámbito de los fenómenos nano-biológicos para presentar al Electromagnetismo como primer fundamento de la NC y la NT. Comienza esta sección recordándonos las cuatro interacciones fundamentales conocidas a día de hoy: las dos interacciones nucleares (la fuerte y la débil), la interacción gravitatoria y la interacción electromagnética. A continuación presenta las ecuaciones de Maxwell como uno de los hitos del paradigma del método científico, que siguiendo a Feyman (Premio Nobel de Física de 1965) articula en torno a cuatro etapas: 1. Observación. 2. Toma de datos. 3. Modelización mediante leyes fundamentales. 4. Resolución de modelos de manera que se justifiquen los datos experimentales. A continuación se presenta la obra de Maxwell como síntesis de los experimentos de electricidad y magnetismo, estructurando su desarrollo en tres apartados: a) la primera etapa: de la presocrática al siglo xviii, b) segunda y tercera etapa, de 1785 a 1840, y c) síntesis y última etapa. Acaba esta sección indicando que a diferencia de la dinámica de Newton, las ecuaciones clásicas del Electromagnetismo han resistido invariables las modificaciones asociadas a la Relatividad restringida y a la Mecánica Cuántica, de tal forma que con el desarrollo de la Electrodinámica Cuántica la teoría de la interacción electromagnética ha alcanzado el máximo grado de ejemplaridad como ciencia bien establecida.

Prosigue Hernando enfocando la tecnología como base y consecuencia de las ecuaciones de Maxwell y defendiendo que la transmisión de la energía y de la información define un mundo económico «electromagnético». Señala que teoría y desarrollo tecnológico se vienen entrelazando en la dinámica histórica de la ciencia de tal modo que resulta imposible ponerlas en orden de causalidad. Esto es evidente en el caso de la física de altas energías donde la influencia del progreso de las prestaciones de los aceleradores en el conocimiento íntimo de las partículas elementales resulta obvia. Una vez que la técnica establece las condiciones necesarias para incrementar la comprensión y síntesis de los fenómenos, reflejadas en nuestro caso en las ecuaciones de Maxwell, la propia nueva síntesis encierra una gran capacidad de generación de tecnología innovadora. El transporte de información llevado a cabo a la velocidad de la luz constituye una de las consecuencias tecnológicas más importantes de la teoría de campos electromagnéticos. El descubrimiento de la ley de Faraday revolucionó la capacidad de trasmitir energía. La posibilidad de utilizar la energía en cualquier parte sin necesidad de aproximación a la fuente constituye el resultado científico que más ha contribuido a alcanzar el nivel de bienestar, cultura, seguridad sanitaria y capacidad industrial de los pueblos más desarrollados. Ambas consecuencias justifican

el calificativo de mundo electromagnético al mundo de la tecnología actual. Tanto la química como la biología estudian fenómenos electromagnéticos naturales. La energía biológica que se encuentra almacenada en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas es electromagnética y el propio andamiaje que permite la síntesis de dichas moléculas tiene como energía de alimentación la radiación electromagnética, luz solar, mediante la fotosíntesis.

Los campos magnéticos producidos por la actividad de la corteza cerebral son analizados en la sección siguiente. La magnetoencefalografía, MEG, es una útil herramienta que permite aproximarnos al conjunto de correlaciones y sincronismos eléctricos inducidos en el cerebro humano por la actividad neuronal. La escala nano aparece por doquier: las intensidades de corriente de las señales son del orden 20 femtoamperio metro (recordemos que un femtoamperio equivale a la fracción 10^{-15} de un amperio) y el campo magnético tiene una magnitud del orden de la mil millonésima parte del campo terrestre. Hoy, gracias a la MEG, se sabe que la sincronización es un proceso que abarca a las distintas bandas y a las distintas partes del cerebro. Por ejemplo, anormalidades en la sincronización en zonas motoras parecen estar asociadas a síntomas de enfermedad de Parkinson.

Esta parte concluye con unas consideraciones finales en las que se mantiene que la sociedad de la energía y de la información, la sociedad electromagnética de hoy, hunde sus raíces en las cuatro ecuaciones diferenciales del sistema de Maxwell. Tan enorme fecundidad de comprensión teórica e innovación tecnológica resulta difícil de exagerar y constituye una síntesis paradigmática del quehacer colectivo humano de máximo nivel intelectual, es decir, riguroso, experimental y, por tanto, científico.

En la sección siguiente, Hernando lleva a cabo la difícil tarea de presentar, en tan solo unas páginas, y sin poder descender a grandes detalles técnicos para primar el carácter divulgativo, de la Mecánica Cuántica como fundamento de la NC. Comienza refiriéndose a los átomos que hoy día conocemos gracias a los progresos de la física atómica y de la física de la materia condensada. Están constituidos por tres tipos de partículas: a) el electrón, con una masa de 10^{-31} kg y una carga eléctrica negativa, que constituye el quantum de carga de valor $e=1.6\ 10^{-19}$ C, donde aquí la C se refiere culombio que es la unidad de carga en el sistema SI, b) el protón, con una masa de aproximadamente dos mil veces la del electrón y con la misma carga eléctrica pero positiva, y c) el neutrón, con la misma masa que el protón y carente de carga eléctrica. Los protones y neutrones se agrupan en el núcleo, y los electrones orbitan alrededor de él, a una distancia mínima de 0.05 nanómetros es decir $5\ 10^{-11}$ m. Pese a su pequeño tamaño, esta distancia es muy grande comparada con el tamaño del núcleo: el diámetro del átomo total es veinte mil veces mayor que el del núcleo en el uranio y cientos de miles de veces mayor en el caso del hidrógeno.

El electrón puede recibir el impacto de un fotón y absorber su energía si es igual a la diferencia de energía de dos estados estacionarios del átomo, absorbiendo al propio fotón que desaparece y transitando al estado de energía superior. Del mismo modo, el electrón puede emitir un fotón de energía y decaer al estado inicial. Resulta pues crucial el estimar y conocer las distancias en energía entre los estados atómicos (estados estacionarios de los electrones). Hernando comienza recordando para ello el planteamiento de la Mecánica Clásica con la interpretación del átomo, y los movimientos del electrón, a través del movimiento de una masa en un sistema de fuerzas centrales. A continuación introduce la regla de cuantificación como una restricción a los posibles valores del momento angular del electrón lo que origina la diferenciación crucial respecto a la descripción kepleriana del movimiento de los planetas (también sometidos a un campo central de fuerzas). Muestra cómo se obtiene así la cuantificación de los radios de las posibles órbitas y la de los posibles valores de la energía postulada por Bohr (lo que implica la cuantificación de la energía de los fotones absorbidos o emitidos durante el proceso de tránsito entre niveles, lo que constituyó la hipótesis de Planck). Lo conecta entonces con el efecto fotoeléctrico, explicado por Einstein en 1905, lo que le valió el premio Nobel de 1921. La actividad febril de la comunidad científica, especialmente entre los años 1913 y 1926, produjo tanto resultados experimentales revolucionarios en la escala atómica como el desarrollo de una teoría rigurosa conocida como Mecánica Cuántica que permitió cerrar una de las páginas más importantes de la historia de la Física.

La contribución del Instituto Rockefeller de Madrid, creado bajo los auspicios de la Junta para Ampliación de Estudios, y en particular a través de escuela de Física creada por Blas Cabrera en Madrid, también produjo importantes contribuciones a los descubrimientos de aquel momento histórico pese a la falta de tradición en investigación científica que caracterizaba a España en comparación al resto de los países europeos más avanzados. Los años comprendidos entre 1915 y 1936 que coinciden con ese momento de máxima productividad marcan también un hito de máxima relevancia para la historia intelectual de España. Las aportaciones de Cabrera, Velayos, Miguel Catalán y Enrique Moles, entre otros conectaron a esta ciencia con las aportaciones más valiosas de su tiempo y con sus autores en otros países.

Aborda a continuación Hernando el tema de las reglas de cuantificación. El comportamiento de los objetos a escala de los ångström y nanómetros no tiene por qué ser familiar para nuestra intuición adquirida por observaciones realizadas a la escala de nuestros sentidos. Son comportamientos bastante extraños pero lo suficientemente bien fundados por la Mecánica Cuántica y apoyados por la experiencia en la escala atómica y subatómica. Se trata de una disciplina que abren Planck y Einstein y que cierra Dirac unificando la Mecánica Ondulatoria y la Mecánica de Matrices, desarrolladas por de Broglie, Schrödinger, Bohr, Pauli, Heisenberg,

Fermi y Born. Su carácter probabilístico y su renuncia al determinismo, manifestada explícitamente por el Principio de Indeterminación de Heisenberg, han movilizado incluso al mundo de la filosofía.

En un punto álgido de este capítulo Hernando se refiere a la relación entre la cuantificación de estados y la NC. A modo de ilustración considera un electrón que se mueve libremente (aunque confinado en una dimensión) a lo largo de una cadena (unidireccional) de N átomos separados entre ellos una distancia a. Apelando al carácter fermiónico de los electrones, pues su espín es ½, y al Principio de Exclusión de Pauli (dos fermiones no pueden tener los mismos números cuánticos) analiza el salto de energía entre el estado de número cuántico n_{max} y el $n_{max}+1$ para concluir con lo que cataloga como ecuación fundamental de la NC: $\Delta E_n/E_n = 2/n = 4/N$. Pone de manifiesto como la separación relativa de niveles es del orden del 1% para el caso de que la cadena conste de 100 átomos, que es el número que se mencionó para definir la escala nanométrica. Si los electrones fueran bosones se llega a justificar la razón de por qué es posible que un material sea superconductor.

A continuación se aborda el importante papel de la temperatura en el contexto de la NC. La distancia entre niveles de energía es el parámetro fundamental que gobierna el comportamiento del sistema con la temperatura que es la energía media que un sistema posee por cada grado de libertad. Los grados de libertad coinciden con la dimensión del espacio en que las partículas del sistema pueden moverse. Boltzmann y Maxwell explicaron que si por ejemplo consideramos un sistema de partículas idénticas y que cada una de ellas tiene un conjunto discreto de estados cuánticos de distintas energías y que en orden creciente podemos describir como, e_1, e_2,...e_i..., la energía total del sistema será $n_1e_1+ n_2e_2+...+ n_ie_i+...$, donde n_i es el número de partículas que se encuentran en el estado de energía e_i. Los valores de n_i están constreñidos a sumar N que es el número total de partículas idénticas que contiene el sistema. Los cambios de energía pueden venir o bien por el intercambio de energía con el exterior producido por cambios de la energía de los niveles, lo que se conoce como intercambio por trabajo mecánico, o por el intercambio generado por variaciones de la ocupación de los niveles, lo que se conoce como intercambio térmico. La teoría estadística de Boltzmann y Maxwell permitió determinar cuales eran las ocupaciones de los niveles de energía de un sistema cuando alcanzaba el equilibrio con un foco térmico (mucho mayor que el sistema). La importancia de la temperatura en cualquier fenómeno físico dota a esta variable de una categoría especial como variable reina de todos los fenómenos naturales. En el caso de los electrones próximos al nivel de Fermi (correspondiente a n=N/2: si N es del orden de 100 el salto de energía coincide con la energía térmica a temperatura ambiente) los únicos que pueden intercambiar energía térmica, o adquirir energía de campos externos, son los que condicionan las propiedades físicas del material como son sus propiedades térmicas,

ópticas, eléctricas, y magnéticas. La NC trata con sistemas cuyo espectro de energía está caracterizado por valores menos discretos que los atómicos pero muchísimo menos continuos que los correspondientes a los sólidos macroscópicos. Estas dos características conducen a algunas de las peculiares propiedades electrónicas de la materia en su escala nanométrica.

Dedica la sección siguiente Hernando a la función de onda, la ecuación de de Broglie y su relación con los campos magnéticos para lo cual ha de referirse a la dualidad entre partículas y ondas. La función de onda de una partícula es descrita por la mecánica cuántica mediante un número complejo $\psi=Ae^{i\theta}$ en el que tanto su módulo como su fase, números reales ambos, dependen de la posición y del tiempo. Según Max Born el cuadrado del módulo, que se obtiene de multiplicar ψ por su complejo conjugado ψ^*, es la probabilidad de encontrar a la partícula en un punto dado r y en un instante concreto t. Se introduce la corriente de probabilidad (que coincide con lo que se conoce como densidad de corriente) J, asociada a la función de onda, como el producto de la constante de Planck h por el inverso de la masa de la partícula, por el cuadrado del módulo (A^2) y por el gradiente de la fase gradθ. Si sumamos (es decir, integramos) el cuadrado de la función de onda en todos los puntos del espacio debemos obtener 1. La variación espacial de la corriente de probabilidad conduce a otra conservación: el carácter local independiente de la conservación de la partícula.

Un electrón libre que se mueve sin estar sometido a fuerza alguna en un volumen V se describe mediante una onda plana de la forma $\psi=(1/V)^{1/2}e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ de longitud de onda λ. La relación entre la cantidad de movimiento de una partícula, **p**, y su longitud de onda, λ, se conoce como axioma de de Broglie y conecta las dos interpretaciones, aparentemente contradictorias entre sí, de una partícula cuántica: el de ser a la vez una partícula y una onda. Este carácter dual permite justificar que un chorro de electrones, o de fotones, que alcanza una pantalla con dos rendijas pueda generar una figura de difracción análoga a la que generaría una onda en el célebre experimento de Young sobre ondas, siempre que la distancia entre rendijas sea del orden de las longitudes de onda de las partículas. Basta que se tape una de las rendijas para apreciar que las partículas se comporten propiamente como partículas clásicas. Un experimento de difracción de electrones se puede llevar a cabo siempre que la distancia entre las rendijas sea del orden de ångström o nanómetros, lo que es habitual en las observaciones con microscopio electrónico en las que los átomos de una sustancia actúan de centros de difracción de los electrones enviados por un cañón. Según este axioma, un electrón moviéndose a la velocidad de $10^6\ m/s$ y con una masa de $10^{-30}\ Kg$ tiene una longitud de onda $\lambda=10^{-9}\ m$ que es precisamente del orden del nanómetro, *1nm*. Cuando se aplica un campo magnético a un electrón la ley de Faraday nos indica que al aplicar un campo magnético perpendicular al plano de la órbita circular, se

induce a lo largo de ésta una fuerza electromotriz dada por la derivada respecto del tiempo del flujo de campo magnético que atraviesa el circuito. En la escala nanométrica la importancia de uno de los términos del cambio en la corriente de probabilidad se amplifica. Esto se manifiesta en la cuantificación del flujo de campo en anillos superconductores, lo que da lugar a fenómenos de interferencia cuántica.

Refiriéndose a las propiedades eléctricas y magnéticas de nanocristales y nanopartículas, Hernando comienza recordando lo que atañe a las longitudes características: anisotropía magnética, longitud de correlación de canje. superparamagnetismo y memoria magnética. El autor, que se encuentra ahora en su dominio de especialización, nos introduce en el complejo mundo que aparece cuando las dimensiones de un material coinciden con las de las longitudes características. Lo ilustra con el caso del hierro que cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo. Detalla cómo la imanación se organiza en dominios para conseguir que la imanación global sea nula e ilustra las tres tendencias que condicionan la existencia de los dominios: por un lado los espines tienden a ponerse paralelos por una interacción denominada interacción de canje y que es de origen cuántico pero basada en la repulsión electrostática que se ejercen mutuamente los electrones, la repulsión electrostática originada por los espines antiparalelos y la energía de anisotropía cristalina (dependencia de una propiedad direccional con la dirección) en la que aparece una constante de enorme trascendencia (la constante de anisotropía K que mide la energía externa que hay que suministrar por unidad de volumen para girar la imanación de la dirección fácil a la difícil). Nos señala que todo el avance de la ingeniería magnética proviene del conocimiento a nivel microscópico del origen de K y lo que ha permitido controlar su valor hasta límites insospechados debido al desarrollo de la NC y la NT. Más tarde menciona una serie de experimentos llevados a cabo por Luborsky, Jacobs y Bean a mediados del siglo xx en los laboratorios de General Electric en Nueva York que dio lugar al nanomagnetismo buscando mejores imanes permanentes. Sin embargo, posteriores disminuciones de tamaño dieron la sorpresa de la desaparición del llamado campo coercitivo, lo que resulta crucial para la comprensión de muchos fenómenos nanomagnéticos y está estrechamente vinculado al desafío más radical de la tecnología de la memoria magnética y al desarrollo del supermagnetismo (que aunque es un fenómeno que se manifiesta en la escala del nanómetro responde a un principio muy bien establecido de la termodinámica clásica).

Considera después la relación entre las longitudes características y la conducción eléctrica, refiriéndose al recorrido libre medio, la penetración túnel y el efecto túnel y la NC. En un metal los electrones externos de sus átomos son los responsables de la conductividad eléctrica. El tiempo que tiene un electrón para adquirir energía del campo eléctrico aplicado es el que transcurre entre dos colisiones sucesivas, que en los metales

es del orden de 10^{-13} o 10^{-14} s. La distancia media que recorre el electrón entre dos colisiones es del orden de decenas de nanómetro e incluso de centenas de nanómetro. Si el electrón se mueve a lo largo de una dirección según la cual el tamaño de la muestra es extremadamente pequeño no sufre ninguna colisión durante su recorrido (régimen balístico). Esto es relevante para el análisis de la conducción eléctrica en sistemas nanocristalinos formados por cristalitos de dimensiones de algunos nanómetros y conectados entre ellos a través de sus fronteras de grano. Las fronteras constituyen obstáculos para la conducción que sin embargo es balística en el interior del grano. La manera en que el electrón atraviesa la frontera depende de muchos factores pero en ocasiones se presenta el llamado efecto túnel, de gran relevancia en NC. Es una de las grandes diferencias entre la Mecánica Clásica y la Cuántica. Hernando utiliza la ecuación de Schrödinger para ilustrar este fenómeno de penetrabilidad mediante un sencillo ejemplo particular. Muestra que la longitud de penetración túnel es una longitud característica que depende de la altura de la barrera, de la energía cinética y de la masa de la partícula. Un caso de efecto túnel que generó el nacimiento de la NC y la NT al permitir una resolución a escala nanométrica para la observación y manipulación de átomos y grupos de átomos fue el desarrollo del microscopio de efecto túnel. En este caso una superficie metálica es recorrida o barrida por una punta metálica que permanece sin contacto muy próxima a ella.

El capítulo se encamina a su finalización con el análisis del papel relevante de las propiedades de la superficie en la física de las nanopartículas y la emergencia de magnetismo en nanopartículas de materiales que no son magnéticos en la escala ordinaria. Una característica de las partículas nanométricas es su elevada proporción de átomos de superficie respecto al número total de átomos que contienen en todo su volumen.[4] Un cristal cúbico de lado L contiene $(L/a)^3$ átomos, donde a es la distancia interatómica, mientras que el número de átomos de superficie es $6(L/a)^2$. Consecuentemente, la razón entre el número de átomos de superficie y el número total de ellos es r=6a/L. Como a es del orden de algunos ångström podemos inferir que en un cristal cúbico de un centímetro de lado la razón r es aproximadamente 10^{-6}. Un átomo de cada millón está en la superficie. Sin embargo esta fracción se eleva según va disminuyendo L y para un cubo de un nanómetro de lado se acerca al 100%. Este incremento cuantitativo de la fracción r tiene una gran importancia en las diferentes propiedades físicas de las nanopartículas cuando se comparan con las de las muestras masivas de las mismas sustancias, como se nos describe a continuación utilizando algunos ejemplos.

[4] Es oportuno apelar, a este respecto, la famosa «desigualdad isoperimétrica», que en el caso del espacio tridimensional afirma que la relación entre el volumen V de una región y su superficie exterior A viene dada por $36\pi V^2 \leq A^2$ y que la igualdad solo se alcanza en el caso de la esfera.

Para concluir el capítulo, Hernando considera un ejemplo prometedor de NC en futuras terapias: la hipertermia. La elevación de la temperatura de un tumor es un método terapéutico para el tratamiento del cáncer y es conocido como tratamiento por hipertermia. Actualmente se utiliza conjuntamente con los tratamientos terapéuticos convencionales, como la quimioterapia o la radioterapia. Los ensayos clínicos para elevar la temperatura de un tumor comenzaron en los años 70, con la aplicación de diferentes tipos de radiación como microondas, radiofrecuencia o ultrasonido, llegando incluso a introducir las fuentes de calor dentro del tumor. La hipertermia magnética es el método terapéutico para el tratamiento del cáncer basado en el uso de nanopartículas magnéticas biocompatibles. Dependiendo de la conductividad térmica y la capacidad calorífica del medio orgánico, el calor generado elevará la temperatura del entorno de las nanopartículas ocasionando la muerte de las células tumorales. El uso de la hipertermia magnética como terapia alternativa al tratamiento del cáncer supondría un gran logro para la oncología actual. Se trata de un tratamiento localizado y selectivo, por lo que se evitarían los efectos secundarios producidos por la aplicación de radioisótopos. En el caso de tumores localizados y de fácil acceso, como en el cáncer de mama, las NP pueden aplicarse directamente al tumor. En el caso de tumores internos, como un tumor cerebral, las NP deben ser funcionalizadas para ser dirigidas selectivamente hacia las células tumorales.

Sobre el capítulo II

En el segundo de los capítulos de la primera parte, el Académico F. Briones, aborda el tema de la Nanotecnología en evolución. En su brillante introducción señala que la teoría cuántica del sólido se enfrenta a nuevas dificultades cuando se pretende aplicar a objetos de dimensiones del orden de unos nanómetros. Las propiedades fisicoquímicas de los agregados atómicos o de estructuras moleculares complejas, resultan muy diferentes de las de los medios continuos o de los cristales periódicos macroscópicos formados por esos mismos átomos o moléculas. Más aún, en algunos casos aparecen propiedades emergentes características de una coherencia cuántica extendida a todo el objeto. Casos paradigmáticos son, por ejemplo, el origen de los números mágicos en clústeres moleculares, las propiedades magnéticas de nanopartículas, los efectos de proximidad en interfaces metal normal/superconductor, los efectos de confinamiento cuántico en sistemas de baja dimensionalidad, como son los pozos, hilos y puntos cuánticos en matrices semiconductoras, el túnel o inyección de espín y, recientemente, las propiedades electrónicas y estructurales del grafeno, entre las muchas que se descubren año tras año, y no dejan de sorprender a los físicos.

Se insiste en que estas sorpresas no se limitan solo a los físicos; también a la comunidad de la química en la escala nano, por ejemplo en la catáli-

sis, o incluso en la biología en temas como la fotosíntesis o la orientación de las aves migratorias.

La idea de que sería posible hacer ingeniería en la nanoescala fue desarrollada y expresada públicamente por primera vez, ya en 1959, por Richard Feynman, profesor de física teórica en Caltech, cuyo genio excepcional se ha extendido en muchos campos de la física y la tecnología. Inicialmente, sus ideas no tuvieron mucho impacto en la comunidad científica hasta que, mucho más tarde, K. Erik Drexler, un ingeniero extraordinariamente creativo y visionario del Instituto Tecnológico de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology MIT) que trabajaba con la NASA publicase en 1986 su libro *Engines of creation: The coming era of Nanotechnology*, especulando sobre la posibilidad de diseñar y fabricar máquinas moleculares. La termodinámica ofrecía oscuros presagios sobre el éxito de posibles intervenciones a la escala nanométrica, pero el éxito de Heinrich Rohrer y Gerd Binnig (de la IBM, en Zurich) invirtió el pesimismo. Desarrollaron un microscopio basado en medir la corriente túnel entre los átomos terminales de una punta metálica extremadamente afilada y los átomos de una superficie conductora para utilizar esta corriente como parámetro de realimentación y mantener constante la distancia punta/superficie durante un barrido lineal sobre la misma lo que les permitió publicar las primeras imágenes en 1982. En 1986 compartieron el Nobel de Física conjuntamente con Ernst Ruska, el inventor del microscopio electrónico.[5] Binnig inventó también, poco después del STM, otro instrumento revolucionario, el Microscopio de Fuerzas Atómicas (AFM) complementario del anterior y capaz de funcionar al aire, sobre superficies aislantes, a temperatura ambiente e incluso en medios líquidos a partir de la medida de la fuerza ejercida por los átomos de una nanopunta móvil sobre la superficie o nano objeto a representar. Desde 1982, una vez demostrado que es posible construir instrumentos capaces de acceder a la escala nano llegando a observar y manipular la materia átomo a átomo, la expansión de la nanotecnología ha sido imparable.

Nos indica Briones que el primer microscopio STM que salió del laboratorio de IBM en Zurich fue cedido a la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) gracias a una colaboración de Binnig con el grupo del Prof. Arturo Baró que había estado trabajando en IBM como postdoc. Desde entonces, Baró se dedicó a desarrollar nuevos microscopios pioneros en España y, con sus estudiantes de tesis y colaboradores, llegó a crear una empresa, Nanotec Electrónica, que ahora fabrica y comercializa con éxito en todo el mundo microscopios de este tipo.

[5] La aparición de éste y otros tipos de microscopios llevó aparejada de manera simultánea que la cuestión del tratamiento matemático de las imágenes cobrase aún una mayor relevancia y actualidad.

Dedica también una subsección, dentro de su Introducción, a ilustrar el paso de la microelectrónica a la nanoelectrónica. La nanoelectrónica se distingue de la microelectrónica por hacer uso de esos efectos mesoscópicos de coherencia cuántica en estructuras de tamaño sub-micrométrico. El primer dispositivo nanoelectrónico fue el diodo túnel, descubierto por Leo Esaki en 1959 lo que fue reconocido al otorgarle el premio Nobel de Física en 1973.

Esaki, que es doctor honoris causa por la Universidad Politécnica de Madrid (1976) con cuyos profesores de la Escuela de Telecomunicaciones (ETSIT) ha colaborado desde IBM en numerosas ocasiones y contribuido a la formación de excelentes investigadores, predijo a comienzos de los 70, las propiedades de los nanosistemas de dimensionalidad reducida, pozos, hilos y puntos cuánticos, cuyas dimensiones fueran comparables con la extensión efectiva del electrón en un semiconductor, del orden de 10 nm. Entre ellas la de emitir luz con una eficiencia extraordinaria debido a la presencia simultánea de electrones y huecos en la misma región del espacio que ha sido fundamental para el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos entre los que se encuentran los diodos laser de comunicaciones por fibras ópticas.

Nos relata Briones otros hitos puramente cuánticos como fue el efecto Hall fraccionario en el gas bidimensional de electrones confinado en el estrecho pozo de potencial asociado a una heterounión semiconductora, lo que le valió la concesión del Premio Nobel de 1998 a Horst Störmer, y la epitaxia de haces moleculares (MBE), debida a Al Cho en 1968 con la que se hizo posible fabricar en el laboratorio, y más tarde industrialmente, estas estructuras semiconductoras artificiales con un control o precisión dimensional mejor que el nanómetro. Aunque en sus comienzos no fue clasificada como nanotecnología (porque no se había inventado siquiera este término) representa un ejemplo paradigmático de tecnología de nanofabricación que ahora se califica de tipo «bottom-up», es decir de abajo a arriba, construyendo la materia átomo a átomo, y resultando fundamental para el desarrollo de muchos dispositivos semiconductores. Esta técnica ha sido perfeccionada por diversos grupos, uno de ellos el del grupo de Briones del IMM, pionero también en España, a lo largo de los últimos 30 años. Los reactores de MBE han salido de los laboratorios de investigación para convertirse en una de las más rentables tecnologías industriales a la hora de fabricar en gran escala nanodispositivos. Los Diodos Laser, inventados por el ruso Zohres Alferov, del Instituto Ioffe en S. Petersburgo (Nobel en 2000) y los transistores y circuitos denominados HEMT son un magnífico ejemplo de ello.

Nos señala que el impacto socio-económico de estos dispositivos es enorme. Los cabezales de lectura presentes en cualquier equipo reproductor/grabador de CD y DVD, son sistemas ópticos integrados y miniaturizados que incorporan un láser de pozo cuántico fabricado por MBE. Internet es

fundamentalmente posible gracias a la extraordinaria eficiencia del diodo-láser de confinamiento cuántico para emitir luz y modularla a un ritmo de más de 40 Gb por segundo. Las comunicaciones por micro-ondas, los ya imprescindibles teléfonos móviles, IPads, etc., integran circuitos HEMFET de electrones de alta movilidad 2D de manera que puede decirse que la nanotecnología ha entrado ya, masivamente, en la sociedad de la información.

El vasto tema de la ciencia y tecnología en la escala nano es objeto de la Sección más amplia de este capítulo. Una característica específica de las nanociencias es la inmediatez entre los descubrimientos científicos básicos y el desarrollo de las tecnologías que de éstos se derivan. Esto no ha sido siempre así, las tecnologías más importantes del siglo xx, con la excepción de la tecnología nuclear y del láser, se han basado en la física del siglo xix, mecánica, termodinámica, fluidos, electromagnetismo, física clásica en suma. Incluso la tecnología microelectrónica, se basa en una concepción totalmente clásica de la física. La tecnología del siglo xxi tendrá su máximo fundamento en la física que fue necesario crear en el siglo xx para entender y modelar la escala atómica, la física cuántica.

El impacto sobre la sociedad en general de las nuevas tecnologías informáticas, posibilitadas por el desarrollo rapidísimo de las capacidades de cálculo de los circuitos integrados es ya enorme. La revolución informática solo acaba de empezar. La física actual está explorando una nueva opción de desarrollo de la informática, la Informática Cuántica, basada en una forma revolucionaria de codificar, procesar y transmitir información. Todo ello es de enorme importancia especialmente para la prospectiva de defensa, donde la capacidad de anticipación es cada vez más necesaria.

Una buena parte de los resultados más prometedores en el ámbito de la Informática Cuántica son debidos al investigador español, Ignacio Cirac, director, al frente de un grupo de 250 personas,[6] de la división de Teoría del Instituto Max-Planck de Óptica Cuántica en Garching, Alemania.

Es difícil prever cuándo aparecerán las primeras computadoras cuánticas pero en menos de 10 años seguramente se producirán avances espectaculares y sus consecuencias, particularmente en el campo de la defensa, pueden ser impresionantes. Existe un enorme interés por parte de usuarios militares, financieros, etc., para los que la seguridad es fundamental, sobre las tecnologías fotónicas que se desarrollan actualmente para transmitir información cuántica cifrada con el fin de hacer imposible su interceptación o recepción no autorizada. Ya existen implementaciones comerciales, aunque no muy extendidas.

[6] Entre los colaboradores españoles de Cirac se puede citar al matemático Prof. D. García Pérez, responsable del programa *QPHASE: Classifying quantum phases of nature via PEPS* del IMI de la UCM.

Un tema actual de investigación en nanofotónica es el desarrollo de dispositivos emisores de un solo fotón, de fotones entrelazados y de detectores de fotones individuales en las dos bandas de longitudes de onda utilizadas en comunicaciones por fibra óptica. El IMM, tras una larga trayectoria de investigación pionera en España en procesos de fabricación de estos dispositivos mediante técnicas originales de MBE, ha participado activamente durante los últimos 8 años en una gran red de excelencia europea, SANDIE, financiada con 18,6 millones de euros, en colaboración con otros 25 laboratorios y empresas. Estas cifras dan una idea de la relevancia de este aspecto de la nanotecnología y de su dificultad técnica en Europa. Empresas como Toshiba, en sus laboratorios europeos en Cambridge, UK, se han beneficiado especialmente de estos resultados aprovechando el gran potencial humano y excelencia investigadora de nuestros jóvenes doctores en estas tecnologías avanzadas. Actualmente, y en esta misma línea, el IMM trabaja en el desarrollo de emisores de fotones individuales en colaboración con comunidad de centros e investigadores españoles activos en este tema particular (unos 50 doctores), sobre todo con el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de la Universidad Técnica de Cataluña, el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) de la Universidad Politécnica de Madrid y el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.

Las técnicas de posicionamiento con precisión nanométrica son muy sofisticadas y solo son accesibles a muy pocos laboratorios en el mundo. El grupo del IMM, dirigido actualmente por la Dra. Luisa González, es un equipo reconocido internacionalmente por sus múltiples desarrollos originales de MBE en semiconductores III-V y tiene acceso directo a otras técnicas de nanofabricación como son la litografía de electrones y el ataque iónico para la fabricación de los diodos laser, detectores de IR y resonadores o micro-cavidades ópticas tipo cristal fotónico 2D en GaAs y InP (Dr. Aitor Postigo). Análogamente, el laboratorio de este Instituto, dirigido por el Dr. Benito Alén, dedicado a la espectroscopia óptica de alta resolución espacial y espectral (puede analizar la emisión de un solo QD aislado, a bajas temperaturas y en una bobina superconductora con campos magnéticos de hasta 9 Tesla), es único en nuestro país y permite determinar los estados cuánticos de las nanoestructuras producidas, puntos cuánticos, moléculas artificiales, hilos cuánticos, etc. Este grupo ha trabajado en paralelo en la aplicación de estas mismas nanoestructuras al desarrollo de células solares de banda intermedia mediante nanoestructuras fotónicas. Es el fruto de la colaboración con el Instituto de Energía Solar de la UPM del Prof. Antonio Luque, creador de la primera empresa Española, ISOFOTON, capaz de competir en el difícil campo industrial de la energía fotovoltaica con tecnología propia.

La investigación en estas nanotecnologías implica emplear un enorme esfuerzo también en el desarrollo de nuevas técnicas experimentales

macroscópicas para acercarse a la interfaz del mundo nano con el mundo macro. Estas nuevas herramientas no existían previamente y han tenido que irse desarrollando a medida que se hacían necesarias. La construcción de los correspondientes reactores, extraordinariamente complejos y utilizando materiales muy sofisticados (tantalio, nitruro de boro, cuarzo, etc.) tiene un coste enorme, no sólo económico sino de tiempo y dedicación. Es parte ya de la filosofía de trabajo de la investigación en esta área el desarrollar las propias máquinas que, aunque se puedan adquirir en empresas especializadas y a un coste del orden de un millón de euros, requieren siempre, además de un gran esfuerzo ulterior de puesta a punto, adaptación a cada material y proyecto, unos equipos de monitorización y control in situ con resolución nanométrica y una dedicación constante. Es ésta la principal razón por la que son muy pocos los grupos que trabajan con estas técnicas tan costosas y de que sólo se puedan mantener operativas en laboratorios con infraestructuras y personal de apoyo técnico muy importantes.

Hay que reconocer, por otra parte, la gran dificultad que implica para el investigador el superar todas las barreras y dar todos los pasos necesarios para, además de hacer buena investigación en tecnologías tan avanzadas como es el caso de las nano, poder llegar al punto en que sus resultados, científica y tecnológicamente válidos y competitivos, puedan transferirse a la industria o a la sociedad en general. En el caso del prof. Briones, han dado lugar a 4 patentes internacionales en explotación por empresas de alta tecnología europeas y norteamericanas. Está claro que el esfuerzo solo de los investigadores no puede ser suficiente. Es fundamental la cooperación de unos mecanismos de transferencia eficaces en manos de profesionales familiarizados con las tecnologías y con sus aplicaciones y, más aún, con el sector industrial al que pueden ir destinados los resultados. Estos mecanismos fallan estrepitosamente en nuestro país en el área de las nanotecnologías por falta de personal con formación adecuada. En general, se recurre a la creación de empresas *spin-off* y a los contactos directos, a través de estas *spin-off*, con empresas grandes ya consolidadas en el sector que, en muchos casos, son extranjeras a falta de emprendedores o de inversores nacionales con confianza en este sector del mercado.

Cuenta el Prof. Briones cómo la transferencia a la sociedad ha sido posible ya, en nuestro país, y con éxito. Refiriéndose a su propia línea de investigación (su primer reactor MBE data de 1983) comenta que el Cuartel General de la Armada, en 1978, había acudido al CSIC solicitando ayuda para poder desarrollar espoletas de proximidad para proyectiles antimisil capaces de detectar la emisión IR de las toberas y gases calientes de misiles. Particularmente preocupante era la necesidad de defensa de los buques de la armada frente a misiles de tipo EXOCET que como se demostró más tarde en las Malvinas, iban a ser muy eficaces hundiendo o dañando gravemente barcos ingleses. En aquella época, solo se

fabricaban los sensores de IR en la banda de 4,3 micras de longitud de onda para las espoletas, en dos laboratorios del mundo, Santa Barbara Research Center (SBRC), más tarde Raytheon Vision Systems (RVS), en California con tecnología propia, y en un laboratorio indeterminado en Rusia con tecnología probablemente originada en la DDR. Ambas tecnologías eran, absolutamente secretas y los detectores no eran accesibles ni siquiera para países aliados. El SBRC había publicado un par de patentes, probablemente de despiste, basadas en procesos químicos de deposición que, a pesar de intentos muy valiosos del laboratorio dirigido por la Dra. Teresa Montojo en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA), resultaban imposibles de reproducir. Los detectores contenían PbSe, un semiconductor de pequeño band-gap y muy fácilmente oxidable e inestable al aire. En su grupo de investigación, en el entonces Instituto de Física Aplicada del CSIC, con sólo dos investigadores, el Prof. Briones y la Dra. Golmayo construyeron un sistema de evaporación en vacío con la ayuda del taller mecánico procedente del antiguo Instituto Torres Quevedo. Se trataba de nanotecnología pionera desarrollada en España, en 1979, y aplicada a fines de defensa. En la actualidad una empresa española, NIT Europe, creada por personal procedente del CIDA, fabrica y comercializa cámaras de IR cuyos píxeles son detectores de PbSe según este procedimiento. El Prof. Briones desarrolló en 1998 un detector microfabricado de metano de bolsillo para una empresa europea (Schlumberger), basado en estos detectores que no necesitan refrigeración. En la actualidad el IMM tiene un proyecto de desarrollo de tecnología de fabricación de cámaras de rayos-X que se pretenden instalar en un gran telescopio espacial, Athena, que previsiblemente se pondrá en órbita por la Agencia Europea del Espacio (ESA) en 2021.

Relativo a la conexión de la nanotecnología con la biología (relacionado con la defensa ante amenazas biológicas) menciona el Prof. Briones al área de investigación del Grupo de Bionanomecánica del IMM (doctores Tamayo y Calleja) cuyo objetivo es desarrollar dispositivos biosensores capaces de detectar y cuantificar interacciones moleculares, en aplicaciones por ejemplo de detección de patógenos a través de sus interacciones con micropalancas y resonadores nanomecánicos. La Comisión Europea apoya este proyecto con la concesión de un prestigioso contrato del European Research Council (ERC) dentro del programa IDEAS. Han abordado con éxito el desarrollo de nanochips de ADN para genómica funcional, creando ellos mismos una empresa *spin-off*: Mecwins.

En el llamado siglo de la biología, la contribución de la nanociencia a las ciencias de la vida será decisiva. Ya se mantiene que la vida es una demostración del poder de una nanotecnología natural desarrollada por la evolución a lo largo de la historia del planeta Tierra. El primer intento de interpretar la vida en términos físicos se remonta a uno de los padres de

la Mecánica Cuántica, Erwin Schrödinger, Nobel de Física en 1933 quien en 1944 publicó un pequeño libro, ¿Qué es la vida?, en el que compatibiliza la evolución biológica con la termodinámica y sienta las bases de una interpretación física del código genético que inspiró mucho más tarde a James Watson, Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1962, en sus investigaciones sobre los genes y el descubrimiento de la estructura de doble hélice del ADN. Actualmente se piensa que el desarrollo de la física en la escala mesoscópica y el de la biología, son totalmente convergentes y que el edificio teórico que los unificará se irá construyendo en este siglo sobre la base de las nanociencias.

A continuación, el Prof. Briones dedica un subapartado específico al desarrollo de las nanobiociencias: un contexto en el que trabajan físicos, químicos, informáticos y biólogos a pesar de las dificultades que presenta el entendimiento entre disciplinas tradicionalmente tan alejadas. Nuevas ideas y sorprendentes resultados experimentales van apareciendo aunque todavía se está lejos de que pueda lograrse un consenso. El autor anticipó estas ideas ya en su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias («Nanociencias, entre la Física y la Biología», RAC, 2005). La naturaleza parece que hace uso de la física cuántica para su desarrollo en aspectos tan fundamentales como pueden ser la fotosíntesis o el procesado de información en los organismos vivos. Estos mensajeros, receptores y memorias moleculares no son sistemas químicos estáticos, se adaptan continuamente y modifican su configuración química y morfológica de acuerdo con el entorno químico, con los mensajes recibidos de moléculas vecinas. Pueden ser considerados como verdaderos procesadores, como procesadores químicos de información química y por tanto procesadores cuánticos de información. Richard Feynmann, en los años 80, avanzó otra idea revolucionaria: las macromoléculas biológicas podrían ser los únicos simuladores cuánticos capaces de simularse o computarse a sí mismas (algo relacionado con su idea de «simulador cuántico universal»). La creencia de que los organismos vivos pueden ser considerados supercomputadores cuánticos comienza ya a ser defendida en la comunidad científica.

Briones profundiza después en el concepto de nanoprocesador bioquímico como computador cuántico. Los nanoprocesadores moleculares elementales interaccionan entre sí o con el medio exterior a través de la reactividad química de determinadas terminaciones funcionales distribuidas sobre su topología. Esta reactividad química es una medida estadística de los estados cuánticos correspondientes a toda la molécula considerada como un sistema fuera del equilibrio. La preparación de los correspondientes qubits se realiza también a través de interacciones químicas o procesos de reconocimiento molecular en terminaciones específicas de la molécula. El movimiento browniano, descubierto por Robert Brown en 1827 en granos de polen e interpretado por Einstein en 1905 como resultado de las fluctuaciones estadísticas del momento

cinético de moléculas de agua en un medio en equilibrio térmico, resulta ahora de una importancia fundamental para la comprensión de la forma en que actúan las nanomáquinas y nanoprocesadores moleculares. Cada vez más aparecen publicaciones en las que, se aportan interpretaciones de tipo rectificadores cuánticos o brownianos para funciones biológicas básicas como, por ejemplo, el transporte uni y bidireccional de cargas químicas a lo largo de la red de microtúbulos en el citoesqueleto de las células eucariotas mediante la kinesina y dyneina. En un sentido más amplio, la posibilidad de generar orden, evolución, mediante un proceso de selección entre variaciones aleatorias es el fundamento de la teoría de Darwin de la selección natural. Y en la base de esta selección, en la escala mesoscópica de las macromoléculas, están de nuevo los rectificadores moleculares, los motores de Darwin, los nanoprocesadores cuánticos. De acuerdo con estas ideas, la forma del organismo en cada instante, la vida, es el resultado de un cálculo en tiempo real ejecutado por miles de millones de nanoprocesadores en paralelo coordinados globalmente de forma jerárquica para dar un estado resultante dinámicamente estable.

Concluye el capítulo con una exposición sobre la investigación española en Nanotecnología. Se refiere en primer lugar a la red Nanospain (www.nanospain.org) que Antonio Correia, Pedro Serena y el propio Fernando Briones pusieron en marcha a finales de los 90 con el fin de conocer y aunar en lo posible el potencial nanotecnológico, tanto en investigación básica como en tecnología e industria, de nuestro país. Actualmente cuenta con algo más de 2.000 miembros, investigadores que trabajan actualmente en España en 362 grupos universitarios, del CSIC, otros OPI, fundaciones y empresas. Allí se puede encontrar un catálogo de 96 empresas españolas activas en nanotecnología, 65 empresas fabricantes y comercializadoras de Grafeno en todo el mundo y la noticia de que, en el programa de la Comisión Europea, Graphene FlagShip, financiado con mil millones de euros, España ocupa el segundo lugar entre los países europeos con mayor participación. El proyecto financiado más recientemente se refiere a la desalinización de agua de mar, está liderado por el centro Tecnalia.

Sin embargo, a pesar de la evidencia de que el nivel de la nanotecnología española es excelente y cuenta con una comunidad investigadora muy numerosa e iniciativas empresariales de primer nivel tecnológico, una gran parte de la financiación, se consigue únicamente en convocatorias competitivas europeas. Se está desaprovechando con ello una oportunidad única, la de poner en valor la extraordinaria capacidad investigadora de nuestro país en nanotecnología para invertir en ella de forma decidida y coordinada. Esta capacidad no resulta nada despreciable para otros países del entorno europeo que, en vista de este descuido nuestro, se están llevando a los mejores investigadores para trabajar en sus instituciones y empresas.

Sobre el capítulo III

En el tercero de los capítulos (primero de la segunda parte) el Ing. D. Julio Plaza del Olmo, de la Jefe de la Unidad de fotónica del INTA/ITM, presenta el desarrollo de nanotecnologías capacitadoras para seguridad y defensa como antesala de las aplicaciones concretas que se harán en el último capítulo. En su introducción se insiste en que el desarrollo de la nanotecnología, un nuevo campo en el que la fenomenología ocurre a nivel molecular y atómico, representa avances que se espera sean disruptivos. La propiedad de combinar distintos campos del conocimiento como física, química, biología y matemáticas, implica poder abordar distintas facetas de la naturaleza y poder emplearlas en nuestro favor para el desarrollo de aplicaciones que nos permitan tener esa superioridad frente a las amenazas hoy día existentes, y ser capaces de neutralizarlas a tiempo.

En su apartado sobre *El desarrollo de tecnología* Julio Plaza acude a la clasificación de los distintos niveles de madurez tecnológica (Technology Readiness Level, TRL), adoptado por la Agencia Europea de Defensa (European Defence Agency, EDA), desde el descubrimiento de un nuevo fenómeno, hasta la puesta en operación de un sistema. En esencia se pueden identificar dos tipos de aproximación que lejos de ser excluyentes deben ser consideradas complementarias. La primera aproximación se podría denominar *bottom-up*: se parte de la observación de fenómenos naturales, identificando sus factores claves, se investigan científicamente hasta estar en disposición de idear aplicaciones que exploten estos fenómenos, y que puedan aprovechar potenciales usuarios finales. En el contexto de esta monografía se trataría de la Nanociencia. La aproximación complementaria se puede denominar *top-down*, se parte de unas necesidades que deben ser resueltas con la tecnología disponible, o con el desarrollo de nueva tecnología. En nuestro caso nos referimos a la propia Nanotecnología. Ambas aproximaciones idealmente deberían converger a mitad de proceso: la investigación aplicada, el desarrollo tecnológico e innovación orientados a generar aplicaciones finales. Foros específicos de seguridad y defensa, como la EDA, y la Organización de Ciencia y Tecnología (Science and Technology Organization, STO) de la OTAN tienen entre sus objetivos el poner en contacto a todos estos actores para el desarrollo de tecnología.

El objetivo del capítulo III es presentar una aproximación *bottom-up* a la Nanotecnología aludiendo a tecnologías que son emergentes y que en un plazo medio de tiempo (5 a 10 años) serán componentes importantes en nuevos sistemas de defensa. Se trata de preparar un camino expositivo al siguiente capítulo en el que se hace una aproximación *top-down*, partiendo de necesidades y aplicaciones a las que se quiere dar solución a través de la Nanotecnología en el ámbito específico de defensa.

Se comienza el desarrollo propiamente dicho de este capítulo con una sección dedicada a la optoelectrónica y estructuras de baja dimensionalidad. La optoelectrónica, también denominada optrónica, nace como una combinación de óptica y electrónica, de cómo hacer una conversión entre fotones y electrones tanto en un sentido como en el contrario. Hablamos así de emisores cuando a partir de una corriente eléctrica, se puede generar un haz de fotones, ya sean LED (Light Emitting Diode, diodo emisor de luz) o láseres. Y hablamos de sensores o detectores cuando un haz de luz se convierte en una corriente eléctrica. La optrónica basada en el desarrollo de estructuras de confinamiento cuántico es una tecnología madura hoy día, base del desarrollo de multitud de aplicaciones de interés en defensa.

El desarrollo de la epitaxia de haces moleculares (MBE), mencionado en el capítulo dos, es en gran parte responsable de que este tipo de tecnología se haya desarrollado rápidamente en años en los que aún no se hablaba de nanotecnología. Su principal ventaja es la de poder diseñar estructuras de baja dimensionalidad con un control a nivel del nanómetro, como pozos cuánticos, donde los electrones ocupan estados de energía muy concretos que se pueden controlar sólo con cambiar el tamaño de la estructura. En esta sección se recuerda la organización de los electrones en bandas o rangos de energía semiconductores: banda de valencia, banda de conducción (que está vacía o casi vacía) y la intermedia banda de energía (banda prohibida o gap) que representa energías que un electrón no puede adquirir. Un pozo cuántico se forma cuando se juntan dos materiales con bandas prohibidas de distinto tamaño y son fácilmente sintonizables durante la fabricación. La estructura puede determinar en gran parte las propiedades de absorción y emisión de luz, pero no sólo ella. Los semiconductores son generalmente materiales de un solo átomo (como el silicio y el germanio), o binarios (como GaAs o CdTe). Otra de las ventajas de los crecimientos epitaxiales es poder alear distintos semiconductores para generar semiconductores binarios (SiGe), ternarios (InGaAs, CdHgTe), e incluso cuaternarios (InGaNAs), con un buen control de la composición que permite sintonizar según la necesidad los valores de la energía de la banda prohibida.

Se señala que podemos encontrar ejemplos recientes del uso de esta tecnología en defensa en el proyecto SIRIO (Sistema de detección IR para Investigación Optrónica), financiado con el programa COINCIDENTE de la por entonces Subdirección de Tecnología y Centros (hoy de Planificación, Tecnología e Innovación) de la Dirección General de Armamento y Material. El desarrollo, totalmente nacional, fue realizado a petición de la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL) de la Armada, y contó con la participación del Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA), la Universidad Carlos III, Indra Sistemas, y el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM). El objetivo del proyecto fue el desarrollo de un demostrador de un sistema de alerta temprana para buques contra misi-

les rozaolas. La experiencia y conocimientos adquiridos ha servido como base en la participación a nivel internacional en grupos de trabajo para poner en común el desarrollo de este tipo de sistemas, dentro del grupo de Defensa contra Misiles en el Teatro Marítimo (Maritime Theatre Missile Defence, MTMD), con participación de Estados Unidos, Canadá, Italia, Reino Unido y España. Sistemas equivalentes con el uso de tecnología similar, están en desarrollo actualmente como el Sistema Alertador de Misiles (Missile Warning System, MWS) del nuevo Airbus A400M.

En la siguiente sección se aborda la Fotónica como una tecnología habilitadora transversal. Tras subrayar la exposición de previos capítulos sobre electromagnetismo y mecánica cuántica se documenta cómo la fotónica puede considerarse como una tecnología transversal y capacitadora por emplear idénticos fundamentos para aplicaciones radicalmente distintas. Existe una importante cantidad de empresas dispuestas a desarrollar la tecnología tanto para aplicaciones civiles como militares. Es el caso de la plataforma industrial, Photonics 21 que tuvo relevancia en que la Comisión Europea designase a la fotónica como *Tecnología Habilitadora Clave (Key Enabling Technology, KET),* tal y como aparece en Horizon 2020. En España existe una réplica de tal plataforma, Fotónica 21, que agrupa a la mayor parte de empresas, centros tecnológicos y universidades que ejecutan el I+D+i en fotónica en nuestro país. En ambos casos, existen sendos grupos de trabajo sobre aplicaciones a seguridad y defensa para dar cuenta de las peculiaridades, potencialidades y necesidades de dicho sector. En lo relativo a plasmones (partícula asociada a las oscilaciones del gas de electrones de un metal) se indica cómo puede ser considerada como una tecnología emergente que está siendo objeto de estudio por varios grupos españoles entre los que cabe destacar el de García Vidal (Universidad Autónoma de Madrid) y de León Pérez (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza).

La sección dedicada a la fotónica y optoelectrónica para sensores de agentes químicos y biológicos es un ejemplo paradigmático de cómo combinar los campos de la biología, química y física a través de la nanotecnología en distintos aspectos, algo sobre lo que ya se incidió en el segundo capítulo de esta monografía. Se da buena cuenta de tres experiencias en esta dirección con sello español aunque también con proyección internacional. CANARIO fue el acrónimo de un proyecto desarrollado entre Italia y España, con participación del Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada basado en la detección de la firma de absorción de gases y uno de los demostradores pioneros de sistemas ópticos para detección de agentes químicos. Las pruebas finales se llevaron a cabo en el Centro Tecnico Logistico Interforze (CETLI-NBC), en Civitavecchia (Italia), y permitieron comprobar que a concentraciones del orden de 10 partes por millón, el sistema era capaz de identificar y reconocer el gas introducido en un tiempo entre 7 a 10 segundos. También como demostrador de detección de gases químicos, se desarrolló, a través de la EDA, el proyecto

NANOCAP, con participación de universidad y empresas españolas (Centro de Nanofotónica de Valencia y DAS Photonics), francesas e italianas. El proyecto proponía el uso de un chip fotónico integrado (Photonic Integrated Circuit, PIC) para dos aplicaciones: una relativa a telecomunicaciones, y una segunda orientada a la detección de agentes químicos. Es un ejemplo de transversalidad, de cómo una misma tecnología es capaz de abarcar campos muy separados entre sí. Basado en el mismo concepto y desarrollo que NANOCAP, actualmente se desarrolla el proyecto BIOTYPE con el mismo consorcio más la participación del Instituto Tecnológico la Marañosa. Los tres demostradores descritos están pensados como sistemas que puedan ser integrados en edificios, espacios cerrados o con gran acumulación de gente, para realizar una vigilancia no atendida con un mantenimiento mínimo. Su colocación debería hacerse en puntos estratégicos como pueden ser los conductos de aire acondicionado. En caso de detectarse un agente químico o biológico, se activaría una alarma, que señalaría la necesidad de evacuación del recinto.

Se culmina esta sección con una mención a la fotónica para telecomunicaciones, pioneramente asociada a los nombres de Maxwell, Hertz y Marconi. Más de un siglo después, seguimos empleando ondas electromagnéticas, si bien se han mejorado diferentes aspectos: emisores, receptores, modulación de señal, encriptado, señales analógicas y señales digitales. La aportación de la fotónica se centra en el desarrollo de componentes que permiten la digitalización de una señal analógica de radiofrecuencia. El empleo de componentes fotónicos para la fabricación de convertidores analógico–digital (*Analog to Digital Converter*, ADC) viene siendo un reto desde los años 70. Una aplicación inmediata se puede encontrar en aquellas circunstancias en las que se requiere obtener una señal, y trasladarla hasta un centro de mando o de procesado a una gran distancia. Una digitalización óptica hecha cerca de la antena de RF más una transmisión por fibra óptica, mejora la recepción final de una señal con bajo ruido, e inmune a interferencias. Una vez en el centro de proceso, la señal óptica puede ser convertida de nuevo a señal eléctrica para un procesado más habitual. Una posible aplicación radica en sistemas como el mástil integrado de buques.

Una tecnología incipiente, que desde organismos como la EDA se está empezando a potenciar, y donde la nanotecnología puede tener su contribución, se refiere a la microtecnología y el uso de matrices de antenas como fuentes y detectores (radiofrecuencia y microondas). Entre las potenciales aplicaciones de esta tecnología está su uso en sistemas de escaneo en busca de objetos ocultos, tales como armas ocultas bajo la ropa, o de explosivos improvisados (Improvised Explosive Devices, IED) enterrados a pocos centímetros de la superficie. Son aplicaciones muy ligadas a la seguridad en lugares de tránsito como aeropuertos, o acceso a edificios, y también para la seguridad ante ataques terroristas a convoyes. Se trata de rangos de frecuencias intermedios entre los más

comunes de microondas y ópticas: son las frecuencias de Terahercios, y de ondas submilimétricas.

Los materiales de gap ancho, como el Nitruro de Galio son objeto de la sección siguiente. Otro ejemplo es el carburo de silicio (SiC). La elevada energía de la banda prohibida ha permitido extender el rango de funcionamiento de LED y diodos láser hasta la región del azul y el ultravioleta. Este hito permite la fabricación de sistemas de iluminación de luz blanca con un bajo consumo energético, y ha sido el motivo de la concesión del Premio Nobel de Física a los japoneses Akasaki, Amano y Nakamura en 2014. Son grandes ideas sin la menor duda, que ya han abandonado el ámbito platónico de la nanociencia para cristalizar en objetos del mundo real a través de la nanotecnología.

Ministerios de Defensa de varios países han considerado ya como estratégico el desarrollo de la tecnología de transistores de potencia basados en GaN necesaria principalmente en sistemas radar. Actualmente, existen sistemas que integran esta tecnología, pero cuyo origen es externo a Europa. De esta forma, nos hallamos expuestos a un cambio en la consideración de la tecnología por los países fabricantes. Por el momento, Japón considera la tecnología de GaN como de uso dual, pero un cambio que los considere como ítems de exportación controlada haría muy complicada la integración de dichos componentes en sistemas de defensa europeos. El principal objetivo de desarrollar esta tecnología a un nivel completamente europeo es, por tanto, no depender tecnológicamente de países como Japón o Estados Unidos, que se hallan en posición de ventaja en el desarrollo de esta tecnología. Así, desde la década pasada, se han ido financiando desde la EDA distintos proyectos para avanzar en este desarrollo: KORRIGAN, MAGNUS, MANGA, etc.

Se dedica también una sección al grafeno. Desde que en 1985 se descubrieran nuevas formas del carbono, los fullerenos, que partiendo de la estructura básica del grafito se estructuran a escala nanométrica con forma aproximadamente esférica, las formas alotrópicas del carbono no han cesado de ser objeto de consideración por la vanguardia de la investigación científica. El descubrimiento del fullereno (el llamado C60) mereció el premio Nobel de Química en 1996 a Robert Kurl Jr., Sir Harold Kroto y Richard Smalley. Posteriormente en 1991, el japonés Sumio Iijima descubrió los nanotubos de carbono, lo que fue reconocido, en 2008, con el premio Príncipe de Asturias (junto a los estadounidenses Shuji Nakamura, Robert Langor, George Whitesides y Tobin Marks). Los nanotubos de carbono presentan una forma de cilindro a partir del enrollamiento de capas de grafito, en una estructura que se puede considerar casi unidimensional. El diámetro típico de los nanotubos está en el orden del nanómetro. El estudio del carbono y sus propiedades cobró un nuevo impulso con el desarrollo del grafeno, que supuso la concesión del premio Nobel de Física en 2010 a Andrei Geim y Konstantin Novoselov. El grafeno se

considera actualmente una tecnología emergente, y existen centros en España con líneas de investigación centradas en este material, y en la exploración de sus propiedades. Es un campo todavía inmerso en la nanociencia, pero que en el medio plazo podría estar en disposición de comenzar a desarrollar tecnología y aplicaciones.

Plaza del Olmo continua con una sección dedicada a los metamateriales que también titula como *Cuando la luz se curva al revés*. Se refiere a materiales artificiales con unas propiedades ópticas bastante peculiares y han sido objeto de investigación en la última década desde que en 1967, cuando Veselago publicó un artículo teórico analizando las consecuencias de un material que manifiesta de forma natural una constante dieléctrica y una permitividad magnética con valores negativos: algo que no se produce en materiales naturales. El estudio experimental tuvo que esperar hasta finales de los 90, cuando se ideó una forma de fabricar estructuras con esas propiedades. Su interés para aplicaciones de defensa se ha acrecentado en la última década. El SOPT (Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica, perteneciente a la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación de la DGAM) a nivel nacional monitoriza, entre otros muchos objetivos, el estado del arte de esta tecnología.

El diseño de metamateriales se basa en conseguir unas propiedades efectivas particulares, a partir de materiales que por sí solos no las presentan. Es en esencia una solución geométrica (con claras componentes matemáticas), basada en una metaestructura que se repite de forma periódica, de forma que la longitud de la onda debe ser mucho mayor que esta periodicidad.[7] En el caso de los metamateriales para radiofrecuencia, es sencillo entender que para trabajar en frecuencias ópticas como el infrarrojo y el visible, donde la longitud de onda varía desde unas pocas micras hasta el centenar de nanómetros, la periodicidad y tamaño de las metaestructuras puede estar en el rango de decenas de nanómetros. Por tanto, uno de los principales escollos para el estudio experimental y el desarrollo de tecnología de metamateriales se encuentra en las dificultades de fabricación de estas estructuras. En cambio, para frecuencias más bajas, como la radiofrecuencia y microondas típicas de aplicaciones radar y telecomunicaciones, las metaestructuras pueden tener tamaños del orden del centenar de micras. Obviamente, estos tamaños se salen de la definición de nanotecnología, para quedarse en el mundo de la microtecnología, sin embargo, la mayor facilidad de fabricación ha permitido, por un lado demostrar los conceptos asociados a los metamateriales, y por otro avanzar en la maduración de esta tecnología. Entre los proyectos desarrollados en los últimos años, se puede destacar METALESA, finan-

[7] El estudio asintótico de las propiedades de materiales compuestos, poseyendo una estructura periódica a escala microscópica, es el objeto principal de la teoría matemática de «homogeneización» desarrollada desde principios de los años setenta del pasado siglo.

ciado a través del Joint Investment Programme – Innovative Concepts and Emerging Technologies (JIP-ICET) de la EDA. El proyecto, liderado por la empresa española Tafco Metawireless (una *spin – off* de la Universidad Pública de Navarra), además de la participación de centros y universidades de Italia, Francia y Alemania. En el ámbito de defensa las aplicaciones se refieren a antenas y sus componentes con mejores prestaciones, menores tamaños y más baratas, y a la reducción de la sección eficaz de radar (RCS) para dificultar la detección de plataformas. Por otra parte, los metamateriales ópticos son frentes de investigación que aunque sin aplicaciones ligadas directamente a defensa, pueden tener su efecto indirecto a través de la industria, al permitir diseñar dispositivos de menor tamaño que exploten otras ramas de la nanociencia y nanotecnología.

La óptica de transformación es sin duda, lo que más atención suscita dentro del campo de los metamateriales por su relación con las capas o dispositivos de invisibilidad. Se trata de guiar la luz o radiación por un camino concreto que sea de interés, y a la vez tener las menores pérdidas posibles por reflexión o dispersión (como son los típicos espejismos que se pueden ver en verano a ras de suelo). Desde un punto de vista académico son ejemplos teóricos y experimentales que demuestran el potencial de la técnica. El recubrimiento de antenas para evitar la interferencia entre ellas es una de las escasas técnicas disponibles para su realización práctica. Otra de ellas podría ser la posible adaptación de ciertas zonas de una plataforma con geometría simple (las turbinas de un avión por ejemplo) para conseguir una reducción en la sección eficaz de radar. Una variante de la óptica de transformación es la llamada óptica de ilusión (*illusion optics)* que persigue que la luz sea dispersada de forma que aparente haberse encontrado un objeto distinto al que es. Así, se consigue una ocultación, engañando al observador que cree ver un objeto, cuando en realidad se está ocultando otro distinto. También se ha comenzado a desarrollar la acústica de transformación y, al igual que su homónima en óptica, se ha propuesto el efecto de invisibilidad como potencial de la técnica, para intentar, por ejemplo, reducir la firma sonar de un buque o submarino.

Otra sección se dedica al análisis de energía en el nanomundo. Se motiva la idea de que el propio combatiente es una «plataforma» por lo que, como se expone en el siguiente capítulo, cada vez es más relevante poder equiparle con sistemas y de algún tipo de suministro energético. El uso de las células solares es uno de los métodos, al igual que ya se hace con los satélites artificiales, lo que está relacionado con la tecnología optoelectrónica anteriormente mencionada. La viabilidad de las células solares flexibles lleva tiempo abierta y ha propiciado la investigación en compuestos orgánicos para emisión y detección de luz (Organic Light Emiting Diode, OLED). La flexibilidad les brinda la posibilidad de integrarse en compuestos textiles, por lo que el propio uniforme, el casco, o la tela de una tienda de campaña cumplirían una función de recolección de

energía, a la vez que mantienen sus funciones básicas de protección y camuflaje. La combinación de tecnologías como nanotubos de carbono, o ahora el grafeno podrían ayudar en estos objetivos.

Las células de combustible y baterías son otra alternativa para el anterior fin. Se basan en la transformación de iones de hidrógeno y oxígeno en agua, a través de una reacción química que produce calor. En 2008, Boeing realizó en el aeródromo de Ocaña (Toledo) el primer vuelo tripulado de la historia de la aviación usando estos elementos como fuente de energía demostrando su uso potencial en avionetas o UAV[8]. El desarrollo y mejora de la eficiencia de estas células pasa por varios pasos, en el que intervienen algunas de las nanotecnologías ya comentadas. Las baterías recargables de ión litio son también objeto de fructíferas investigaciones y realizaciones.

El capítulo finaliza con una sección dedicada a las comunicaciones seguras y a la criptografía cuántica. La idea subyacente es el objetivo de que si el enemigo interceptase un mensaje no le fuera posible conocer su contenido si no conoce la clave, incluso si conoce el sistema de cifrado. Se nos recuerdan varios casos concretos cercanos de nuestra pasada guerra civil y en particular la labor crucial del matemático A. Turing (del que este año se cumple el centenario de su nacimiento) durante la Segunda Guerra Mundial al descifrar, en un lugar a 80 kilómetros de Londres, las comunicaciones alemanas cifradas con la versión militar de la máquina Enigma. El absoluto secretismo con que se llevó a cabo esta labor hizo que los alemanes nunca sospecharan que sus mensajes estaban siendo descifrados, y no pudieran actuar en consecuencia.

La comunicación cuántica está basada en el concepto de entrelazamiento de dos partículas con propiedades complementarias, lo que alude a la famosa polémica de la teoría de Einstein, Podolsky y Rosen de 1935 y su resolución final, negativamente, por John Bell a finales de los años sesenta. El uso del entrelazamiento en comunicaciones seguras fue propuesto durante los años 80 por Weisner y Bennet y Brassard, donde la idea principal es el concepto puramente cuántico de que una medida perturba el sistema observado de acuerdo con el principio de indeterminación de Heisenberg. El problema tecnológico asociado que se plantea es el de la fabricación de emisores y detectores de único fotón (Single Photon). Una primera solución encontrada a este problema es emplear fuentes láser con muy baja potencia, que en promedio pueden emitir un fotón por bit. Sin embargo todavía existe la posibilidad de emitir más de un fotón. Una

[8] En toda esta monografía se utilizan las siglas UAV (Unmanned Aerial Vehicle) y derivados como UCAV por ser las más conocidas aunque no se ajustan plenamente a la realidad. Estas aeronaves no tripuladas sí tienen un piloto al mando en todo momento por lo que ya se están empezando a popularizar las siglas RPA (Remotely Piloted Vehicle) en todo el mundo para indicar que no son aeronaves autónomas sino que están pilotadas por control remoto.

solución encontrada en la nanotecnología pasa por combinar las propiedades electroópticas y acústicas de los materiales.

Sobre el capítulo IV

El cuarto y último de los capítulos (segundo de la segunda parte), como su propio título expresa, «Aplicaciones de la nanotecnología en sistemas militares», culmina la aproximación a la nanotecnologia que se realiza en capítulos anteriores para centrarse ya propiamente en el ámbito de defensa. En su Introducción, el TCol. CIP. Gómez Pardo empieza comentando los cambios originados, incluso en el área de la investigación militar, por la caída del muro de Berlín y con él de la política de bloques: del hecho de que la sociedad se beneficiase de la I+D de la defensa se pasa a una inversión de los papeles de vanguardia en la investigación y desde finales de los ochenta el motor de la innovación pasa a ser el sector civil. Centrándonos en nuestro país, señala como el uso de tecnologías maduras en la vida civil es canalizado para el desarrollo de prototipos que resuelvan capacidades militares a través del programa COINCIDENTE del Ministerio de Defensa de España. En el ámbito europeo resalta el papel distinguido de la NT en la declaración de objetivos del programa Horizon 2020 de la Unión Europea (y por tanto los del plan nacional de I+D). Resalta el enorme potencial de desarrollo que la NT juega en el sector de la defensa y la seguridad, mejorando significativamente las capacidades de combate de los nuevos sistemas de armas. Finalmente indica que a la hora de revisar las aplicaciones de las NT en los sistemas de defensa es adecuado seguir el marco conceptual de la Estrategia de Tecnología e Innovación de la Defensa (ETID), siguiendo las áreas de actuación funcional en él indicadas y presentando de manera secuencial la incursión de la NT en armamento, ISTAR (inteligencia, vigilancia, adquisición de objetivos y reconocimiento), plataformas; protección personal; protección de plataformas e instalaciones y TICS (tecnologías de la información, comunicaciones y simulación).

Entra a detallar después, ya en su segunda sección, el análisis del entorno de la batalla del futuro como condicionante de los desarrollos potenciales y en particular de las modificaciones que tienen su origen en la NT. El escenario previsto por la OTAN indica que las operaciones se llevarán a cabo centradas en red, con sistemas multimodales capaces de procesar las cantidades ingentes de información procedentes de las distintas fuentes del campo de batalla y del entorno próximo del combatiente. La toma de decisiones del mando operativo dependerá cada vez más de la capacidad de procesado, interpretación y distribución de la información que pueda disponer a través de sistemas con procesos automatizados. El «asistente digital» de cada combatiente le proporcionará inteligencia y capacidad para actuar en la red del campo de batalla. Asimismo, podrá monitorizar sus constantes biológicas y dispondrá de herramientas de

apoyo a la decisión. Describe el uniforme inteligente, que le ofrece protección balística y NBQ[9] y alude a la presencia cada vez mayor de UAV, USV y UCAV[10] en el campo de batalla. El soldado será necesario para la consolidación del terreno. Las NT jugarán un papel trascendental en las operaciones militares ofreciendo mayores capacidades de medida por los sensores y mejores tecnologías de la comunicación que son necesarias para que con un número pequeño de unidades, con gran potencia de fuego, se pueda neutralizar al adversario. En particular, la guerra asimétrica (contra pequeñas bandas, grupos terroristas o actores no gubernamentales) se basa en una inteligencia más sofisticada y un soldado mucho más eficiente mediante el uso de la nanotecnología.

En su tercera sección, el TCol. CIP. Gómez Pardo recuerda unas informaciones muy valiosas en las que se alude a la Estrategia de Tecnología e Innovación de la Defensa y sus líneas de actuación funcional. Indica cómo el plan de I+D del MINISDEF compete a la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). Tal plan, guía de referencia para el desarrollo tecnológico de la industria de la defensa, viene dado por la ETID que además está alineada con la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación. La planificación del recurso material y la gestión de la I+D corresponde a la DGAM a través de la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN), mientras que su ejecución es responsabilidad de los centros tecnológicos de la Secretaría de Estado de Defensa: INTA, CEHIPAR, ITM y LABINGE, recientemente unificados en un único centro.[11] La ETID recoge las actividades de investigación, tecnología e innovación hasta niveles de madurez tecnológica que, puede alcanzar el nivel TRL-7 «validación operativa». Se definen 6 Áreas de Actuación Funcional (AAF) que cubren el espectro completo de tecnologías de interés para la defensa. Las AAF se dividen en Líneas de Actuación Funcional (LAF) para las que se establecen una o varias Metas Tecnológicas (MT) que sirven de guía fundamental a la hora de determinar las actividades de investigación y tecnología (I+T) en el periodo 2011-2014 (ETID 2010, a lo largo del año se publicará la ETID 2014 para el periodo 2015-2020).

El resto del capítulo analiza de manera sistemática la contribución de la nanotecnología a los futuros sistemas militares siguiendo para ello el esquema trazado por la ETID en cada una de las seis Áreas de Actuación Funcional (AAF). Así, la sección 4 se dedica al análisis de la NT en el ámbito del armamento ofreciendo un balance pormenorizado en lo que atañe

[9] El acrónimo NBQ es un término vulgarizado, usado en las Fuerzas Armadas y en otros grupos de sanidad y seguridad, aludiendo a la protección nuclear, biológica y química.

[10] UAV: aeronaves no tripuladas, USV: vehículos de superficie no tripulados, UCAV: aeronaves no tripuladas de combate.

[11] De acuerdo con la Ley 15/2014, de 16 de septiembre, de racionalización del Sector Público y otras medidas de reforma administrativa.

a la munición (materiales no energéticos y materiales energéticos), logística de municiones, municiones complejas, espoletas, sensores y dispositivos de activación, señuelos pirotécnicos, sistemas de armas, medios no letales y tecnologías de aplicación general. Como común denominador podemos mencionar que los nuevos sistemas de armas convencionales, en los que la presencia de las NT será elevada, tendrán una mayor letalidad sobre el objetivo minimizando el daño sobre la población civil y estructuras próximas que no constituyan objetivo militar. Esto se conseguirá reduciendo el peso, mediante el empleo de los nanomateriales; aumentando la velocidad y el alcance, mediante el empleo de propulsantes con mayor impulso específico; mejorando la precisión y la probabilidad de impacto, mediante la incorporación de microsistemas de guiado; mejorando su balística de efectos, cargando las municiones con explosivos optimizados; y todo ello con una reducida firma multiespectral, mediante el empleo de nanomateriales y metamateriales, que disminuye la vulnerabilidad del sistema de armas y aumenta, en consecuencia, la probabilidad de supervivencia de tripulaciones y sirvientes. A su vez las NT contribuirán notablemente al abaratamiento del proceso de fabricación y del coste final de producción. En su desarrollo pormenorizado, TCol. CIP. Gómez Pardo apela a wolframio y tantalio nanocristalinos, nanopartículas de aluminio, nanosensores, etc. Menciona que en el ITM se están llevando a cabo varios proyectos para el guiado de municiones: el proyecto GRETA-DAD (empresa AERTEC) está desarrollando un sistema de guiado terminal láser de cohetes de 70 mm para dar cumplimiento a un Requisito de Estado Mayor (REM) del Jefe del Estado Mayor de la Defensa (JEMAD) y que, por otro lado, el proyecto MIURA (fundación EVERIS) pretende dotar a munición de artillería, cohete MC25, de un sistema de guiado INS-GPS. El desarrollo de estos proyectos permitirá a España cumplir con el Roadmap marcado por la PGA (Precision Guided Ammunition de la EDA) para el 2020. Menciona también algo, en cierto modo, insospechado en este contexto: la relevancia del procesamiento de imágenes (tan relevante en contextos como la medicina) que mediante el desarrollo de nuevos algoritmos inteligentes permitirán la detección de blancos sin falsas alarmas (proyecto DABIH Detección de Anomalías y Blancos en Imágenes Hiperespectrales; Programa COINCIDENTE). Respecto de municiones complejas se nos informa que en el ITM, y en colaboración con el INTA, se está poniendo a punto un banco de estatocohetes y desarrollando una munición ramjet de 30 mm que permita un vuelo propulsado a Mach 4 con un motor de este tipo. Respecto a las tecnologías de minado y desminado, mientras se avanza hacia el cumplimiento de los acuerdos de la Convención de Ottawa (1997), la realidad es que existen millones de minas activas desplegadas por distintas zonas del globo que causan al año miles de muertos y terribles amputaciones: éste es otro inmenso campo en el que las NT tendrán gran relevancia. Sobre señuelos pirotécnicos se comenta que la empresa EXPAL, está finalizando el desarrollo de dos tipos de bengalas avanzadas, espectrales y autopropulsadas en

el marco del proyecto del Ministerio de Defensa SAVIR en el que el ITM lleva la dirección técnica. Desarrollando lo tocante a sistemas de armas se menciona que INDRA está trabajando en la miniaturización del láser de su Direct Infra Red Countermeasure (DIRCM) MANTA, el sistema que actualmente tiene la tecnología más avanzada del mundo en la perturbación de misiles antiaéreos de guiado IR.

Un claro ejemplo de tecnología dual es la que atañe a ciertos medios no letales, (espumas, ultrasonidos, etc.), en las que la aplicación de las NT puede introducir notables mejoras. Los avances en este campo, serán asimismo de relevante aplicación para los Cuerpos y Fuerzas de la Seguridad del Estado. La aplicación de los avances en NT a sistemas de microondas, microláseres y generadores de onda, en los espectros acústico y de radiofrecuencia, hará posible la capacidad de neutralizar grupos de personas.

La siguiente sección está dedicada a sistemas de inteligencia, vigilancia, adquisición de objetivos y reconocimiento (ISTAR: *Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaisance*) capaces de adquirir, procesar, explotar y diseminar información de inteligencia de manera integrada y en el tiempo adecuado que permita ser utilizada en el planeamiento y desarrollo de las operaciones militares. En esta AAF se establecen cinco LAF siguiendo el ciclo de inteligencia: adquisición de datos de sensores; proceso y explotación de datos, análisis de la información y producción de inteligencia; distribución de información e inteligencia; dirección del ciclo de inteligencia; arquitectura ISTAR.

La adquisición de datos y sensores es uno de los campos en el que la presencia de las NT va a permitir desarrollos espectaculares y algunos de ellos son ya realidad. Así por ejemplo: el empleo de los llamados Smartdust (polvo inteligente) pueden ser dispersados en miles de motas con capacidad para detectar cualquier tipo de señal (luz, vibraciones o temperaturas); las nanopolianilinas (PANI) se utilizarán como sensores para el almacenamiento de energía y memorias digitales no volátiles, así como para la fabricación de nanofibras que se utilizarán como electrodos en pantallas electrocrómicas (Electro Chromic Display - ECD) y células fotoelectrocrómicas autoabastecidas; los nanosensores por resonancia plasmónica superficial (SPR) permitirán incrementar la sensibilidad y la relación señal/ruido de las fibras ópticas; o el uso del nanocirconio, que aprovechará su elevada conductividad iónica y que se trata de un material fotoluminiscente, para utilizarse en la fabricación de sensores y células de combustible de óxido sólido (SOFC). Respecto de los sensores radar, en EE.UU. ya se ha desarrollado un nano-SAR que puede montarse en cualquier tipo de plataformas. Pesa alrededor de 1kg incluyendo el sistema de navegación, antenas, cableado, procesador en tiempo real y emisor de RF. Son importantes los esfuerzos que se están realizando en el desarrollo de la tecnología del nitruro de galio GaN para su aplicación

en transistores con un consumo hasta 10 veces menor que la tecnología actual de arseniuro de galio. Estos dos desarrollos están dando paso a la tercera generación de las tecnologías RF (primera generación silicio, segunda generación arseniuro de galio y fosfuro de indio). Sensores mecánicos basados en desplazamientos diferenciales de diminutas ménsulas, haces o nanocables al ser sometidos a fuerzas mecánicas de tipo inercial, vibratoria o variaciones de presión son capaces de detectar fuerzas muy pequeñas de hasta 10^{-18} N. La radiación electromagnética puede recogerse mediante nanosensores electromagnéticos constituidos por antenas dipolo de tamaño nanométrico conectadas a una matriz de detectores bolométricos que pueden utilizarse estructuras de pozo cuántico en las que se generan electrones de efecto túnel a partir del estímulo provocado por la radiación incidente. Sensores químicos y biológicos (QB).

La NT permitirá el desarrollo de sensores químicos y biológicos (QB) cada vez más pequeños que podrán integrarse en los uniformes y textiles que tendrán la capacidad de responder a la agresión de agentes químicos o biológicos. Para su fabricación se emplean microsistemas llamados «lab-on-chip» que son microsistemas que realizan las funciones de procesamiento del fluido, filtrado y pretratamiento, en un único chip con el uso de puntos cuánticos fluorescentes, partículas magnéticas, superficies nanoestructuradas o guías de onda planas, con las que pueden conseguirse sensibilidades de hasta 10-16 moles/litro. Así por ejemplo, DAS Photonics está liderando el proyecto de la EDA BIOTYPE, en el que participa ITM, para la detección rápida de ántrax.

También se utilizan sensores basados en la espectroscopía Raman con capacidad para la detección remota, en aeropuertos y aviones, a temperatura ambiente, la presencia de explosivos y de sustancias prohibidas con los que pueden detectarse partes por trillón (ppt=10^{-6} ppm, trillón anglosajón) de sustancias explosivas tales como la trilita, el hexógeno, el dinitrotolueno, el triperóxido de triacetano, la pentrita o el explosivo C4, así como trazas de cocaína y otras drogas. Así por ejemplo, el proyecto EDA-NANOCAP, liderado por DAS Photonics, busca el desarrollo de sensores para la detección de trazas de TNT en IED, con una sensibilidad demostrada de 20 x 10^{-6} ppm.

En la siguiente sección se analiza el impacto de las NT sobre lo relativo a todo tipo de plataformas: comunes-plataformas; materiales; energía; plataformas terrestres; plataformas navales; plataformas aéreas; plataformas espaciales. En todos ellos las NT están teniendo un impacto muy novedoso. Por ejemplo, las planchas de blindaje de los vehículos blindados y acorazados se fabricarán a base de nanomateriales estructurales tales como nanofibras, nanotubos de carbono, metales, cerámicas nanocristalinas o combinaciones de nanocompuestos de tal manera que el blindaje resultante tenga una elevada dureza, mejor flexibilidad y tenacidad, alta resistencia al impacto y peso reducido. Ya se han conse-

guido nanocerámicas estructurales y nuevas formas de aleaciones metálicas con durezas similares a las del diamante. Se espera que el uso de polímeros reforzados con nanofibras/nanopartículas reduzca el peso de los blindajes balísticos hasta en un 60%. Los fulerenos inorgánicos están fabricados a partir de disulfuro de wolframio o de disulfuro de titanio y presentan un grado extremadamente alto para absorber choques, protección balística, etc. La Universidad de Michigan ha desarrollado un material plástico compuesto (acero transparente) tan resistente como el acero pero mucho más ligero y transparente que se fabrica utilizando capas de nanocerámicas y polímeros solubles en agua, embebidos en un aglomerante blanco. También son muy novedosos los nanoblindajes líquidos, similares a los geles, en los que una de las caras del material contiene un número elevado de nanopartículas de silicio. La superficie resultante tras su aplicación tiene capacidad ante impacto de bala. Cuando el proyectil impacta sobre el material, las nanopartículas se ven sometidas a presión y se produce su apelmazamiento con lo que el líquido se transforma en un material compuesto muy duro.

En el campo de la energía, las NT tienen una importancia relevante: por ejemplo en células solares flexibles para recarga de baterías, microcélulas de combustible que funcionan con diésel o biocombustibles; baterías micronucleares, de larga duración, recolectores de energía, a partir de las vibraciones, etc. En lo relativo a plataformas terrestres se esperan avances espectaculares. Por ejemplo, los vehículos actuales ya se están diseñando para cumplir requisitos de furtividad rompiendo las formas características y utilizando nanorecubrimientos que reduzcan las firmas visible (VIS), infrarroja (tanto en el infrarrojo cercano NIR como en el térmico TIR), magnética y radar del vehículo. El avance de la nanoelectrónica y de la capacidad de procesado de los ordenadores está permitiendo el desarrollo de microrobots artillados dotados de múltiples sensores y diverso armamento que pueden utilizarse para labores de vigilancia, reconocimiento y apoyo logístico en zonas hostiles, principalmente en el combate urbano.

En lo referente a aeronaves de combate la furtividad es una de sus cualidades fundamentales. Para conseguir reducir su firma multiespectral e intentar lograr un enmascaramiento casi perfecto, se utilizan varios desarrollos de las NT: empleo de los metamateriales, materiales con un índice de refracción negativo, analizados en el capítulo 3, materiales de absorción radar (RAM) para minimizar su firma radar (pinturas a base de esferas de carbonilo de hierro o ferrita que transforma la radiación radar en calor, materiales a base de hojas de polímero de neopreno con granos de ferrita, con carbón negro o nanotubos de carbón embebidos en una matriz polimérica, etc.).

Respecto de plataformas navales los avances son ya realidad, como por ejemplo el «Centinela» estadounidense que permite su operación

remota y autónoma preprogramada en misiones de vigilancia de aguas profundas. Está dotado de más de 1.000 baterías de ion litio similares a las de los ordenadores portátiles aunque adaptadas para condiciones de presión extrema. Actualmente tiene una autonomía de 18 horas, un radio de acción de 58 km y capacidad de navegar a más de 5.000 m de profundidad.

Las NT y los microsistemas, han permitido el desarrollo de componentes miniaturizados para el uso en satélites muy pequeños con una notable reducción de peso y tamaño respecto a los satélites actualmente en servicio. El espacio para la carga útil se incrementa aportando mayor valor a la misión. Por satélites pequeños se entienden aquellos clasificados como: mini (<500 kg), micro (<50 kg), nano (<10 kg) y pico (<1 kg) satélites.[12]

A continuación el TCol Gómez Pardo introduce una sección dedicada a los avances de la NT aplicados a la protección personal. El gran reto para el sistema, es cumplir con el requisito OTAN 25/24 por el cual, el combatiente debe ser capaz de combatir durante 24 horas, sin requerir apoyo logístico, con un peso máximo de 25 kilos. Aunque lejos de haberse ya conseguido marca un reto hacia la miniaturización de los distintos subsistemas. La sección ofrece una exposición pormenorizada sobre el papel de la NT en la lucha contra IED, protección NBQ, tecnologías del combatiente y los subsistemas Ss1 «armamento», Ss2 «fuente de alimentación», Ss3 «eficacia de fuego», Ss4 «información y comunicación», Ss5 «supervivencia», Ss6 «sostenimiento» y Ss7 «preparación». Por ejemplo, relativo a la detección de artificios explosivos improvisados (IED) se cuenta ya con la tecnología de los sistemas FIDO (empresa canadiense) que es una familia de detectores de explosivos portátiles y de gran precisión para cantidades de explosivos de algo más de 1 kg desarrollados por FLIR (Forward Looking Infra Red) Systems Inc. resultado de un proyecto de Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Utilizan polímeros amplificadores de fluorescencia capaces de detectar trazas de explosivo en partes por cuatrillón (ppq=10^{-9} ppm, notación anglosajona). Este nivel de detección es similar al olfato de los perros mejor entrenados, que es el método más efectivo hasta la fecha para la detección de explosivos. También son muy ilustrativos los progresos alcanzados en lo relativo a fuentes de alimentación. El estado actual en I+D en células de combustible, en EE.UU., ha generado células de combustible de óxido sólido (SOFC). Se han realizado pruebas de verificación y validación sobre un prototipo de 50 W fabricada con un 20% de nanomateriales (membranas, electrodos y catalizadores), que ha sido diseñado para el combatiente del futuro americano y que va a permitir que se reduzca hasta 17 kg de peso en baterías. En vez de hidrógeno el prototipo utiliza gas propa-

[12] Es oportuno hacer referencia en este punto al nanosatélite Nanosat-1B creado enteramente y lanzado el 29 de julio de 2009 por el INTA .

no muy fácil de encontrar y muy barato. La cantidad de nanomateriales empleados para fabricar estas células irá aumentando progresivamente. Las NT introducirán también notables mejoras en la eficiencia de las células solares orgánicas y de silicio, mejoradas con electrodos de nanohilos; de células solares basadas en nanotubos de carbono y fulerenos; y de células solares basadas en puntos cuánticos con un rendimiento de potencial muy elevado.

En cuanto al almacenamiento de energía, la Universidad de Maryland ha desarrollado un nanocondensador electroestático que tiene una capacidad de almacenamiento de energía 10 veces mayor que la de los mejores condensadores actualmente en el mercado. Los nanocondensadores electroestáticos, se fabrican depositando secuencialmente una capa atómica de metal, aislante y metal sobre un sustrato de óxido de aluminio anódico nanoporoso. Se tienen fundadas expectativas de utilizar grafeno como supercondesador, dado que su estructura basada en el carbono del grosor de un átomo le proporciona una gran capacidad para el almacenamiento de energía. En suma, avanzamos aquí que la lectura de toda esta sección aumentará aún más si cabe la curiosidad e interés sobre las aplicaciones presentes y futuras de la NT en el área de defensa.

El tema de la protección de plataformas e instalaciones es desarrollado en la siguiente sección, estructurándolo en cinco líneas de actuación funcional: sistemas ESM y ECM de guerra electrónica; armas de energía dirigida; sistemas de autoprotección; simulación y adiestramiento sobre sistemas de guerra electrónica; sistemas de protección de instalaciones y despliegues. Antes de cerrar el capítulo con una sección de conclusiones, se ofrece una penúltima sección relativa a tecnologías de la información, comunicaciones y simulación (TIC). Se analiza allí la repercusión de la NT en el campo de los sistemas de información para mando y control, comunicaciones, NEC, seguridad CIS, simulación y CD&E.

Concluidos estos largos resúmenes solo nos resta agradecer la colaboración recibida y felicitar a los autores de los capítulos que siguen por el trabajo cuidadoso y brillante que han llevado a cabo. Disfruten de su lectura tanto como yo he disfrutado coordinando su gestación.

Capítulo primero

De Maxwell al mundo de la Nanociencia

Antonio Hernando
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Introducción

En este capítulo se pretende revisar cómo la nanociencia (NC) se imbrica en el contexto general de la física conocida hasta el momento de su nacimiento y comienzo de su desarrollo. La parte de la física afectada por interacción directa con el nanomundo es principalmente la física de la materia condensada y esta disciplina resulta de una bellísima mezcla de electromagnetismo y mecánica cuántica de los átomos y sus electrones. El «modelo standard» que explica el funcionamiento del mundo subatómico, de partículas elementales e interacciones fundamentales y parte de los datos astrofísicos, recolectados a una velocidad que crece exponencialmente con el tiempo, no se ve directamente perturbado por el desarrollo de la NC. Lo mismo sucede con los campos de la Geofísica o la Física Atmosférica. Estas disciplinas directamente independientes de la NC si pueden interaccionar indirectamente con ella a través del desarrollo de la nanotecnología (NT) que suministra progresivamente mejor instrumentación, lo que constituye la fuente más importante de mantenimiento del flujo de avance científico. Como detallamos más adelante al hablar de la tecnología desarrollada a partir de la física contenida en las ecuaciones de Maxwell, la relación entre ciencia y tecnología es circular. Si bien, como es generalmente aceptado, el aumento de conocimiento científico genera nueva tecnología no es tan habitual escuchar con la misma intensidad la oración simétrica, esto es: que el desarrollo de la

tecnología induce el aumento del conocimiento científico. Sin embargo, analizando la historia del progreso de la ciencia se encuentra uno con múltiples ejemplos que ilustran el papel relevante del desarrollo tecnológico en la dinámica de los descubrimientos del conocimiento científico básico. Baste recordar que la comprobación de la inexactitud del modelo geocéntrico de Ptolomeo fue debida a la utilización de un telescopio que permitió a Galileo observar los satélites de Júpiter. El invento de una balanza de torsión permitió a Coulomb descubrir su ley universal que describe la fuerza ejercida entre cargas eléctricas en función de su intensidad y distancia. El invento de otro instrumento como es el microscopio hizo posible que conociéramos la multitud de microorganismos que pueblan una gota de agua y que posteriormente pudiéramos observar la estructura de las células que constituyen la unidad de vida. La mejora arrolladora de los telescopios y su instalación en plataformas espaciales ha sido responsable del aceleradísimo avance del conocimiento en Cosmología y Astrofísica, haciendo posible que un elevado porcentaje del conocimiento total sobre el campo se haya adquirido en los últimos 15 años. Finalmente, podríamos citar como ejemplos pertinentes para el tema que nos ocupa, los inventos de los microscopios de efecto túnel y de fuerza que han dado lugar al nacimiento, diríamos oficial, tanto de la NC como de la NT. Aunque la escala nanométrica tenía enorme relevancia en muchísimos procesos físicos, químicos y sobre todo biológicos, no se ha podido decir que existiera una NC propiamente dicha hasta que ha sido posible ver y manipular físicamente objetos de esta escala. En este sentido las aplicaciones de la NC y la NT son importantísimas o pueden serlo para el avance de cualquier disciplina científica. Las aplicaciones requieren el concurso de especialistas de varias disciplinas, lo que ahora está en boga denominar transversalidad, y sobre ellas hablan con rigor otros capítulos de esta monografía.

La escala nanométrica

Lo nanométrico es característico de una escala comprendida entre la del átomo y la de la célula o, precisando con ejemplos, entre la escala de agregados de unos pocos átomos y la de las macromoléculas de proteínas citoplasmáticas. En física diríamos que la NC estudia el funcionamiento de agregados de átomos que contienen un número de ellos inferior a un millón, aunque lógicamente este límite es puramente convencional y puede moverse hasta valores muy superiores si admitimos como objetos de la NC aquellos agregados en los que al menos una o dos de sus tres dimensiones son nanométricas. Las cadenas de ADN contenidas en el núcleo de las células eucariotas pueden considerarse pertenecientes a esta escala ya que en la dimensión transversal de la cadena tienen esencialmente dos bases que ocupan dimensiones de *2 nm.* de anchura. Según esta generalización podríamos decir que es nanométrico un trozo de materia que en

alguna de sus dimensiones tienen menos de 100 átomos. El espesor de la membrana de los núcleos celulares es de 10 *nm*. Actualmente se admite como perteneciente al nanomundo cualquier sistema que tenga en al menos una dimensión con espesor inferior a 100 *nm*.

Una vez definida la escala nanométrica a partir del tamaño de algunos objetos, conviene fijar sus dimensiones en unidades de longitud. Para que una fila de átomos dispuestos sucesivamente a una distancia entre ellos igual a la que se encuentran los primeros vecinos en los sólidos ocupara una longitud de una micra necesitaríamos poner *3000* átomos aproximadamente. Una micra es la milésima parte de un milímetro o, lo que es lo mismo, la millonésima parte de un metro. Si tuviéramos un cubito de una micra de lado lleno de átomos separados entre ellos la distancia que los separa en un sólido normal, tendríamos entonces *27000000000* átomos en el interior del cubo. Ese es el número: veintisiete mil millones de átomos que se escribe como $27\ 10^9$. Donde el exponente, *9*, del número *10* indica el orden de magnitud o número de ceros de la cifra, en este caso nueve indica mil millones. Una micra es el tamaño de una bacteria pequeña o el tamaño del núcleo de una célula animal. El nanómetro es la milésima parte de la micra lo que equivale a la milmillonésima parte del metro. En el interior de un cubo cuyo lado mide un nanómetro entrarán, entonces, *27* átomos; en general podemos considerar que el orden de magnitud de los átomos que entrarían, admitiendo una fluctuación en las distancias interatómicas, sería de decenas de átomos.

Cómo nace la NC

La escala de lo nanométrico es la escala de las moléculas. El tamaño estimado por Einstein en su trabajo de tesis doctoral para la molécula de glucosa fue 1 nanómetro. En una conferencia ya célebre dictada por Richard Feynman en 1959 con el atractivo título *There is plenty of room at the bottom*, indicaba la existencia de un territorio inexplorado en una escala intermedia entre lo microscópico y lo atómico. En esa zona que hasta entonces era desconocida por la dificultad de escala de nuestros sentidos para adaptarse a ella se ubica el punto de encuentro de la física de los fenómenos cuánticos, atómicos y subatómicos, con la física macroscópica. Consecuentemente, las propiedades de la materia cuyas dimensiones pertenecieran al nanomundo podrían deparar sorpresas y descubrimientos de esa clase tan deseada por la inagotable curiosidad del científico y del cerebro humano. Desde que Feynman pronunciara dicha conferencia hasta hoy una serie de jalones han ido marcando el progreso de la NC y de la NT. El avance en la capacidad de fabricación, control y manipulación de nanoestructuras y de la artesanía a escala atómica con el descubrimiento de nanotubos, posibilidad de fabricación de nanochips y los microscopios de efecto túnel y de fuerza abren posibilidades ilimitadas en el mundo de la miniaturización de dispositivos y de

ahorro energético. Pero simultáneamente se fue descubriendo cómo la nanoescala era fundamental en los procesos de la vida. La maquinaria celular, como analizamos en los siguientes apartados, está basada en el funcionamiento de nanómaquinas que rigen tanto los procesos de conversión energética como de información genética, esto es: los procesos fundamentales para la vida como son la información y el metabolismo funcionan gracias a la contribución funcional de membranas, ribosomas y proteínas que pertenecen al mundo de la nanoescala.

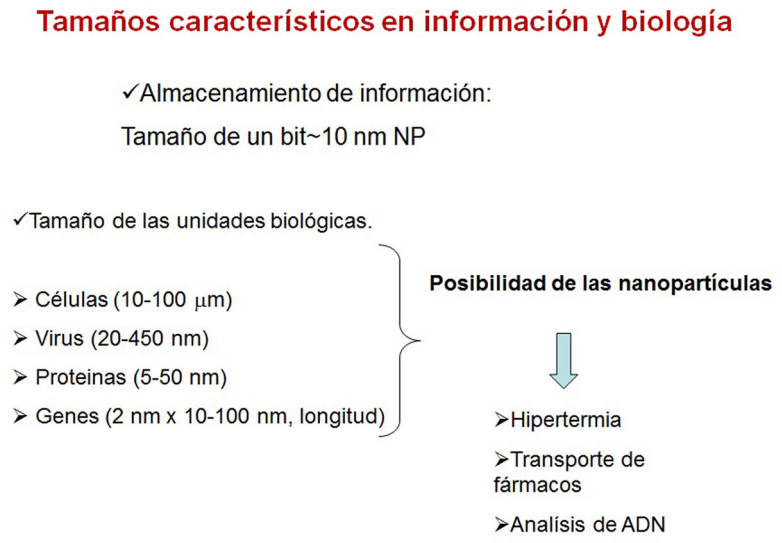


Figura 1-1. Tamaños característicos en información y biología (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

En este rango de tamaños que cubre la NC, la biología molecular y la bioquímica se encuentran con el mundo de los dispositivos optoelectrónicos y magnéticos diseñados por la NT. Simultáneamente la física básica se cruza con la NT en un mundo que tiene el atractivo de ser punto de encuentro de la mecánica cuántica y la física básica. En este punto de encuentro se habla de la posibilidad de ensamblar átomos para producir tejidos o de guiar el crecimiento de huesos mediante estructuras ensambladas de átomos o utilizar nanoactuadores capaces de acelerar la secuenciación de genomas. Lógicamente, se define entonces un terreno de juego científico-tecnológico totalmente multidisciplinar en el que Biología, Medicina, Física, Química e Ingeniería reivindican los mismos derechos para ocupar y desarrollar su actividad investigadora y de desarrollo.

Como decíamos más arriba, este capítulo trata de enfocar el encaje de la NC en la física básica.

La energía necesaria para la vida y la información almacenada en el ADN. Dos ejemplos naturales de nanotecnología

Influencia de la NC y la NT en la evolución y la aparición de la vida

Como se indicaba unos renglones más arriba la NT ha tenido una participación activa de máxima relevancia en los procesos más importantes para el ser humano como son el flujo evolutivo cósmico y la aparición de la vida en la Tierra. Como veremos con un ejemplo, la NT está subyacente en el mecanismo que permite vivir a la mayoría de las células evolucionadas.

La evolución cósmica es el estudio de los cambios en el ensamblaje y la composición de la radiación, la materia y la vida a través de todo el tiempo. Se trata, por tanto, de todos los cambios físicos, biológicos y culturales que han conducido a la formación de nuestra galaxia, nuestro Sol, nuestra Tierra y de nosotros mismos. El resultado es una gran síntesis evolutiva que implica y correlaciona una amplia variedad de especialidades científicas. En palabras de Eric Chaisson (1) «*se requiere una nueva narrativa épica que se extienda desde el big-bang hasta el ser humano*».

Resulta apasionante el descubrimiento de que la materia que conocemos en nuestro entorno, en la biosfera, es capaz de organizarse para generar vida. Fue la experimentación científica la causa del abandono del vitalismo como marco conceptual de la biología. En 1895 Eduard Buchner puso de manifiesto que las levaduras no eran necesarias para producir fermentación sino que bastaba con la acción catalizadora de sustancias (enzimas) que aunque presentes en las levaduras pueden ejercer su acción cuando se separan de ellas. En los años 50 del siglo xx, Stanley Miller y Harold Urey, sintetizaron aminoácidos en el laboratorio, mediante descargas eléctricas en una atmósfera adecuada. Ambos experimentos no dejaron resquicio a la certeza de que la materia involucrada en los procesos biológicos y sus leyes químico-físicas son las mismas que rigen el comportamiento de los seres no vivos que se encuentran en nuestro entorno. La biología moderna como bien percibió y explicó Jacques Monod (2), hace más de cincuenta años en su célebre ensayo *Le hasard et la necessité*, al haber desvelado en una gran parte el «secreto de la vida» se convierte en la base inevitable de apoyo de cualquier reflexión especulativa sobre la naturaleza humana.

La vida supone un orden que se basa en dos pilares: a) la información almacenada en el ADN que forma el genoma y que solo varía en estructura y escala al comparar bacterias y eucariotas y b) en el proceso de conversión de energía. Ambos procesos pertenecen a la escala nanométrica.

Empezamos por establecer unas consideraciones generales sobre el segundo aspecto o proceso de conversión de energía: la materia contenida en nuestra biosfera está bañada por un abundante y generoso flujo de

muy rica energía, que nos llega del Sol en forma de ondas electromagnéticas, que pueden considerarse chorros de unas partículas energéticas llamadas fotones. La vida requiere energía que obtiene de este flujo de fotones. Un fotón que alcanza una gota de agua de la superficie de la Tierra es absorbido por ésta generando un aumento de su temperatura y no produce ningún trabajo. Por el contrario, si el fotón incide sobre una hoja de parra parte de su energía no se emplea en subir la temperatura de la hoja sino en formar una molécula de azúcar por la acción catalizadora de la clorofila mediante el proceso de la fotosíntesis. En total la potencia media recibida en toda la superficie de la Tierra corresponde a $1.5\ 10^5$ terawatios (Un terawatio equivale a un billón de watios o $10^{12}\ w$). Una parte de esta energía es utilizada por los seres vivos para construir las moléculas de alta energía libre que necesitan para vivir. Tal fracción puede estimarse por la utilizada por las plantas y algas para fijar carbono. La cantidad de masa de carbono fijado en glucosa mediante la fotosíntesis, a partir del anhídrido carbónico de la atmósfera se estima del orden de $10^{11}\ gr$. por segundo. Lo que requiere una potencia de *100* terawatios, que corresponde a una milésima parte de la energía solar total que nos llega, pero que es un orden de magnitud superior a la que gasta toda la civilización para locomoción, calefacción e industria, aproximadamente *10* terawatios.

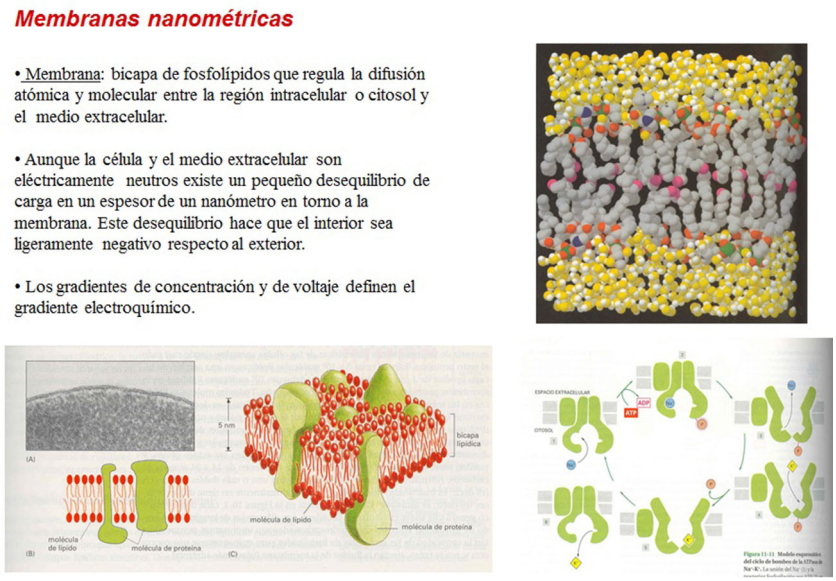


Figura 1-2. Membranas nanométricas (Fuente: Editorial Omega)

Parte del orden de la radiación incidente se ha conservado en la molécula de azúcar. La evolución tiende a que la fracción de energía absorbida convertible en otra energía, ordenada -química, eléctrica o mecánica- sea

la máxima posible. No nos vamos a detener en los detalles de la fotosíntesis, sin duda, el manantial del que surge la vida sobre la Tierra tal cual la conocemos, pero sí debemos acentuar que los mecanismos moleculares que participan en la construcción de moléculas que tienen una gran energía como son las de azúcar, constituyen auténticos motores nanométricos que ha creado la evolución y que aventajan en eficiencia e ingenio de diseño a los más sofisticados nanomotores que a día de hoy somos capaces de producir.

Conviene detallar el balance energético de un ser humano: el sol radia una potencia de $4\ 10^{26}$ watios y su masa es $2\ 10^{30}\ Kg$. La potencia emitida por gramo de Sol es entonces *0,0002* miliwatios. Una persona de *70 Kg* de peso y que come $3\ 10^{6}$ calorías lo que equivale a $12{,}6\ 10^{6}$ julios y supuesta una eficiencia de transformación energética del *30%*, absorbe y transforma *2* miliwatios por gramo, es decir, diez mil veces la emisión del Sol, por gramo. Estas transformaciones energéticas tienen lugar en nuestras células, concretamente en una parte de nuestras células llamadas mitocondrias. La respiración es un proceso mediante el cual la energía de las moléculas se desprende y se almacena en forma de energía potencial electroquímica a través de la membrana de la mitocondria. Pero, evidentemente, esta energía se necesita en todas las partes de la célula y del organismo por lo que resulta necesario un mecanismo de transporte. La energía asociada a la fuerza almacenada en la membrana interna de las mitocondrias en forma de gradiente o diferencia de la concentración de protones a ambos lados de la membrana debe transportarse a todas las partes de las células. Como la energía potencial almacenada en una presa debe convertirse por medio de un generador en energía eléctrica para que de esta forma pueda transportarse a su lugar de uso, la energía almacenada en la membrana de la mitocondria tiene que convertirse en energía transportable. El equivalente a la energía eléctrica de la materia viva es la molécula química ATP, siglas del nucleótido cuyo nombre químico es adenosina trifosfato y que recorre todo el organismo suministrando la energía local para cada proceso.

Un nanomotor diseñado y construido por la evolución para suministrar la energía requerida para la vida

Como hemos ya señalado, la molécula de ATP almacena energía que se libera controladamente en millones de reacciones acopladas en todas las partes de nuestro organismo y es, también, la causa de la capacidad muscular para realizar trabajo mecánico. El ATP se forma a partir del grupo fosfato y de otra molécula, igual pero que le falta ese grupo fosfato, llamada ADP. La composición química del ATP y del ADP que puede consultarse en cualquier libro de biología no es relevante para lo que aquí se pretende ilustrar, basta saber que *gP+ADP=ATP* relación que indica que grupo fosfato añadido a la molécula de ADP genera una molécula de ATP.

Para que el grupo fosfato se adhiera a la molécula de *ADP* hay que suministrar una energía, ya que la energía de la molécula de ATP es superior a la de ADP. Esta energía extra la suministra un nanomotor alimentado por el gradiente electroquímico de la membrana. Este gradiente es, como hemos dicho, de concentración de protones (núcleos de átomos de hidrógeno) y funciona muy intuitivamente debido a que si aparecen poros en la membrana, los protones tienden a difundirse a través de ellos de la zona de mayor concentración a la de menor, hasta igualar las concentraciones. La fuerza que puede ejercer su flujo es proporcional al gradiente de concentraciones.

Hemos dicho que el transporte de la energía se realiza en los organismos vivos mediante las moléculas de ATP que equivalen al fluido eléctrico en el suministro de energía a las ciudades. Pero queda por describir el equivalente al generador de la central que en nuestro caso sería el mecanismo mediante el cual la energía almacenada por la fuerza protón-motriz en la membrana mitocondrial es capaz de convertir el ADP en ATP. El descubrimiento del instrumento que hace el papel biológico de generador de energía eléctrica usando el símil de la central hidroeléctrica mereció el Premio Nobel de 1997. Aisladas de las otras macromoléculas de la membrana interna, pueden observarse, por microscopía electrónica, unas partículas semejantes a champiñones también perfectamente insertadas en la membrana y que constituyen una enzima o catalizador biológico formada de proteínas conocidas como ATP sintasa.

La ATP sintasa es un ejemplo único de nanotecnología producida por la naturaleza. Constituye un motor de rotación que es la máquina más pequeña basada en las partes móviles de una proteína. Contiene dos partes fundamentales, un eje de giro que atraviesa la membrana desde la matriz hasta la región inter-membrana y una cabeza rotante. La presión ejercida por la diferente concentración protónica fuerza a los protones a acelerarse por el eje de modo que ponen en rotación la cabeza que es precisamente la parte que recuerda a un champiñón. El paso de cada tres protones produce un giro de la cabeza de 120 grados, en tres pasos sucesivos de tres protones se recorre una vuelta completa. La cabeza tiene tres sitios de enlace y en ellos se manufactura el ATP. Cada vez que gira la cabeza las tensiones ejercidas fuerzan a los enlaces a formarse o a romperse. El primer sitio enlaza una molécula de ADP durante el primer paso, durante el segundo paso el segundo sitio enlaza un grupo fosfato y lo ensambla al ADP formando ATP y en el tercero se desprende e*l ATP.* Una vuelta completa requiere nueve protones y permite la formación de tres moléculas de ATP. En otras especies la ATP sintasa requiere un diferente número de protones para completar el giro de 360 grados. La nanomáquina es completamente reversible y puede utilizarse para bombear protones hacia el exterior a través del eje utilizando la energía liberada por la descomposición del ATP en ADP y fosfato.

EL nano-motor biológico

- La conversión energética la realizan las mitocondrias (respiración en células eucariotas) y los cloroplastos en plantas (fotosíntesis).
- Durante la respiración celular se produce una transformación de ADP en ATP y viceversa gracias a un bombeo de protones a través de la membrana mitocondrial
- El ATP es utilizado para impulsar reacciones celulares que requieren energía.

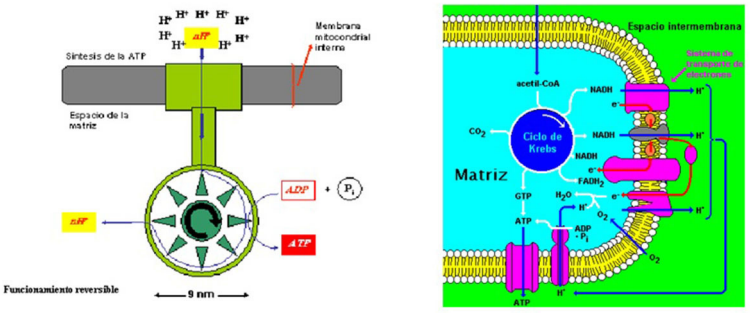


Figura 1-3. El nano-motor biológico (Fuente: Editorial Omega)

La información: reguladora de la evolución. El núcleo de la célula y el ADN como nano-códigos

La importancia de la información en el proceso evolutivo global de la biosfera ha sido descrita muy detalladamente por John Avery (3) en su obra *Information Theory and Evolution (2003).*

La teoría de la información surgió con la pregunta que se planteó Shannon (4) y que se puede resumir de este modo ¿Cuántos dígitos binarios se requieren para expresar un número entero Ω? El número de dígitos es fácil de conocer si el entero es un múltiplo de *2*. En efecto, si el entero es $\Omega=2^n$, el número de dígitos requerido es *n+1*. Cualquier entero puede escribirse de modo general en base dos como:

$$\Omega=a_n \times 2^n + a_{n-1} \times 2^{n-1} + ... + a_0 \times 2^0,$$

donde todos los a_i valen *0* o *1*

Para todo entero Ω tal que $2^{n-1} \leq \Omega < 2^n$ su representación binaria requiere n dígitos binarios. Cada dígito binario es denominado bit. Se define la cantidad de información requerida para expresar un entero arbitrario Ω como:

$$I=\log_2\Omega \text{ bits}= \frac{\ln \Omega}{\ln 2} \text{ bits}=K\ln\Omega \text{ bits, con } K=1.442695 \text{ bits,}$$

donde el logaritmo en base *2* se ha expresado en logaritmos naturales. Shannon (4) se preguntó a continuación cuanta información falta para conocer el resultado de un experimento del cual sabemos sus posibles

resultados sin certeza total. Por ejemplo, si lanzamos una moneda al aire sabemos que pueden salir dos opciones, cara o cruz. Sabemos también que si la lanzamos un número suficientemente grande de veces el número de caras que obtendremos tenderá a igualarse al número de cruces. Es decir, sabemos que si la probabilidad de un evento, *i*, es P_i y repetimos el experimento *N* veces el número de ellas en que el evento aparece va convergiendo a NP_i a medida que aumenta *N*. Conociendo la distribución de probabilidades de los *p* eventos posibles podemos saber el número que obtendremos cada uno de ellos si repetimos el experimento *N* veces y será NP_1, NP_2,.....NP_p. Aun sabiendo esto queda aún una indeterminación que consiste en la secuencia de eventos a lo largo de los N experimentos. El número total, Ω, de posibles secuencias es según un cálculo común de análisis combinatorio:

$$\Omega = \frac{N!}{n_1!n_2!..n_p!} \text{ con } n_i = NP_i.$$

La información requerida para expresar este número indeterminado es $I_N = K \ln \Omega$, luego esta información puede considerarse como ausente o perdida.

Un cálculo elemental conduce a:

$$I_N = K \ln \Omega = -KN \sum P_i \ln P_i .$$

Si ahora dividimos por *N* obtendremos la información perdida antes de realizar un solo experimento, que resulta: $I = -K \sum P_i \ln P_i$.

Resulta muy interesante apreciar que la expresión de la entropía definida por Boltzmann y grabada en su tumba es: $S = k_B \ln \Omega^*$, donde k_B es la constante de Boltzmann $1{,}38\ 10^{-23}\ JK^{-1}$ y Ω^* el número de microestados correspondientes al macroestado del sistema. Si el macroestado del sistema está definido por tener *N* partículas con energía *E* y denominamos n_i al número de partículas que ocupan el nivel discreto de energía E_i, es obvio que debe verificarse la condición $E = \sum n_i E_i$. Pero aunque conozcamos todas las n_i nos seguiría faltando información de cuál es la secuencia distributiva de las partículas en los distintos niveles. El número de secuencias es el número de microestados, Ω^*, accesibles al sistema con un macroestado definido por los enteros n_1, n_2,...n_p.:

$$\Omega^* = \frac{N!}{n_1!n_2!..n_q!} \text{ con } \sum n_i = N .$$

Por tanto la información que nos falta respecto al microestado particular posible en que se encuentra el sistema para este macroestado fijo es según la definición de Shannon:

$$I_N = K \ln \Omega^* = \frac{K}{k_B} S = \frac{S}{k_B \ln 2} \text{ bits.}$$

La entropía correspondiente a un bit de información perdida es, por tanto, $k_B \ln 2$, que equivale a $0.95\ 10^{-23} J\ K^{-1}$. La temperatura tiene dimensiones de energía bit^{-1}, de tal modo que un grado kelvin es igual a $0.95\ 10^{-23} J\ bit^{-1}$.

Una entropía de $1JK^{-1}$ equivale a una información perdida de $1{,}04\ 10^{23}$ bits que al dividir por el número de Avogadro nos permite inferir la entropía de un mol equivale a *0,17* bits molecula^{-1}. Es también interesante considerar que una entropía de $1eV\ K^{-1}$ implica una falta de información de $1{,}67\ 10^{4}$ bits.

La relación matemática y formal entre falta de información y entropía fue implícitamente supuesta en la explicación que dio Maxwell a su experimento ideal de separación de moléculas por su energía. En un recipiente que contiene un gas en equilibrio se coloca un tabique en su centro de modo que quede subdividido en dos recintos idénticos y se hace una pequeña abertura que se puede abrir o cerrar accionando una pequeña puerta sin peso. En ella se sitúa un minúsculo ser, el diablillo de Maxwell, cuya misión consiste en abrir la compuerta cuando de la izquierda llega una molécula de alta velocidad o cuando de la derecha llega una molécula de baja velocidad. Al cabo de un tiempo suficientemente largo, las moléculas de alta velocidad estarán a la derecha de la caja y las de baja velocidad a la izquierda. La entropía del sistema ha disminuido lo que equivale a que la información ha aumentado. En efecto, ahora sabemos dónde encontrar las moléculas rápidas y donde encontrar las lentas. Si retiramos ahora la pared central las moléculas iniciarán su redistribución aproximándose al equilibrio progresivamente, aumentando su entropía y perdiendo la información contenida.

De acuerdo con la definición de «información perdida» de Shannon y con la expresión de la entropía de Boltzmann, se puede decir que el segundo principio de la termodinámica establece que la evolución espontánea de cualquier sistema aislado tiende a disminuir la información almacenada en el sistema. En otras palabras, la entropía de un sistema es opuesta a la información que contiene. Por ejemplo, cuando un fotón solar llega a una gota de agua de la superficie de la tierra, le entropía inicial sistema fotón-agua es menor que la entropía final correspondiente al estado en que el fotón ha sido absorbido por el agua y su energía compartida por las moléculas de agua con un incremento infinitesimal de la temperatura de la gota. La información contenida en el sistema fotón-agua se pierde cuando la energía libre del fotón se degrada en calor. Si la temperatura a la que se absorbe el fotón, esto es, la temperatura de la gota de agua, es de *300 K* y la energía del fotón *2 eV* el aumento de entropía generado por la absorción es de $0{,}66\ eVK^{-1}$que implica una pérdida de información de *56.157* bits respecto a la información contenida en el sistema antes de la absorción. Si el fotón hubiera incidido sobre la superficie de hoja verde

de una planta, la energía libre transportada en lugar de haber sido inmediatamente degradada, podría haberse estabilizado en forma de alta energía de enlace químico. Cuando parte de la energía libre del fotón es estabilizada durante el proceso, la información que transportaba no se ha perdido sino que parte de ella se ha almacenado en otras formas de información.

Los genes de nuestras células son gigantescas moléculas que contienen información. La energía que llega a la Tierra en forma de radiación solar contiene una alta energía libre porque es de baja entropía lo que equivale a decir que contiene información. Las transformaciones irreversibles que suceden en la atmosfera de la Tierra generadas por el gradiente térmico entre la Tierra y el Sol generan una pérdida de información. La vida es un proceso irreversible mediante el cual parte de la información recibida en la alta energía libre de las moléculas que la alimentan se transforma en otras formas de información retardando su degradación total hasta el momento de la muerte del organismo.

Desde la perspectiva de la información el proceso evolutivo general está orquestado por un flujo enorme de información contenido en la energía libre que atraviesa la biosfera. La mayoría de la información recibida se pierde degradada en calor, pero una fracción de ella se preserva y estabiliza como información cibernética. Se entiende por información cibernética aquella asociada con la emisión y recepción de señales, con las comunicaciones, con códigos o idiomas y con la complejidad biológica y cultural.

En los sistemas vivos las señales se escriben y leen en escala molecular. Los conceptos de complementariedad de contornos y exceso de carga eléctrica están en el origen físico del lenguaje entre moléculas. La información entre células se transfiere de forma cronológica vertical entre las células padres y las células hijas y de forma horizontal, como lo hacen las bacterias liberando ADN en su entorno que puede ser asimilado por otras bacterias. Dentro de las células existe comunicación entre los nucleótidos y las proteínas y entre las proteínas y los carbohidratos. El orden de las bases en los genes y el orden de los aminoácidos en las proteínas constituyen el instrumento clásico de transmisión de la información entre las diversas generaciones de los sistemas vivos. El ADN transmite la información al ARN y éste a las proteínas. Las proteínas, actuando como catalizadores, participan en la síntesis de los carbohidratos. Los sitios activos de las enzimas o catalizadores deben tener bien definidos su conformación espacial y el exceso de carga electrostática, para que de este modo puedan fijar dos moléculas en una orientación relativa adecuada para hacerlas reaccionar. En algunos casos las moléculas reaccionantes son tensionadas y deformadas en el sitio activo para rebajar la energía de activación de la reacción.

En la mayoría de los organismos multicelulares el comportamiento colectivo o cooperativo de las células se consigue por la acción de las

hormonas que son mensajeros químicos transmisores de información. Los mensajeros son reconocidos por los receptores mediante la complementariedad de formas y carga eléctrica. Receptores habituales son las proteínas que constituyen canales selectivos en las membranas de las células. Cuando la parte externa de la proteína atrapa una molécula de mensajero se produce un cambio de configuración que genera la liberación de una molécula que estaba ligada a su parte interna y que pasa a formar parte del interior de la célula. En otros casos el mensajero puede penetrar por canal de membrana al interior de la célula. Mediante los mensajeros de información las células saben cuándo deben parar sus divisiones o saben qué papel especial van a tener en el organismo. La insulina permite que las condiciones termodinámicas internas del organismo se mantengan dentro de unos intervalos de valores casi constantes e independientes de las variaciones de condiciones del exterior, por esta razón actúa como mensajero homeostático.

La lentitud de la red de información tejida por la actividad hormonal potenció evolutivamente la formación de una red mucho más rápida: el sistema nervioso. Las neuronas son unidades de información binaria que se activan cuando el voltaje que alcanza su citoplasma supera un umbral. Cuando así sucede lanza un pulso de voltaje, voltaje de acción, a lo largo de su axón que alcanza a las uniones sinápticas de otras neuronas. La propagación de los voltajes post-sinápticos y de acción se lleva a cabo a través de proceso químicos como son la segregación de neurotransmisores que modifican los voltajes mediante cambios de la permeabilidad de las membranas en los procesos post-sinápticos o mediante la propagación de una variación de la permeabilidad de la membrana del axón inducida por voltaje (potencial de acción). La actividad cerebral se mantiene por la constancia de los potenciales electroquímicos lo que requiere una ajustada actividad de las bombas que extraen en contra del gradiente de energía libre los iones que participan en el proceso. El gasto energético requerido por las bombas se mide por la cantidad de azúcar necesaria para mantener el trabajo del córtex. En el caso del cerebro humano el proceso evolutivo más marcado es la formación del córtex. El córtex se extiende de *2 a 4 mm* de espesor debajo del cráneo con una superficie de *2.500 cm^2* plegados y consistentes en sustancia gris. Está formado por *10^{11}* neuronas unidas por más de *10^{14}* conexiones sinápticas y embebidas en *10^{14}* células gliales que forman el tejido blanco. Por cada milímetro cuadrado de cráneo, e inmediatamente en su parte inferior, existen conectadas más de mil millones de neuronas. La conectividad entre neuronas es la base del funcionamiento del cerebro aunque aún no hayamos desvelado exactamente a día de hoy cual es el misterio que encierra dicho funcionamiento.

Todos estos mecanismos están condicionados por la secuencia de ADN que pertenece a la escala nanométrica, así como todas las macromo-

léculas que participan activamente en el proceso de transmisión de la información que sirve de guía para hacer posible la vida.

El electromagnetismo como primer fundamento de la NC y la NT

Las interacciones fundamentales conocidas a día de hoy

Hemos visto un par de ejemplos ilustrativos de la relevancia de la escala nanométrica en la biología, concretamente en el mecanismo de conversión energética intracelular más importante para los organismos superiores y en el proceso de conservación y mantenimiento de la información. Es precisamente en el mundo de la biología donde lo nanométrico, construido lentamente durante *4.600* millones de años bajo la enorme presión evolutiva, se manifiesta más frecuentemente y se desvela progresivamente al conocimiento humano al ritmo de los nuevos descubrimientos. La biología desde un punto de vista fundamental no constituye más que una parte específica de la química. La química es una manifestación de la interacción electromagnética entre átomos. Al tratarse de interacciones entre átomos y moléculas su descripción debe hacerse dentro del marco de la mecánica cuántica. En definitiva: la interacción que sustenta todos los procesos biológicos es la interacción electromagnética.

Las interacciones fundamentales que a día de hoy conocemos son cuatro, dos interacciones nucleares, la fuerte y la débil; la interacción gravitatoria y la interacción electromagnética. La interacción fuerte es la responsable de la estabilidad e inestabilidad de los núcleos de los átomos. Actúa en las estrellas durante el proceso de formación de los núcleos y síntesis de átomos por fusión nuclear, nucleosíntesis, y se manifiesta en la energía nuclear que utilizan los reactores generadores de energía eléctrica y en las explosiones de las bombas atómicas. La interacción débil es responsable de los procesos radiactivos. A cada interacción le corresponde una partícula que la transmite y que se han observado excepto en el caso de la gravitación. Las interacciones nucleares son de corto alcance, actúan en un rango de $10^{-15}\,m$ en el caso de la fuerte y de $10^{-18}\,m$ en el caso de la débil, siendo sus mediadores los gluones y los bosones *W* y *Z*, respectivamente. Las interacciones que son más familiares en la escala de nuestros sentidos y, por tanto, de nuestra vida habitual son la gravitatoria y la electromagnética. Ambas son de alcance infinito y su intensidad decae con el inverso del cuadrado de la distancia a las fuentes. Los fotones son los mediadores de las interacciones electromagnéticas mientras, a día de hoy, aún se mantiene velado el transmisor de la interacción gravitatoria o hipotético gravitón. La gravitación, sin duda alcanza un papel preponderante en el campo de la cosmología y de la relatividad general que es, en definitiva, una teoría del espacio y de la gravitación. La formación de las galaxias y la dinámica astrofísica está regida, así como la curvatura de la luz producida por los cúmulos

de galaxias y tan eficaz para el escrutinio experimental del pasado, por la interacción gravitatoria.

La interacción electromagnética nace de la unificación de las interacciones eléctrica y magnética realizada durante la segunda mitad del siglo XIX, como detalladamente describimos más adelante. Otro esfuerzo intelectual de máximo calado que acabó con reconocido éxito fue el realizado por A. Salam, S. Glashow y S. Weinberg para unificar las fuerzas electromagnéticas y débiles entre partículas elementales, lo que les valió el premio Nobel de Física de 1979 por su unificada fuerza electro-débil.

El electromagnetismo se manifiesta en primer lugar por la luz del Sol que es la fuente de energía primaria para la vida, los fenómenos atmosféricos como los relámpagos y el arco iris, el campo magnético terrestre, el transporte de energía mediante líneas de alta, media y baja tensión, los motores eléctricos, los imanes, los videos, la memoria almacenada en los ordenadores. También subyace en todos los fenómenos ópticos, en las técnicas de diagnosis como los rayos X o la resonancia magnética nuclear y en todos los sistemas de comunicaciones basados en la transmisión de ondas electromagnéticas como son la radio, la televisión, el radar, la telefonía móvil y el wi-fi.

Las ecuaciones de Maxwell y el paradigma del método científico

Nadie que haya estudiado física desconoce que las ecuaciones de Maxwell sintetizan en lenguaje matemático una multitud inconmensurable de experimentos referentes a las interacciones electromagnéticas. La teoría clásica del electromagnetismo es quizás la ciencia mejor acabada dentro del concepto ortodoxo de ciencia pura. Su hechura ha servido y sirve de ejemplo permanente para las disciplinas que nacen con vocación de llegar a ciencia. La trascendencia de la obra de Maxwell supera así su propio ámbito de aplicación ya que su génesis y su significado ilustran ejemplarmente la trayectoria del método científico. Este método ha resultado de una eficacia tan sorprendente para aproximarnos a la comprensión del «funcionamiento» de los fenómenos naturales que se debe considerar como el único método de conocimiento moderadamente fiable.

Las etapas del método científico

Explica Feynman (5), haciendo uso del caso de la difracción de la luz, como el denominado método científico comprende idealmente cuatro etapas. La primera, más primitiva y aparentemente ingenua, consiste en la observación de un fenómeno que llama nuestra atención. Evidentemente el espectro de fenómenos candidatos a llamar nuestra atención se dilata exponencialmente a lo largo de la historia con el desarrollo de técnicas de observación a escalas diferentes a la de resolución de

nuestros sentidos. La sorpresa que causa la aparente curvatura que adquiere una barra al introducirse en el agua, constituyó la primera etapa del estudio científico de la difracción de la luz. Como este fenómeno se observa con nuestros ojos sin requerir ayuda de instrumento alguno, fue conocido desde la más remota antigüedad. La segunda etapa del método es la medida de las magnitudes adecuadas relacionadas con el fenómeno. Los resultados de las medidas son números, por tanto, susceptibles de manipulación y control aritmético o matemático. Esta etapa es mucho más ardua que la primera y requiere «aguda» intuición y eliminar sensibilidad para elegir las variables a medir y desarrollo técnico que suministre los instrumentos capaces de medir o transformar en números las observaciones realizadas. El método científico es eminentemente experimental en sus dos primeras etapas. En el caso de la difracción, y muy excepcionalmente, el nacimiento de la experimentación sucedió en la antigua Grecia. La cuestión versaba sobre la relación entre el ángulo que formaba la barra con la normal a la superficie del agua (ángulo de incidencia) y el que formaba la barra en el interior del agua con la misma normal (ángulo de refracción). Claudio Ptolomeo escribió una tabla de valores de pares de ángulos de incidencia y refracción datada en el año 140 antes de Cristo. La tercera etapa del método consiste en la búsqueda de una regla matemática que relacione las variables medidas de tal forma que su conocimiento no requiera la memorización o lectura de la tabla. Esta regla, generalmente conocida como ley, serviría como una ayuda nemotécnica para recordar inteligentemente muchos datos, reduciendo la capacidad de memoria requerida. Volviendo a nuestro ejemplo de la difracción es de destacar que tuvieron que transcurrir casi mil ochocientos años tras la elaboración de la tabla para que Snell, en 1621, encontrara la relación conocida como ley de Snell que indica que la razón entre los senos de los ángulos de incidencia (medio 1) y refracción (medio 2) es igual a la relación entre los índices de refracción del medio 2 y el medio 1. La cuarta etapa es, sin duda, la que más contribuye a resaltar la grandeza del método y es en ella donde la contribución de Maxwell debe enmarcarse. En esta última etapa se busca un principio o modo de pensar desde el cual la regla experimental resulte evidente. Esta fue, en el caso de la difracción de la luz, la tarea de Fermat que en 1650 estableció que de todos los caminos posibles la luz, para viajar de A a B, sigue aquel que requiere menos tiempo.

La obra de Maxwell como síntesis de los experimentos de electricidad y magnetismo

Los fenómenos eléctricos y magnéticos que suceden a escala no cuántica y que son los descritos por las ecuaciones de Maxwell, son manifestaciones de una de las cuatro interacciones fundamentales que gobiernan el comportamiento de la materia y la energía. A diferencia de las inte-

racciones fuerte y débil, la interacción electromagnética se manifiesta a la escala habitual de los sentidos y rige la mayoría de los fenómenos con los que nos sentimos familiarizados desde que nuestro cerebro comienza a recoger y ordenar sensaciones. La química, la óptica, una parte considerable de los fenómenos meteorológicos, la biología e incluso la actividad cerebral, protagonista en la aventura del conocimiento, pueden considerarse sub-disciplinas del Electromagnetismo clásico.

El enlace químico y su capacidad de alterarse liberando o absorbiendo energía en forma de radiación, trabajo o calor, constituye el elemento básico de los fenómenos electromagnéticos macroscópicos y que comenzaron a ser observados desde los albores de la humanidad.

a) La primera etapa: de la presocrática al siglo XVIII.

La primera etapa del proceso constitutivo de la ciencia del Electromagnetismo surge con la observación de la capacidad de atracción del ámbar frotado sobre virutas de paja y de la fuerza ejercida por la magnetita sobre el hierro. Tales de Mileto (*640-546 a. C.*) describió ambos fenómenos. Ya en los Vedas se hace mención de una piedra denominada «chumbuk» o piedra que besa que claramente hace referencia a la magnetita. Como recoge Velayos (6) en su Historia del Magnetismo, el origen de la palabra imán (magnet en inglés o aimant en francés) se ha descrito en diferentes versiones. Lucrecio (*98-55 a. C.*) en el libro sexto de «*De Rerum Natura*» afirma que la palabra Magnetismo deriva de Magnesia región *del Asia Menor muy rica en piedra imán (magnetita). Sin embargo, Plinio (23-79 d. C.*) refiere una bonita leyenda del poeta griego Nicandro (siglo *II a. C.*) en la que se dice que un pastor llamado Magnes, mientras vigilaba su ganado en las faldas del monte Ida, observó admirado que su cayado de hierro quedó colgado de una roca, que desde entonces se conoció como piedra de Magnes. El campo magnético terrestre influyó sobre la navegación a través de la brújula, cuyo fundamento esta descrito en China en el *121 d. C.*, si bien el primer documento chino que hace referencia explícita a la brújula marina data de *1297*. Pocos años antes, en *1269*, Pedro de Maricourt o Pedro el Ermitaño, discípulo de Roger Bacon, describió la brújula de pivotes en un breve manuscrito titulado «De Magnete». En *1600* la aparición del libro de William Gilbert «De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure; Physiologia nova, plurimis & argumentis, & experimentis demostrata» marcó un hito en la sistematización de todo el conocimiento de la época sobre los fenómenos magnéticos.

Curiosamente las observaciones directas de fenómenos eléctricos están restringidas a las descargas eléctricas atmosféricas y a la ya mencionada atracción ejercida por algunos materiales frotados. Por tanto, la observación controlada de fenómenos, requerida para el salto a la segunda etapa del método no pudo llevarse a cabo hasta el siglo *XVII* con el desarrollo de las máquinas eléctricas. La electrización de la

materia requiere un gasto de energía. Cuanto mayor es la intensidad de la interacción que se quiere estudiar mayor es la energía requerida para hacerla observable. En el siglo *XVIII*, como indica Sánchez del Río (7), comienza el estudio sistemático de los fenómenos eléctricos con el desarrollo de la botella de Leiden y las maquinas capaces de electrizar por conducción o influencia[1].

b) Segunda y tercera etapa. De 1785 a 1840

Durante el siglo *XVIII*, con el desarrollo de las máquinas eléctricas, progresó el conocimiento de los conceptos eléctricos y sobre todo de las magnitudes que debían medirse utilizando los aparatos recientemente diseñados y fabricados. En *1785* Coulomb (*1736-1806*), utilizando una balanza de torsión, midió las fuerzas entre cargas eléctricas y encontró la ley que resumía los resultados cuantitativos de sus medidas. La fecundidad de la ley de Coulomb se manifestó en su capacidad para definir la unidad de carga y su capacidad para movilizar a los científicos más insignes de su época estimulados por su semejanza con la ley de Newton. Los trabajos de Gauss, Poisson y Green, basados en la ley experimental de Coulomb, establecieron la textura matemática de la electrostática que serviría de base para la gran síntesis de Maxwell.

La invención de la pila de Volta en *1800* permitió llevar a cabo experimentos con circuitos recorridos por corrientes eléctricas ya entrado el siglo *XIX*. En *1820* Hans Christian Oersted (*1777-1851*) realizó el fundamental descubrimiento de que una corriente eléctrica producía el giro de una brújula situada en su proximidad. La corriente eléctrica podía considerarse fuente de campo magnético. Los trabajos experimentales cuantitativos y sistemáticos de Biot y Savart y la contribución tanto teórica como experimental de Ampère (*1775-1836*) sirvieron para consolidar la magnetostática como disciplina bien establecida.

Uno de los descubrimientos más importante de esta etapa fue sin duda el de la ley de la inducción electromagnética por Michael Faraday (*1791-1867*). A este científico inglés, quizás uno de los mejores y, sin duda, más lúcidamente intuitivos de los físicos experimentales de la historia, dedica Maxwell emocionado homenaje en el prólogo de su célebre libro «*A Treatise on Electricity and Magnetism*» (*1873*). Aparte de contribuciones relevantes en el ámbito de la magneto-óptica, consolidó el concepto de campo como perturbación del medio y diseñó su célebre balanza que permitió desvelar el carácter universal magnético de la materia. Descubrió la ley de la inducción que establece que los campos magnéticos variables en el tiempo son fuente de campo eléctrico. Por tanto un campo eléctrico puede ser originado por cargas eléctricas y por campos magnéticos variables en el tiempo.

[1] Influencia o inducción. El término utilizado tradicionalmente en electrostática era influencia para evitar confusión con la ley de inducción de Faraday.

c) La síntesis y última etapa.

Maxwell descubre que la expresión del rotacional de campo magnético, $\vec{B}$, dada por el teorema de Ampère, según el cual es proporcional a la densidad de corriente, $\vec{J}$, no es general. El rotacional de cualquier vector es un campo solenoidal, sin embargo $\vec{J}$ puede ser o no ser solenoidal. Al añadir a $\vec{J}$ el término conocido como corriente de desplazamiento, proporcional a la derivada del vector desplazamiento eléctrico, Maxwell dota de generalidad a la expresión y descubre teóricamente que los campos eléctricos variables en el tiempo son fuente de campo magnético. Existe, por tanto, una perfecta simetría en el comportamiento de las variaciones temporales de los campos eléctrico y magnético como fuentes de campo magnético y eléctrico, respectivamente. Esta simetría no existe entre las dos primeras ecuaciones de Maxwell que describen las divergencias de los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$. En ausencia de fuentes las ecuaciones de Maxwell son invariantes bajo la transformación de dualidad. Con fuentes -densidad y corriente de carga eléctrica- la invariancia bajo dualidad se pierde ya que esta requeriría la existencia simultánea de densidades y corrientes de carga magnética. Galindo (8) y Ray (9) han analizado con detalle las razones teóricas que harían deseable la existencia de monopolos magnéticos. Como Dirac mostró en *1931*, la existencia de al menos un solo monopolo aislado en el universo explicaría la cuantificación de la carga eléctrica. Ningún experimento a día de hoy[2] ha detectado con la requerida fiabilidad rastro de monopolos magnéticos. La síntesis de Maxwell consolida matemáticamente el concepto de campo, tan naturalmente intuido por Faraday, ya que sus ecuaciones, que se reducen a relaciones entre derivadas parciales de los campos, permiten deducir que se propagan a velocidad finita y por tanto ponen de manifiesto su existencia real.

El establecimiento de la síntesis conlleva a predicciones y ya desde *1863* Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas como consecuencia del acoplamiento de fuentes eléctricas y magnéticas con los propios campos magnéticos y eléctricos variables en el tiempo. Como cualquier sistema de enunciados considerable como un principio físico las ecuaciones de Maxwell están permanentemente sujetas a la comprobación tanto de sus propias predicciones como a la de nuevos experimentos llevados a cabo en condiciones nuevas. A diferencia de la dinámica de Newton, que requiere modificaciones a altas velocidades, las ecuaciones clásicas del Electromagnetismo han resistido invariables las modificaciones asociadas a la Relatividad restringida y a la Mecánica Cuántica, de tal forma que con el desarrollo de la Electrodinámica Cuántica la teoría de la interacción electromagnética ha alcanzado el máximo grado de ejemplaridad como ciencia bien establecida. En

[2] En la actualidad se están realizando experimentos con sistemas bosónicos para obtener configuraciones magnéticas de monopolo.

su haber cuenta con la capacidad de predecir resultados experimentales con precisión que Francisco Ynduráin (10) califica, sin exagerar, como «sobrehumana».

La tecnología como base y consecuencia de las ecuaciones de Maxwell. La transmisión de la energía y de la información define un mundo económico «electromagnético»

Las ecuaciones de Maxwell descansan sobre la experimentación que a su vez fue posible gracias al desarrollo tecnológico que permitió el diseño de máquinas eléctricas y pilas voltaicas capaces de generar corrientes eléctricas intensas y estables. Teoría y desarrollo tecnológico se vienen entrelazando en la dinámica histórica de la ciencia de tal modo que resulta imposible ponerlas en orden de causalidad. Ha sido de siempre aceptado que el conocimiento básico es necesario para la generación de desarrollo tecnológico. Pero, no es menos cierto que la propia tecnología genera conocimiento básico. Este aspecto es extremadamente evidente en el caso de la física de altas energías donde la influencia del progreso de las prestaciones de los aceleradores en el conocimiento íntimo de las partículas elementales resulta obvia. La utilización de técnicas nuevas que permiten la fabricación de materiales en condiciones extremas, como son la pulverización catódica, el enfriamiento ultrarrápido o la técnica de haces moleculares, ha potenciado el desarrollo de la teoría de la materia condensada tanto como el teorema de Bloch o la teoría de electrones en sólidos. El invento de la pila eléctrica permitió avanzar en el conocimiento del electromagnetismo en cuarenta años lo que nunca se pudo soñar realizar en veinte siglos.

Una vez que la técnica establece las condiciones necesarias para incrementar la comprensión y síntesis de los fenómenos, reflejadas en nuestro caso en las ecuaciones de Maxwell, la propia nueva síntesis encierra una gran capacidad de generación de tecnología innovadora. La teoría permitió reconocer a la luz como ondas electromagnéticas generadas por transiciones entre distintos niveles de energía de sólidos, moléculas, y átomos y cuya longitud de onda está condicionada por la energía que separa a estos los niveles. En el intervalo de frecuencias comprendido entre el infrarrojo lejano, $10^{11}\ s^{-1}$ y el ultravioleta lejano $10^{15}\ s^{-1}$, se encuentra una estrecha banda de frecuencias entre 10^{14} y $10^{15}\ s^{-1}$ que es capaz de excitar la retina que a su vez envía impulsos nerviosos al córtex visual del cerebro y que se denomina espectro visible. La radiación electromagnética infrarroja constituye el calor que se transmite tanto desde el fuego de la chimenea como desde el interior del sol como consecuencia de los procesos de fusión nuclear.

El intervalo que abarca en frecuencias desde 10^{4} hasta $10^{10}\ s^{-1}$ conocido como banda de ondas de radio y de microondas corresponde a ondas que llenan la atmósfera y que han sido, en su mayoría, artificialmente

generadas por métodos eléctricos. En cualquier país desarrollado esta zona del espectro conocida como radioeléctrica está rígidamente regulada por la legislación. Todas las emisoras de radio, televisión, radares civiles y militares, telefonía móvil y redes informáticas se encuentran en esta pobladísima región del espectro en el que intereses económicos de envergadura llevan a conflictos enormes por la propiedad de sus ya escasos intervalos libres. La información transmitida por estas ondas, que se inició modestamente con el telégrafo, y que constituye la base de la moderna sociedad de la información reposa en su contenido físico más profundo en las ecuaciones de Maxwell. El transporte de información llevado a cabo a la velocidad de la luz constituye una de las consecuencias tecnológicas más importantes de la teoría de campos electromagnéticos.

El descubrimiento de la ley de Faraday revolucionó la capacidad de trasmitir energía. La energía puede utilizarse a gran escala lejos de sus fuentes gracias a que puede fácilmente transformarse en energía eléctrica, transmitirse como tal, y reconvertirse posteriormente en la forma de energía mecánica o calorífica que se necesite. La posibilidad de crear campos magnéticos variables mediante artilugios mecánicos que hagan girar, por ejemplo, imanes, es inmediata. De este modo se podrían construir «fábricas» de campo eléctrico y mediante conductores transportar la electricidad a distancias alejadas de ellas. Tal transporte era en realidad un transporte de energía que, por su principio de conservación, consistía en la energía que gastaba el artilugio mecánico para hacer girar el campo magnético. La energía se podía almacenar como energía química, o mecánica, convertir en campo eléctrico, transmitir a distancia –análogamente a como la energía nuclear del Sol se transmite a la Tierra mediante fotones– y entonces volver a reconvertir en energía utilizable en los lugares de consumo, viviendas, oficinas y fábricas. La posibilidad de utilizar la energía en cualquier parte sin necesidad de aproximación a la fuente constituye el resultado científico que más ha contribuido a alcanzar el nivel de bienestar, cultura, seguridad sanitaria y capacidad industrial de los pueblos más desarrollados. Da vértigo comenzar a vislumbrar cómo cambiaría el mundo si no hubiera suministro de energía en las viviendas, en los hospitales o en las fábricas. Como dato ilustrativo sirva el consumo anual de energía eléctrica en España que en *2004* y *2005* fue del orden de *240.000* millones de kWh.

Las dos consecuencias tecnológicas de las ecuaciones de Maxwell más universalmente extendidas en la actualidad y de máximo impacto económico, la transmisión de energía y de información, justifican el calificativo de mundo electromagnético al mundo de la tecnología actual. Fuera del ámbito de los campos electromagnéticos producidos artificialmente para transmitir energía o información, la química y dentro de ella la biología apunta como ciencia estrella del siglo xxi. Tanto la química como la biología estudian fenómenos electromagnéticos naturales. La energía biológica que se encuentra almacenada en los enlaces químicos de las

moléculas orgánicas es electromagnética y el propio andamiaje que permite la síntesis de dichas moléculas tiene como energía de alimentación la radiación electromagnética –luz solar– mediante la fotosíntesis. Los campos electromagnéticos de baja frecuencia producidos a escala macroscópica por la actividad biológica son de muy pequeña intensidad, sin embargo, el desarrollo de nuevos instrumentos de alta sensibilidad ha permitido detectar algunos de ellos y utilizar sus medidas para profundizar en el conocimiento de mecanismos básicos biológicos. Esta capacidad les hace especialmente prometedores en los campos de la diagnosis y la terapia de enfermedades específicas.

Los campos magnéticos producidos por la actividad de la corteza cerebral

Como establece Hämäläinen (11) en su artículo *Magnetoencephalography en Reviews of Modern Physics:* «*Exploration of the human brain is of the utmost intellectual interest: the whole humanity depends on our minds*»

Una magnífica herramienta que permite aproximarnos al conjunto de correlaciones y sincronismos eléctricos inducidos en el cerebro humano por la actividad neuronal es la magnetoencefalografía, MEG. Las neuronas excitadas por voltajes eléctricos generan nuevos potenciales (potenciales de acción del orden de *100milivoltios*) que son transmitidos a nuevas neuronas, a músculos y a glándulas. Las corrientes eléctricas de polarización y despolarización generan campos magnéticos que pueden ser detectados en las proximidades del cráneo con sensores de tipo *squid* (superconductor quantum interference device)[3] de muy alta sensibilidad (10^{-19} *teslas*).

Cada neurona, recibe información a través de diez mil contactos eléctricos con otras neuronas. Estos contactos, entre el extremo del axón de una neurona y las dendritas de otras neuronas próximas a dicho extremo, se realizan químicamente a través de neurotransmisores y se conocen como uniones sinápticas o sinapsis. Los neurotransmisores se liberan con la llegada del potencial de acción al extremo del axón y modifican la permeabilidad iónica de los canales de las membranas de las neuronas próximas generando en éstas potenciales eléctricos conocidos como postsinápticos y cuyos valores oscilan en amplitud entre *10* y *100 milivoltios* y tienen una duración típica de *10 milisegundos.* La integral de estos potenciales post-sinápticos inducidos en las neuronas próximas genera a su vez, siempre que alcance un determinado umbral, un potencial de acción que se propaga por el axón con valores de *100 milivoltios* durante *1 milisegundo*. Las corrientes sinápticas de polarización se propagan lon-

[3] Son dispositivos basados en la cuantificación del flujo de campo en anillos superconductores, lo que da lugar a fenómenos de interferencia cuántica. Están fabricados con niobio puro o plomo aleado con un 10% de oro o indio.

gitudes, ℓ de *0.1* mm hacia el interior de la dendrita y dan lugar a dipolos de corriente, Iℓ, donde I es la intensidad de corriente, del orden de *20 femtoamperio metro.* El prefijo «femto» significa 10^{-15}, lo que permite inferir que las intensidades son del orden de 10^{-10} *amperios*. Los campos magnéticos en el exterior inmediato al cráneo, producidos por una corriente postsináptica individual de 10^{-10} *amperios* situada inmediatamente adyacente al interior del cráneo, son de 10^{-4} *femto teslas* y, por tanto, serían completamente indetectables. El campo que se mide con el «squid» es del orden de *100 femto tesla* que es el producido por aproximadamente un millón de corrientes sinápticas con una intensidad bipolar de *10 nano amperio metro*, lo que corresponde a la activación del uno por mil de las uniones existentes en *1* mm^2. Un campo de esta magnitud es una mil millonésima del campo magnético terrestre, lo que permite apreciar la enorme sensibilidad de los sensores y la no menos enorme dificultad de la medida que requiere apantallamientos extremadamente eficientes del ruido electromagnético ambiental. Es importante considerar que las corrientes que fluyen por los axones como resultado de los potenciales de acción inducen un campo magnético (de naturaleza cuadripolar y que varían con la inversa del cubo de la distancia) más localizado que los producidos por las corrientes post-sinápticas (de naturaleza bipolar y que varían con la inversa del cuadrado de las distancias).

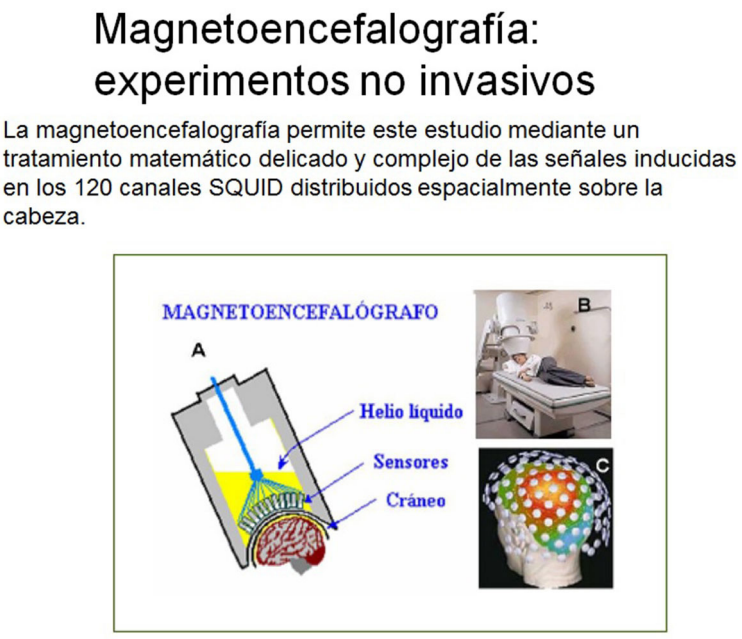


Figura 1-4. Magnetoencefalografía: experimentos no invasivos (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

El magnetoencefalógrafo es un equipo que consta de más de *140* sensores «squid» distribuidos uniformemente en la superficie de un casco que se coloca sobre la cabeza del paciente y que permite registrar los campos magnéticos producidos en su córtex de modo no invasivo. El análisis de sincronismos entre las señales producidas en distintas regiones del cerebro ha conducido recientemente a importantes descubrimientos sobre, por ejemplo, las correlaciones existentes entre las zonas premotora, motora y muscular. Esta técnica cuyo uso ha arrancado muy recientemente permitirá en un futuro inmediato conseguir notables avances en el conocimiento de las transmisiones de señales y acoplamientos entre distintas y distantes regiones cerebrales asociadas a cada actividad consciente e inconsciente.

La asombrosa manifestación de las interrelaciones cerebrales se vislumbra considerando que en un partido de bádminton la pluma alcanza velocidades de *300 km/h* lo que significa que recorre la distancia entre jugadores en *300 milisegundos*. Sin embargo es posible devolver el golpe lo que requiere realizar un buen número de computaciones en ese corto intervalo a las 10^{11} [neuronas] (12). Es obvio que la capacidad del sistema descansa en la calidad de las conexiones entre regiones neuronales la cual depende, a su vez, de aspectos estructurales y funcionales. Estructuralmente resulta notable el gigantesco grado de conectividad entre neuronas, con valores comprendidos típicamente entre mil de diez mil sinapsis por neurona. Desde un punto de vista funcional se ha descubierto que las oscilaciones son una característica importantísima de la actividad neuronal y, con más rigor, la sincronización entre oscilaciones de distintas regiones –que refleja la interacción temporal entre actividades– parece ser un mecanismo eficiente de la comunicación neuronal. Se definen las oscilaciones neuronales como variaciones periódicas de la actividad neuronal. La actividad comprende potenciales de acción y potenciales locales. Estos corresponden a los potenciales extracelulares de membrana de una población local de neuronas y que están originados por los potenciales activadores e inhibidores post-sinápticos que resultan del disparo de potenciales de acción. Los potenciales locales representan un promedio espacial sobre una población por lo que efectos de consistencia aumentan su intensidad. Las oscilaciones de potenciales locales pueden tener distintas relaciones con las frecuencias de los potenciales de acción que las generan ya que representan promedios de éstos. Desde 1999 se ha propuesto la existencia de sincronizaciones en la banda gamma. Hoy, y gracias a la MEG, se sabe que la sincronización es un proceso muy general que abarca a las distintas bandas y a las distintas partes del cerebro. Por ejemplo, anormalidades en la sincronización en partes motoras parecen estar asociadas a síntomas de enfermedad de Parkinson. El método no invasivo de estudio de comunicaciones neuronales de largo alcance requiere monitorizar la actividad neuronal con alta resolución temporal en todo el campo del córtex. Para el estudio experimental de la

coherencia entre señales de distintas regiones se debe definir una señal de referencia que puede ser una de una región concreta del cerebro o la obtenida mediante un electromiograma de una actividad muscular. Una vez definida la referencia se utiliza un filtro para obtener la potencia en una banda concreta de frecuencias de todas las zonas cerebrales monitorizadas y se compara la de cada una de ellas con la de referencia. Aquellas que presenten coherencia pueden analizarse posteriormente en fase e intensidad utilizando el método de Welch. El análisis de fase de las señales puede llevarse también a cabo utilizando el método de la transformada de Hilbert.

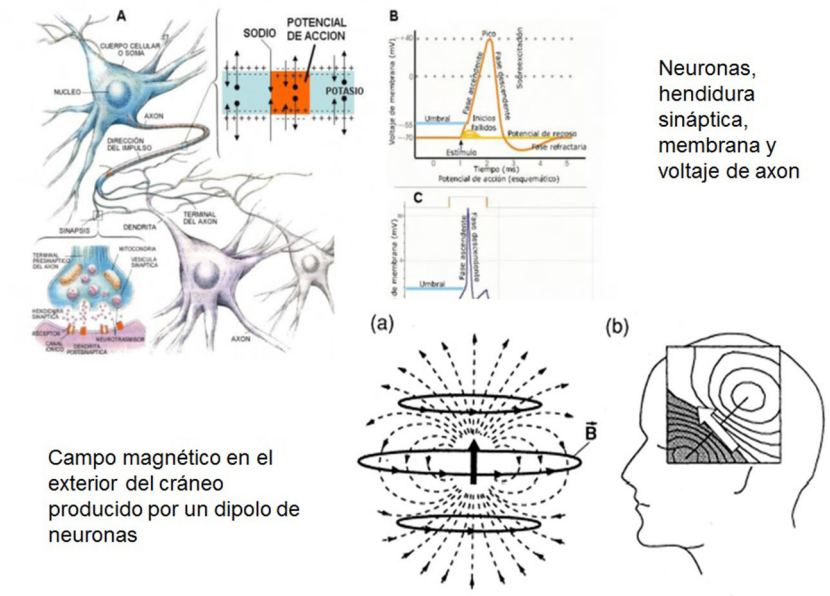


Figura 1-5. (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

Como ejemplo de red oscilatoria de largo alcance descubierta con la MEG resulta interesante destacar las discontinuidades de los movimientos que tienen lugar a frecuencias de 6-9 Hz. La detección de los electromiogramas de dos músculos del dedo índice y de su velocidad en un giro de noventa grados en torno al nudillo ha permitido un análisis comparativo con la señal de referencia MEG que es la del campo magnético producido por el córtex motor primario izquierdo. Como resultado del análisis de coherencias se ha podido concluir que el movimiento discontinuo del dedo a lo largo del recorrido de arco es producido por la llegada al músculo de dos señales cerebrales desfasadas noventa grados. El córtex motor primario es parte de una red extendida de áreas responsables del control motor. El análisis MEG ha puesto de manifiesto las oscilaciones de 6-9 Hz que regulan la interacción entre las componentes de dicha red: el córtex motor

primario contralateral, el córtex premotor, el tálamo y el cerebelo. Dichas interacciones reflejan un control discreto de los movimientos. El cerebelo ha sido asociado con la optimización y corrección de los movimientos actuando sobre la amplitud y programa de actividades musculares *agonistas y antagonistas*. Los resultados indican que los movimientos continuos del dedo son en realidad repeticiones de micro-movimientos cada uno de los cuales consta de un impulso «agonista» proseguido de otro «antagonista». La sincronización de señales oscilatorias que llegan al músculo corresponde a trenes de impulsos activadores e impulsos inhibidores. La combinación de ambos mecanismos es evolutivamente favorable y ventajosa ya que permite descomponer los movimientos reales en sucesivas etapas «diferenciales» dotándoles de reversibilidad. En ausencia de dicha combinación cualquier movimiento, una vez diseñado e iniciada su ejecución, sería irreversible entre sus posiciones inicial y final.

Consideraciones finales

Las ecuaciones de Maxwell resumen la fenomenología de los efectos macroscópicos electromagnéticos y sirven de base para el desarrollo posterior de teorías de interacción de radiación con la materia en escala microscópica. Constituyen también un ejemplo paradigmático de los sucesivos procesos que articulan el método científico. Su génesis es el experimento, que fue posible gracias al desarrollo tecnológico, y sus predicciones contienen también una enorme capacidad de innovación tecnológica. La realidad de los campos o, equivalentemente, la existencia de ondas electromagnéticas y la validez de las transformaciones de Lorentz son aspectos contenidos implícitamente en las ecuaciones. La sociedad de la energía y de la información, la sociedad electromagnética de hoy, hunde sus raíces en esas cuatro ecuaciones diferenciales. Tan enorme fecundidad de comprensión teórica e innovación tecnológica resulta difícil de exagerar y constituye una síntesis paradigmática del quehacer colectivo humano de máximo nivel intelectual, es decir, riguroso, experimental y, por tanto, científico.

La mecánica cuántica como fundamento de la NC

Los átomos

La materia que constituye nuestro cuerpo y la que nos rodea en el entorno terrenal en que nos movemos está constituida por átomos generalmente fabricados en las estrellas. Solamente el hidrógeno se formó en abundancia durante el *Big-Bang*, así como algo de helio y el litio. El resto de los átomos más abundantes en nuestra Biosfera se fabricaron por fusión en los núcleos de las estrellas para dispersarse posteriormente a través del espacio transparente impulsados por la explosión

de sus estrellas madres supernovas. Estos átomos que estudiamos en física atómica y en física de la materia condensada están constituidos por tres tipos de partículas, llamadas fermiones por tener spin ½, y que son: a) el electrón con una masa de $10^{-31}Kg$ y una carga eléctrica negativa, que constituye el quantum de carga de valor $e= 1,6\ 10^{-19}C$, –C significa culombio que es la unidad de carga en el sistema internacional, SI–, b) el protón con una masa de aproximadamente dos mil veces la del electrón y con la misma carga eléctrica pero positiva y c) el neutrón con la misma masa que el protón y carente de carga eléctrica. Los protones y neutrones se agrupan en el núcleo, y –utilizando una imagen clásica e intuitiva, aunque carente de fundamento físico riguroso– los electrones orbitan alrededor de él, a una distancia mínima de *0,53 Ångström* o *0,05 nanómetros* o $5\ 10^{-11}m$. Si bien esta distancia, conocida como radio de Bohr, es pequeña realmente es muy grande comparada con el tamaño del núcleo que es del orden de $10^{-15}\ m$ para el hidrógeno o de $10^{-14}\ m$ para el uranio. El diámetro del átomo total es veinte mil veces mayor que el núcleo en el uranio y cientos de miles de veces mayor en el caso del hidrógeno. Como toda la masa está en el núcleo se puede considerar que la materia está totalmente hueca.

El átomo está en equilibrio debido a la fuerza de interacción eléctrica entre la carga positiva del núcleo y la negativa de los electrones. Los protones están juntos en el núcleo, no obstante su enorme fuerza repulsiva, debido a la fuerza nuclear que los une con más intensidad que la que tiende a separarlos la mencionada repulsión electrostática.

La imagen clásica del átomo que se forjó como resultado de los experimentos de dispersión de partículas alfa llevados a cabo por Rutherford es imposible de justificar en el marco del electromagnetismo clásico. Según la teoría del electromagnetismo inferida de las ecuaciones de Maxwell una partícula cargada, como el electrón, orbitando en torno a un punto está acelerada centrípetamente y debe emitir, por tanto, ondas electromagnéticas. Estas ondas transmiten energía que debe surgir, para su necesaria conservación, de la energía cinética del electrón. Por tanto, según radia ondas y energía, el electrón debe sufrir un progresivo decaimiento de su velocidad y acabar inexorablemente precipitándose en el núcleo. En 1913, Niels Bohr, haciendo uso del concepto de cuantificación de la energía radiada por un cuerpo introducido *ad hoc* por Planck en 1900 para explicar la curva de radiación experimental del cuerpo negro, generalizó su aplicación a los estados de energía de los electrones en los átomos. Bohr, yendo más lejos que Planck, generalizó la cuantificación hasta entonces restringida a la energía intercambiada entre sistemas y postuló la cuantificación de la energía de los posibles estados de energía de los electrones. Según este postulado un electrón en un estado estacionario o estado estacionario permitido, para hablar con mayor propiedad, no puede emitir energía de modo continuo ya que esta es constante en ese estado. Sí puede absorber o emitir energía elec-

tromagnética en paquetes que coinciden con las distancias en energía entre sus estados estacionarios. Cuando un electrón de un átomo recibe un chorro de luz de frecuencia ν, está recibiendo un chorro de fotones de energía $h\nu$, según la fórmula de Planck que utilizó para explicar la radiación del cuerpo negro (*h* es la constante de Planck de valor $h=6{,}610^{-34}$ *Julios* multiplicado por *segundo*). Si esta energía es igual a la diferencia de energía de dos estados estacionarios del átomo, el electrón puede recibir un impacto del fotón y absorber su energía, absorbiendo al propio fotón que desaparece, y transitando al estado de energía superior separado una energía del estado inicial igual a $h\nu$. Del mismo modo el electrón puede emitir ahora un fotón de energía $h\nu$, y decaer al estado inicial. Lo que aquí es relevante es estimar y conocer las distancias en energía entre los estados estacionarios de los electrones en los átomos, denominados estados atómicos.

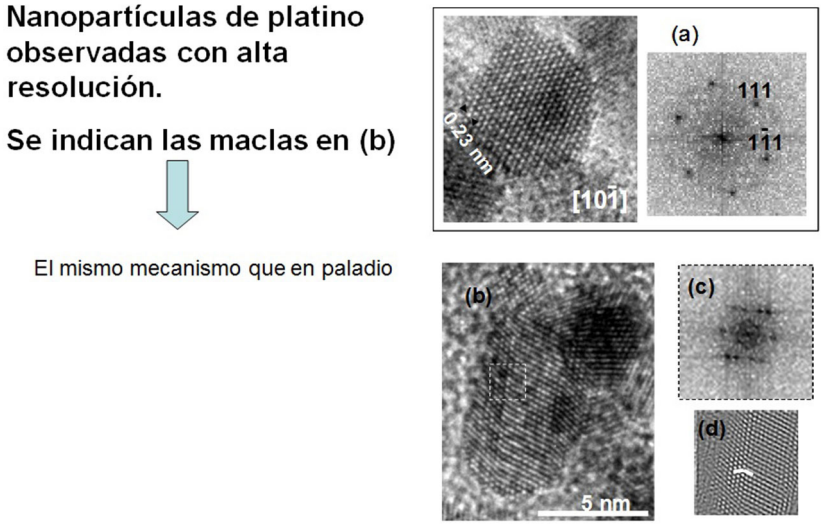


Figura 1-6. Nanopartículas de platino observadas con alta resolución (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

La denominada vieja teoría de los cuantos que nace de la hipótesis de Planck, se había plasmado en las reglas de cuantificación de Bohr-Sommerfeld. Estas reglas fueron introducidas empíricamente sobre relaciones ciertas de la mecánica clásica, haciendo uso del denominado principio de correspondencia.

Un ejemplo magnífico por su transcendencia histórica de aplicación de este método es el caso del átomo de hidrógeno. Empecemos con el planteamiento de la mecánica clásica. Un electrón que gira según un movimiento circular en torno a un protón a una distancia *r* tiene una energía

potencial que es su carga *e*, multiplicada por el potencial electrostático que crea el protón a una distancia *r* de él. El potencial es $e/4\pi\varepsilon_0 r$, donde *e* es la carga positiva del protón. La energía cinética del electrón es $1/2mv^2$, siendo *m* la masa del electrón y *v* el módulo de su velocidad. Si igualamos la fuerza atractiva de Coulomb ejercida sobre el electrón por el protón, $e^2/4\pi\varepsilon_0 r^2$ a su fuerza centrípeta obtenemos, mv^2/r, obtenemos:

$$e^2/4\pi\varepsilon_0 r^2 = mv^2/r. \qquad [1]$$

Hasta aquí todo es mecánica clásica conocida. Ahora introduzcamos como regla de cuantificación una restricción a los posibles valores del momento angular del electrón. Nótese que como en la descripción kepleriana del movimiento de los planetas, el momento angular o momento de la cantidad de movimiento solo tiene una componente según la dirección perpendicular al plano que contiene a la circunferencia y es una constante del movimiento por tratarse de un caso típico de fuerza central, $\boldsymbol{l}=l_z=\boldsymbol{r}x m\boldsymbol{v}=rmv$. Hemos llamado *z* a la dirección perpendicular a la circunferencia. La restricción consiste simplemente en postular que esta componente *z* del momento angular multiplicada por 2π debe ser igual a un entero, *n*, multiplicado por la constante de Planck, *h*. Esto es:

$$2\pi rmv=2\pi l_z=nh. \qquad [2]$$

Si expresamos la fuerza centrípeta en función del momento angular obtenemos:

$$mv^2/r=l_z^{\,2}/mr^3, \qquad [3]$$

e igualando a la fuerza de Coulomb, tras introducir la cuantificación de l_z, uno llega a,

$$e^2/4\pi\varepsilon_0=nh^2/mr, \qquad [4]$$

donde ε_0 es la denominada permitividad del vacío igual a, $8{,}85\ 10^{-11} Fm^{-1}$. (*F* es el faradio o unidad de capacitancia en el sistema internacional o SI). La relación implica que el radio está necesariamente cuantificado,

$$r = n\ 4\pi\varepsilon_0 h^2/me^2 = n\ r_B, \qquad [5]$$

donde r_B es el radio de Bohr igual a *0.529 Å*.

La energía del electrón, *E*, suma de la energía cinética y potencial depende, de *r*,

$$E= e^2/4\pi\varepsilon_0 r+1/2mv^2= e^2/4\pi\varepsilon_0 r+ l_z^{\,2}/2mr^2. \qquad [6]$$

Sustituyendo *r* y l_z por sus valores cuantizados finalmente llegamos a la siguiente expresión de la energía,

$$E= -R/n^2, \qquad [7]$$

donde $R =-e^2/8\pi\varepsilon_0 r_B$ es conocida como constante de Rydberg y tiene un valor de *13,6 eV*. La unidad eV es la energía de un electrón en un potencial de un voltio y es por tanto equivalente a $1{,}6\ 10^{-19}\ J$.

Partiendo de la ecuación [1] de Newton correspondiente a las fuerzas que actúan sobre el electrón e introduciendo la condición de cuantificación del momento angular [2] hemos obtenido la cuantificación tanto de los radios de las posibles órbitas como la de los posibles valores de la energía, en función del número cuántico *n*.

Según la hipótesis de Bohr, cuando un electrón salta de un nivel de energía caracterizado por *n* a otro caracterizado por *m*, el fotón que media en el salto tendrá una energía $h\nu$, dada, según [7], por,

$$h\nu=-R(1/n^2 - 1/m^2). \qquad [8]$$

La cuantificación de los niveles de energía postulada por Bohr implica la cuantificación de la energía de los fotones absorbidos o emitidos durante el proceso de tránsito entre niveles, lo que constituyó la hipótesis de Planck. De [8] resulta evidente que según aumenta el número cuántico *n* la diferencia de energía entre un nivel y su inmediato adyacente *n+1* va disminuyendo hasta anularse cunado *n* tiende a infinito. La diferencia de los niveles de energía es tanto más acusada cuanto menor sea el número cuántico *n*. El mayor salto de energía posible es el que corresponde a una transición entre el estado fundamental o de más baja energía, *n=1*, y el estado caracterizado por *n infinito*, estado este último en que la energía es cero y que, por tanto, describe el estado del electrón arrancado del átomo. El fotón capaz de arrancar al electrón del estado fundamental del átomo de hidrógeno requeriría una energía de *13,6 eV* para conseguirlo. Ese electrón quedaría libre y podría acelerarse con un campo eléctrico. Este fenómeno físico es fundamental en el denominado efecto fotoeléctrico que consiste en producir corriente con electrones arrancados de los átomos por colisiones con fotones o luz generalmente ultravioletas. La radiación ultravioleta se extiende en el rango de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 1 nanómetro lo que corresponde a energías por fotón entre *3,1* y *1.250 eV*. Nótese que la frecuencia de un fotón es la velocidad de la luz, $c= 3\ 10^8\ m/s$, dividida por su longitud de onda. El efecto fotoeléctrico explicado por Einstein en 1905, generalizando la hipótesis de Planck, le valió el premio Nobel de 1921.

El átomo de hidrógeno postulado por Bohr nos ha servido de ejemplo de aplicación de la vieja teoría de los cuantos. Desde 1913 a 1926 una actividad febril de la comunidad científica que conllevó tanto la obtención de nuevos resultados experimentales importantísimos en la escala atómica así como el desarrollo de una teoría rigurosa conocida como Mecánica Cuántica permitió cerrar una de las páginas más importantes de la historia de la física.

La contribución del Instituto Rockefeller de Madrid

Es interesante señalar que en Madrid la escuela de Física creada por Blas Cabrera en torno al viejo Instituto de Investigaciones Físicas creado

bajo los auspicios de la Junta para Ampliación de Estudios sorprendió al mundo científico por una contribución importante a los descubrimientos de aquel momento histórico. Y sorprendió por la falta de tradición en investigación científica que caracterizaba a España en comparación al resto de los países europeos más avanzados. Los años comprendidos entre 1915 y 1936 que coinciden con ese momento de máxima productividad marcan también un hito de máxima relevancia para la historia intelectual de España, ya que fueron esos años los que vieron nacer la investigación experimental en su suelo. Pero lo extremadamente curioso fue que este nacimiento alumbró unos resultados plenos de madurez y muy próximos a los obtenidos por la primera línea de investigación europea. Las medidas de la susceptibilidad magnética de los compuestos de tierras raras llevadas a cabo por Cabrera y Velayos permitieron comprobar experimentalmente la validez de las reglas de Hund que rigen el cálculo de los términos espectrales de los átomos de muchos electrones. Miguel Catalán descubrió, trabajando con Sommerfeld, los multipletes atómicos. Enrique Moles creó un magnífico laboratorio de Química. En alguna de las celebraciones de las famosas Conferencias Solvay que se crearon como fruto de la amistosa relación científica que establecieron Planck y Einstein tras conocerse después de que Einstein utilizara la hipótesis de Planck para explicar el efecto fotoeléctrico, puede verse entre los cuarenta mejores físicos y químicos de la época, más del cincuenta por ciento de los mismos premios Nobel a D. Blas Cabrera como un invitado más entre tan elitista compañía.

Las reglas de cuantificación

La Mecánica Cuántica como disciplina que abren Planck y Einstein y que cierra Dirac unificando la Mecánica Ondulatoria y la Mecánica de Matrices, desarrolladas por de Broglie, Schrodinger, Bohr Pauli, Heisenberg, Fermi y Born, es una disciplina que no se ha visto comprometida por ninguno de los miles de experimentos relevantes llevados a cabo en la escala atómica y subatómica. Su carácter probabilístico y su renuncia al determinismo, manifestada explícitamente por el principio de indeterminación de Heisenberg han motivado una especie de descontento o insatisfacción en el mundo de la filosofía de la ciencia que ha alcanzado a algunos de los propios científicos que la crearon. Célebre es el caso de Einstein que insatisfecho con las implicaciones filosóficas de la teoría, a la que había contribuido tanto a establecer, le dijo a Bohr que Dios no podía jugar a los dados. La respuesta de Bohr ilustra el enorme nivel de inteligencia en el que se desarrolló el diálogo: «¿Quien eres tú para decir lo que tiene que hacer Dios?».

Los físicos de hoy, aunque no entiendan la Mecánica Cuántica, están satisfechos de utilizarla para explicar sus experimentos y aquellos que están más activos en la investigación no tienen mucho tiempo para pensar

en sus dificultades lógicas y las explican o justifican asumiendo que el comportamiento de los objetos a la escala de los ångström y nanómetros no tiene por qué ser familiar para nuestra intuición adquirida por observaciones realizadas a la escala de nuestros sentidos. Son comportamientos bastante extraños pero lo suficientemente bien fundados y apoyados por la experiencia como para hacer uso de ellos sin más.

Para ilustrar la relación de la NC con la mecánica cuántica es interesante considerar que la escala del nanómetro se encuentra en la zona en que la cuantificación de los estados atómicos comienza a desfigurarse en el continuo que caracteriza a la distribución de estados en el mundo macroscópico.

La cuantificación postulada por Bohr y reflejada en la relación [4], es un caso particular de las reglas de cuantificación de Bohr-Sommerfeld aplicadas a la acción de partículas clásicas que realizan movimientos periódicos y cuyas consecuencias pasamos a analizar.

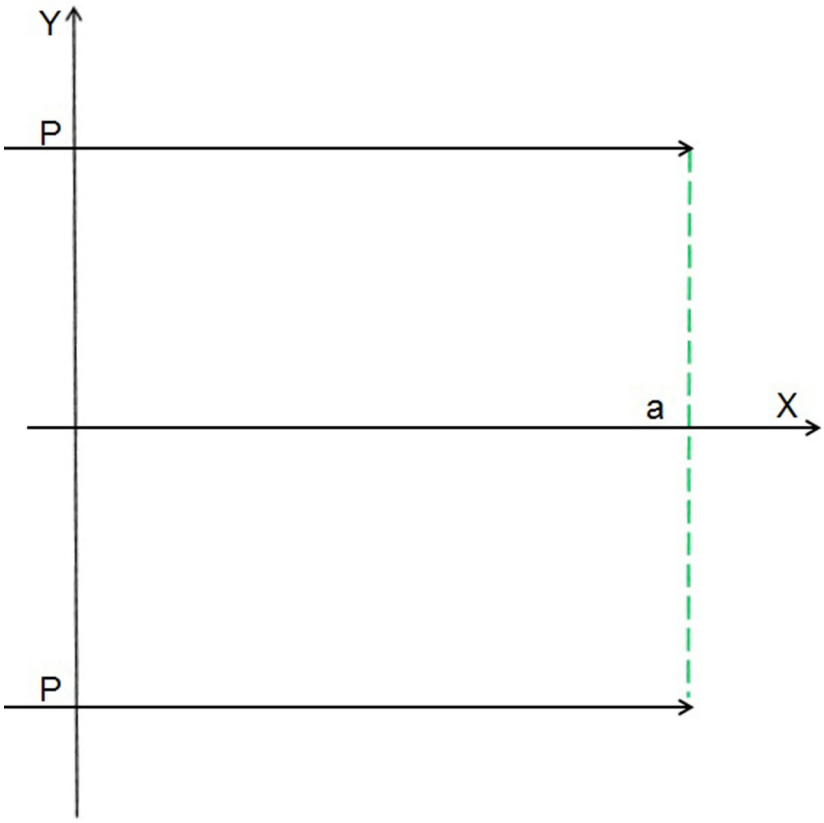


Figura 1-7. (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

Consideremos el movimiento unidimensional de una partícula entre dos paredes, separadas una distancia *a*. La partícula se mueve a los largo de una dirección con velocidad *v* y al llegar a la pared rebota invirtiendo su velocidad hasta que vuelve a alcanzar la otra pared donde vuelve a reflejarse de nuevo. En cada reflexión el momento lineal o cantidad de movimiento de la partícula, $p=mv$, invierte su signo manteniéndose su módulo o valor absoluto. Si representamos la posición de la partícula en el eje de las *x* y su momento en el eje de las *y* obtendríamos una imagen como la dibujada en la figura 1-7.

Esta imagen representa el llamado espacio de las fases que en este caso de movimiento unidimensional es de dimensión dos: *x, y*. El postulado de Bohr equivale a establecer que el área del rectángulo definido por la partícula en el espacio de las fases, $S=2pa$, debe ser necesariamente un entero *n* multiplicado por la constante de Planck, *h*.

Por tanto, podemos escribir,

$$S=2pa=nh. \qquad [9]$$

S es una magnitud llamada acción y tiene las mismas unidades que *h*. Como cualquier acción en un movimiento periódico, como es el de la partícula en el pozo de potencial comprendido entre las dos paredes, debe ser múltiplo de *h*, una acción elemental $\Delta S= \Delta p \Delta a$ no puede ser menor que *h*, por lo que debe verificarse siempre la siguiente desigualdad,

$$\Delta p \Delta a > h/2. \qquad [10]$$

Esta relación derivada por vez primera por Heisenberg en 1927 se conoce como relación de indeterminación. Su trascendencia es fundamental ya que pone de manifiesto que no es posible conocer con precisión la posición y la velocidad de una partícula simultáneamente. Las relaciones de incertidumbre como establece la mecánica cuántica no se restringen a la posición y al momento de una partícula sino que su validez se extiende a cualquier par de las llamadas variables conjugadas en la mecánica clásica o pares de operadores que no conmutan como se conocen en el tecnicismo cuántico, así sucede también, por ejemplo, para la energía y el tiempo. No vamos a ir más lejos en detalles, ya que la expresión [10] permite comprender la ubicación de la NC en lo que se refiere al carácter discreto de los estados de energía.

La cuantificación de la acción *S*, descrita por la relación [9] implica que el momento de la partícula *p* está cuantificado y puede escribirse como,

$$p_n=nh/2a. \qquad [11]$$

A partir de la cuantificación de *p* se derivan automáticamente la cuantificación de la velocidad y la de la energía cinética,

$$v_n=nh/2ma \text{ y } E_n= (nh/a)^2/8m. \qquad [12]$$

Conviene aquí recordar que en la mecánica clásica la velocidad y la energía de las partículas no están cuantificadas.

Consideremos ahora un cambio al estado más próximo en energía de una partícula que se encuentra en el estado *n* y que corresponde, por tanto, a una transición al estado *n+1*. El incremento de velocidad será, según *[12]*, $\Delta v_n = h/2ma$. Podemos considerar que el efecto de cuantificación o el carácter discreto de los estados será tanto más tangible cuanto mayor sea la variación relativa de velocidad que supone la transición más pequeña entre estados, esto es cuanto mayor sea el cociente $\Delta v_n/v_n$. Pero, según [12],

$$\Delta v_n/v_n = 1/n. \qquad [13]$$

Si *n* es muy grande $\Delta v_n << v_n$ y el sistema no percibe la cuantificación y la velocidad varía continuamente. Podemos concluir que para números cuánticos, *n*, muy grandes la partícula obedece a la mecánica clásica ya que la cuantificación no afecta de modo alguno el carácter continuo de sus posibles variaciones. Sin embargo, para valores pequeños de *n* el carácter discreto o discontinuo de las transiciones se manifiesta de forma sustancial.

Veamos un ejemplo que ilustra la tenue transición que separa la descripción clásica de la cuántica. Consideremos que la partícula que se mueve entre las paredes es una bola de billar. La masa de la partícula es $m=0,1\ Kg$ y las dimensiones de la mesa son del orden de un metro, $a=1m$. En este caso $\Delta v_n = h/2ma = 10^{-33} m/s$. Como la velocidad de la bola es aproximadamente $0,01m/s$, el incremento relativo de velocidad para un salto cuántico de la bola es $\Delta v_n/v_n = 10^{-31}$, por lo que puede considerarse de todo punto continuo.

En el caso de un electrón en un átomo, su masa es de $10^{-31} Kg$ y se mueve en un pozo de un Ångström o $10^{-10}\ m$. En este caso $\Delta v_n = h/2ma = 10^6 m/s$. Si la velocidad del electrón es superior a $10^6\ m/s$ el salto de velocidad podría considerarse casi continuo, pero los electrones en los átomos se mueven a velocidades próximas a $10^6\ m/s$ por lo que el salto representa un *100%* de incremento relativo de velocidad y su carácter cuántico es notablemente manifiesto.

La cuantificación de estados y la NC

Un electrón que se mueve libremente a lo largo de una cadena de *N* átomos separados entre ellos una distancia *a*. Tendrá, según [12], una velocidad $v_n = nh/2mNa$. En esta situación el salto entre dos estados consecutivos corresponde $a\Delta v_n = h/2mNa$. Como se aprecia el salto relativo de velocidad es independiente del número *N* que es el número de átomos de la cadena y solo depende de *n*. Sin embargo, en general, el número de electrones que hay en la cadena depende de *N*. Supongamos que cada átomo de la cadena contribuye con un electrón móvil, como sucede con

el caso de los átomos de metales alcalinos. El carácter fermiónico de los electrones –que es equivalente a decir que el hecho de que su spin sea semi-entero, concretamente ½– determina que se cumpla el Principio de Exclusión de Pauli, el cual establece que dos fermiones no pueden tener los mismos números cuánticos. Como cada spin puede tomar dos orientaciones posibles, hacia arriba o hacia abajo, cada número cuántico *n* está ocupado por dos electrones. Si existe, como hemos dicho, un electrón por átomo, habrá en total *N* electrones móviles que ocuparan todos los estados con *n* comprendidos entre *n=1* y *n=N/2*. En este caso la energía del sistema solo podrá variar por un salto de cualquiera de los dos electrones que ocupan el nivel de energía máxima que corresponde a $n_{max}=N/2$, ya que un salto de cualquiera de los que ocupan niveles inferiores está prohibido por que aquel nivel al que subirían está ocupado. El salto de energía entre el estado de número cuántico n_{max} *y el* $n_{max}+1$ es, de acuerdo con [12], $\Delta E_n=2n_{max}\Delta n h^2/8mN^2a^2$ y se puede apreciar que si $n_{max}=N/2$, se verifica que,

$$\Delta E_n/E_n = 2/n = 4/N. \qquad [14]$$

La relación [14] incluso aunque se haya obtenido despreciando la interacción electrostática entre los *N* electrones de la cadena y restringido su validez para el caso particular de electrones confinado en una dimensión, puede considerarse una ecuación fundamental de la NC. De hecho pone de manifiesto cómo la separación relativa de niveles es del orden del 1% para el caso de que la cadena conste de 100 átomos que es el número que introdujimos para definir la escala nanométrica.

Es importante constatar que si los electrones fueran bosones y pudieran ocupar todos el mismo estado el *n* máximo correspondiente al estado fundamental o de menor energía sería $n_{max}=1$. El aumento mínimo de energía correspondiente a la transición de una partícula, de las *N* totales, al estado *n=2* sería entonces,

$$\Delta E_n/E_n = 2.$$

Esta variación relativa de energía es *N* veces mayor que la correspondiente al caso de fermiones. Por esta razón es posible que un material sea superconductor. Los pares de electrones acoplados en un superconductor y formando pares de Cooper de spin cero, son bosones, y en el estado fundamental se encuentran todos en el mismo estado cuántico o de $n=n_{max}=1$. La conductividad tiende a infinito porque los portadores de carga que son los pares de Cooper no pueden intercambiar energía por choques. Para que un par de Cooper choque con otro e intercambie energía esta debe ser al menos del valor de la separación al estado más próximo que sería el de n=2, pero esta separación es muy grande. La energía que puede transferirse entre el medio y un par de Cooper es del orden de k_BT, como veremos en el siguiente párrafo, y si este valor es inferior a la diferencia de energías entre los estados *n=1* y *n=2*

no puede haber absorción y el par de Cooper se mueve libremente sin sufrir choques.

La importancia de la cuantificación de niveles se comprende considerando la influencia de la temperatura en el estado de un sistema como analizamos a continuación.

La temperatura y la NC

La distancia entre niveles de energía es el parámetro fundamental que gobierna el comportamiento del sistema con la temperatura. Como se conocía desde los tiempos de Maxwell y Boltzmann la temperatura es la energía media que un sistema posee por grado de libertad. Los grados de libertad coinciden con la dimensión del espacio en que las partículas del sistema pueden moverse. Un electrón moviéndose libremente por el espacio posee tres grados de libertad, si se mueve en el plano tiene dos y se está obligado, como en nuestro ejemplo anterior, a moverse en una dirección tiene uno. Cuando un sistema está en contacto con otro mucho más grande de temperatura fija llamado foco, alcanza al cabo de un cierto tiempo la misma temperatura que el foco. En otras palabras, transcurrido un cierto tiempo, con el contacto térmico establecido, las temperaturas de ambos sistemas tienden a igualarse. Esta observación universalmente repetida es la que nos permite asegurar que, al cabo de un cierto tiempo en la mesa, el café contenido en la taza se enfriará hasta alcanzar los veinte grados que hay en la habitación. El café constituye en este ejemplo el sistema pequeño, mientras todas las moléculas de la habitación constituyen el foco. Lo que Boltzmann y Maxwell explicaron es el mecanismo mediante el cual la temperatura del café disminuye. La idea es la siguiente. Supongamos que un sistema tiene partículas idénticas y que cada una de ellas tiene un conjunto discreto de estados cuánticos de distintas energías y que en orden creciente podemos describir como, $e_1, e_2,...e_i$. La energía del sistema será $n_1e_1+ n_2e_2+...+ n_ie_i+....$, donde n_i es el número de partículas que se encuentran en el estado de energía e_i. Los valores de n_i están constreñidos a sumar N que es el número total de partículas idénticas que contiene el sistema. La energía del sistema podría variar mediante dos procesos diferenciables. Primero podría variar porque de alguna forma, manipulando el sistema desde el exterior como sería, por ejemplo, variando sus dimensiones, los niveles de energía cambiarán manteniéndose constante sus ocupaciones n_i. La otra forma implicaría un cambio en las ocupaciones de los niveles manteniéndose constantes sus valores respectivos de energía. Mientras el intercambio de energía con el exterior producido por cambios de la energía de los niveles se conoce como intercambio por trabajo mecánico, el intercambio generado por variaciones de la ocupación de los niveles se conoce como intercambio térmico.

Mientras la temperatura de la taza de café disminuye hasta igualarse con la de la habitación se están produciendo cambios en la ocupación de los niveles de energía de las moléculas del café. La energía promedio de estas moléculas de café viene dada por k_BT, donde k_B es una constante denominada constante de Boltzmann que vale $1{,}38\ 10^{-23}\ JK^{-1}$ como ya vimos al esbozar más arriba la teoría elemental de la información y T es la temperatura absoluta del café, que estará comprendida entre la inicial suya y la de la habitación. El equilibrio se alcanza cuando la energía media por grado de libertad de las moléculas de café se iguale a la energía media de las moléculas de la habitación, lo que equivale a que se igualen las temperaturas de ambas o también a que la temperatura del café baje hasta igualar la de la habitación. Este último aspecto es muy importante y está ligado al hecho de que el foco sea mucho mayor que el sistema. Si es así, la energía que intercambian foco y sistema si bien cambia la temperatura del sistema no cambia la del foco. Cuando se intercambia energía en cantidad ΔE la temperatura del foco cambia en $\Delta T=\Delta E/f$, donde f es el número de grados de libertad del sistema, típicamente $3N$, si tiene N partículas moviéndose en tres dimensiones. Sin embargo la temperatura del foco cambia en $\Delta T_F = -\Delta E/f^*$, siendo f^* el número de grados de libertad del foco que será mucho mayor que f por hipótesis, en concreto tiene que ser, para ser foco, tantas veces mayor como para anular ΔT_F. Foco es por tanto un sistema que puede intercambiar energía con otro más pequeño sin cambiar su temperatura.

Con estos conceptos ya podemos entender lo que Boltzmann y Maxwell establecieron y la importancia fundamental que su hallazgo tuvo para la física. En concreto, definieron cuales eran las ocupaciones de los niveles de energía de un sistema cuando alcanzaba el equilibrio con un foco térmico. O dicho de otra forma, definieron las ocupaciones de los niveles de energía cuando el sistema se encontrara a la misma temperatura que el foco que es equivalente a decir que el sistema se encontrara en equilibrio térmico con el foco. Según su teoría estadística la probabilidad de ocupación de un nivel concreto de energía e_i es proporcional a la exponencial de $-e_i/k_BT$ según la expresión,

$$P_1(E_i) = \frac{1}{Z} e^{-\frac{E_i}{k_B T}}. \qquad [16]$$

Donde la constante es la inversa de Z, llamada función de partición Z del sistema y es la suma de todos los estados de $e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$; $Z=\Sigma\ e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$, donde la suma se extiende a todos los estados posibles. Si hay $g(E_i)$ estados con el mismo valor de energía E_i, la suma a todos los estados se puede condensar en la suma a todos los valores posibles de energía $Z=\Sigma\ g(E_i)e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$, donde, insistimos, la suma se restringe ahora a todos los valores de E_i. La función $g(E_i)$ se conoce como densidad de estados. Nótese que la probabi-

lidad de que el sistema tenga una energía E_i es la suma de las probabilidades de que ocupe alguno de los estados de dicha energía,

$$P(E_i) = \frac{g(E_i)}{Z} e^{-\frac{E_i}{k_B T}}. \quad [17]$$

Resulta curioso comprobar que la distribución de probabilidades de ocupación de niveles o distribución de Maxwell-Boltzmann dada por [16] o [17] conduce inmediatamente a la condición de equilibrio de un sistema en contacto con un foco térmico definido por la termodinámica y que corresponde al estado de mínima de la energía libre del sistema. La energía libre, *F*, se define como *F=E-TS*, donde *E* es la energía interna del sistema, *T* su temperatura igual a la del foco en equilibrio y *S* la llamada entropía. Consideremos el sistema formado por una sola partícula, la probabilidad de que tenga una energía E_i es proporcional a $g(E_i)e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$. Si tomamos logaritmos en los dos miembros de [17] obtenemos,

$$\ln P = (-E_i / k_B T) + \ln(E_i). \quad [18]$$

La probabilidad de ocupación de un nivel en el equilibrio será máxima cuando sea máximo $-E_i + k_B T \ln(E_i)$ o sea mínimo su opuesto $E_i - k_B T \ln(E_i)$. Si como de hecho sucede $k_B \ln(E_i)$ es la entropía, *S*, del sistema de una sola partícula, esta condición de mínimo equivale a que *F* sea mínimo.

La importancia de la temperatura en cualquier fenómeno físico dota a esta variable de una categoría especial como variable reina de todos los fenómenos naturales. El parámetro relevante es $e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$ ya que nos suministra la información requerida para conocer las ocupaciones de los distintos niveles de energía en función de la temperatura del sistema, supuesto, eso sí, que se encuentra en equilibrio con el foco o a su misma temperatura *T*.

En el caso de los electrones, hemos visto que se ocupan todos los niveles de menor energía pero cada uno se llena con dos electrones. A cero grados kelvin el equilibrio termodinámico corresponde al estado fundamental. Si razonamos sobre nuestro ejemplo anterior de un conjunto de *N* electrones en un segmento de longitud *Na*, sabemos que en el estado fundamental están llenos todos los estados cuánticos hasta el de valor *n=N/2*. Si aumenta la temperatura del foco, en que se encuentra nuestro sistema, los electrones que se encuentran en los niveles inferiores no pueden absorber energía del foco ya que al hacerlo deberían ocupar niveles superiores ocupados. Solamente aquellos que están en una franja de energía de anchura $k_B T$ en torno al nivel de energía mayor podrían absorber energía y pasar a los niveles desocupados superiores. El nivel correspondiente a n_{max} se conoce como nivel de Fermi. Se observa que a temperatura ambiente, es decir, a *T= 293 K*, el valor de $k_B T$ es de *0,02 eV*. Consecuentemente, a temperatura ambiente se pueden producir cambios de energía en el sistema de electrones si la distancia entre el nivel de Fermi y los niveles de energía superior distan cantidades del orden de *0,02 eV* o son más pequeñas.

Utilizando la expresión [11] podemos estimar la energía del nivel de Fermi, o energía de Fermi, correspondiente a $n=N/2$ y que resulta $\Delta E_{(N/2)}=h^2/8mNa^2$, tomando para $a=1A$, el valor de $\Delta E_{(N/2)}$ es del orden de $10^{-19}J/N$ o de $1eV/N$. Si N es del orden de 100 el salto de energía coincide con la energía térmica a temperatura ambiente.

Si la longitud de la línea de N átomos es del orden de una micra o $10^{-6}m$ se necesitaría agrupar del orden de 10.000 átomos supuestos separados una distancia de $1A$. En este caso la diferencia de energía entre el nivel de Fermi y el primer excitado sería de $0,0001\ eV$ dos órdenes de magnitud inferior a la energía térmica a temperatura ambiente.

Al ser los electrones próximos al nivel de Fermi los únicos que pueden intercambiar energía térmica o adquirir energía de campos externos, son los que condicionan las propiedades físicas del material, como son sus propiedades térmicas, ópticas, eléctricas, y magnéticas. Es importante ver que el espectro de energía de un sistema material formado por el conjunto de valores posibles de energía de los estados de sus partículas puede considerarse continuo o discreto según sea el valor relativo de $\Delta E_n/E_n$. La NC trata con sistemas cuyo espectro de energía está caracterizado por valores menos discretos que los atómicos pero muchísimo menos continuos que los correspondientes a los sólidos macroscópicos. Por otra parte la distancia en energía entre su nivel de Fermi y los primeros excitados es del orden de la energía térmica k_BT a temperatura ambiente. Estas dos características conducen a algunas de las muy peculiares propiedades electrónicas de la materia en su escala nanométrica.

La función de onda y la ecuación de de Broglie y su evolución con los campos magnéticos. Partículas y Ondas

Una partícula descrita por la mecánica cuántica posee una función de onda que es un número complejo en el que tanto su módulo como su fase dependen de la posición y del tiempo. Podemos escribir cualquier número complejo en la forma $\psi=Ae^{i\theta}$ donde A y θ, módulo y fase respectivamente, son números reales. La parte real del número complejo es $A\cos\theta$ y la parte imaginaria $A\mathrm{sen}\theta$. Fue Max Born quien interpretó en la forma generalmente aceptada el significado de la función de onda. El cuadrado del módulo que se obtiene de multiplicar ψ por su complejo conjugado ψ^* es la probabilidad de encontrar a la partícula en un punto dado r en un instante t. No debe olvidarse que tanto el módulo A como la fase θ dependen de r y t. La fase nos permite conocer la denominada corriente de probabilidad. Si la fase θ varía en un punto al movernos en torno a ese punto, debe existir una dirección en la que esa variación sea máxima. Fijamos entonces esa dirección y medimos a lo largo de ella cuanto varía la fase por unidad de longitud en ese punto, un vector según la mencionada dirección de máxima variación y cuyo módulo sea la variación por unidad de longitud se llama el gradiente de la fase en ese punto. La corriente de

probabilidad, *J*, asociada a la función de onda en un punto coincide con el producto de la constante de Planck *h* por el inverso de la masa de la partícula, por el cuadrado del módulo (A^2) y por el gradiente de la fase $grad\theta$,

$$J=(h/m)A^2 \, grad\theta. \qquad [19]$$

El significado de la función de onda fue asunto controvertido en los albores de la mecánica cuántica. Mientras científicos de la talla de Schrödinger opinaban que el cuadrado del módulo describía la densidad de carga del electrón que se encontraría entonces difuminado formando una nube de carga con puntos de distinta densidad, otros como Born opinaban que el electrón era un punto y que el cuadrado de la función de onda informaba de las distintas probabilidades de encontrarle en cada punto del espacio. Como ya apuntábamos más arriba fue finalmente la interpretación de Born la que se impuso con el tiempo. Es obvio que la probabilidad de encontrar al electrón en algún punto del espacio es 1. Por esta razón si sumamos el cuadrado de la función de onda en todos los puntos del espacio debemos obtener 1. Esta es la condición de conservación de la partícula. El hecho de que exista una corriente de probabilidad nos describe un hecho que parece trivial pero que no lo es. Supongamos que a lo largo del tiempo varían los cuadrados de la funciones de onda en los puntos del espacio. No obstante esta posible variación, las sumas de los cuadrados de las funciones de onda en todos los puntos debe ser 1 en cualquier instante. A este principio de conservación hay que añadirle el carácter local de tal conservación que se manifiesta con la existencia de la corriente de probabilidad. La condición de conservación podría cumplirse si, por ejemplo, la probabilidad de encontrar la partícula en un punto *r*, disminuye con el tiempo según aumenta en otro punto distante *r´*. La existencia de corriente de probabilidad enseña que si la probabilidad disminuye en un punto y aumenta en otro es porque existe una corriente de probabilidad que transporta la probabilidad entre *r* y *r´*. La corriente de probabilidad implica una conservación local de la probabilidad, no solo una conservación en sentido general.

Es muy instructivo observar como en un conjunto de *N* bosones, todos en el mismo estado y por tanto en la misma función de onda, que define dicho estado, las concepciones de Schrödinger y Born coinciden. Si es $A^2(r,t)$ la probabilidad de encontrar a una partícula en *r* en el instante *t*, el número de partículas que habrá en ese punto ese instante será $NA^2(r,t)$, por lo que $A^2(r,t)$ coincide con la densidad de partículas en ese punto. De la misma manera la corriente de probabilidad coincide con la densidad de corriente $J=(h/m)NA^2 \, grad\theta$.

La densidad de corriente de probabilidad se obtiene a partir de la ecuación de Schrödinger como proporcional a la parte real del valor esperado del operador $p/m=-ihgrad\psi$. Cuando se calcula esa parte real considerando que $\psi=Ae^{i\theta}$ se obtiene la expresión [19]. Por tanto, se infiere directamente que la parte real de la cantidad de movimiento de una partícula es propor-

cional al gradiente de la fase. Un electrón libre que se mueve sin estar sometida a fuerza alguna en un volumen *V* se describe mediante una onda plana de la forma $\psi=(1/V)^{1/2}e^{i\vec{k}\vec{r}}$, que constituye una onda plana de vector de onda $\vec{k}=2\pi/\lambda$, donde el momento del electrón es $\vec{p}=\hbar\vec{k}$. La fase es $\vec{k}\vec{r}$, por lo que se deduce que su gradiente es el vector de onda $\vec{k}$, que salvo un factor *h* es el momento del electrón. La relación entre la cantidad de movimiento de una partícula, *p*, y su longitud de onda, λ, se conoce como relación de de Broglie y conecta los dos caracteres que de forma tan contradictoria para nuestra mente posee una partícula cuántica: el de partícula y el de onda. Este carácter dual permite que un chorro de electrones o de fotones que alcanza una pantalla con dos rendijas pueda generar una figura de difracción análoga a la que generaría una onda en el célebre experimento de Young, siempre que la distancia entre rendijas sea del orden de las longitudes de onda de las partículas. Pero basta que se tape una de las rendijas para que las partículas se comporten como partículas. Toda esta sorprendente y bella fenomenología está descrita con detalle en el libro de Feynman (5) dedicado a la mecánica cuántica *Lectures on Physics.*

La relación $p=h/\lambda$, relaciona el momento *p* y la energía de una partícula libre, que es energía cinética y vale $p^2/2m$, con su longitud de onda λ. Podemos, como hicimos antes con la velocidad, estimar la longitud de onda de una bola de billar. El momento es el producto de la masa, *0,1 Kg,* por la velocidad, *0,001m/s*, por lo que resulta $p=10^{-3}Kg.m/s$. Como $h=6,6\ 10^{-34}\ J*s$, la longitud de onda de la bola es $\lambda=6,6\ 10^{-31}m$. En el otro extremo un electrón moviéndose a la velocidad de $10^6m/s$ y con una masa de $10^{-30}Kg$ tiene una longitud de onda $\lambda=10^{-9}m$ que es precisamente del orden del nanómetro, *1nm*. El nanómetro es, por tanto, el orden de magnitud de las longitudes de onda de electrones moviéndose con velocidades próximas a $10^6m/s$, que es la velocidad de los electrones en los átomos.

Un experimento de difracción de electrones se puede llevar a cabo siempre que la distancia entre las rendijas sea del orden de ångström o nanómetros, lo que es habitual en las observaciones con microscopio electrónico en las que los átomos de una sustancia actúan de centros de difracción de los electrones enviados por un cañón. Sin embargo, un experimento de difracción de bolas de billar es imposible de realizar ya que la distancia entre las rendijas debería ser menor que el tamaño del núcleo atómico en dieciséis órdenes de magnitud. Para un objeto material de densidad y velocidad fija la longitud de onda es inversamente proporcional a su volumen. Los experimentos de difracción requieren que la distancia entre rendijas sea superior a las dimensiones del objeto, es decir, las dos rendijas deben estar a distancias superiores al radio de la bola de billar y además esta distancia debe ser del orden de su longitud de onda. Solamente en el rango de volúmenes tan pequeños como el del electrón es posible juntar tanto las rendijas como para que sea del orden de su longitud de onda. Este argumento explica porqué la dualidad onda-corpúsculo solo tiene relevancia en partículas cuyas dimensiones sea inferiores al nanómetro.

¿Qué le sucede a un electrón cuando se le aplica un campo magnético? Supongamos un electrón girando alrededor del núcleo según una circunferencia, de radio *r*, recorrida con velocidad angular ω. La ley de Faraday nos indica que al aplicar un campo magnético $\vec{B}$, perpendicular al plano de la órbita circular, se induce a lo largo de ésta una fuerza electromotriz dada por la derivada respecto del tiempo del flujo de campo magnético que atraviesa el circuito. Debido al campo eléctrico inducido la cantidad de movimiento del electrón se incrementa, durante el tiempo en que el campo evoluciona de su valor inicial nulo a su valor final $\vec{B}$, en $q\vec{B}r/2$. Este incremento de la cantidad de movimiento tiene una repercusión cuántica relevante. Hemos visto que el momento lineal está relacionado con la fase de la función de onda de la partícula. En concreto, sabemos que el valor esperado de la parte real de la cantidad de movimiento es proporcional a la corriente de probabilidad y resulta ser proporcional al gradiente de la fase tal como indica [19]. El campo magnético al inducir un cambio de la cantidad de movimiento induce, consecuentemente, un cambio de la fase de la función de onda del electrón,

$$J=(A^2/m)(h\,\mathrm{grad}\theta - q\vec{B}r/2) = =(A^2/m)h\,\mathrm{grad}(\theta - q\vec{B}r\mathbf{dl}/2). \qquad [20]$$

Esta relación pone de manifiesto cómo la fase de la función de onda cambia al aplicarse un campo magnético. Si era θ ahora pasa a ser $\theta - q\vec{B}r\mathbf{dl}/2$.

En la escala nanométrica la importancia del segundo sumando se amplifica. Nótese que el cambio de fase inducido por el campo tiene dimensiones de flujo, es decir de campo magnético por área. Al recorrer una circunferencia la fase de la función de onda sin campo, θ, o no varía o varia en un múltiplo de 2π. De otra forma la función de onda no sería una función unívoca de punto. Esta restricción implica que el flujo de campo magnético a través de las superficies limitadas por esa circunferencia debe estar cuantificado. La cuantificación de campo se manifiesta en la escala nanométrica y solo trasciende a la escala mesoscópica y macroscópica con sistemas formados por bosones, como es el caso de los superconductores. De hecho y como hemos visto al describir el magnetoencefalógrafo, los magnetómetros más sensibles y precisos, los *squids*, están basados en la cuantificación del flujo de campo en anillos superconductores, lo que da lugar a fenómenos de interferencia cuántica.

Las propiedades eléctricas y magnéticas de nanocristales y nanopartículas

Las longitudes características: anisotropía magnética, longitud de correlación de canje. Superparamagnetismo y memoria magnética

Las propiedades térmicas, mecánicas, eléctricas y magnéticas de la materia dependen de longitudes características que generalmente son del orden del nanómetro. Consecuentemente, cuando las dimensiones de un

material coinciden con las de las longitudes características las propiedades asociadas varían. Sirva de ejemplo el caso de un material ferromagnético cual el hierro. Un trozo de hierro se encuentra subdividido en dominios elementales en los que la imanación sigue unas direcciones cristalográficas determinadas. En hierro que cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo estas direcciones coinciden con las aristas del cubo elemental de la red y se conocen genéricamente como direcciones 1,0,0. Dentro de un domino todos los espines no compensados, que son imanes elementales, se encuentran orientados paralelamente según la misma dirección, por ejemplo la <100> o eje *x* del cubo. En el dominio de al lado sucede lo mismo con los espines no compensados pero ahora se orientan según otra dirección, por ejemplo la <010> o eje *y* del cubo. Es evidente que entre un domino y otro debe existir una región del material en que los espines giran desde la dirección *x* a la dirección *y*. Esta región se conoce como pared de Bloch o pared de separación de dominios. La imanación se organiza en dominios para conseguir que la imanación global sea nula. Cuando así sucede el material no es un imán en el sentido de que no crea un campo intenso fuera de él. Si no hubiera más que un domino el hierro sería un imán permanente. Un imán permanente es un almacén de energía ya que en su presencia otro material magnético puede sufrir fuerzas con posibilidad de desarrollar un trabajo. Existen, por tanto, tres tendencias que condicionan la existencia de los dominios. Por un lado los espines tienden a ponerse paralelos por una interacción denominada interacción de canje y que es de origen cuántico pero basada en la repulsión electrostática que se ejercen mutuamente los electrones.

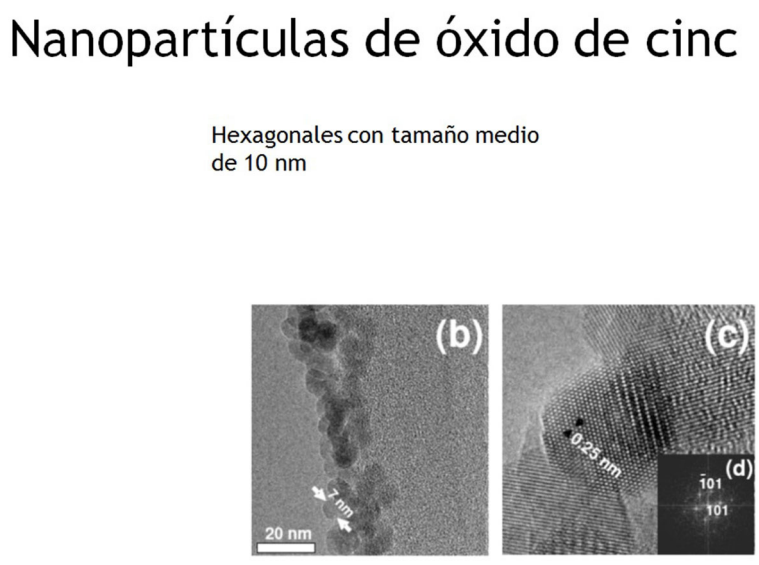


Figura 1-8. Nanopartículas de óxido de cinc (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

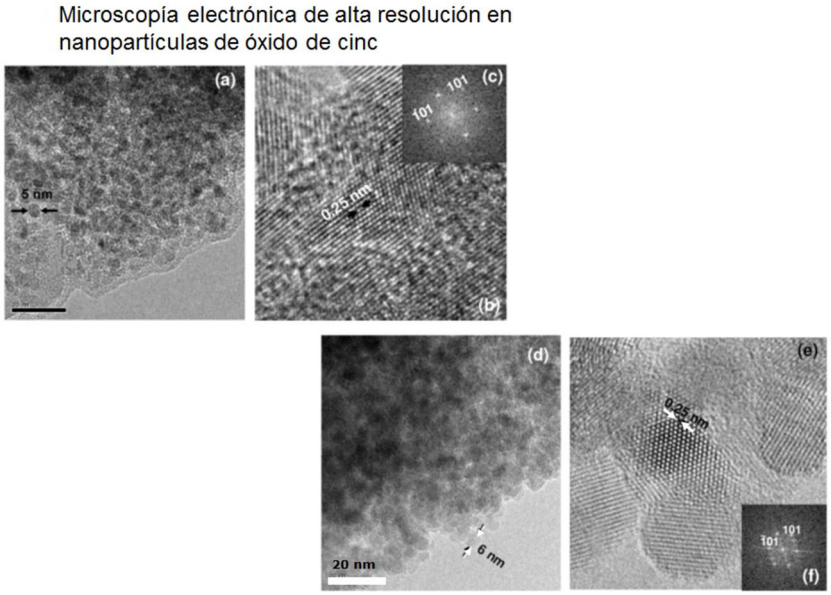


Figura 1-9. Microscopía electrónica de alta resolución en nanopartículas de óxido de cinc (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

Los electrones con espines paralelos no pueden aproximarse tanto como los que los tienen antiparalelos. Como consecuencia la repulsión electrostática que decrece con el cuadrado de la distancia entre los electrones es inferior cuando sus espines son paralelos. La tendencia al paralelismo entre los espines de dos electrones puede escribirse mediante un término de energía de canje de la forma $-2JS^2\cos\varphi$, donde J es la energía de canje entre los dos electrones de cuyos espines de módulo S forman un ángulo φ. Pero si todos los espines estuvieran paralelos a lo largo del volumen completo del material, éste sería un imán que crearía un campo magnético externo y almacenaría una alta energía magnetostática. Una tercera interacción es la denominada energía de anisotropía cristalina. Isotropía es una palabra que proviene del griego y que significa indistinguibilidad de las direcciones para una propiedad direccional. Anisotropía significa dependencia de una propiedad direccional con la dirección. Evidentemente para que se pueda hablar de anisotropía debe existir una estructura cristalina o disposición espacial de los átomos que permita distinguir unas direcciones de otras, esto es: debe existir una estructura anisótropa respecto de la cual se puedan definir direcciones distinguibles. En un cristal con simetría cúbica las direcciones definidas por las aristas del cubo, [100], son diferenciables respecto a las direcciones de las diagonales de las caras, [110] o de las diagonales del cubo [111]. Superpuesta a esta anisotropía cristalina una magnitud física direccional como es una magnitud vectorial puede definirse propiamente como isótropa o anisótropa. El material será magnéticamente isótropo si al aplicar

un campo magnético en cualquier dirección la imanación que adquiere el material en esa dirección es la misma para todas las direcciones. En caso contrario el material es anisótropo. En el hierro la imanación espontánea se encuentra según las aristas del cubo y para orientarla según su diagonal es preciso aplicar un campo magnético de centenares de oersted a lo largo de dicha diagonal. Este experimento, realizado por el japonés Honda a principios del siglo xx aplicando campos magnéticos a lo largo de distintas direcciones de un monocristal de hierro, puso de manifiesto que aparte de la interacción de canje que tiende a orientar los espines paralelos, existe otra interacción que liga la dirección de la imanación a ciertas direcciones de la red cristalina. Esta última se conoce como anisotropía magnética y está originada por un efecto relativista denominado interacción spin-órbita. El espín de un electrón localizado en un átomo es como un imán que ve al núcleo, cargado positivamente, girando alrededor de él. Existe un campo magnético producido por el movimiento circular del núcleo que es como una espira recorrida por una intensidad $Ze\nu$ siendo Z el número atómico, e la carga del protón y ν la frecuencia de giro del núcleo medida en el sistema en que el electrón está en reposo, que es la frecuencia a la que gira el electrón alrededor del núcleo en el sistema habitual en el que el núcleo se encuentra en reposo. El spin se encuentra por tanto en un campo y tiende a orientarse, como cualquier dipolo magnético, paralelo a él. Las órbitas de los electrones no tienen generalmente isotropía o simetría esférica excepto las correspondientes al nivel *s*. La falta de simetría esférica de las órbitas implica una distribución de la carga electrónica anisótropa en torno al núcleo del átomo. Al encontrarse los átomos ubicados en los nudos de una red cristalina anisótropa y ser sus distribuciones posibles de carga también anisótropas existe una tendencia a que se distribuyan las orientaciones de la órbitas de manera que la energía de interacción entre las cargas electrónicas de los átomos vecinos sean lo menor posibles. En otras palabras: las distribuciones de menor energía serán las que mejor compatibilicen ambas anisotropías, la de la red y la de las órbitas. El magnetismo de los materiales ferromagnéticos es debido principalmente al spin, pero éstos se encuentran ligados a las cargas por la interacción spin-orbita y como las órbitas se encuentran ligadas a la red por la interacción electrostática entre vecinos, resulta que el spin se encuentra ligado a la red. Si con un imán aplicamos un campo externo que tiende a girar el spin y este gira, al hacerlo está modificando las orientaciones de las órbitas de los electrones atómicos y consecuentemente la interacción entre los electrones de los átomos vecinos.

En resumen, en un material ferromagnético los espines están paralelos espontáneamente pero las direcciones en que lo están son aquellas en que la energía electrostática del sistema es menor. En el hierro hemos visto que las direcciones de la imanación espontánea son las [100] pero en el níquel, también cúbico pero centrado en las caras, son las [111]. El

cobalto es hexagonal y tiene como eje fácil el eje senario. La intensidad de la anisotropía magnética se mide mediante la constante de anisotropía *K* que mide la energía externa que hay que suministrar por unidad de volumen para girar la imanación de la dirección fácil a la difícil. En un material uniáxico, único caso que consideraremos a partir de ahora por razones de simplicidad, la energía de anisotropía que por unidad de volumen puede escribirse como $Ksen^2\theta$, donde θ es el ángulo que forma la imanación con el eje fácil. Por tanto, la energía necesaria para girar la imanación desde la dirección fácil, que para $K>0$ corresponde a $\theta=0$ o $\theta=\pi$, hasta la dirección difícil, $\theta=\pi/2$ o $\theta=3\pi/2$, resulta ser *K*. Es interesante señalar que el valor de *K* es importantísimo en tecnología magnética. Un alto valor de *K* es necesario para la fabricación de imanes mientras que un bajo valor es fundamental para la fabricación de materiales blandos como los utilizados en cantidades de millones de toneladas como núcleos de máquinas electromagnéticas y multiplicadores de flujo. Todo el avance de la ingeniería magnética proviene del conocimiento a nivel microscópico del origen de *K* y lo que ha permitido controlar su valor hasta límites insospechados debido al desarrollo de la NC y la NT. Mientras que el valor de la imanación de saturación de un material, magnitud que siempre se desea incrementar para cualquier aplicación, no puede aumentarse mucho, ya que es el número de átomos de la unidad de volumen multiplicado por el momento magnético atómico (siempre del orden de algunos magnetones de Bohr), la investigación de la segunda mitad del siglo xx ha permitido variar *K* en muchos órdenes de magnitud. Veamos órdenes de magnitud, en el cobalto $K=4{,}5\ 10^5\ Jm^{-3}$, en hierro $K=5\ 10^4\ Jm^{-3}$ y en níquel $K=-5\ 10^3\ Jm^{-3}$. Como explicaremos mas tarde la NC ha permitido controlar a partir del diseño de nanoestructuras el valor de *K* que puede variar entre 10^2 y $5\ 10^6\ Jm^{-3}$.

La anisotropía magnética determina la estructura de dominios de un material. En un cristal uniáxico la imanación en dos dominios sucesivos estará orientada según el eje fácil hacia arriba en el primero y según el mismo eje hacia abajo en el segundo. Estas consideraciones nos van a permitir estimar el espesor de las paredes de Bloch. Es obvio que cuanto mayor sea el espesor de una pared $\delta=Na$, siendo *a* la distancia interatómica y *N* el número de átomos contenidos en una fila que separa dos dominios, mayor será el número de espines orientados en direcciones difíciles y por tanto mayor será la energía de anisotropía por unidad de superficie almacenada en la pared que podemos considerar proporcional a *N* y escribir *KNa*. Por tanto, inferimos que la energía de anisotropía tiende a disminuir el espesor de la pared hasta anularle, esto implicaría que súbitamente un spin hacia arriba tendría un primer vecino con spin hacia abajo. Evidentemente esta configuración no requiere ningún gasto de energía cristalina ya que ambas orientaciones son las de energía mínima. Pero veamos como en esta configuración el gasto de canje sería muy alto.

Como entre el domino de la izquierda y el de la derecha la imanación gira un ángulo π, si la pared tienen de espesor *N* espines, o *N* átomos, el ángulo que formará un spin con su vecino será del orden de $\varphi=\pi/N$. Esto nos indica que dos espines adyacentes deben tener una energía de canje $-2JS^2\cos\varphi$, expresión que para φ pequeño puede aproximarse a una constante más $JS^2\varphi^2$ o $JS^2(\pi/N)^2$. Al existir *N* pares de electrones la energía de canje total será inversamente proporcional a *N*. La energía de canje contenida en la pared por unidad de superficie resulta entonces $JS^2(\pi/aN)^2$.

En resumen, mientras el canje prefiere energéticamente aumentar indefinidamente el espesor de la pared la anisotropía tiende a disminuirle el compromiso de ambos que se obtiene de minimizar la suma de las dos energías por unidad de superficie descritas en los párrafos anteriores, resultando $N=\pi(JS^2/Ka^3)^{1/2}$ y que define un espesor $\delta=Na$ como $\delta=\pi(A/K)^{1/2}$, donde $A=\pi(JS^2/a^3)$. Es importante ver que δ toma los siguientes valores para Fe *18 nm*, para Ni *5.5 nm*, Co *51 nm* y para el imán más potente, que es el de la aleación neodimio, hierro y boro *1.3 nm*.

El espesor de la pared,

$$\delta=\pi(A/K)^{1/2} \qquad [21]$$

describe también la denominada longitud de correlación de canje. Esta longitud de enorme importancia en la tecnología y la teoría del magnetismo describe la distancia a la que se propaga en un material una desviación local del paralelismo promedio de los espines. Consideremos un domino magnético en el que todos sus espines no compensados se encuentran orientados en la misma dirección. Por medio de cualquier técnica somos capaces de desviar un spin y llevarle a una dirección distinta. La pregunta es ¿hasta dónde alcanza la perturbación local? La distancia a la que alcanza es la longitud de correlación de canje. Hemos visto cómo esta distancia es del orden de nanómetros.

Cuando un material ferromagnético reduce su tamaño por debajo de la longitud de correlación de canje su volumen es insuficiente para contener una pared de Bloch y, por tanto, para descomponerse en dominios; pasa a ser un monodominio.

La presencia de paredes de Bloch y de dominios es la causa de que los materiales se ablanden o de que se imanen y desimanen con facilidad. Para girar la imanación de un sentido de su eje fácil al sentido opuesto hay que vencer una barrera de densidad de energía de valor *K*. Como la energía de la imanación espontánea, M_s, en el campo externo es $-\mu_0 M_s H$ siendo $-\mu_0 M_s$ la imanación espontánea expresada en teslas y que es del orden de 1 T. Como *K* en Fe es $5\ 10^4\ Jm^{-3}$ hará falta aplicar campos magnéticos del orden de $5\ 10^4\ Am^{-1}$ o de *700 Oe* para conseguir que la imanación gire un ángulo π invirtiendo su sentido. Sin embargo es de experiencia común que un trozo de hierro puede invertir su imanación con campos del orden de *1 Oe*. Esto es debido a que el campo ejerce una presión so-

bre la pared de Bloch que puede desplazarse libremente sin incremento de energía ya que la energía almacenada en la pared si no depende de la posición en que esta se encuentre no se altera con su movimiento. La presencia de paredes facilita el proceso de imanación rebajando la energía requerida para ello. Por esta razón los investigadores que buscaban imanes de mejores características en la segunda mitad del siglo xx iniciaron una serie de esfuerzos por conseguir imanes formados por aglomerados de pequeñas partículas en las que no hubiera volumen para que cupieran dominios. De este modo eliminarían la contribución de los procesos de imanación por corrimiento de paredes y obligarían a la imanación a tener que girar coherentemente venciendo las barreras de la anisotropía y aumentando así el campo coercitivo o campo necesario para invertir el sentido de la imanación. Una serie de experimentos llevados a cabo por Luborsky, Jacobs y Bean a mediados del siglo xx en los laboratorios de General Electric en Nueva York permitieron observar como el campo coercitivo de las nanopartículas incrementaba respecto al presentado por la muestra masiva. Se comenzó a trabajar en nanomagnetismo buscando mejores imanes permanentes. Sin embargo, posteriores disminuciones de tamaño dieron la sorpresa de la desaparición del campo coercitivo. Este punto es muy importante para la comprensión de muchos fenómenos nanomagnéticos y está estrechamente vinculado al desafío más radical de la tecnología de la memoria magnética.

Cuando el volumen, *V*, de una partícula nanométricamonodominio continúa disminuyendo se alcanza un volumen en que la barrera de la energía de anisotropía *KV* se hace del orden de la energía térmica k_BT. En estas condiciones la agitación térmica es capaz de invertir la imanación que fluctúa en dirección como lo hacen los momentos magnéticos de los átomos paramagnéticos. Cualquier información que pudiera derivarse de la orientación hacia arriba o hacia abajo de la imanación se pierde en ese momento. La temperatura destruye la información al borrar la memoria magnética de la partícula. Un monodominio puede considerarse un portador de información con un bit *1* y un bit *0*, el uno corresponde a la imanación en un sentido y el cero en el sentido opuesto. La memoria existe si el sentido de la imanación permanece en el tiempo, cuando éste cambia la memoria se borra. El campo coercitivo desaparece y la imanación se comporta como la de un conjunto de átomos paramagnéticos con una diferencia, el valor del momento magnético elemental, que en lugar de ser del orden del magnetón de Bohr como en los átomos ahora puede incluir cientos o decenas de miles de magnetones de Bohr, correspondientes a todos los espines de la nanopartícula orientados paralelamente por el canje, pero sin anclarse en ninguna dirección concreta debido a la agitación térmica. Este fenómeno nanométrico es conocido como superparamagnetismo. El aumento de la densidad de información magnética requiere el mayor número de bits posibles por unidad de volumen, pero cuando intentamos disminuir y disminuir más el volumen de la partícu-

la alcanzamos el régimen superparamagnético y el sistema pierde su capacidad de almacenar información. Una solución que aparentemente quizás se pudiera explorar es el aumento de la constante de anisotropía. Sin embargo, tal solución implica problemas colaterales de la misma magnitud. La memoria también requiere facilidad de lectura y escritura que se vería muy afectada con el aumento de la anisotropía.

En realidad, el superparamagnetismo es un fenómeno que se manifiesta en la escala del nanómetro pero que responde a un principio muy bien establecido de la termodinámica clásica. En equilibrio termodinámico todo volumen de materia debe estar desimanado. Como sabemos, cuando un sistema alejado del equilibrio no altera sus condiciones externas alcanza al cabo de un cierto tiempo el equilibrio. Lo que la termodinámica no predice es cuánto es el tiempo requerido para ello. A esta cuestión intenta responder la teoría cinética.

Consideremos un conjunto de *N* partículas monodominios con los ejes fáciles orientados paralelos en todas ellas y según el eje *z*. Apliquemos ahora un campo magnético según el eje z y hacia arriba que orienta a la imanación de todas las partículas según el eje fácil y hacia arriba. Si ahora suprimimos el campo la imanación en cada partícula quedará orientada en la misma dirección y sentido, según el eje z positivo. En ausencia de campo esta configuración de la imanación no es de equilibrio. Como hemos visto más arriba, si la temperatura del conjunto de las *N* partículas monodominio es *T*, el equilibrio corresponderá a la configuración de energía libre, *F*, mínima, donde recordamos que $F=E-TS$. La energía es la mínima ya que todas las partículas se encuentran con la imanación según el eje fácil, por tanto $E=0$. Sin embargo la entropía es muy pequeña ya que solo existe un estado de las *N* partículas con la condición de que todas ellas se encuentren en la misma dirección y sentido. Bastaría que una se encontrara, según *z*, pero hacia abajo para que *F* disminuyera ya que la energía seguiría siendo nula y la entropía, proporcional al logaritmo del número de estados, habría aumentado. Nótese que un estado caracterizado por una partícula con imanación hacia abajo tiene *N* posibilidades que corresponden a cada una de las partículas. El máximo desorden o posibilidades corresponde a $N/2$ partículas con imanación hacia arriba y $N/2$ partículas con imanación hacia abajo. En este caso el número de posibilidades sería $N!/((N/2)!)^2$. Según esta argumentación el sistema alcanzará el equilibrio cuando la mitad de las partículas hayan invertido su imanación. Pero sabemos que para ello es preciso que la imanación gire superando una barrera de energía de altura KV. El tiempo que tarda una partícula en invertir su imanación puede describirse por la siguiente consideración cinética. El número de veces que la imanación se aproxima en un segundo a la barrera, ν_0, multiplicado por la probabilidad de que en una de las aproximaciones la supere, será el número de veces que la imanación salte la barrera por unidad de tiempo o la frecuencia de salto, ν. La probabilidad está dada

por la función de Maxwell-Boltzmann $p=e^{-E/k_B T}$. Donde ahora la energía E es KV. Por tanto, podemos escribir,

$$\nu=\nu_0 \, e^{-KV/k_B T}. \qquad [22]$$

La frecuencia ν_0 es típicamente del orden de $10^{10} s^{-1}$ o 10^{10} veces por segundo. Podemos decir que si al retirar el campo magnético el sistema alcanza el equilibrio en un tiempo, llamado de relajación, similar al tiempo que se tarda en realizar una medida de la imanación, aproximadamente dos minutos, no apreciaremos ninguna remanencia; si por el contrario la relajación tiene lugar en un tiempo muy superior al de medida, el sistema se comporta como un imán permanente al menos durante el tiempo en que no se ha relajado suficientemente. El tiempo de relajación es el inverso de la frecuencia de salto.

Vemos que según [22], para $KV=28k_B T_A$ la frecuencia ν es del orden de $0.01 s^{-1}$ o el tiempo de relajación del orden de $100s$ o de dos minutos, que es el tiempo de medida.

Veamos algunos de los valores del tiempo de relajación de partículas monodominios de Fe. Si las partículas tienen *14 nm* de radio su volumen es $V=1{,}15\ 10^{-23} m^3$ y el producto KV resulta $1{,}15\ 10^{-19} J$ que coincide aproximadamente con $28k_B T_A$ siendo T_A la temperatura ambiente. Por tanto, estas partículas de Fe relajan a temperatura ambiente en dos minutos y cuando se mide la imanación al anular el campo se obtienen el valor de equilibrio. Si doblamos el volumen de las partículas, esto es fabricándolas con un radio de *18 nm,* el mismo cálculo nos indica que el tiempo de relajación ha pasado a ser de 10^{14} *s.* que es un tiempo superior al que dista desde este momento en *2014* al Terciario. Para utilizar partículas monodominios de Fe como portadores de información su radio debe ser superior a *14 nm*. Este ejemplo ilustra lo crítico que puede llegar a ser un tamaño, dentro de la escala nanométrica, para determinar un tipo de comportamiento de una magnitud física u otro diferente.

Cuando un sistema está formado por cristalitos ferromagnéticos anisótropos orientados al azar y unidos a través de sus fronteras de grano se presenta un fenómeno nuevo conocido como anisotropía al azar y que tiene consecuencias muy importantes en el campo de la ingeniería magnética o de diseño de materiales magnéticos. Si bien la imanación tiende a estar orientada según los ejes fáciles de cada cristalito, el canje tiende a suavizar las variaciones bruscas de su orientación que aparecerían en las fronteras de los granos. Si el canje es más intenso que la anisotropía la imanación iría girando lentamente a lo largo de la dirección normal a la frontera de grano como hemos visto que ocurre con la frontera de dominios. Típicamente esta zona en que la imanación gira sería del orden del espesor de la pared de Bloch en ese material. Pero si este espesor es mayor que la dimensión del nanocristal habrá superposición de los efectos con el resto de los nanocristales vecinos de modo que la imanación

variará espacialmente con una longitud de correlación distinta de la longitud de correlación de la anisotropía la cual, como es obvio, coincide con el tamaño de los nanocristales. En un sólido ferromagnético nanocristalino en que la longitud de correlación de canje es mayor que el tamaño de los nanocristales que le forman, la anisotropía efectiva decrece respecto a la anisotropía local de cada grano por efecto del canje que tiende a orientar los espines paralelos. Utilizando estos principios se han conseguido sintetizar los materiales magnéticos de más baja anisotropía efectiva que son aleaciones nanocristalinas, con tamaño de grano de *7nm*, de composición $Fe_{77}Zr_7B_{14}$ en las que el espesor de las paredes de Bloch es mayor que el tamaño de los nanocristales. El valor de la constante de anisotropía es $k=10^2\ Jm^{-3}$. Si la aleación nanocristalina está formada por granos en los que la anisotropía es muy grande, de modo que el espesor de la pared de Bloch sea muy inferior al tamaño del grano, cada cristalito actuará como un monodominio y el proceso de imanación solo se podrá realizar por rotaciones de la imanación. De este modo se han fabricado las aleaciones más duras conocidas con composición $Fe_{79}Nd_7B_{14}$ cuya constante de anisotropía *es* $k=5\ 10^6 Jm^{-3}$.

Es sumamente ilustrativo constatar que dos aleaciones con composiciones muy parecidas y cuya única diferencia es un tipo de átomos Zr o Nd, con cristalitos nanométricos de las mismas dimensiones, pueden comportarse como ejemplos extremos de material blando o material duro solo por el valor relativo de la longitud característica, que es la longitud de correlación de canje, o espesor de la pared de Bloch, respecto a la dimensión del nanocristal. En el primero el campo coercitivo es de 10^{-3} *Oe*, mientras que en el segundo es de 10^4 *Oe*. Esta constatación sirve para poner de manifiesto la relevancia que el control de lo nanométrico tiene en propiedades macroscópicas de importancia tecnológica como es la dureza magnética de un material.

Las longitudes características y la conducción eléctrica: recorrido libre medio, penetración túnel. Efecto túnel y NC

En un metal los electrones externos de sus átomos son los responsables de la conductividad eléctrica. El tiempo, τ, que tiene un electrón para adquirir energía del campo eléctrico aplicado es el que transcurre entre dos colisiones sucesivas. El incremento de la cantidad de movimiento del electrón en la dirección del campo, E, será igual al impulso comunicado por la fuerza $eE\tau$. En los metales τ es del orden de 10^{-13} o 10^{-14} *s*. Es instructivo estimar la distancia media que recorre el electrón entre dos colisiones y que vendrá dada por el producto del tiempo τ y la velocidad de los electrones. Esta velocidad es la denominada velocidad de Fermi ya que solamente los electrones próximos en energía a la energía de Fermi son susceptibles de sufrir colisiones. La velocidad de Fermi, v_F, se infiere dividiendo el doble de la energía de Fermi por la masa del

electrón y así se obtienen valores del orden de $v_F \sim 10^6 m/s$. Consecuentemente el recorrido libre medio de los electrones de conducción, l_F, fuertemente dependiente de las impurezas, es del orden de 10^{-7} o 10^{-8} *m*. En otras palabras, l_F es del orden de decenas de nanómetro e incluso de centenas de nanómetro en muestras muy recocidas y libres de impurezas. Es importante caer en la cuenta de que la densidad de corriente que puede expresarse como la densidad cúbica de carga electrónica, *ne*, multiplicada por la velocidad de los electrones inducida por el campo *E*, $v = eE\tau/m$, resulta ser $J = ne^2\tau E/m$. Por tanto el factor $ne^2\tau/m$ corresponde a la conductividad eléctrica del material ya que la constante de proporcionalidad entre la *J* y el campo *E*, descrita por la ley de Ohm es, por definición, la conductividad eléctrica.

Cabe ahora preguntarnos por la conductividad de un metal con dimensiones nanométricas. Si el electrón se mueve a lo largo de una dirección según la cual el tamaño de la muestra es inferior a l_F no sufre ninguna colisión durante su recorrido y consecuentemente irá adquiriendo una cantidad de movimiento a lo largo del tiempo *t*, dada por *eEt* con $t<\tau$. Este régimen se conoce como balístico. Es muy interesante el análisis de la conducción eléctrica en sistemas nanocristalinos formados por cristalitos de dimensiones de algunos nanómetros y conectados entre ellos a través de sus fronteras de grano. Las fronteras constituyen obstáculos para la conducción que sin embargo es balística en el interior del grano. La manera en que el electrón atraviesa la frontera depende de muchos factores pero en ocasiones se presenta el llamado efecto túnel, cuya importancia en el campo de la NC es difícil de sobreestimar.

El efecto túnel es característico del comportamiento de la materia en la escala atómica. Si una partícula libre se mueve, según el eje *x*, con energía cinética E_c y alcanza una región, para $x>0$, en la que existe una barrera de potencial de altura *V*, sufrirá una reflexión siempre que *V* sea mayor que E_c. Este aserto es cierto en el marco de la mecánica clásica y es consecuencia del principio de conservación de la energía. Para $x<0$ la energía total de la partícula es E_c, mientras que para $x>0$ es E'_c+V, donde E'_c es la energía cinética de la partícula para $x>0$. Evidentemente, si $V>E_c$, el principio de conservación exige que E'_c sea negativa lo que es imposible. Por tanto la zona $x>0$ es inaccesible para cualquier partícula clásica cuya energía cinética inicial sea inferior a *V*.

La descripción del fenómeno es distinta en mecánica cuántica. Para $x<0$ existe una función de onda que describe la partícula con energía E_c que puede escribirse como $\psi_1 = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$, con $\hbar k = \sqrt{2mE_c}$. Para $x>0$ existe una función de onda, solución de la ecuación de Schrödinger con energía $E_c = E'c+V$ que llamamos $\psi_2 = Ce^{ik'x}$. $\hbar k' = \sqrt{2m(E_c - V)}$.Si la energía inical de la partícula es inferior a *V*, E'_c es negativa y k' es imaginario, $k' = i\alpha$, donde $\hbar\alpha = \sqrt{2m(V - E_c)}$ es real. La función de onda en la zona $x>0$ es, por tanto, $\psi_2 = Ce^{-\alpha x}$.

Recordemos ahora que, como vimos en el párrafo anterior, el cuadrado del módulo de la función de onda nos informa de la probabilidad de encontrar a la partícula en un punto. En este caso la probabilidad de encontrar a la partícula en la zona $x>0$ será $\psi_2\psi^*_2= C^2 e^{-2\alpha x}$, que es evidentemente decreciente exponencialmente con x, pero, no obstante es distinta de cero si C es distinto de cero. Si probamos que C es distinto de cero habremos mostrado que en mecánica cuántica es posible que una partícula con energía inferior al potencial de la barrera, V, se encuentre en esa zona o, más gráficamente, que la partícula al llegar a la barrera la penetre parcialmente, lo que es imposible en un marco clásico. Esta capacidad de penetración se conoce como efecto túnel.

Las condiciones que deben cumplir las funciones de onda solución de la ecuación de Schrödinger en $x=c$ que son a) las funciones de onda deben tomar el mismo valor en $x=0$, esto es $\psi_1(0)= \psi_2(0)$, lo que implica que $A+B=C$ y b) las derivadas de la función de onda deben tomar el mismo valor en $x=0$, por tanto, $ikA-ikB=-\alpha C$. Las condiciones de frontera de la función de onda nos permiten obtener dos ecuaciones lineales de dos incógnitas, B y C, supuesta conocida A. Las soluciones son,

$$B = \frac{ik+\alpha}{ik-\alpha}A \quad C = \frac{2ik}{ik-\alpha}A. \qquad [23]$$

De esta expresión se infiere que solo en el caso de que α tienda a infinito y k permaneciera finita el coeficiente C se anularía y nos encontraríamos en el caso clásico de que la partícula no puede penetrar la zona de potencial superior a su energía cinética. Sin embargo, vemos que para que α tienda a infinito es necesario que V sea infinito, en consecuencia, para cualquier potencial finito y una energía cinética inferior a V, la partícula penetra una cierta distancia a través de la barrera. En efecto, de [22] se infiere que para $A=1$,

$$C^2 = \frac{4k^2}{\alpha^2+k^2} = \frac{4E^2}{(E-V)^2+E^2}. \qquad [24]$$

Por tanto, al encontrar la partícula una barrera de potencial de altura V es capaz de penetrar una distancia, $x=\delta$, a través de la zona prohibida por la mecánica clásica, $x>0$. Tal longitud de penetración se puede estimar considerando la distancia a la que la probabilidad de encontrar a la partícula ha decrecido en un factor $1/e$ respecto a la probabilidad de encontrarla en $x=0$. Esta condición se cumple $(1/e)C^2=C^2e^{-2\alpha\delta}$, que indica que,

$$\delta = \frac{\hbar}{2\sqrt{2m(V-E)}}. \qquad [25]$$

La longitud de penetración túnel es una longitud característica que depende de la altura de la barrera y de la energía cinética y la masa de la partícula. Es instructivo observar que para la masa del electrón, $10^{-30}kg$, y diferencias de energía $(V-E)$ del orden de décimas de electrón-voltios, $10^{-20}J$, la penetración es del orden del ångström. Cuando un electrón se aproxima a una barrera de altura V es posible modificar esta altura introduciendo una diferencia de potencial entre la barrera y el medio por

el que el electrón se aproxima a ella. Tal modificación controlada permite modular δ a través de la relación [25].

Los electrones de conducción de los metales encuentran una barrera de potencial al aproximarse a la superficie la cual impide su salida. La altura de esta barrera es conocida como función de trabajo, cuyos valores en los metales son del orden de unidades de *eV* pero, lógicamente, siempre son superiores a la energía de Fermi de la banda de conducción, o energía cinética máxima de los electrones de dicha banda. De acuerdo con la expresión [25] siempre habrá electrones capaces de abandonar un breve tiempo la superficie del metal y pasar al vacío, para volver al volumen. La distancia *E-V* es del orden de algunos *eV* y la longitud de penetración en el vacío es inferior al orden de una distancia atómica. Sin embargo, si se aproximan dos superficies metálicas de forma que la distancia entre ellas sea del orden de unas pocas distancia atómicas y se aplica una diferencia de potencial entre ambas se puede producir una corriente a través del vacío de separación por efecto túnel. El potencial reduce *(E-V)* y polariza a los electrones.

Un caso de efecto túnel que generó el nacimiento de la NC y la NT al permitir una resolución a escala nanométrica para la observación y manipulación de átomos y grupos de átomos fue el desarrollo del microscopio de efecto túnel. En este caso una superficie metálica es recorrida o barrida por una punta metálica que permanece sin contacto muy próxima a ella. Como la probabilidad de túnel depende exponencialmente de las distancias y siempre existirá un átomo de la punta más próximo que el resto será precisamente en él, donde la probabilidad túnel sea máxima. Este máximo se alcanzará cuando este átomo esté alineado con la densidad de carga electrónica de otro átomo de la superficie metálica que se analiza. Si existe una diferencia de potencial entre punta y superficie, la densidad de corriente túnel alcanzará máximos según la punta barre la superficie cuando el átomo de la punta se encuentre más próximo a la carga asociada a un átomo de la superficie y disminuirá en aquellas posiciones en que la barrera aumente, esto es cuando la distancia aumente. De esta manera un mapa intensidad de corriente–punto de la superficie será un mapa con resolución atómica. Este es el fundamento de la microscopía túnel que constituye una tecnología habitual y enormemente extendida en laboratorios dedicados a la investigación de NC y NT.

Como más arriba indicábamos en muestras nanocristalinas conductoras los electrones pueden viajar, bajo la acción del campo electromotor suministrado por una batería de modo balístico en el interior de los nanocristales, siempre que sus dimensiones sean inferiores al recorrido libre medio. Sin embargo la frontera de grano representa una barrera de potencial que puede superarse por efecto túnel o bien por probabilidad térmica. La probabilidad túnel de que un electrón que ha adquirido bajo el efecto del campo una energía cinética *E* supere la barrera *V* que

representa la frontera de grano de espesor *d* vendrá dada por $C^2e^{-2\alpha d}$, con $\hbar\alpha=\sqrt{2m(V-E_c)}$. Esta probabilidad solo depende de *E, V y d* y es independiente de la temperatura. El electrón puede también saltar la barrera por efecto de la agitación térmica. En este caso la probabilidad de salto en un solo intento viene dada por la expresión $e^{-(V-E)/kT}$. La contribución de cada uno de estos diferentes mecanismos a la conductividad eléctrica de la muestra nanocristalina puede analizarse experimentalmente diferenciando las componentes dependientes de las independientes de la temperatura. La primera es la contribución del efecto túnel, mientras que la segunda corresponde a la inducida térmicamente.

En resumen, podríamos concluir este apartado incidiendo una vez más en la relevancia que tiene en las propiedades de un material la coincidencia de longitudes características, como son el recorrido libre medio o la penetración túnel, con las dimensiones de la muestra cuando estas se encuentran en la escala nanométrica. Tal coincidencia repercute notablemente en propiedades macroscópicas como es el caso, aquí analizado, de la conductividad térmica.

El papel relevante de las propiedades de la superficie en la física de las nanopartículas. Emergencia de magnetismo en nanopartículas de materiales que no son magnéticos en la escala ordinaria

Una característica de las partículas nanométricas es su elevada proporción de átomos de superficie respecto al número total de átomos que contienen en todo su volumen. Un cristal cúbico de lado *L* contiene $(L/a)^3$ átomos, donde *a* es la distancia interatómica, mientras que el número de átomos de superficie es $6(L/a)^2$. Consecuentemente, la razón entre el número de átomos de superficie y el número total de ellos es $r=6a/L$. Como *a* es del orden de algunos ångström podemos inferir que en un cristal cúbico de un centímetro de lado *r* es aproximadamente 10^{-6}. Un átomo de cada millón está en la superficie. Sin embargo esta fracción se eleva según va disminuyendo *L* y para un cubo de un nanómetro de lado se acerca al 100%. Este incremento cuantitativo de la fracción *r* tiene una gran importancia en las propiedades físicas de las nanopartículas, NP, como describimos a continuación utilizando algunos ejemplos.

La estructura cristalina de equilibrio de un sólido es aquella que minimiza su energía libre. Está condicionada por el volumen y simetría electrónica de los átomos que la forman y principalmente por enlace químico o tipo de fuerzas que los mantiene unidos. Los átomos de la superficie al carecer del mismo entorno que los de volumen no tienden necesariamente a ordenarse según la misma estructura que los de volumen o, dicho de otra forma, la estructura que minimiza su energía libre no es necesariamente la misma que minimiza la de volumen. No obstante, en las muestras

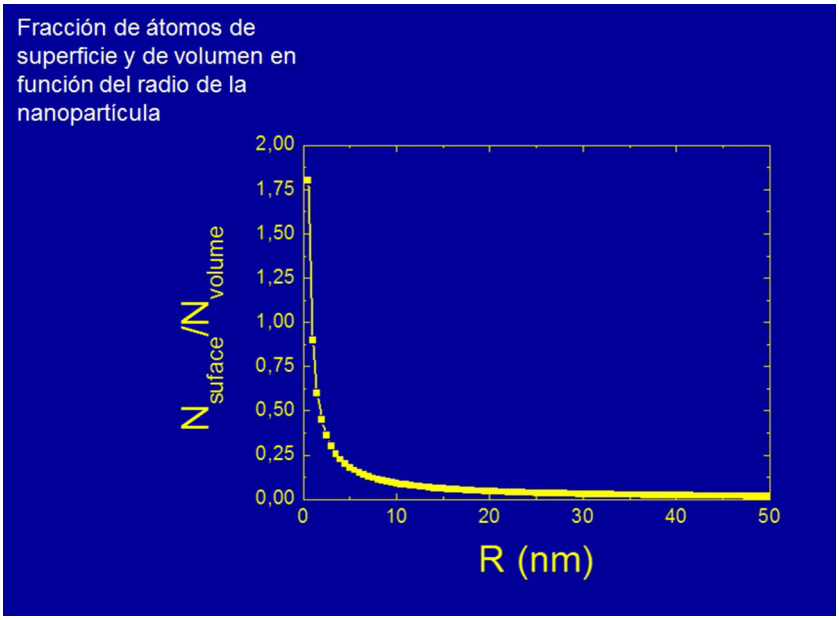


Figura 1-10. Fracción de átomos de superficie y de volumen en función del radio de la nanopartícula (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

masivas, al ser el porcentaje de átomos de superficie *r* muy pequeño, la fuerza termodinámica ejercida por el volumen vence a la ejercida por la superficie y la estructura de equilibrio corresponde aproximadamente con la deseada por los átomos del volumen. Los átomos de superficie se ven constreñidos a emitir alguna queja que se manifiesta en la generación de algunos defectos de superficie de baja densidad. Esta queja aumenta de intensidad y se amplifica según disminuye *L*. Es bien conocido que conjuntos de pocos átomos de algunos metales cuya estructura es cúbica a escala macroscópica estabilizan estructuras icosaédricas cuando se trata de agrupaciones de pocos átomos. Por tanto, la presencia de defectos, como son los defectos de apilamiento, maclas y dislocaciones, y las variaciones de constantes de la red e incluso de la simetría del grupo cristalino respecto a los de las muestras macroscópicas han sido y son muy frecuentemente observadas en NP. La variación de la estructura atómica de un sólido conlleva la variación de su estructura electrónica y, por tanto, las muestras nanométricas pueden presentar propiedades ligadas a la estructura electrónica, como son las propiedades magnéticas y ópticas, muy distintas de las que presentan sus homólogas macroscópicas. Un aumento de las distancias interatómicas en un sólido conduce generalmente a un aumento de la denominada densidad de estados al nivel de Fermi, $g(E_F)$. La densidad de estados define el número de estados cuánticos disponibles en un intervalo de energía unidad en torno a la energía de Fermi. Cuando mayor sea esta densidad más fácil resulta a

electrones con energía próxima a la de Fermi voltear la orientación de su espín, ya que al hacerlo y como consecuencia del principio de exclusión, deben saltar a un nivel de energía superior, lo que requerirá un gasto tanto menor cuanto mayor sea el número de estados libres accesibles próximos a esta energía, lo que equivale a decir cuanto mayor sea la densidad de estados. Un material ferromagnético es aquel en que el número de electrones con espín hacia arriba es mayor que el número de ellos con espín hacia abajo. Sea E_F la energía de Fermi cuando existen $N/2$ electrones con espín hacia arriba y $N/2$ electrones con espín hacia abajo. En este caso, cada estado está ocupado por dos electrones uno con spin arriba y otro con espín abajo y el espín neto, por tanto, se anula. Si un número q de electrones con espín abajo invierten su orientación hacia arriba la energía habrá aumentado una cantidad $\delta E=q\delta\varepsilon$, donde $\delta\varepsilon$ es la energía media ganada por cada electrón que invierte su orientación de espín. Esta energía media se puede estimar como el producto de la densidad de estados por el número de electrones volteados, $\delta\varepsilon=q/g(E_F)$. Por tanto, el incremento total de energía se puede escribir como $\delta E=q^2/g(E_F)$. Esta expresión ilustra el hecho de que un aumento de la densidad de estados facilita la inversión de la orientación de espines.

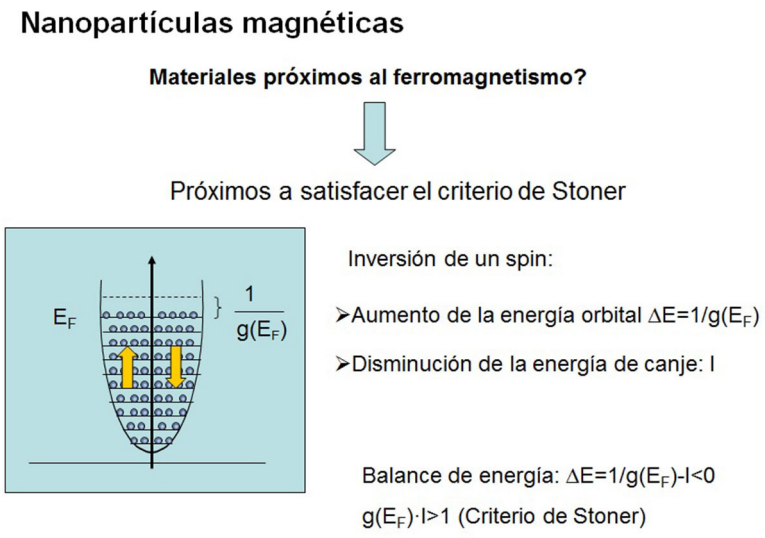


Figura 1-11. Nanopartículas magnéticas (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

La energía de interacción electrostática entre dos electrones es menor cuando los espines de ambos son paralelos. Para ver como la orientación relativa de sus espines tiene relación con la energía de repulsión culombiana de dos electrones, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones cuánticas. Debido a su carácter fermiónico, la función de onda de dos electrones debe ser antisimétrica. Cuando la parte orbital de la

función de onda es antisimétrica los electrones están más alejados espacialmente y su repulsión culombiana es menor. Pero si la parte orbital de la función de onda es antisimétrica la parte de espín debe ser simétrica para que el producto de ambas lo sea. Si los espines son paralelos los electrones tienen que estar más alejados y consecuentemente su energía de repulsión es menor. La interacción culombiana tiende por tanto a orientar paralelos los espines de electrones próximos, pero según establece el principio de exclusión para que dos electrones tengan espines paralelos deben diferir en otros números cuánticos o deben ocupar distintos estados. En un conjunto de electrones todos los niveles de menor energía se han idos ocupando y solo pueden cambiar de estado los más próximos la energía máxima o nivel de Fermi. Cuanto mayor sea el número de estados próximos a ese nivel menor es el gasto que se requerirá para que algunos de ellos inviertan su espín y disminuyan así la energía repulsiva culombiana, originando la aparición de imanación espontánea. En este sentido, las variaciones de distancias interatómicas, respecto a las de las muestras masivas, en las superficies de las NP pueden inducir variaciones de la densidad de estados capaces de promover la aparición de un espín neto, o comportamiento ferromagnético, en sustancias que en volumen no presentan imanación espontánea. Más abajo comentamos muy brevemente el ejemplo de las NP de paladio, Pd.

Otra característica de las NP se deriva de la necesidad de mantenerlas dispersas por el uso de moléculas que impidan su unión. Estas moléculas pueden unirse mediante enlace covalente a los átomos de la superficie o bien mediante fuerzas más débiles de tipo Van der Waals. En el caso de que el enlace sea covalente la estructura electrónica de los átomos de la superficie de las NP que están enlazados se modifica muy notablemente. Puede, en general, haber transferencia de carga lo que conduce a un drástico cambio en las características de los electrones de superficie. El nivel de ocupación de los estados de la banda de superficie, modificado por el enlace, y modificado en un número de átomos que como hemos visto es muy relevante respecto al número total de átomos de la superficie es un parámetro muy determinante de las propiedades magnéticas de dicha superficie. En una banda de energía no completamente llena es posible que algunos electrones al nivel de Fermi inviertan su espín para disminuir la energía culombiana si la densidad de estados es suficientemente grande, como se describe muy sucintamente en el párrafo anterior. Pero si una banda está llena, la densidad de estados es cero al nivel de Fermi y la inversión de un espín requiere vencer un gap de energía finita que es la que separa la banda llena de la inmediatamente situada encima de ella. En el caso del oro se ha observado un comportamiento sorprendente. El oro, en volumen, es diamagnético y tiene una densidad de estados muy pequeña al nivel de Fermi $g(E_F)=0,29$ estados por *eV* por spín, por átomo. Cuando las NP de oro son funcionalizadas con moléculas que se adhieren a su super-

ficie mediante un enlace thiol se convierten en ferromagnéticas, pero si se usa como dispersante un conjunto de moléculas de surfactante débilmente unidas a los átomos de superficie las NP permanecen diamagnéticas como sucede con el oro masivo. La razón de la aparición del ferromagnetismo hay que buscarla en la profunda modificación que el enlace con los átomos de azufre, enlace thiol, produce en la estructura electrónica de la banda de superficie de las NP de oro, la cual promueve un cambio de la densidad de estados suficiente para permitir la inducción de ferromagnetismo (13).

Microscopía de dos conjuntos de nanopartículas de oro y diagramas de distribución de tamaños

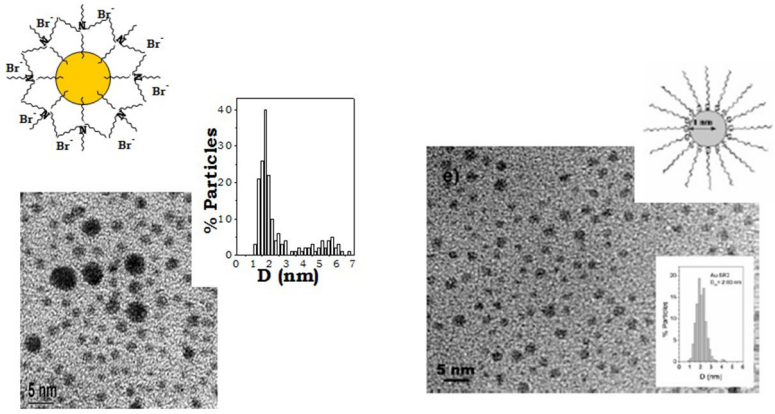
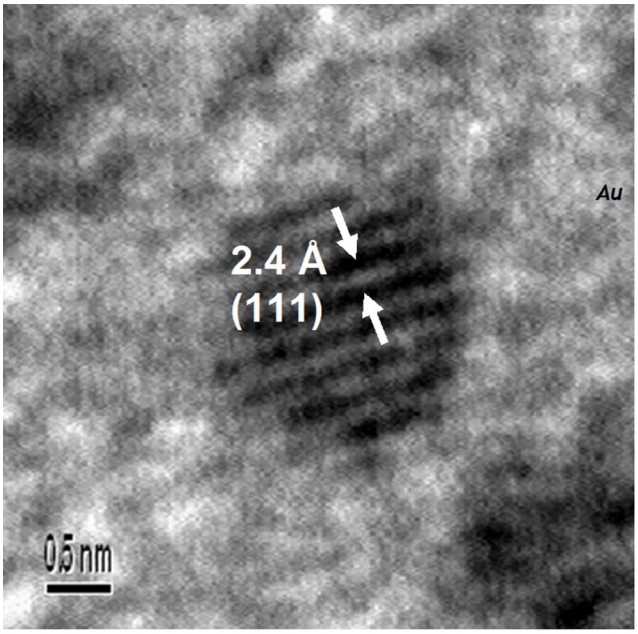


Figura 1-12. Microscopía de dos conjuntos de nanopartículas de oro y diagramas de distribución de tamaños (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

Es distinto el caso del Pd, ya que este metal que cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras con una constante de red de 3,8898 ångström. En estado de átomo libre tiene configuración $4d^{10}$ que corresponde al Kriptón. Es, por tanto, un átomo de capas cerradas y de comportamiento diamagnético. Sin embargo en el cristal la configuración es $4d^{10-\xi}5s^{\xi}$ y la capa *4d* está incompleta. En estado metálico, debido al carácter incompleto de la capa *4d*, es paramagnético fuerte ya que su densidad de estados es muy alta $g(E_F)=1,23$ estados por *eV,* por espín *y* por átomo. Tanto el Pd como el Pt se han considerado elementos de transición muy próximos al comportamiento ferromagnético. En forma de NP con radio promedio de *1,2 nm* (14) presentan ferromagnetismo. Los estudios de microscopía electrónica de alta resolución llevados a cabo en estas NP indican que existe una gran cantidad de faltas de apilamiento en su superficie lo que implica una ruptura de la simetría cúbica y una posible variación de $g(E_F)$, suficiente para inducir ferromagnetismo.



Una nanopartícula de oro, observada con alta resolución. Se aprecian los planos atómicos

Figura 1-13. (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

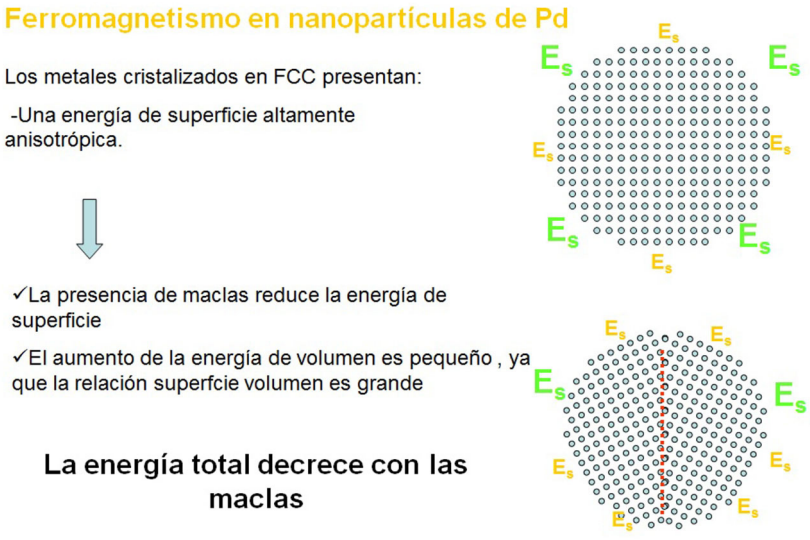


Figura 1-14. Ferromagnetismo en nanopartículas de Pd (I) (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

En resumen la alta fracción de átomos de superficie característica de las NP puede dar lugar a modificaciones profundas de sus propiedades físicas cuando se comparan con las de las muestras masivas de las mis-

mas sustancias. El cambio de estructura cristalina o la modificación de los estados electrónicos generados por las moléculas dispersantes son causa de alteraciones de la densidad de estados y de las propiedades físicas sensibles a este parámetro que, como es bien sabido, es de máxima relevancia en física de la materia condensada. Sobre estos aspectos se puede consultar un reciente artículo de revisión publicado en *Journal of Physics Condensed Matter* (15).

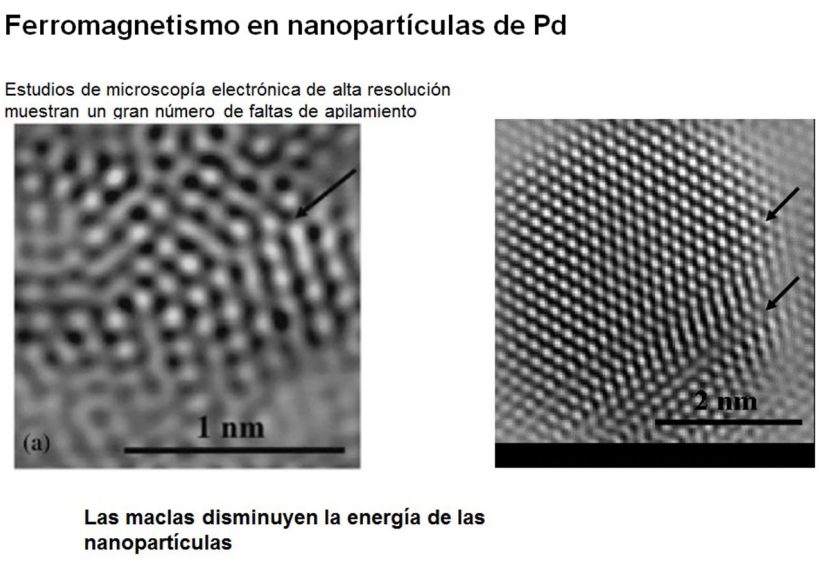


Figura 1-15. Ferromagnetismo en nanopartículas de Pd (II) (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

Un ejemplo de NC en futuras terapias: hipertermia

La elevación de la temperatura de un tumor es un método terapéutico para el tratamiento del cáncer y es conocido como tratamiento por hipertermia. En la actualidad la hipertermia se utiliza conjuntamente con los tratamientos terapéuticos convencionales, como la quimioterapia o la radioterapia, con el fin de potenciar los efectos terapéuticos de algunas drogas anticáncer o de la radiación ionizante. Los ensayos clínicos para elevar la temperatura de un tumor comenzaron en los años 70, con la aplicación de diferentes tipos de radiación como microondas, radiofrecuencia o ultrasonido, llegando incluso a introducir las fuentes de calor dentro del tumor.

Existen dos métodos diferentes para el tratamiento de tejidos tumorales por calor: la termoablación, en la que el rango de temperaturas es 48-60 ºC, y la llamada hipertermia moderada, para temperaturas entre 42-48 ºC. En la primera se produce directamente la necrosis del tejido orgánico, mientras que la segunda tiene diversos efectos tanto a nivel celular (como la

regulación de la apoptosis, la liberación de proteínas de choque térmico, etc.) como a nivel orgánico (cambios en el pH y en la perfusión y oxigenación del microentorno del tumor).

La hipertermia magnética es el método terapéutico para el tratamiento del cáncer basado en el uso de nanopartículas magnéticas (NP) biocompatibles. El procedimiento consiste en inyectar las NP en un tumor y aplicar un campo magnético alterno de amplitud $\mu_0 H$ y frecuencia elegida f previamente, que suministra energía a los momentos quedando estos en un estado excitado. Esta energía se disipa en forma de calor cuando los momentos relajan a su posición de equilibrio. Dependiendo de la conductividad térmica y la capacidad calorífica del medio orgánico, el calor generado por la relajación elevará la temperatura del entorno de las NP, ocasionando la muerte de las células tumorales.

El uso de la hipertermia magnética como terapia alternativa al tratamiento del cáncer, supondría un gran logro para la oncología actual. Se trata de un tratamiento localizado y selectivo, por lo que se evitarían los efectos secundarios producidos por la aplicación de radioisótopos. En el caso de tumores localizados y de fácil acceso, como en el cáncer de mama, las NP pueden aplicarse directamente al tumor. En el caso de tumores internos, como un tumor cerebral, las NP deben ser funcionalizadas para ser dirigidas selectivamente hacia las células tumorales.

Para optimizar la capacidad calentamiento de las NP, es necesario entender los mecanismos involucrados en dicho calentamiento, es decir, es necesario un estudio detallado y sistemático de todos los parámetros involucrados en la interacción del campo magnético alterno con los átomos que conforman las NP. El objetivo es buscar las NP más adecuadas que optimicen la capacidad de calentamiento en función de la composición, tamaño de partícula, tamaño hidrodinámico, recubrimiento, estabilidad coloidal y, fundamentalmente, grado de biocompatibilidad. Es un objetivo sumamente ambicioso que requiere la interacción de científicos pertenecientes a diferentes áreas de investigación, como físicos, químicos, biólogos, farmacéuticos, médicos e ingenieros.

La eficiencia de cualquier material para generar calor debido a la aplicación de un campo magnético alterno se mide en términos de la tasa de absorción específica (SAR: *specific absortion rate*) o de la disipación de potencia específica (SLP: *specific loss power*). Estos términos se usan para definir la transformación de energía magnética en calor. El SAR es la medida de la razón a la cual las NP absorben energía del campo magnético alterno aplicado, y esta energía será luego depositada en el material biológico en el que estén las partículas. El parámetro SAR, que es proporcional a la potencia disipada, depende de la frecuencia y del cuadrado de la intensidad del campo magnético aplicado. Esto implica que el valor del SAR no sólo depende de los parámetros intrínsecos de las NP, sino también de parámetros extrínsecos, como son la frecuencia y la intensidad de campo aplicado. Como conse-

cuencia, la comparación directa de valores de SAR obtenido para diferentes NP en diferentes laboratorios, no da información sobre las propiedades de las partículas y no permite comparar resultados experimentales.

Control de células cancerígenas. Se ven con nanopartículas , sin ellas y tras haberse aplicado un campo

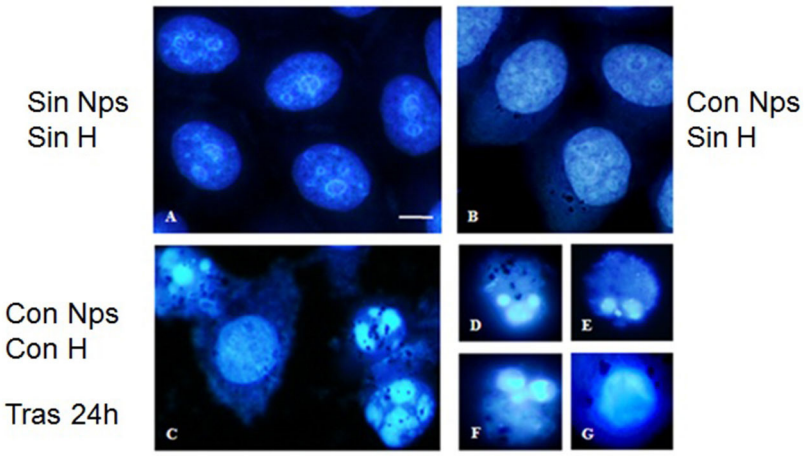


Figura 1-16. Control de células cancerígenas. Se ven con nanopartículas, sin ellas y tras haberse aplicado un campo (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

A, B y C muestra las nanopartículas, el citoplasma y ambas superpuestas, respectivamente, D, E y F lo mimso pero sin nanopartículas. Puede apreciarse en C como la célula ha comido muchas nanopartículas

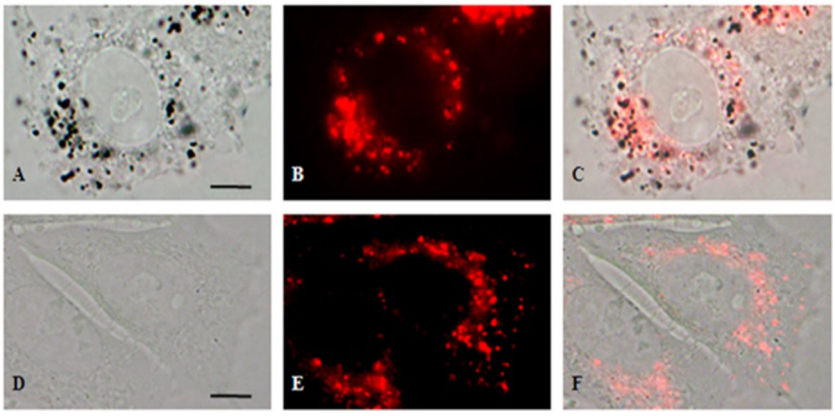


Figura 1-17. (Fuente: Instituto de Magnetismo Aplicado)

Los valores más altos del SAR fueron obtenidos para partículas de maghemita (γ-Fe203) recubierta con dextrano o polietilenglicol (d=15,3 nm) y con magnetosomas (partículas de 20 a 45 nm rodeadas de una membrana biológica) aislada de la bacteria. Aunque la síntesis y la modificación de superficie de NPM son la clave para la distribución de tamaño, propiedades magnéticas, estabilidad y biocompatibilidad de las NP aún no hay un estudio sistemático que determine la influencia de estos parámetros en la capacidad de calentamiento de las NP. En particular, cómo depende el SAR de la anisotropía efectiva, del volumen, la temperatura, la frecuencia y amplitud del campo magnético aplicado y, eventualmente, de las interacciones entre partículas. Además, en el caso de partículas recubiertas, cómo afecta el recubrimiento a la eficiencia de calentamiento.

Los diferentes mecanismos de generación de calor por NP magnéticas monodominios pueden estudiarse variando el tamaño, la anisotropía magnética del material del cual están compuestos y la viscosidad del medio en el que están dispersas. Las NP de maghemita γ-Fe203, que son las aceptadas por el organismo de protección y promoción de salud (FDA, por sus siglas en inglés), se usan normalmente con propósito de diagnóstico y terapéutico. La capacidad de calentamiento de estas partículas depende fuertemente de su tamaño, que para los campos de radiofrecuencia en el rango de hipertermia su tamaño óptimo se encuentra entre los 14 y 16 nm.

Los efectos del calentamiento, i.e., la distribución espacial y temporal de la temperatura en la región del tumor estarán determinados por parámetros intrínsecos de las NP como el tamaño, la imanación de saturación, la anisotropía magnética efectiva (cristalina y de superficie), el radio hidrodinámico y la interacción entre partículas, pero también por parámetros técnicos externos como la intensidad y frecuencia del campo magnético aplicado y duración de la aplicación. Por lo tanto, para poder aplicar una dosis adecuada, es necesario entender la física subyacente del problema.

El calentamiento de NP sometidas a un campo magnético alterno se debe básicamente a 3 procesos: i) Disipación de energía por relajación de los momentos magnéticos de los átomos o el momento magnético de las partículas. ii) Calentamiento producido por corrientes inducidas en la superficie de las NP. iii) Procesos de resonancia. Dado el tamaño de las NP ($d \leq 100$ nm), el calentamiento por inducción magnética puede ser descartado del análisis. Los rangos de frecuencia utilizados en la hipertermia están muy por debajo de los GHz ($f \leq 1$ MHz), frecuencias por encima de la cual el tejido orgánico se calienta por inducción. Dado que los procesos de resonancia requieren frecuencias aún mayores quedarán afuera de este análisis.

Cuando el tamaño de particular decrece, la probabilidad de magnetización espontánea se incrementa debido a que la activación térmica aumenta y pueden observarse efectos de relajación independientemente de la frecuencia de medida. La frecuencia de medida ω define el volu-

men crítico V_c para el cuál se cumple que $\omega\tau = 1$, donde τ es el tiempo de relajación característico de ese sistema. Para tamaños de partículas próximos al tamaño crítico, los efectos de relajación causan un rápido decrecimiento de la magnetización remanente: $M_r = M_{r0}e^{-t/\tau}$, dónde es la remanencia para partículas que no están afectadas por la relajación. Al mismo tiempo, por encima del régimen superparamagnético, la coercividad decrece con el tamaño de partícula de la siguiente forma $H_c = (2K / M_s)[1-(V_c / V)^{1/2}]$, $V > V_c$. Consecuentemente, la disipación de calor producido por ciclo de histéresis se anula abruptamente cerca del tamaño crítico de la partícula. Un trabajo de revisión que puede consultarse sobre el tema es el referido de Crespo et al (15).

Bibliografía

1. Chaisson, Eric y McMillan, Steve. *A begineer's guide to the univers.* s.l.: Amazon, 2012.
2. Monod, Jacques Lucien. *Le Hasard et la Necesitté.* s.l.: Ed. Du Seuil, 1978.
3. Avery, John Scales. *Information theory and evolution.* s.l.: World Scientific, 2003.
4. Shannon, Claude Elwood. 27, julio y octubre de 1948, *The Bell system technical journal*, págs. 379-423, 623-656.
5. Feynman, Richard Phillips, Leighton, Robert Benjamin y Sands, Matthew Linzee. *Lectures on Physics.* s.l.: Addison-Wesley, 1975. Vols. tomo I, 26-3.
6. Velayos, Salvador. «Historia del Magnetismo». *Revista del Colegio Mayor Universitario de «Santa Cruz».* Valladolid: s.n., 1950. 10.
7. Sánchez del Río y Sierra, Carlos. *Los principios de la física en su evolución histórica.* s.l.: Ed. Universidad Complutense, 1985, pág. 161.
8. Galindo Tixaire, Alberto. *En el centenario de Blas Cabrera.* s.l.: Universidad Internacional de Canarias «Pérez Galdós», 1979, pág. 161.
9. Ray, Michael W, y otros. «Experimental observation of Dirac monopoles». *Nature.* 30 January 2014. 505, págs. 657-660.
10. Ynduráin Muñoz, Francisco José. *Electrones, neutrinos y quarks.* 2. s.l.: Crítica, 2006, pág. 99.
11. Hämäläinen, Matti, y otros. «Magnetoencephalography—theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain». *Reviews of Modern Physics.* 1993. 65, pág. 413.
12. Schnitzler, Alfons y Gross, Joachim. «Normal and pathological oscillatory communication in the brain». *Nature Reviews Neuroscience.* Abril de 2005. 6, págs. 285-296.

13. Crespo, P., y otros. «Permanent Magnetism, Magnetic Anisotropy, and Hysteresis of Thiol-Capped Gold Nanoparticles». *Physical Review Letters.* 20 de agosto de 2004. 93.
14. Sampedro, B., y otros. «Ferromagnetism in fcc Twinned 2.4 nm Size Pd Nanoparticles». *Physical Review Letters.* 4 de diciembre de 2003. 91.
15. Crespo, Patricia, y otros. «Magnetism in nanoparticles: tuning properties with coatings». *Journal of Physics: Condensed Matter.* 4 de diciembre de 2013. Vol. 25, 48, págs. 484006-484026.

Capitulo segundo

Nanotecnología en evolución

Fernando Briones
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Introducción

La teoría cuántica de los sólidos describe con precisión la mayoría de las propiedades de la materia macroscópica que nos rodea, en especial las de los sólidos cristalinos cuya estructura periódica facilita mucho el tratamiento matemático y la interpretación de sus propiedades. Estas son en muchos casos inconcebibles dentro de la física clásica, y sólo se han podido explicar sobre la base de conceptos y formalismos cuánticos sofisticados que se han ido desarrollando a lo largo del siglo xx.

Pero la teoría cuántica del sólido se enfrenta a nuevas dificultades cuando se pretende aplicar a objetos de dimensiones del orden de unos nanómetros, la escala mesoscópica, intermedia entre la escala atómica y la macroscópica. En esta escala, las propiedades fisicoquímicas de los agregados atómicos o de estructuras moleculares complejas, resultan muy diferentes de las de los medios continuos o de los cristales periódicos macroscópicos formados por esos mismos átomos o moléculas. Más aún, en algunos casos aparecen propiedades emergentes características de una coherencia cuántica extendida a todo el objeto. Casos paradigmáticos son, por ejemplo, el origen de los números mágicos en clústeres moleculares, las propiedades magnéticas de nanopartículas, los efectos de proximidad en interfaces metal normal/superconductor, los efectos de confinamiento cuántico en sistemas de baja dimensionalidad, como

son los pozos, hilos y puntos cuánticos en matrices semiconductoras, el túnel o inyección de spin y, recientemente, las propiedades electrónicas y estructurales del grafeno, entre las muchas que se descubren año tras año, y no dejan de sorprender a los físicos. No solo a los físicos; la investigación en nanoestructuras genera continuamente sorpresas en una comunidad mucho más amplia que la física: la de la química en la escala nano, por ejemplo en la catálisis, o incluso en la biología en temas como la fotosíntesis o la orientación de las aves migratorias.

Las nanociencias tratan precisamente de entender y modelar las propiedades de los nanoobjetos en los que las propiedades globales dependen acusadamente de su tamaño, de sus límites o superficies y/o de su forma en términos de la distribución topológica de sus componentes en relación con las funciones de onda características.

Se trata de investigaciones multidisciplinares que requieren aportaciones de la física, la química, la biología, las matemáticas, la informática y, por supuesto, de especialistas particularmente dispuestos a interaccionar y conocer los métodos y los lenguajes de las demás disciplinas.

Por otra parte, la nanotecnología, basada en las nanociencias, es un nuevo tipo de ingeniería aplicable en la escala nano. Se trata del desarrollo de técnicas experimentales que permitan la observación, la medida, la manipulación y la fabricación de estructuras, objetos, dispositivos y sistemas nanométricos.

La idea de que sería posible hacer ingeniería en la nanoescala fue desarrollada y expresada públicamente por primera vez, ya en 1959, por Richard Feynman, profesor de física teórica en Caltech, cuyo genio excepcional se ha extendido en muchos campos de la física y la tecnología.

Inicialmente, sin embargo, sus ideas sobre la nanoescala no tuvieron mucho impacto en la comunidad científica hasta que, mucho más tarde, K. Erik Drexler, un ingeniero extraordinariamente creativo y visionario del MIT que trabajaba con la NASA en proyectos futurísticos de colonización del espacio, leyó las conferencias de Feynman y en 1986 publicó el libro «*Engines of creation: The coming era of Nanotechnology*», especulando sobre la posibilidad de diseñar y fabricar máquinas moleculares. La llamativa propuesta de Drexler sirvió para popularizar el tema en todo el mundo. Los químicos conocían ya desde hacía mucho tiempo la variedad más elemental de ensamblado de moléculas a medida, la síntesis química, por lo que la idea de sintetizar macromoléculas en la escala nanométrica gustó mucho inicialmente y se comenzó a considerar dichas moléculas como verdaderas nanomáquinas o nanorobots capaces de fabricar nuevas moléculas, auto-replicarse incluso y de auto-organizarse en sistemas o estructuras macroscópicas complejas.

De ahí procede gran parte del entusiasmo inicial por la nanotecnología: su dominio podría implicar la realización del ideal del industrial post-mo-

derno, fabricar sin maquinaria y, mejor aún, sin obreros. Para algunos, significó una esperanzadora oportunidad de salvar vidas mediante el desarrollo de estupendas aplicaciones biomédicas, para otros en cambio, la de desarrollar nuevas armas letales.

Sin embargo, aunque estas posibilidades han dado lugar a numerosas historias de ciencia ficción, el objetivo de diseñar y fabricar nanomáquinas moleculares funcionales, ya entrados en el siglo XXI, no ha prosperado significativamente, tiene serios detractores y ha generado no pocas frustraciones. Entre otras cosas, porque a medida que vamos investigando y sabiendo más, la consecución de este objetivo aparece cada vez más alejada. Veremos más adelante por qué.

Uno de los argumentos más fuertes en contra de la posibilidad de intervenir en el mundo nano desde nuestra dimensión macro procede de la termodinámica, una ciencia clásica con principios de validez general e indiscutible. El ruido, las fluctuaciones aleatorias debidas a la agitación térmica en objetos de dimensiones nanométricas, recuérdese la amplitud del movimiento Browniano para objetos de tamaños micrométricos como son los granos de polen, haría imposible el intento de diseñar y construir herramientas, ni siquiera microscopios, para manipular u observar nanoobjetos. En consecuencia, nadie le dedicaba el interés necesario ni era fácil conseguir recursos para intentarlo.

Sin embargo, un pequeño grupo formado por dos físicos, Heinrich Rohrer y Gerd Binnig, con la valentía y la libertad que les permitía una gran empresa de alta tecnología, IBM, en sus laboratorios de investigación en Zurich, se empeñaron en desarrollar un microscopio basado en medir la corriente túnel entre los átomos terminales de una punta metálica extremadamente afilada y los átomos de una superficie conductora para utilizar esta corriente como parámetro de realimentación y mantener constante la distancia punta/superficie durante un barrido lineal sobre la misma. En 1982 publicaron las primeras imágenes tomadas con un scanning tunneling microscope (STM) con resolución suficiente para detectar detalles topográficos de tamaño atómico en ultra alto vacío y en 1986 compartieron el Nobel de física con Ernst Ruska, el inventor del microscopio electrónico. Binnig inventó también, poco después del STM, otro instrumento revolucionario, el microscopio de fuerzas atómicas (AFM) complementario del anterior y capaz de funcionar al aire, sobre superficies aislantes, a temperatura ambiente e incluso en medios líquidos a partir de la medida de la fuerza ejercida por los átomos de una nanopunta móvil sobre la superficie o nano objeto a representar.

¿Qué ha pasado con las objeciones termodinámicas? Los principios básicos de la termodinámica en sistemas aislados siguen siendo válidos, por supuesto, pero los microscopios pueden alcanzar resolución atómica porque integran una realimentación electrónica externa, en tiempo real,

controlada por la corriente túnel en el STM o por la medida con láser de las fuerzas atómicas en el AFM. La teoría correspondiente, incluyendo el efecto de una realimentación «inteligente» en sistemas nanométricos abiertos, se desarrolló posteriormente y tranquilizó a los termodinámicos.

Debemos señalar que el primer STM que salió del laboratorio de IBM de Zurich en 1984 fue cedido a la Universidad Autónoma de Madrid, UAM, gracias a una colaboración de Binnig con el grupo del Prof. Arturo Baró que había estado trabajando en IBM como postdoc. Desde entonces, Baró, en el Departamento de Física que había fundado el Prof. Nicolás Cabrera en la UAM, se dedicó a desarrollar nuevos microscopios STM y AFM, pioneros en España y, con sus estudiantes de tesis y colaboradores, llegó a crear una empresa, Nanotec Electrónica, que fabrica y comercializa en todo el mundo microscopios de este tipo. Un ejemplo perfecto de lo que se puede lograr a partir de una línea de investigación básica y el dominio de tecnologías avanzadas. Desde ese momento, 1982, una vez demostrado que es posible construir instrumentos capaces de acceder a la escala nano llegando a observar y manipular la materia átomo a átomo, la expansión de la nanotecnología ha sido imparable.

De la microelectrónica a la nanoelectrónica

Los dispositivos nanoelectrónicos no son solamente dispositivos muy pequeños; son dispositivos cuánticos. La nanoelectrónica se distingue precisamente de la microelectrónica por hacer uso de esos efectos mesoscópicos de coherencia cuántica en estructuras de tamaño sub-micrométrico.

El primer dispositivo nanoelectrónico fue el diodo túnel, descubierto por Leo Esaki en 1959. Esaki era entonces el único físico teórico contratado por la, entonces pequeña, empresa Sony. A pesar de que el negocio de la empresa estaba asegurado fabricando aparatos de radio de transistor, se le permitió desarrollar en sus laboratorios un trabajo de investigación básica sobre las corrientes de fuga en aisladores y diodos. Ahora bien, cuando intentó presentar sus resultados y su interpretación teórica como tesis doctoral en la Universidad de Tokio, tuvo serias dificultades. Lo que era difícilmente aceptable por los profesores de Ingeniería Electrónica de entonces, era el que la corriente de electrones pudiera pasar a través de una barrera perfectamente aislante, como el Comendador del Don Juan Tenorio a través de las paredes, por un efecto de deslocalización puramente cuántico, el efecto túnel de Esaki. Pero, finalmente, fue capaz de convencerles, defender y publicar una tesis que resultó ser tan relevante para la electrónica que mereció el premio Nobel de física en 1973.

A comienzos de los años 70, el mismo Esaki, trabajando ya en IBM-Yorktown, USA, predijo teóricamente las propiedades de estructuras periódicas artificiales, las llamadas superredes, y en general de los nanosiste-

mas de dimensionalidad reducida, pozos, hilos y puntos cuánticos, cuyas dimensiones fueran comparables con la extensión efectiva del electrón en un semiconductor, del orden de 10 nm. Una de las propiedades más interesantes de estos sistemas ideales de baja dimensionalidad era la de emitir luz con una eficiencia extraordinaria debido a la presencia simultánea de electrones y huecos en la misma región del espacio (superposición por confinamiento cuántico). Como veremos, este efecto ha sido fundamental para el desarrollo de múltiples dispositivos optoelectrónicos entre los que se encuentran los diodos laser de comunicaciones por fibras ópticas. Por cierto, Esaki es Doctor Honoris Causa por la Universidad Politécnica de Madrid (1976) con cuyos profesores de la Escuela de Telecomunicaciones (ETSIT) ha colaborado desde IBM en numerosas ocasiones y contribuido a la formación de excelentes investigadores.

Años más tarde, (1998), Horst Störmer, recibió también el reconocimiento del Nobel por otro efecto puramente cuántico, el efecto Hall fraccionario en el gas bidimensional de electrones confinado en el estrecho pozo de potencial asociado a una heterounión semiconductora. Las extraordinarias propiedades de alta movilidad de este gas bidimensional de electrones, cuya cuantización del efecto Hall había sido descubierta anteriormente por otro Nobel alemán, Klaus von Klitzing (1985), han dado lugar al desarrollo de los transistores de alta movilidad de electrones (HEMT), actualmente muy extendidos en el campo de las micro-ondas y comunicaciones móviles.

En 1968 Al Cho, en los laboratorios Bell de New Jersey, había inventado una técnica, la epitaxia de haces moleculares (MBE), con la que se hizo posible fabricar en el laboratorio y, más tarde industrialmente, estas estructuras semiconductoras artificiales con un control o precisión dimensional mejor que el nanómetro. Se pudieron así comprobar muchas de las propiedades predichas teóricamente y descubrir experimentalmente, como suele suceder, algunas nuevas e insospechadas. La técnica MBE se basa en dirigir chorros de diferentes átomos o moléculas hacia la superficie caliente de un sustrato cristalino sobre el que reaccionan químicamente consiguiendo su disposición ordenada en capas sucesivas de espesor atómico. Aunque en sus comienzos sus creadores no la clasificaron como nanotecnología porque no se había inventado siquiera este término, se trata de un ejemplo paradigmático de tecnología de nano-fabricación que ahora se califica de tipo «*bottom-up*», es decir de abajo a arriba, construyendo la materia átomo a átomo, y resultando fundamental para el desarrollo de muchos dispositivos semiconductores. Esta técnica ha sido perfeccionada por diversos grupos, uno de ellos el nuestro del IMM-CSIC, pionero también en España, a lo largo de los últimos 30 años y los reactores de MBE han salido de los laboratorios de investigación para convertirse en una de las más rentables tecnologías industriales a la hora fabricar en gran escala nano-dispositivos. Los diodos láser, inventados por el ruso Zohres Alferov, del Instituto Ioffe en S. Petersburgo (Nobel

en 2000) y los transistores y circuitos HEMT basados en los electrones 2D descubiertos por von Klitzing, son un magnífico ejemplo de ello.

El impacto socio-económico de estos dispositivos es ya enorme. Así, los cabezales de lectura presentes en cualquier equipo reproductor/grabador de CD y DVD, son sistemas ópticos integrados y miniaturizados que incorporan un láser de pozo cuántico fabricado por MBE. Para dar una idea de la capacidad de esta técnica: con un solo reactor de MBE, se fabrican del orden de 100 millones de dispositivos laser al año. Más aún, el desarrollo más revolucionario y de mayor impacto en este siglo, Internet, es fundamentalmente posible gracias a la extraordinaria eficiencia del diodo-láser de confinamiento cuántico para emitir luz y modularla a un ritmo de más de 40 Gb por segundo. En estos momentos, casi todo el enorme flujo de información que circula en Internet entre continentes a través de fibras ópticas, a 2/3 de la velocidad de la luz y en una red global de más de 2.800 millones de usuarios (datos de final de 2013), ha sido transmitido por estos diodos, nanodispositivos por excelencia.

En cuanto a grabación y lectura de información digital, todos los populares equipos lectores y grabadores de CD y DVD, incluidos los más modernos Blue Ray, funcionan con diodos láser de este tipo.

Por otro lado, en las comunicaciones por micro-ondas, los ya imprescindibles teléfonos móviles, i-Pads, etc., emplean circuitos que integran HEMT de electrones 2D de alta movilidad.

Así que, al menos a través de estas aplicaciones pioneras, puede decirse que la nanotecnología ha entrado ya, masivamente, en nuestra sociedad, la sociedad de la información. Y casi nadie se ha dado cuenta.

Ciencia y tecnología en la escala nano

Una característica específica de las nanociencias es la inmediatez entre los descubrimientos científicos básicos y el desarrollo de las tecnologías que de estos se derivan. En general, las nanotecnologías se desarrollan actualmente en laboratorios universitarios o centros públicos y son aplicadas rápidamente por empresas fuertemente competitivas ligadas al entorno académico. Se puede hablar ya incluso de una ingeniería de nuevo cuño en la que el ingeniero, el inventor, además de utilizar la mecánica, la resistencia de materiales, la dinámica de fluidos, la termodinámica, utiliza las ecuaciones de Schrödinger o los últimos avances de la biología molecular para calcular y diseñar sus inventos.

La física clásica es una física que cree en el determinismo. Desde Galileo, la física cree en la causalidad, en la verdad de la realidad experimental, en la lógica y en las matemáticas, e incorpora cierto fundamentalismo en la confianza de que el hombre pueda entender el mundo y descri-

birlo mediante leyes expresadas rigurosamente por hermosas fórmulas matemáticas.

La física cuántica, por el contrario, implica un «agnosticismo» de base, inherente a un modelo indeterminista de la realidad que, por ello, resulta incomprensible e inaceptable para muchos. Nos cuesta, y nos costará mucho todavía, asumir una realidad cuántica, tan alejada de nuestra experiencia cotidiana y tan ajena a nuestro bagaje cultural.

Así, aun siendo a menudo motor de cambios sociales gigantescos, las tecnologías más importantes del siglo xx, con la excepción de la tecnología nuclear y del láser, se han basado en la física del siglo xix, mecánica, termodinámica, fluidos, electromagnetismo, física clásica en suma. Incluso la tecnología microelectrónica, la tecnología más avanzada, poderosa y perturbadora de los últimos años del siglo, se basa en una concepción totalmente clásica de la física.

Análogamente, la tecnología del siglo xxi es probable tenga su máximo fundamento en la física que fue necesario crear en el siglo xx para entender y modelar la escala atómica, la física cuántica.

La ley empírica de Moore (1965, Gordon Moore, cofundador de INTEL) que establece que la densidad de integración de los circuitos integrados se duplica cada 18 meses, evolución que se ha ido cumpliendo rigurosamente hasta nuestros días, empieza a moderarse ya este año al entrar las dimensiones de cada nodo del circuito en el rango de los 14 nm longitud de puerta, del orden de sólo 30 átomos de la red del silicio. A partir de esta longitud de puerta mínima, la corriente túnel empieza a aumentar exponencialmente y constituye un problema fundamental. Por otra parte, debido a la necesidad de utilizar técnicas litográficas mucho más avanzadas, el coste de una factoría de producción, que supera ya los 5.000 millones de dólares, se dispara también exponencialmente. Se ve claro ya que pronto será necesario cambiar de mentalidad y utilizar nuevos conceptos de la física cuántica para diseñar los procesadores nanoelectrónicos de este siglo. Así, por ejemplo, dentro del programa europeo NANOCAD de ingeniería de diseño asistido por ordenador para modelar dispositivos electrónicos de dimensiones nanométricas, se ha desarrollado un simulador 3D-SIMNAD para el cálculo de probabilidades de túnel cuántico y densidades de carga electrónica con el fin de modelar las características de transistores SET (Transistores de un Solo Electrón).

Más aun, un sector de la industria electrónica ha reconocido el hecho, hasta ahora sin explotar, de que el electrón tiene spin además de carga eléctrica, y se ha lanzado a desarrollar la spintrónica, uno de cuyos primeros éxitos comerciales ha sido la masiva introducción en el mercado de las cabezas lectoras de discos duros basadas en el efecto de magnetorresistencia gigante y el de válvula de spin, descubiertos respectivamente por el alemán Peter Grünberg y el francés Albert Fert (Premios

Nobel en 2007). Con este último habíamos colaborado poco antes (1). En breve estos desarrollos serán seguidos por el lanzamiento de memorias MRAM, resistentes a las radiaciones nucleares, de gran interés obviamente para la defensa y no solo para la defensa. En principio no se piensa en sustituir las memorias actuales de silicio por las magnéticas de spin. Estas se reservan de momento para algunas aplicaciones militares críticas.

El impacto sobre la sociedad en general de las nuevas tecnologías informáticas, posibilitadas por el desarrollo rapidísimo de las capacidades de cálculo de los circuitos integrados es ya enorme.

Este año por ejemplo, el número uno entre los 500 mayores supercomputadores del mundo, el Tihane-2 (Vía lactea-2) desarrollado por la Universidad Nacional China de Tecnología de Defensa, puede hacer cálculos al ritmo de 33,8 PFLOPS, esto es $33{,}8 \times 10^{15}$ operaciones en coma flotante por segundo. Estos supercomputadores se utilizan ya, no solo para cálculos científicos y tecnológicos, sino para predecir fenómenos naturales como el clima, las corrientes marinas o los terremotos y, cada vez más, los comportamientos sociales, económicos y las acciones militares.

Por otro lado, la red global que permite intercambiar información de todo tipo y comunicarse en tiempo real, con unos 2.850 millones de ordenadores interconectados a la red (datos de 2013) y un enorme número más de móviles en 2014, no solo está cambiando a las jóvenes generaciones sino a toda la sociedad. Se trata de una verdadera revolución para las transacciones comerciales, bancarias, administrativas, para la educación, la salud, etc. pero, sobre todo, para el desarrollo de la investigación científica, de la tecnología y de la seguridad y la defensa.

Piénsese solamente en que la población mundial es del orden de 7×10^9 individuos y que basta un archivo de 1 MB, es decir 10^6 Bytes, para almacenar prácticamente toda la información relevante de cada persona. Bastaría pues una memoria de 7 PB (equivalente a 7.000 memorias comerciales de 1 TB) para tener fichada a toda la población del planeta. Además, se puede acceder en tiempo real a la información requerida en menos de una décima de segundo, que es lo que tarda en promedio el algoritmo de búsqueda de Google en encontrar lo que le pidamos.

No se trata ya de ciencia ficción; es suficiente con tener una tarjeta de crédito o entrar en cualquier red social para estar ya presente en varios bancos de datos de este tipo. Más aún, la evolución rapidísima y coordinada de, por una parte, la nanoelectrónica y por otra, las tecnologías informáticas de la computación y comunicaciones en red a escala global promete ya, sin duda alguna, la pronta aparición de las primeras formas de inteligencia artificial. De momento la red y sus buscadores, memorias y herramientas de todo tipo, es una especie de soporte o ampliación de la inteligencia de sus usuarios, pero vista en su conjunto cada vez se

parece más a una inteligencia colectiva que, como la del hormiguero es muy superior a la de las hormigas individuales que, evidentemente, tienen muy limitadas luces. Las implicaciones sociales y políticas de este hecho revolucionario son impresionantes y sus implicaciones en defensa merecerían por si mismas un capítulo aparte.

Pero la revolución informática no se para aquí. Sólo acaba de empezar. La física actual, en paralelo, está explorando una nueva opción de desarrollo de la informática: la Informática Cuántica, basada en una forma revolucionaria de codificar, procesar y transmitir información. Se barrunta además que esta nueva física va a ser capaz de modelar la enorme complejidad de la escala mesoscópica de las macromoléculas y de la vida. Y esta nueva física probablemente se agregue pronto a la fantástica dimensión global que está alcanzando ya la investigación en biología, la bioquímica, la biofísica y la bioinformática con la ayuda de las nanociencias, de las nanotecnologías y de potentísimas técnicas instrumentales como son los actuales sincrotrones, los láser de rayos X y las espectroscopias de femtosegundo (fs), por citar algunos ejemplos.

Como veremos más adelante en este capítulo, las inmensas capacidades informáticas y de supercomputación aportadas por la microelectrónica en los últimos años y la aparición de nuevos dispositivos y arquitecturas nanofotónicas, nanomecánicas, etc., se presentan como fundamentales para posibilitar la emergencia de esa informática cuántica, implementada sobre plataformas configuradas por dispositivos y procesadores de estado sólido que previsiblemente abrirá la vía para una implementación realista y en gran escala de los procesadores cuánticos. Pero, previsiblemente también, tendremos que esperar todavía bastantes años para llegar a ello y superar a la informática digital que conocemos.

Por otra parte, el rapidísimo ritmo con que evolucionan los conocimientos básicos y se transfieren a la tecnología, a la industria y a la sociedad es cada vez más acelerado. Ya en 2011, Mike Rocco, impulsor de la *National Nanotechnology Initiative* del presidente Clinton en 2001, (2) repasaba la evolución del área nano a que había dado lugar ese programa y calculaba que en este momento ya habría más de 2 millones de personas trabajando en diversos aspectos de la nanotecnología en todo el mundo. Parecería una cifra exagerada pero, haciendo la suma con cuidado, resulta perfectamente correcta. Más de la mitad de esa cifra corresponde a investigadores e ingenieros que trabajan, y mucho, al otro lado del océano Pacífico. Y, como hemos dejado entrever por la rapidez y creatividad de los desarrollos actuales en nanotecnología, la liebre (un descubrimiento revolucionario) puede saltar en cualquier momento y en cualquier sitio. En (3) incluimos también una referencia a un importante documento del mismo autor, en el que se consideran seriamente las previsibles implicaciones sociales y de todo tipo de la convergencia de los rápidos desarrollos de las tecnologías nano, bio, informáticas y del conocimiento a lo largo de este siglo.

Habrá que tener muy en cuenta este aviso, especialmente para la Prospectiva de Defensa, donde la capacidad de anticipación es cada vez más necesaria.

Naturalmente, no basta con que los expertos puedan prever la evolución de ciertos parámetros tecnológicos, climáticos, medio-ambientales, económicos, etc., o, incluso, de los acontecimientos sociales por medio de las avanzadísimas herramientas y apoyos de inteligencia artificial que tienen ya a su alcance; es necesario disponer de mecanismos cada vez más rápidos y eficaces para que los gobiernos puedan acceder a esos conocimientos y previsiones y puedan reaccionar adecuadamente antes de que sea demasiado tarde y las medidas puestas en práctica finalmente no resulten contraproducentes.

Un ejemplo cercano: en el campo de la computación cuántica mediante plataformas tecnológicas basadas en la interacción de fotones con iones o átomos, aislados en trampas ópticas en vacío con el fin de garantizar largos tiempos de coherencia cuántica, hay ya resultados muy interesantes.

Y resulta que el investigador responsable de ello es un joven y ya internacionalmente famoso investigador español, Ignacio Cirac.

Cirac dirige actualmente la división de Teoría del Instituto Max-Planck de Óptica Cuántica en Garching, Alemania, al frente de un grupo de 250 investigadores trabajando en esta opción, de momento la más accesible en el laboratorio, en paralelo con los desarrollos de la teoría.

Cuando, hace pocos años, sin previsible futuro en España, aceptó una oferta para marcharse a Austria y poco después a Alemania, como director del IQO-Max-Planck y exento de incompatibilidades, como catedrático en la Universidad de Múnich, era simplemente profesor titular de Física en la Facultad de Química de la Universidad de Castilla la Mancha en Ciudad Real y trabajaba solo. Ninguna institución española fue entonces capaz de reconocer plenamente su valía ni de hacer una contraoferta razonable.

Actualmente se investiga intensamente en diversas instituciones del mundo con el fin de desarrollar computadores cuánticos basados en otros tipos muy diferentes de plataformas tecnológicas. Las más recurrentes son plataformas de estado sólido e incorporan elementos de nanofotónica. Estas tienen más posibilidades realistas de ser escalables e integrables y crear así los primeros prototipos de computadores cuánticos. Es difícil prever cuando aparecerán las primeras máquinas de este tipo, porque hay que salvar todavía muchas dificultades, pero hay que estar muy atentos porque en menos de 10 años seguramente se producirán avances espectaculares y sus consecuencias, particularmente en el campo de la defensa, pueden ser impresionantes.

De momento, la aplicación de la información cuántica que, por parecer más cercana en el tiempo, está causando más interés, no es todavía la computación sino la transmisión cuántica de información cifrada o criptografía cuántica. De momento también, los métodos de transmisión más desarrollados se basan en las propiedades de los fotones o cuantos de luz que, como propuso Einstein en su teoría del efecto fotoeléctrico, tienen simultáneamente propiedades de ondas electromagnéticas y de partículas (por cierto, sin masa).

Ello que no implica que no se pueda transmitir información mediante electrones, protones o cualquier otro tipo de partícula/onda, sino que el fotón es más manejable y compatible con las redes actuales de transmisión de información digital por fibra óptica que se piensa seguir utilizando todavía mucho tiempo.

Los fotones transmiten información a la velocidad de la luz y a grandes distancias. Un fotón procedente de una galaxia en los confines del universo puede haber viajado durante miles de millones de años por el espacio sin perder la información que transporta. Tanto es así que, si lo hacemos pasar por una red de difracción (la interferencia es una operación cuántica por excelencia) y medimos su longitud de onda, obtenemos información suficiente para identificar el elemento atómico del que procede por su línea característica de emisión y, por su desplazamiento al rojo, para saber a qué distancia está la galaxia que lo ha emitido hace, pongamos, mil millones de años. El fotón es un cuanto de energía electromagnética pero puede ser considerado también como un cuanto de información, un bit cuántico (Qubit). En la práctica, la propiedad del fotón que se utiliza para transmitir un Qubit, es su estado de polarización, paralela o perpendicular al detector.

Para ello se necesita disponer de una fuente emisora de fotones en estados de polarización «entrelazados» (*entangled*) cuánticamente. Ello se logra con fotones procedentes de electrones con polarizaciones de spin correlacionadas, es decir, en un estado singlete (de spin cero ocupado por dos partículas de spin opuesto, por ejemplo 1/2 y -1/2. Se dice que los estados cuánticos de un sistema de dos o más partículas están entrelazados cuando se describen mediante un estado único que involucra a todas las partículas del sistema aunque estén separadas espacialmente. Un sistema atómico con dos electrones en estado singlete emite pares de fotones entrelazados. Mediante un dispositivo adecuado es posible enviarlos a través de dos fibras ópticas hacia dos detectores separados. Si medimos la polarización de uno de ellos, la polarización del otro queda determinada automáticamente aunque hayan recorrido distintos caminos, los dos receptores estén muy alejados uno de otro, y por tanto se detecten o midan en instantes de tiempo diferentes.

No es el momento, ni disponemos del espacio, para explicar aquí el fundamento de las tecnologías fotónicas que se desarrollan actualmente

para transmitir información cuántica cifrada con el fin de hacer imposible su interceptación o recepción no autorizada. Basta con decir que existe un enorme interés por parte de usuarios militares, financieros, etc., para los que la seguridad es fundamental, y que ya existen implementaciones comerciales, aunque no muy extendidas.

Un tema actual de investigación en nanofotónica es, precisamente, el desarrollo de dispositivos emisores de un solo fotón, de fotones entrelazados y de detectores de fotones individuales en las dos bandas de longitudes de onda utilizadas en comunicaciones por fibra óptica (1,3 y 1,55 micras). No se trata solamente de contar fotones uno a uno, cosa que ya es habitual en el espectro visible-UV, sino de discriminar con precisión el instante de su llegada y sus correlaciones en función de su polarización.

Los dispositivos más prometedores para la implementación práctica de esta tecnología son los emisores de fotones basados en las propiedades de los puntos cuánticos integrados en semiconductores III-V. Se llama punto cuántico (Quantum Dot, QD) a un nanocristal típicamente de InAs, un semiconductor de zanja prohibida de pequeña anchura (band gap), incrustado en una matriz de otro semiconductor también cristalino de zanja más an-

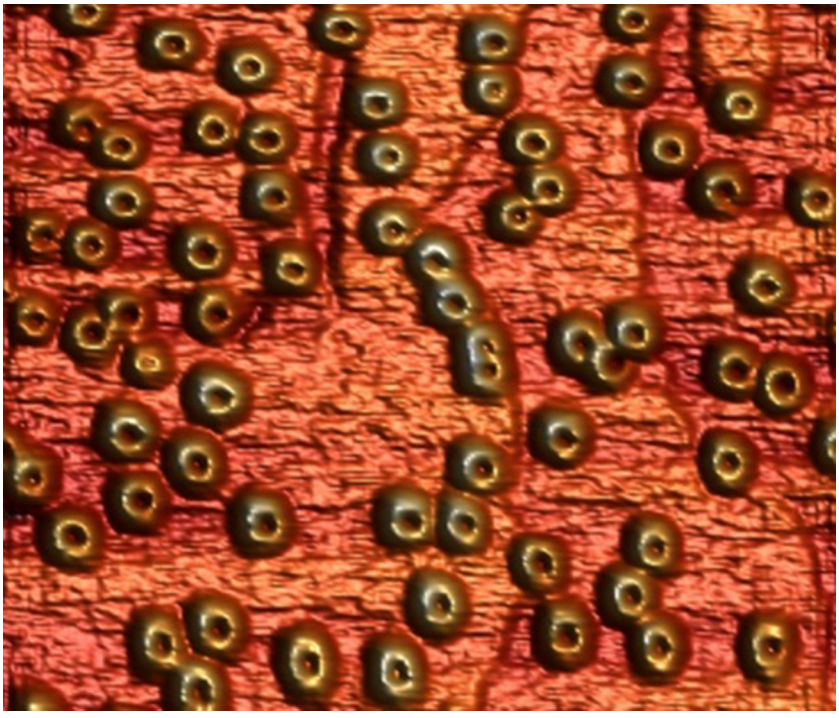


Figura 2-1. Micrografía de Fuerzas Atómicas (AFM) de anillos cuánticos (QRings) de InGaAs auto-ensamblados por MBE sobre la superficie de un sustrato de GaAs. Su densidad es del orden de 1011 cm-1 y la altura los escalones atómicos de las terrazas que se observan es de 0,34 nm (Fuente: Jorge García IMM-CSIC)

cha (típicamente GaAs o InP). Se produce así un efecto de confinamiento cuántico cero dimensional de las funciones de onda de electrones y huecos en la misma región del espacio. Los puntos cuánticos, con un diámetro del orden de los 15 nm, se comportan como si fueran átomos artificiales y emiten fotones en las mencionadas bandas del espectro infrarrojo con una eficiencia cuántica cercana al 100% por recombinación de estados excitónicos. Los puntos cuánticos se fabrican de forma auto-ensamblada y se integran industrialmente en la zona activa de la guía de fotones que constituye la cavidad resonante del pequeño chip (500×50×100 micras) de un láser actual de comunicaciones por fibra óptica.

El IMM-CSIC, sin ir más lejos, tras una larga trayectoria de investigación pionera en España en procesos de fabricación de estos dispositivos mediante técnicas originales de epitaxia de haces moleculares (MBE), ha participado activamente durante los últimos 8 años en una gran red de excelencia europea, SANDIE, financiada con 18,6 millones de euros, en colaboración con otros 25 laboratorios y empresas. Estas cifras dan una idea de la relevancia de este aspecto de la nanotecnología y de su dificultad técnica en Europa.

Como hemos adelantado, algunas nanoestructuras, difíciles de fabricar por métodos litográficos, son susceptibles en cambio de auto-ensamblarse espontáneamente e incluso de auto-organizarse por si mismas para formar estructuras modulares más complejas. La tecnología actual de fabricación «de abajo a arriba», es decir, construidas átomo a átomo, molécula a molécula, es ya una realidad práctica. En la figura 2-1 puede apreciarse la formación de anillos cuánticos de InGaAs de dimensiones nanométricas autoensamblados sobre sustratos de GaAs. Nuestra participación en el programa Self-Assembled semiconductor Nanostructures for new Devices in photonics and Electronics (SANDIE) se ha centrado precisamente en las técnicas de auto-ensamblado de nanoestructuras del tipo descrito más arriba, puntos cuánticos (Quantum Dots), hilos cuánticos (QWires), anillos (QRings), postes (Qposts), que, por su tamaño y sensibilidad a cualquier defecto o contaminante en su entorno, no soportan las técnicas de litografía habituales en microelectrónica. Empresas como Toshiba, en sus laboratorios europeos en Cambridge, UK, se han beneficiado especialmente de estos resultados aprovechando el gran potencial humano y excelencia investigadora de nuestros jóvenes doctores en estas tecnologías avanzadas. Actualmente, y en esta misma línea, un paso más adelante, nuestro laboratorio del Instituto de Microelectrónica de Madrid del CSIC (IMM-CSIC) trabaja en el desarrollo de emisores de fotones individuales en colaboración con la ya bastante desarrollada comunidad de centros e investigadores españoles activos en este tema particular (unos 50 doctores), sobre todo con el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de la Universidad Técnica de Cataluña, el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) de la

Universidad Politécnica de Madrid y el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.

Los emisores de fotones tienen que ser capaces de emitir fotones entrelazados o individuales, en secuencias preestablecidas según un código y a un ritmo de millones de fotones por segundo con una eficiencia de emisión muy alta, por lo que requieren una integración de los puntos cuánticos en posiciones muy precisas en cavidades ópticas resonantes de alta calidad o factor Q, microfabricadas por litografía electrónica con estructura de cristales fotónicos 2D. Las técnicas de posicionamiento con precisión nanométrica son en sí mismas muy sofisticadas y solo son accesibles a muy pocos laboratorios en el mundo. El grupo del IMM-CSIC, dirigido actualmente por la Dra. Luisa González, es un equipo reconocido internacionalmente por sus múltiples desarrollos originales de la epitaxia de haces moleculares (MBE) en semiconductores III-V, tiene acceso

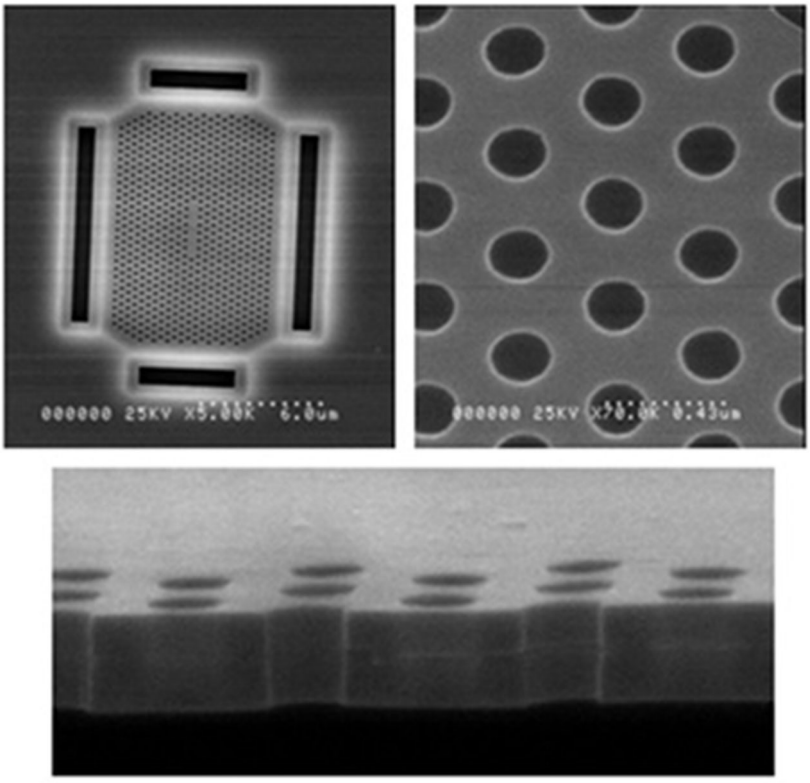


Figura 2-2. Microcavidades ópticas de tipo cristal fotónico 2D sobre membranas epitaxiales de GaAs, fabricadas en el IMM por litografía de electrones y ataque iónico. Incluyen nanoestructuras auto-ensambladas y centradas en el plano central de la membrana (aparecen como una línea horizontal blanca en la sección del dispositivo de la micrografía electrónica SEM en la parte baja de la figura) (Fuente: Iván Prieto y P. Aitor Postigo (IMM-CSIC))

directo a otras técnicas de nanofabricación como son la litografía de electrones y el ataque iónico para la fabricación de los diodos láser, detectores de IR y resonadores o micro-cavidades ópticas tipo cristal fotónico 2D en GaAs y InP (Dr. Aitor Postigo).

Al mismo tiempo, el laboratorio de este Instituto, dirigido por el Dr. Benito Alén, dedicado a la espectroscopia óptica de alta resolución espacial y espectral puede analizar la emisión de un solo QD aislado, a bajas temperaturas y en una bobina superconductora con campos magnéticos de hasta 9 Teslas, es único en nuestro país y permite determinar los estados cuánticos de las nanoestructuras producidas, puntos cuánticos, moléculas artificiales, hilos cuánticos, condensados de excitones, etc. La posición del Grupo del MBE del IMM es muy relevante en este tema, una carrera extraordinariamente competitiva en la que, precisamente en este año, han aparecido unos resultados muy alentadores (4)(5).

Por otra parte, este grupo ha trabajado en paralelo en la aplicación de estas mismas nanoestructuras a un campo de la tecnología totalmente diferente. Se trata del desarrollo de células solares de banda intermedia mediante la incorporación en su diseño de QD y de nanoestructuras fotónicas. Este desarrollo es el fruto de una magnífica colaboración con el Instituto de Energía Solar de la UPM del Prof. Antonio Luque, creador de la primera empresa española, ISOFOTON, capaz de competir en el difícil campo industrial de la energía fotovoltaica con tecnología propia. Queremos hacer hincapié en que la investigación en estas nanotecnologías implica emplear un enorme esfuerzo también en el desarrollo de nuevas técnicas experimentales macroscópicas para acercarse a la interfaz del mundo nano con el mundo macro. Estas nuevas herramientas no existían previamente y han tenido que irse desarrollando a medida que se hacían necesarias. Una de ellas, mencionada anteriormente, es la epitaxia de haces moleculares para nanoestructuras de materiales semiconductores cuya pureza tiene que ser extraordinaria. Como está basada en el auto-ensamblado de esas nanoestructuras (lo llamamos crecimiento, en la jerga de los nanotecnólogos), a partir de haces de átomos o moléculas eyectadas por cañones moleculares (células de Knudsen) en las que se evaporan los correspondientes elementos a muy altas temperaturas y en ultra alto vacío (UHV), es decir en un vacío mejor aún que el del espacio interplanetario.

La construcción de los correspondientes reactores, extraordinariamente complejos y utilizando materiales muy sofisticados (tantalio, nitruro de boro, cuarzo, etc.) tiene un coste enorme, no sólo económico sino de tiempo y dedicación. Es parte ya de la filosofía de trabajo de la investigación en esta área el desarrollar las propias máquinas que, aunque se puedan adquirir en empresas especializadas y a un coste del orden de 1 millón de euros, requieren siempre, además de un gran esfuerzo ulterior de puesta a punto, adaptación a cada material y proyecto, unos equipos

de monitorización y control in-situ con resolución nanométrica y una dedicación constante. Es ésta la principal razón por la que son muy pocos los grupos que trabajan con esta técnicas tan costosas y de que solo se puedan mantener operativas en laboratorios con infraestructuras y personal de apoyo técnico muy importantes. En la figura 2-3 se puede apreciar la complejidad y dificultad de un laboratorio de este tipo necesario para producir, sin embargo, objetos tan pequeños. En la industria, para producir en gran escala los diodos láser, los circuitos de micro-ondas y amplificadores HEMT o más recientemente las células solares multiunión de alta eficiencia, no queda otra opción que emplear máquinas de este tipo, solo que todavía más grandes y más costosas al estar automatizadas para una producción en serie. Ello implica una transferencia muy directa entre el laboratorio y la industria en este campo.

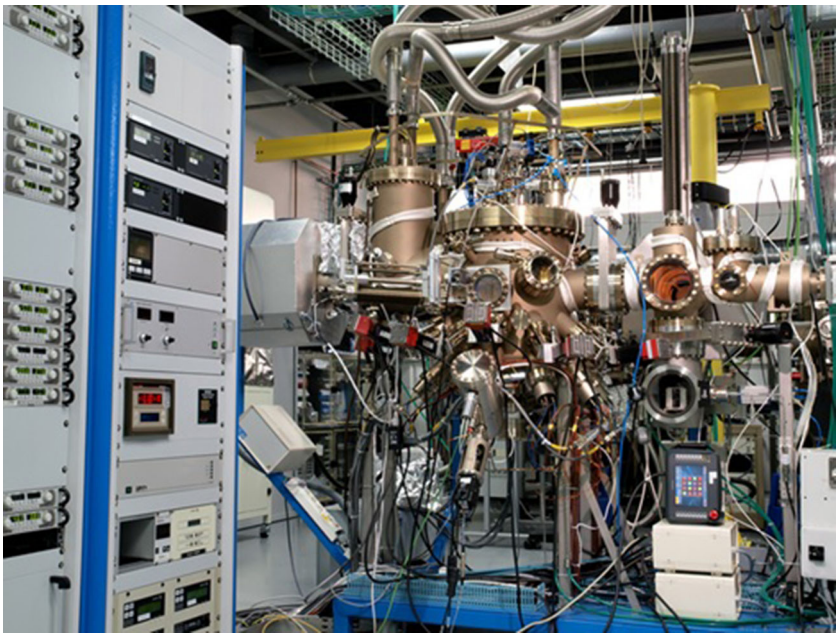


Figura 2-3. Vista de uno de los tres reactores de MBE del laboratorio de fabricación de nanoestructuras del IMM-CSIC. Requiere un soporte técnico externo muy complejo de nitrógeno líquido para refrigeración, a través de los tubos corrugados aislados en vacío que se pueden observar, gases y control de temperaturas y programación del proceso por ordenador (Fuente: Fernando Briones)

Hay que reconocer, por otra parte, la gran dificultad que implica para el investigador el superar todas las barreras y dar todos los pasos necesarios para, además de hacer buena investigación en tecnologías tan avanzadas como es el caso de las nano, poder llegar al punto en que sus resultados, científica y tecnológicamente válidos y competitivos, puedan transferirse a la industria o a la sociedad en general. En nuestro caso, han dado lugar a 4 patentes internacionales en explotación por empresas

de alta tecnología europeas y norteamericanas (6). Está claro que el esfuerzo solo de los investigadores no puede ser suficiente. Es fundamental la cooperación de unos mecanismos de transferencia eficaces en manos de profesionales familiarizados con las tecnologías y con sus aplicaciones y, más aún, con el sector industrial al que pueden ir destinados los resultados. Estos mecanismos fallan estrepitosamente en nuestro país en el área de las nanotecnologías por falta de personal con formación adecuada. En general, se recurre a la creación de empresas spin-off y a los contactos directos, a través de estas spin-off, con empresas grandes ya consolidadas en el sector que, en muchos casos, son extranjeras a falta de emprendedores o de inversores nacionales con confianza en este sector del mercado.

Sin embargo, en algunos casos excepcionales y en circunstancias particulares, la transferencia a la sociedad ha sido posible, y con éxito. Concretamente, el origen de nuestra línea de investigación (nuestro primer desarrollo de un reactor MBE data del año 1983), se debió a un proyecto extraordinariamente relevante para el país relacionado con la defensa. El Cuartel General de la Armada, en 1978, había acudido al CSIC solicitando ayuda para poder desarrollar espoletas de proximidad para proyectiles antimisil capaces de detectar la emisión IR de las toberas y gases calientes de misiles. Particularmente preocupante era la necesidad de defensa de los buques de la Armada frente a misiles de tipo EXOCET que como se demostró más tarde en las Malvinas, iban a ser muy eficaces hundiendo o dañando gravemente barcos ingleses. En aquella época, solo se fabricaban los sensores de IR en la banda de 4,3 micras de longitud de onda para las espoletas, en dos laboratorios del mundo, Santa Barbara Research Center (SBRC), más tarde Raytheon Vision Systems (RVS), en California con tecnología propia, y en un laboratorio indeterminado en Rusia con tecnología probablemente originada en la DDR. Ambas tecnologías eran, por supuesto, absolutamente secretas y los detectores no eran accesibles ni siquiera para países aliados. El SBRC había publicado un par de patentes, probablemente de despiste, basadas en procesos químicos de deposición que, a pesar de intentos muy valiosos del laboratorio dirigido por la Dra. Teresa Montojo en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA), resultaban imposibles de reproducir.

Lo único que estaba claro era que los detectores contenían PbSe, un semiconductor de pequeño *band-gap* y muy fácilmente oxidable e inestable al aire. En nuestro pequeño grupo de investigación en el entonces Instituto de Física Aplicada del CSIC, con sólo dos investigadores, el que suscribe y la Dra. Dolores Golmayo cuya contribución al proyecto fue extraordinaria, decidimos intentarlo con mucho entusiasmo y nuestras propias ideas basadas en lo que sabíamos de tecnología de vacío. Construimos y pusimos a punto rápidamente un sistema de evaporación en vacío con la ayuda del excelente taller mecánico procedente del antiguo Instituto Torres Quevedo y en menos de un año de trabajo intenso y muy creativo,

llegamos a definir un proceso totalmente original de fabricación que dio lugar a unos detectores con prestaciones iguales, si no superiores, a las publicadas por SBRC y probablemente también a las no publicadas por los Rusos. Cuando hicimos una demostración en el laboratorio detectando pequeños objetos calientes (un soldador) a distancias de 40 metros, con nuestro detector a temperatura ambiente (sin refrigerar) como exigían las especificaciones militares, el Almirante que asistió a la misma no se lo podía creer, pero una vez reproducidos nuestros resultados por el CIDA, de acuerdo con el documento reservado que entregamos describiendo nuestro método, los detalles de la fabricación, nuestras medidas de la respuesta espectral, la estabilidad y el nivel de ruido de fondo de los detectores, se hicieron pruebas reales muy satisfactorias en campo de tiro. ¡Nanotecnología desarrollada en España en 1979, y aplicada ya para fines de defensa!

Han transcurrido 35 años desde entonces, con vicisitudes varias que no vienen ahora a cuento, pero finalmente existe una empresa española, NIT Europe (7), creada por personal procedente del CIDA, que fabrica y comercializa cámaras de IR cuyos píxeles son detectores de PbSe, según nuestro antiguo procedimiento, naturalmente optimizado posteriormente por la empresa para su integración (8). Sus prestaciones en aplicaciones militares y civiles, son todavía hoy muy competitivas, no habiendo sido superadas por las de otros materiales o tecnologías. Nosotros mismos desarrollamos en 1998 (9) un detector de metano de bolsillo microfabri-

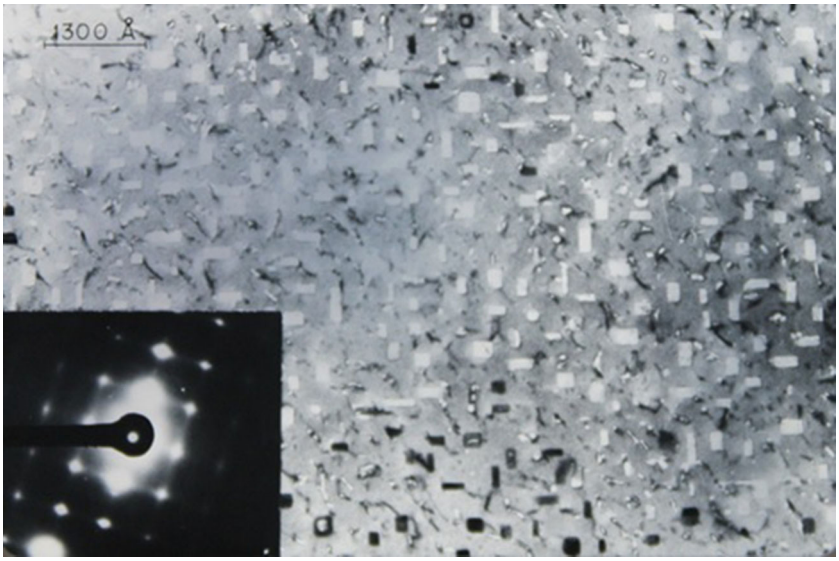


Figura 2-4. Micrografía de electrones en transmisión y contraste de difracción en una película de PbSe epitaxial sobre un sustrato cristalino de NaCl con inclusiones nanométricas autoensambladas durante el proceso de crecimiento en vacío con presión parcial de oxígeno (10). (Fuente: Fernando Briones).

cado para una empresa europea (Schlumberger) que integraba un sistema óptico IR microfabricado en silicio en nuestro laboratorio y detectores de PbSe no refrigerados.

Un trabajo de investigación básica, que publicamos parcialmente en 1981, más sistemático y basado en películas monocristalinas producidas por epitaxia (no eran fotoconductoras), demostraba que las propiedades de fotoconducción en el IR de nuestros detectores policristalinos se debían a su nanoestructura (entonces no se llamaba así, por supuesto) (1). En la micrografía electrónica de transmisión (TEM) de la figura 2-4 se observan, por ejemplo, una serie de precipitados nanométricos auto-ensamblados, con bordes alineados paralelamente a los ejes cristalográficos de la red cúbica del PbSe que junto a las fronteras de grano, y examinados a la luz de lo que sabemos ahora, podrían dar lugar a la excepcional fotoconductividad observada.

Por aportar otro ejemplo, mucho más cercano en el tiempo y también al IMM, citaremos un proyecto de desarrollo de tecnología de fabricación de cámaras, esta vez de rayos X, que se pretenden instalar en un gran telescopio espacial, Athena, que previsiblemente se pondrá en órbita por la Agencia Europea del Espacio (ESA) en 2021.

Cada píxel está constituido por un microcalorímetro superconductor de tipo TES (Transition Edge Sensor) integrado en una matriz de membranas de nitruro de silicio sobre sustratos microestructurados capaz de medir la energía depositada por cada fotón individual de rayos X absorbido. De esta forma se logra resolución espectral a la vez que espacial. El IMM ha desarrollado en los últimos años una tecnología propia de fabricación de estos microcalorímetros, similares a los desarrollados por la NASA para los instrumentos Norteamericanos, depositando bicapas Mo/Au (metal superconductor/metal normal) con una temperatura crítica ajustada a los 100 mK por un efecto cuántico de proximidad en el que los pares de Cooper del superconductor pierden coherencia por procesos de dispersión en el metal normal. Las bicapas se fabrican mediante la técnica de *sputtering* (pulverización catódica) en sistemas de UHV con un control muy preciso de los espesores en el rango nanométrico y de la calidad a escala atómica de la interfaz entre las capas de la estructura. Es esta una tecnología crítica a desarrollar en el consorcio europeo/español de laboratorios de investigación y empresas del sector aeroespacial y es esta precisamente nuestra aportación, bajo la dirección actualmente del Dr. Jose Luis Costa-Kramer. Esperemos que esta vez, los excelentes resultados que ya se han obtenido en una primera etapa del proyecto, científica y tecnológicamente muy válidos, puedan llegar a buen puerto, o mejor al espacio, a lo largo del desarrollo de la actividad futura del consorcio.

Otros desarrollos en el IMM de posible relación con defensa se derivan de una línea de investigación en magneto-plasmónica, dirigida por el Dr. Gaspar Armelles, sobre la interacción de la luz con nanoestructuras y

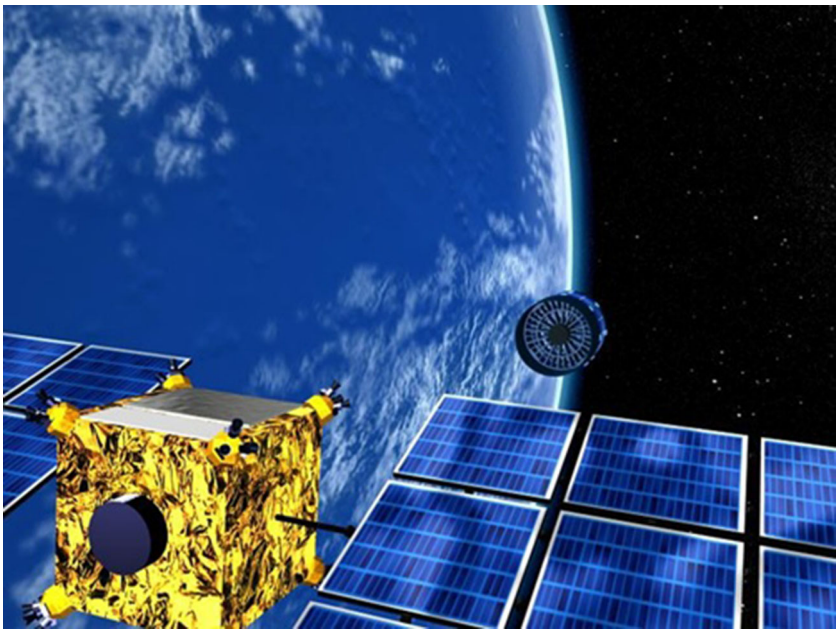


Figura 2-5. Recreación artística de una de las opciones de la ESA de telescopio en órbita de alta resolución angular y espectral para astronomía de rayos X. Este diseño, XEUS, finalmente sustituido por el actual, ATHENA, o más conservador, implica el vuelo en formación del módulo de espejo (al fondo en la imagen) y del módulo conteniendo la cámara superconductora refrigerada a temperaturas criogénicas (100 mK) en primer término (Fuente: Agencia Europea del Espacio-ESA)

nanopartículas híbridas para generar efectos magneto-ópticos y plasmónicos muy interesantes y la línea de materiales nanoestructurados por técnicas electroquímicas y sus aplicaciones en dispositivos termoeléctricos, con la financiación de varios proyectos europeos bajo la dirección de la Dra. Marisol Martín (11). La Comisión Europea apoya este proyecto con la concesión de un prestigioso contrato del European Research Council (ERC) dentro del programa IDEAS.

En cuanto a la conexión de la nanotecnología con la biología y, particularmente en aquellos aspectos que, dentro del ámbito también de nuestro entorno, afectan más directamente a la defensa en los aspectos de amenazas biológicas, podemos citar un área de investigación actualmente muy avanzada en la que trabaja el Grupo de Bionanomecánica, también en nuestro instituto. Este grupo, muy joven y dinámico se establece en el año 2005 especializándose en estructuras micro y nanomecánicas para interrogación biológica. Sus investigadores principales, los doctores Javier Tamayo y Montserrat Calleja, físicos también, poseen una gran experiencia en el desarrollo de instrumentación avanzada para la lectura óptica de sistemas nanomecánicos, con varias patentes licenciadas. Su objetivo es desarrollar dispositivos biosensores capaces de detectar y

cuantificar interacciones moleculares, en aplicaciones por ejemplo de detección de patógenos a través de sus interacciones con micropalancas y resonadores nanomecánicos. La Comisión Europea apoya este proyecto con la concesión de un prestigioso contrato del European Research Council (ERC) dentro del programa ERC-IDEAS. Por otra parte, en paralelo, han abordado con éxito el desarrollo de nanochips de ADN para genómica funcional, aspecto en el que han conseguido el interés de la industria del sector y creado ellos mismos una empresa spin-off, Mecwins (12), inicio de una actividad industrial con mucho futuro. Es evidente el interés que tiene la formación de investigadores y la creación de grupos de trabajo en este área de frontera entre la física y la biología, en la que, hasta hace muy poco existía un gran déficit de cátedras y centros de investigación en nuestro país a pesar del gran desarrollo de la biotecnología impulsado fundamentalmente desde el lado de la biología.

Nano-bio-ciencias

Todo el mundo está de acuerdo en que los más relevantes descubrimientos y desarrollos revolucionarios de la investigación en este siglo XXI procederán del área de la biología, la ciencia y la tecnología de la vida. Pero, en el llamado siglo de la biología, la contribución de las nanociencias a las ciencias de la vida va a ser decisiva. No en vano empezamos a barruntar que la vida es una maravillosa demostración del poder de una nanotecnología natural desarrollada por la evolución a lo largo de la historia del planeta Tierra.

El conocido biólogo, Ginés Morata, afirmaba hace poco, con su fino humor, que lo que menos se entiende de la biología es la física y es cierto que no existe hasta el momento una explicación física de los mecanismos últimos de la evolución de la materia hasta convertirse en materia viva. Más aún, uno de los aspectos más sorprendentes del genio de Darwin es el de que fuera capaz de expresar sus ideas, probablemente las ideas científicas más importantes que nadie haya tenido, sin recurrir a una sola fórmula. Imagínense el campo que hubiese dejado abierto Darwin a los físicos teóricos si en el fondo todo fuese física, si fuese posible interpretar el origen y sentido de la evolución mediante mecanismos y formalismos físico-matemáticos.

Diremos, entre paréntesis, que el gran despegue de la física a partir del siglo XVIII se debió en gran parte a la introducción de un lenguaje o formalismos matemáticos desarrollados por genios como Descartes y Newton, que hicieron posible construir con precisión unos modelos de la realidad física sobre la base de datos experimentales cuantitativos. Mecánica, termodinámica y electromagnetismo son ejemplos del éxito de este nuevo lenguaje.

Más aun, en el siglo XX, la teoría cuántica ha llegado a lo que parecía imposible, describir con extraordinaria precisión el exótico comporta-

miento del mundo atómico y de las partículas elementales. Por el contrario, en el desarrollo paralelo de la biología, igualmente enorme, el uso de formalismos físico-matemáticos se ha ido introduciendo con bastante dificultad y, sólo muy recientemente, conceptos procedentes de la mecánica cuántica.

Santiago Ramón y Cajal, Nobel de Fisiología y Medicina en 1906, fue el primero en describir el sistema nervioso de los animales y del hombre como un conjunto de circuitos en los que se propagan «impulsos nerviosos» de neurona en neurona, con una visión absolutamente genial para aquellos tiempos. Tanto es así que en recientes desarrollos de redes neuronales artificiales basadas en sinapsis nanoelectrónicas se le reconoce como pionero (13)(14).

Desde el otro lado, el primer intento de interpretar la vida en términos físicos se remonta a uno de los padres de la mecánica cuántica, Erwin Schrödinger, Nobel de Física en 1933. En 1944 publicó un pequeño libro, ¿Qué es la vida? en el que compatibiliza la evolución biológica con la termodinámica, gracias al concepto de negentropía y sienta las bases de una interpretación física del código genético que, por cierto, inspiró mucho más tarde a James Watson, Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1962, en sus investigaciones sobre los genes y el descubrimiento de la estructura de doble hélice del ADN.

A estas alturas, empezamos a pensar que, en realidad, ambos desarrollos, el de la física en la escala mesoscópica y el de la biología, son totalmente convergentes y estamos convencidos de que el edificio teórico que los unifique se irá construyendo en este siglo sobre la base de las nanociencias. Tanto es así que, en la actualidad, comienzan ya a gestarse ideas y formalismos que seguramente evolucionarán por el buen camino en los próximos años y permitirán describir cuantitativamente y con toda generalidad lo que intuyó el genio de Darwin.

En los apartados siguientes, nos permitiremos profundizar e insistir en algunas de esas ideas fundamentales, no con el fin de sentar cátedra ni de explicar nada, que en este tema el conocimiento es todavía escaso y todo está abierto, sino con el de ir ganando perspectiva sobre el desarrollo previsible de las bionanotecnologías en el ya próximo futuro.

Se trata por tanto de un tema difícil de presentar sistemáticamente. Por ello daremos sólo unas pinceladas para hacernos una idea de la complejidad de los problemas que estamos abordando y de sus dificultades. Los descubrimientos en este campo son difíciles de asumir y, más aún, de interiorizar en nuestra cultura y formas de pensar. De ser amos de la naturaleza, de creernos unos seres superiores, estamos pasando a tener que aceptar el ser una más de las formas evolutivas creadas por una clase de inteligencia distinta de la nuestra, lenta en nuestra escala de tiempos pero extraordinariamente poderosa y creativa.

De entrada, y a este respecto, es necesario recordar la importancia del mayor descubrimiento que hemos ido haciendo colectivamente los nanotecnólogos en los pocos años que han transcurrido desde que la investigación y las aplicaciones prácticas de las nanociencias han despegado con enorme fuerza.

Ante todo, hemos descubierto, nada más y nada menos, que la naturaleza nos lleva un adelanto en nanotecnología de unos 3.000 millones de años, no sólo en el diseño de nuevos dispositivos en la escala nano, sino también en su implementación práctica y sobre todo, en la realización de ensayos de viabilidad y seguridad de sus aplicaciones en gran escala.

Acabamos de empezar en esta disciplina, tenemos mucho que aprender de «nuestros mayores» y asumir un enorme respeto por el maravilloso edificio construido sobre la base de la nanotecnología natural que ha originado y mantiene vivo a nuestro entorno y a nosotros mismos.

Algunas de esas ideas ya se habían adelantado en el discurso de entrada en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RAC) por parte del autor del presente capítulo («Nanociencias, entre la Física y la Biología», RAC, 2005). Reconociendo su carácter bastante especulativo en aquellos momentos, hay que decir también que desarrollos experimentales y teóricos, publicados en estos últimos diez años van aportando argumentos a favor de ideas que intentan explicar la evolución biológica en función de las leyes de la física en la escala mesoscópica.

Una excelente revisión del tema, publicada en 2011 por el físico, académico y presidente de la RAC, profesor Alberto Galindo, en su discurso de toma de posesión en la Academia de Medicina, con el título «Quanta y Vida» (15), confirma el interés de una línea de investigación en plena ebullición actualmente. La Naturaleza parece que hace uso de la física cuántica para su desarrollo en aspectos tan fundamentales como pueden ser la fotosíntesis o el procesado de información en los organismos vivos.

La información cuántica y las proteínas

La bioquímica y la fisiología han tenido siempre muy claro que el mecanismo básico de transducción de señales o de información en las células y, en general, en los organismos vivos, esta soportado por mensajeros químicos. Se conocen ya con increíble detalle miles de diferentes sistemas moleculares que actúan como generadores, transmisores y receptores de información entre el exterior y el interior de las células a través de la membrana celular, entre distintos órganos a través del sistema vascular, entre neuronas a través de las sinapsis, o en general los componentes bioquímicos procesadores de información o señales en el sistema o sociedad celular de los seres vivos: hormonas, factores de crecimiento y de angiogénesis, neurotransmisores, feromonas, interferonas, molécu-

las coestimuladoras, mensajeros, reguladores e inhibidores, etc. Otras muchas funciones específicas de las proteínas son recogidas también en un estupendo artículo del académico Ángel Martín Municio (16).

Proteo, era un ser mitológico, muy inteligente y miembro del cortejo de Poseidón dios de los océanos, capaz de cambiar de forma y así escabullirse de los que pretendían atraparlo porque con su inteligencia tenía la habilidad de prever o predecir el futuro. Es curioso que aunque la denominación «proteína» empleada por primera vez en 1838 por su descubridor, el químico alemán Gerardus Johannes Mulder, procede del griego proteios (sustancia primera), el uso del adjetivo «proteico» (de forma cambiante como Proteo) parecería mucho más adecuado para describir la estructura y habilidades de las proteínas a la vista de los modernos conocimientos sobre las mismas.

Por otro lado, los sistemas de memoria, lectura y replicación de la información genética, en particular de la doble hélice de ADN, son ejemplos de sistemas moleculares enormemente dinámicos en sus funciones de replicación, transcripción, reparación, recombinación y todos los intricados factores de regulación asociados como son los activadores, represores, coactivadores, correpresores, adaptadores, etc.

Ahora bien, estos eferentes, mensajeros, receptores y memorias moleculares no son sistemas químicos estáticos. Todos ellos se adaptan continuamente y modifican su configuración química y morfológica de acuerdo con el entorno químico, es decir, con los mensajes recibidos de moléculas vecinas. Insistimos, para que quede claro, se comportan no solo como memorias o simples portadores de información, sino como verdaderos procesadores, como procesadores químicos de información química. Pero decir químicos es totalmente equivalente a decir que son procesadores cuánticos de información porque la química, la ciencia de los mecanismos que intervienen en el auto-ensamblado y reacciones entre moléculas, es pura cuántica. ¿No será tal vez información cuántica?

De momento, quedémonos solo con la hipótesis de que la vida primigenia, la capacidad que tienen los organismos más primitivos de auto-configurarse, de adaptarse e interaccionar en tiempo real con un entorno cambiante definido por múltiples parámetros, la capacidad de auto replicarse según un esquema codificado y de evolucionar hacia formas cada vez más complejas, pueda ser consecuencia de la aparición de sistemas moleculares capaces de adaptar su propia forma en función del entorno, es decir, de procesar información y de reaccionar con una elemental «inteligencia».

La construcción de organismos superiores (células procariotas y eucariotas, organismos multicelulares, etc.) parece ser modular, utilizando componentes básicos relativamente sencillos siempre en la escala nano y por tanto con una propiedad intrínseca de coherencia o de funciona-

miento coordenado. Estos sistemas moleculares complejos, considerados como computadores, parecen contener memorias moleculares entre las cuales probablemente sea el código genético la versión más avanzada y la que ha sido empleada con más éxito a lo largo de la evolución. Se trata de una memoria, como ahora diríamos de tipo ROM, que puede ser copiada con mínimos errores y leída por nanosistemas moleculares capaces de transcribir, traducir y procesar las diversas informaciones contenidas en el código, con el resultado de ensamblar nuevas proteínas y construir células y organismos.

Es importante recalcar que estos nanosistemas desarrollan funciones complejas y flexibles según el momento y el entorno. Son ciertamente nanoprocesadores muy elementales y muy especializados, pero procesadores al fin.

De acuerdo con John von Neumann (17) «un computador es una organización de componentes funcionales elementales en la cual, con gran aproximación, sólo las funciones desarrolladas por los componentes son relevantes para el comportamiento del sistema». No importa para nada el tipo de «hardware» que constituya los componentes, sean estos relés, transistores, neuronas o aminoácidos.

¿Por qué pensamos que las proteínas puedan ser procesadores cuánticos? En primer lugar porque en la escala en que están construidas (algunos nanómetros), en la escala molecular, la física cuántica se aplica estrictamente a la hora de determinar los estados del sistema y su dinámica. La arquitectura, la forma de introducir las variables o datos de entrada y la manera de expresar los resultados, son obviamente muy diferentes de las de un microprocesador digital ordinario. Y tampoco parece coincidir su arquitectura con la que actualmente imaginan los ingenieros electrónicos para los futuros computadores cuánticos.

Sin embargo las biomoléculas, particularmente las proteínas de alto peso molecular, tienen algunos puntos en común con las propiedades ideales de estos últimos, a saber: primero, la posibilidad de acumular en sistemas físicos pequeños, mediante un número relativamente pequeño de qubits, una enorme cantidad de información definida por un gran número de variables o parámetros de entrada; segundo, la posibilidad, como consecuencia del principio de superposición lineal, de procesar toda esa información de una sola vez (paralelismo masivo) y, por tanto, casi en tiempo real; y tercero, la posibilidad de que ese sistema cuántico adopte un estado o configuración resultante que sea medible de un modo eficiente.

Richard Feynmann, en los años 80, fue una vez más el que, en relación con una idea suya, un hipotético «simulador cuántico universal», avanzó otra idea revolucionaria: las macromoléculas biológicas podrían ser los únicos simuladores cuánticos capaces de simularse o computarse a sí mismas.

Solo recientemente se están empezando a retomar estas ideas y la consideración de que los organismos vivos sean supercomputadores cuánticos comienza a introducirse en la comunidad científica. A este respecto, han aparecido incluso trabajos teóricos de calado en los que se desarrollan las posibles bases evolutivas y estabilidad dinámica de los sistemas vivos en general, considerados como computadores cuánticos. (18).

Merece la pena, por tanto, profundizar algo más en este concepto de nanoprocesador bioquímico como computador cuántico puesto que, de entrada, es un concepto que choca con la idea que todos tenemos de computador.

El prejuicio establecido en las últimas décadas del pasado siglo de identificar un computador con un circuito electrónico es realmente muy fuerte. Tanto es así que la mayoría de los laboratorios y programas de investigación en el campo de la llamada Electrónica Molecular, campo que actualmente origina multitud de publicaciones, revistas, patentes y congresos, mantienen como objetivo el lograr manipular y disponer moléculas conductoras y semiconductoras para formar con ellas circuitos electrónicos. Se intenta arduamente todavía construir redes con transistores, nodos y conductores moleculares en dos dimensiones, a imagen y semejanza de los circuitos microelectrónicos actuales. Téngase en cuenta que la computación electrónica clásica se basa en la carga del electrón como soporte físico de los bits de información y en el transporte de carga basado en la movilidad de los electrones en estados extendidos.

Por el contrario, el intercambio de electrones entre moléculas se basa en reacciones tipo redox. La única posibilidad real, al menos conceptualmente, para intercambiar electrones entre macromoléculas, sería la utilización del efecto túnel, porque la corriente túnel es, en sí misma, una medida estadística o promedio sobre los estados cuánticos a un lado y al otro de la unión. Sin embargo, en la práctica, es extraordinariamente difícil disponer múltiples uniones túnel sobre diferentes terminaciones de una molécula determinada, aun cuando se trate de una macromolécula muy grande.

No obstante, la evolución parece que, hace ya mucho tiempo, ha logrado resolver todos los problemas arriba apuntados y diseñar y fabricar multitud de computadores cuánticos. La solución natural estriba precisamente en no utilizar los electrones ni los fotones como portadores de la información codificada cuánticamente. Los nanoprocesadores moleculares elementales interaccionan entre sí o con el medio exterior a través de la reactividad química de determinadas terminaciones funcionales distribuidas sobre su topología. Esta reactividad química es una medida estadística de los estados cuánticos correspondientes a toda la molécula considerada como un sistema fuera del equilibrio. La preparación de los correspondientes estados de partida se realiza también a través de interacciones químicas o procesos de reconocimiento molecular en

terminaciones específicas de la molécula. A partir de esa preparación, la molécula evoluciona cuánticamente hacia una nueva configuración (*folding*), que la dispone para reaccionar con otras moléculas específicas del entorno. A continuación se pone en marcha una cadena de procesos de apertura o establecimiento de enlaces, control de la cinética de reacciones, intercambio de iones, apertura o cierre de canales iónicos, transporte de masa, intercambio de protones, etc., que afectan a todo el sistema en interacción.

Nanomáquinas

A medida que se desarrolla el concepto de biomolécula como nanomáquina y se van conociendo mejor las innumerables y eficacísimas funciones que estas moléculas desarrollan en los organismos vivos, se hace necesario también reconsiderar la física que interviene en muchos de estos procesos bioquímicos.

En particular, el clásico movimiento browniano, descubierto por Robert Brown en 1827 en granos de polen e interpretado por Einstein en 1905 como resultado de las fluctuaciones estadísticas del momento cinético de moléculas de agua en un medio en equilibrio térmico, resulta ahora de una importancia fundamental para la comprensión de la forma en que actúan las nanomáquinas y nanoprocesadores moleculares.

Una imagen muy gráfica de lo que suponen, para las macromoléculas biológicas de tamaño nanométrico, estas fluctuaciones brownianas del líquido en que están sumergidas, es la de un terremoto de grado 9 de la escala Richter en el que todos los objetos del entorno y las moléculas mismas se agitan y se golpean continuamente con una violencia extraordinaria.

Sin embargo ahora se sabe que precisamente ese movimiento caótico y continuo es la «fuerza vital» que el mismo Brown creía percibir bajo su microscopio. En efecto, la mayoría de las reacciones químicas de las que depende la vida son posibles gracias a este ambiente tumultuoso que rodea a las biomoléculas. Por ejemplo, los motores moleculares usan la energía acumulada en determinados enlaces químicos para desarrollar multitud de funciones biológicas. Todos ellos, a pesar de su gran variedad, funcionan de acuerdo con el mismo principio: el de aprovecharse del movimiento del entorno causado por las fluctuaciones térmicas y, por tanto, del movimiento caótico origen de la difusión de moléculas en un medio líquido. Imagine el lector un pasajero que intenta llegar andando a su camarote por un pasillo de un crucero en medio de una gran marejada. No le quedará otra sino afianzarse fuertemente a cualquier punto de agarre y soltarse cuando la escora de la nave le sea favorable para volver a afianzarse al próximo agarre a la vista, hasta poder dar el siguiente paso. De la misma manera, la adaptabilidad de la molécu-

la, por ejemplo de una kinesina, le permite ir enganchándose a las moléculas de los microtúbulos y soltándose oportunamente para avanzar rápidamente en la dirección elegida y transportar una carga utilizando la agitación térmica del ambiente y, por supuesto, mediante el aporte de la energía química adenosin trifosfato (ATP) necesaria para formar o romper los enlaces oportunos. Resulta que el movimiento caótico térmico no sólo es compatible con la bioquímica de la vida, sino que le es de gran ayuda. Termodinámicamente esto es solo posible si se le atribuye a la molécula una capacidad, aunque sea elemental, de procesar información, de seleccionar a gran velocidad entre diversas opciones de acuerdo con un determinado algoritmo, como si de un microprocesador se tratase. En otro contexto, por ejemplo, el de la actividad enzimática, téngase en cuenta que una enzima tiene que explorar millones de configuraciones por segundo antes de localizar la única correcta y específica de la reacción química que promueve. Solo un procesador cuántico puede ser tan rápido.

Cada vez aparecen más publicaciones en las que, aún con reticencias, se aportan interpretaciones de tipo Quantum Ratchets o Brownian Ratchets (que traduciríamos por rectificadores cuánticos o brownianos) para funciones biológicas básicas como, por ejemplo, el transporte uni y bidireccional de cargas químicas a lo largo de la red de microtúbulos en el citoesqueleto de las células eucariotas mediante la kinesina y dyneina. Estas moléculas, esenciales para el transporte de mitocondrias, endosomas, partículas de ARN[1] mensajero (mARN o mRNA en inglés), virus y vesículas de diferentes tipos, constituyen una especie más de las muchas nanomáquinas o robots macromoleculares que actúan en el interior de las células vivas, capaces de ejecutar funciones complejas y construir formas definidas a partir de un medio caótico, y a los cuales es necesario atribuir (como al famoso diablillo de Maxwell) un cierto grado de «inteligencia», una capacidad de procesado rápido de información inherente a la naturaleza cuántica de los sistemas mesoscópicos.

En un sentido más amplio, la posibilidad de generar orden, evolución, mediante un proceso de selección entre variaciones aleatorias es el fundamento de la teoría de Darwin de la selección natural. Y en la base de esta selección, en la escala mesoscópica de las macromoléculas, están de nuevo los rectificadores moleculares, los motores de Darwin, los nanoprocesadores cuánticos. Sobre esta base, toda una serie de líneas de investigación «bio-inspiradas» aspira actualmente a diseñar nanomáquinas moleculares, o al menos micromáquinas artificiales, que funcionen de una forma equivalente a las anteriores. Todavía queda mucho, sin embargo, para poder medirse en este tema con las asombrosas creaciones de la evolución.

[1] Ácido ribonucléico

La célula es un sistema complejísimo, una verdadera factoría especializada cuyos múltiples procesos internos se coordinan y organizan siguiendo las instrucciones o mensajes de un código específico propio. Sin embargo, es sabido que todas las células de un determinado organismo contienen el mismo código genético. Sin embargo este mensaje o programa interno se expresa en formas y funciones diferentes de acuerdo con el entorno, tanto en el proceso de diferenciación celular como en su función como parte de un organismo. Esta es una de las características que diferencian un mensaje en código cuántico de los mensajes expresados en código binario digital clásico: la superposición de estados o palabras del código y la posibilidad de obtener diferentes configuraciones finales o funciones según sea el entorno de la medida.

Como es sabido, los qubits en los que se codifica la información cuántica son extremadamente frágiles. La obtención de información sobre un sistema cuántico generalmente perturba o destruye el mensaje. No es posible clonar directamente estados cuánticos no ortogonales por lo que un mensaje cuántico no es copiable. De ahí el interés actual por la criptografía cuántica. El inconveniente de no poder realizar copias se compensa con el hecho de que la capacidad de memoria o de información codificable en un sistema cuántico es casi infinita. La razón es que si bien en un sistema clásico, la capacidad de memoria es proporcional a su tamaño (número de bits N en su registro binario), la de un sistema u ordenador cuántico (registro de qubits) crece exponencialmente con N. Por otro lado, la información cuántica puede ser escondida o difuminada mediante el entrelazamiento de estados de forma que ninguna medición local pueda desvelarla. Sin embargo, el entrelazamiento produce correlaciones no locales sin análogo clásico que puede servir para preservar la información relevante, obtenida por interferencia, aunque se destruya parte del código.

Con estas ideas podemos comprender cuál es la estrategia de la evolución para obtener tantas copias como sean necesarias del código: como es imposible copiar o clonar el contenido del mensaje cuántico, lo que ha hecho la evolución es clonar el ordenador, clonar el soporte material del código, la molécula de ADN y su secuencia de aminoácidos. Al ser idénticas las estructuras y secuencias o configuración química de las copias a las de las moléculas originales, el mensaje cuántico contenido en ellas resulta ser estadísticamente el mismo. Pero la copia nunca es exactamente igual al original, solo es casi igual. De ahí la ventaja evolutiva de clonar múltiples ejemplares, logrando así una transmisión estadísticamente precisa del mensaje genético y al mismo tiempo permitir una evolución adaptada a los cambios del entorno.

Queremos insistir, la información necesaria para construir otro patrón está codificada en la forma misma del patrón original, en la estructura misma de la molécula. Cuando se ensambla una nueva molécula sobre el

patrón de la anterior, lo que se produce es una copia del código, una copia de la información.

La información contenida en el código está cifrada cuánticamente sobre la estructura de la propia cadena de ADN que le sirve de soporte físico o material. Esta estructura está determinada por las posiciones relativas de sus átomos y por el conjunto de interacciones cuánticas entre ellos, es decir, un conjunto de estados cuánticos entrelazados sobre toda la molécula. Por ello la información contenida en el código puede ser tan grande y puede ser leída y procesada tan rápidamente a través de sus interferencias con los estados cuánticos de las moléculas del entorno. De ahí la posibilidad de que el mismo código, idéntico para todas las células de un organismo, se pueda expresar de tantas formas diferentes según el momento y el entorno.

La célula, como depositaria del código genético, es el módulo básico y esencial de todo ser vivo. Cada una de ellas es una verdadera factoría especializada cuyos múltiples y complejos procesos internos se coordinan y organizan siguiendo las instrucciones o mensajes del código propio almacenado en sus genes y que, además, puede interaccionar o intercambiar información mediante «interferencia química» con los «mensajes» de las células del entorno.

Esta organización modular se extiende a un nivel superior cuando las células forman parte de un órgano y finalmente de todo un organismo vivo. Ciertamente, la característica más importante de todo organismo vivo es precisamente ese estado de organización dinámica o de coherencia global entre todos sus órganos y funciones, una coherencia que se mantiene, aún siendo muy variable con el tiempo, a lo largo de su vida. De acuerdo con estas ideas, la forma del organismo vivo en cada instante es el resultado de un cálculo en tiempo real ejecutado por miles de millones de nano-procesadores en paralelo coordinados globalmente de forma jerárquica para dar un estado resultante dinámicamente estable. (18)

Cuando la coherencia global del sistema se pierde, debido a causas externas o a un proceso genéticamente programado de apoptosis, el organismo, el individuo muere. Sin embargo, es un hecho experimental el que esa coherencia se puede mantener al menos temporalmente sobre partes separadas del organismo, haciendo posible, por tanto, la conservación y los trasplantes de órganos.

Debemos dejar bien claro que no nos estamos refiriendo a conceptos metafísicos como sería el del alma, sino a una coherencia característica de un sistema modular complejo. Más aún, para muchos autores contemporáneos, esta coherencia no tiene por qué ser cuántica, sino una coherencia funcional emergente de la pura complejidad como la que regula, por ejemplo, el funcionamiento auto-organizado de una gran ciudad o el de la economía mundial.

Resulta entonces que el organismo vivo, que funciona en su conjunto como un supercomputador capaz de ejercer funciones cada vez más competitivas dentro del mecanismo evolutivo de la selección natural de Darwin, no es otra cosa que un portador y procesador activo, un transmisor adaptativo de la información del código, por medio del cual el código es capaz de perdurar a lo largo de múltiples generaciones, competir e ir adaptándose estadísticamente al medio, es decir ir evolucionando inteligentemente.

Mediante los correspondientes mecanismos reproductivos, la evolución produce así múltiples ejemplares de un código cuántico (por tanto intrínsecamente no copiable), mediante la generación de copias, no del código en sí mismo, sino del supercomputador que lo almacena y procesa, el organismo vivo. Hace ya muchos años, el genial Stanislaw Lem había ya intuido y expresado magistralmente en una de sus obras, (19) que, en la evolución de la vida, los individuos vivos no son importantes, son puros portadores provisionales del código, de usar y tirar, como diríamos ahora. Lo importante para la vida es la supervivencia del código, de la especie, no del individuo. Según Lem, el código genético de cada especie, que contiene no solo sus características sino también su historia evolutiva, podría ser comparable a una inmensa creación literaria escrita por la evolución, editada en un gran número de ejemplares y leída y asimilada por un gran número de lectores. Solo los best-sellers han dejado huella perdurable.

Si, por otra parte, en términos informáticos, el código genético se pudiera considerar como un programa, se trataría de un programa con propiedades muy especiales; en primer lugar, porque es un programa capaz de auto-replicarse y en segundo lugar porque se ha auto-ensamblado siguiendo el mecanismo de Darwin. Puesto que la evolución es un hecho, las ideas precedentes implican que muchos de los programas que lo precedieron fueron también programas viables y, por tanto, pueden ser subprogramas o subcomponentes del código evolucionado actual de cada especie.

Existen alternativas mucho más pragmáticas, casi ingeniería, en la forma de abordar el problema. Estas se basan en las propiedades estadísticas emergentes de los sistemas complejos con interacciones de corto alcance y entre próximos vecinos que sean susceptibles de establecer mecanismos de realimentación.

Esta forma de pensar, menos provocativa, es por tanto la más comúnmente aceptada. Es un hecho muy general el que, en sistemas complejos de elementos relativamente simples interconectados, emergen espontáneamente, auto-organizadamente, formas reconocibles de nivel superior de organización. Estamos rodeados en nuestra escala de múltiples ejemplos de estas formas auto-organizadas: las ciudades, las colonias de hormigas, los corales, los ecosistemas, los sistemas económicos, la

comunidad científica, la cultura. Es evidente que la complejidad es un factor importante que todos estos sistemas tienen en común a la hora de modelar su funcionamiento y evolución. Pero otro factor siempre presente en estos sistemas es la capacidad de procesar información, de decidir en cada momento, aunque sea de forma muy elemental, por parte de sus componentes elementales o individuos.

El problema está en el origen. Para evolucionar es necesario que cada elemento del sistema evolutivo tenga una mínima capacidad de adaptación, una mínima inteligencia, una mínima capacidad de procesar información. Seres inteligentes, organismos vivos, células, bacterias... al final de esta cadena o al principio de la vida está una macromolécula. Los átomos no evolucionan, son siempre iguales (salvo que sean radiactivos); las moléculas complejas, las proteínas por ejemplo sí pueden evolucionar.

Este primer componente de la evolución requeriría también una mínima capacidad de cálculo, procesar información, adaptación. Todo parece cuadrar si las macromoléculas fuesen procesadores cuánticos. Para que pudiesen evolucionar sería necesario conferirles una cierta capacidad de selección, de decisión en cada momento. Ello solo sería posible teniendo en cuenta la naturaleza cuántica de los subsistemas moleculares y su dinámica en condiciones siempre fuera del equilibrio termodinámico.

En este sentido, y con independencia de la proliferación de iluminados por la mística de la cuántica, que son muchos, especialmente en USA, están apareciendo recientemente trabajos serios que aportan ideas y desarrollos interesantes sobre el tema del papel de la física cuántica en la evolución. Un aspecto especialmente interesante de estas ideas es su aplicación a la evolución del código genético.

La información contenida en el código es muy posible que esté almacenada sobre la nano-estructura de la propia cadena de ADN que le sirve de soporte material. Esta estructura está determinada por las posiciones relativas de sus átomos y por el conjunto de interacciones cuánticas entre ellos, es decir, un conjunto de estados cuánticos entrelazados sobre toda, o sobre segmentos de, la molécula.

Cuando se ensambla una nueva molécula de ADN sobre el patrón de la anterior, lo que se produce es una copia del soporte material del código, una copia de la información cuántica a pesar de que la información cuántica no es copiable, o como dicen los teóricos, clonable.

El éxito de tal invención, comparable en cierto modo con el de la imprenta, fue enorme puesto que posibilitó la reproducción en gran escala de aquella primera y especial molécula. A partir de ese momento puede decirse que se disparó la evolución, de forma similar a como la imprenta produjo una rápida expansión de la cultura.

Gracias precisamente a su naturaleza cuántica, intuimos, la cantidad de información contenida en el código puede ser tan inmensa y, a pesar de ello, puede ser leída y procesada rápidamente a través de sus interacciones con los estados cuánticos de las moléculas del entorno bio-químico que lo rodea. De ahí también la posibilidad de que el mismo código, idéntico para todas las células de un organismo, se pueda expresar de múltiples formas, tan diferentes como son sus distintas células (piel, huesos, cerebro, por ejemplo), y ello según el momento de su desarrollo y del entorno cambiante en que se encuentre, para dar lugar a los diferentes órganos, funcionalidades y acciones de un ser vivo.

Es este un tema de enorme actualidad y rápido desarrollo dentro de las nano-bio-ciencias. En él trabajan hombro con hombro físicos, químicos, informáticos y biólogos a pesar de las dificultades que presenta el entendimiento entre disciplinas tradicionalmente tan alejadas. Nuevas ideas y sorprendentes resultados experimentales van apareciendo en las publicaciones más recientes a lo largo de esta década, aunque todavía no han llegado a disipar la mayoría de las dudas, muy razonables por cierto, de los investigadores más familiarizados con las ideas clásicas. Digamos que tiene que pasar todavía bastante tiempo antes de que pueda lograrse un consenso.

Por otro lado, a pesar de ser muy conscientes de la modestia de nuestro punto de partida en la investigación de la evolución, comenzamos a pensar que la vida, como la conocemos, no es probablemente la única, ni la última, posible vía evolutiva.

Si, con un esfuerzo de imaginación, pudiéramos considerar los hitos del desarrollo de las ideas y de la cultura, como nuevos códigos evolutivos capaces de crear, transmitir, replicar y procesar información, suficientemente complejos, suficientemente numerosos, competitivos, interactivos y soportados físicamente por nuestros cerebros biológicos y por sus extensiones artificiales como son las bibliotecas, los bancos de datos, los procesadores electrónicos, los algoritmos de búsqueda, las redes informáticas, etc., resultaría posible pensar que se está abriendo una nueva e interesantísima vía evolutiva, la evolución de una cultura y de una inteligencia artificial colectiva.

Entonces, los humanos seríamos portadores involuntarios, actores en el mejor de los casos o, con el tiempo, meros espectadores de un desarrollo rapidísimo, un punto de inflexión, una revolución evolutiva en la que formas elementales y especies de nueva naturaleza van a competir dentro de un ecosistema poblado por innumerables formas nacidas del conocimiento y de la creatividad de la literatura, la poesía, las artes plásticas, la música, las ciencias, la tecnología, la cultura en suma.

Las consecuencias de esta nueva evolución, explosiva si se compara con la escala de los tiempos geológicos o de la evolución misma de la vida, son mucho más difíciles de imaginar.

La investigación española en nanotecnología

Para concluir este capítulo, volveremos a poner los pies en el suelo y nos referiremos al estado de las nanociencias y la nanotecnología en nuestro entorno cercano y en las actuales circunstancias. De entrada, convendría aclarar cuál es, en España, la capacidad de investigación en estos temas, con el objetivo de ayudar a conectar los avances de la investigación en nanotecnología con los intereses y la perspectiva en defensa. Resultaría además que al analizar cuantitativamente esta capacidad investigadora y la comparáramos con la de otros países, nos llevaríamos una sorpresa. Veamos por qué.

A finales de los años 90 del siglo pasado, cuando se comenzaba a popularizar en los programas de investigación de la Comisión Europea el tema de las nanociencias y nanotecnologías, un pequeño grupo de investigadores españoles, Antonio Correia, Pedro Serena y el autor de este capítulo, decidimos poner en marcha una iniciativa para conocer y aunar en lo posible el potencial nanotecnológico, tanto en investigación básica como en tecnología e industria, de nuestro país. Creamos para ello la red Nanospain, de formato similar al de otras iniciativas europeas, con la ayuda de diferentes instituciones y organizaciones. Esta red resultó utilísima, prosperó rápidamente y continúa activa en estos momentos. Los detalles pueden encontrarse en www.nanospain.org (20) pero lo que queremos comentar aquí brevemente es lo siguiente: son miembros de Nanospain, algo más de 2.000 investigadores que trabajan actualmente en España en 362 grupos universitarios, del CSIC, otros OPI, fundaciones y empresas cuyo listado detallado es accesible en esa página a cualquier interesado.

En la página web de la red Nanospain podemos encontrar, por ejemplo, un catálogo de las 96 empresas españolas activas en nanotecnología. Se encuentra también el catálogo actualizado en 2014 de las 65 empresas fabricantes y comercializadoras de grafeno en todo el mundo y la noticia de que, en el programa de la Comisión Europea, Graphene FlagShip, financiado con mil millones de euros, España ocupa el segundo lugar entre los países europeos con mayor participación. El proyecto financiado más recientemente se refiere a la desalinización de agua de mar, está liderado por el centro Tecnalia, y se basa en un nuevo método capacitivo con electrodos de membranas de grafeno que promete seriamente multiplicar la eficiencia energética del estado del arte actual en desalinización.

Sin embargo, a pesar de la evidencia de que el nivel de la nanotecnología española es excelente y cuenta con una comunidad investigadora muy numerosa e iniciativas empresariales de primer nivel tecnológico, no existe una clara reacción del gobierno en el sentido de apoyar claramente e incentivar esta excepcional capacidad. Una gran parte de la financiación, que todavía mantiene la actividad de la mayoría de los grupos, se

consigue en Europa en convocatorias competitivas. Se está desaprovechando con ello una oportunidad única, la de poner en valor la extraordinaria capacidad investigadora de nuestro país en nanotecnología para invertir en ella de forma decidida y coordinada. Esta capacidad no resulta nada despreciable para otros países del entorno europeo que, en vista de este descuido nuestro, se están llevando a los mejores investigadores para trabajar en sus instituciones y empresas.

En cuanto a la preocupación difundida por los medios de comunicación sobre la posible peligrosidad de la investigación en nanotecnología y de la dispersión en el medio ambiente de nanopartículas de diverso tipo como consecuencia de agresiones terroristas o accidentes industriales, conviene aportar aquí argumentos positivos frente a las proclamas de los que pretenden frenar la investigación en este campo.

La enorme experiencia acumulada por la naturaleza en sus desarrollos de nanotecnología natural, nos proporciona unas defensas muy poderosas y sistemas inmunológicos de los seres vivos están preparados para destruir agresores nano de muchos tipos. Siempre ha habido nanopartículas de origen natural y potencialmente perjudiciales, en suspensión en el aire o en el agua, pero los seres vivos son capaces de eliminarlas o de expulsarlas continuamente. Contra agresores vivos nanométricos, también en evolución como, por ejemplo, los virus, la lucha es muy dura y continua desde hace mucho tiempo pero parece que ha sido posible mantener un cierto equilibrio a largo plazo.

El mayor peligro de los productos nanotecnológicos que se están poniendo en el mercado aceleradamente y en escala global, es precisamente el de no haber sido ensayados concienzudamente durante un largo espacio de tiempo para garantizar su seguridad y compatibilidad con la vida a largo plazo como ya ha hecho la evolución.

Los agresores para los que la naturaleza no ha desarrollado defensas son algunos agentes químicos y drogas de diseño, pequeñas moléculas en general capaces de atravesar las barreras de las membranas celulares y, por otro lado, los elementos radioactivos que nunca fueron utilizados por la naturaleza para nada, por la manifiesta incompatibilidad con la vida de las radiaciones ionizantes.

En conclusión, cuanto más se progrese en la investigación, cuanto más se sepa y se trabaje en los aspectos científicos básicos y aplicaciones de las nanotecnologías, menos oportunidades se les dará a potenciales agresores, incluso en situaciones imprevistas. El mayor peligro es la ignorancia y la mejor defensa, ya se sabe, es estar informados y preparados.

Bibliografía

1. Bowen, M., y otros. *Large magnetoresistance in Fe/MgO/FeCo(001) epitaxial tunnel junctions on GaAs*(001). 10 de septiembre de 2001. Vol. 79, 11, pág. 1655.
2. Roco, Mihail (Mike) C. http://www.ecole-doctorale-cli.org/ecole-doctorale/IMG/pdf/NNI_Past_Present_Future.pdf. [En línea] 20 de febrero de 2006.
3. Roco, Mihail (Mike) C. y Bainbridge, William S. *WTEC Study on convergence of Knowledge, Technology and Society: Beyond Convergence of Nano-Bio-Info-Cognitive Technologies.* s.l.: WTEC, 2013.
4. Holmes, Mark J., y otros. *Room-Temperature Triggered Single Photon Emission from a III-Nitride Site-Controlled Nanowire Quantum*. 2014. 14 (2), págs. 982–986.
5. Boitier, Fabien, y otros. *Electrically Injected Photon-Pair Source at Room Temperature*. 2014. 112, págs. 183901-1 183901-5.
6. Fernando, Briones Fernández-Pola. *ES2067381(1994), US 5431735, GB 2274468 (1994) y US 5482892 (1995).*
7. http://www.niteurope.com/. [En línea] [Citado el 15 de agosto de 2014].
8. Rodrigo, M.T., y otros. *Polycrystalline lead selenide x–y addressed uncooled focal plane arrays*. Agosto de 2003. Vol. 44, 4.
9. Silveira, Juan Pedro, y otros. *Micromachined methane sensor based on low resolution spectral modulation of IR absorption radiation*. 30 de mayo de 1988. Vol. 48, 1-3, págs. 305–307.
10. Briones, Fernando, Golmayo, Dolores y Ortiz, C. *The role of oxygen in the sensitization of photoconductive PbSe films*. 24 de Abril de 1981. Vol. 78, 4, págs. 385–395.
11. Muñoz Rojo, Miguel, y otros. *Decrease in thermal conductivity in polymeric P3HT nanowires by size-reduction induced by crystal orientation: new approaches towards thermal transport engineering of organic materials.* 21 de julio de 2014. 14, págs. 7858-7865.
12. www.mecwins.com. [En línea] [Citado el 22 de septiembre de 2014].
13. de Garis, Hugo, y otros. *A world survey of artificial brain projects, Part I: Large-scale brain simulations*. Diciembre de 2010. Vol. 74, 1-3, págs. 3–29.
14. Goertzel, Ben, y otros. *A world survey of artificial brain projects, Part II: Biologically inspired cognitive architectures*. Diciembre de 2010. Vol. 74, 1-3, págs. 30–49.
15. Galindo Tixaire, Alberto y Seoane Prado, Carlos. *Quanta y vida: discurso para la recepción pública del académico electo Excmo. Sr. D. Al-*

berto Galindo Tixaire, leído el día 7 de junio de 2011, y contestación del académico de número Excmo. Sr. D. Carlos Seoane Prado. s.l.: Real Academia Nacional de Medicina, 2011.

16. Martín Municio, Ángel. «Proteómica: ¿Qué son y para qué sirven las proteínas?». *Horizontes culturales 2000.* s.l.: Espasa, págs. 89-117.
17. von Neumann, John. «Probabilistic Logics and the syntesis of reliable organisms from unreliable components. [ed.] C. E. Shannon y J. McCarthy». *Automata Studies.* s.l.: Princeton University Press, 1956, págs. 43-98.
18. *Living Systems are Dynamically Stable by Computing Themselves at the Quantum Level.* Igamberdiev, Abir U. 2, 30 de junio de 2003, Entropy, Vol. 5, págs. 76-87.
19. Lem, Stanislaw. *Wielkosc Urojona (Un valor imaginario).* s.l.: Bruguera, 1983. 9788402094735.
20. www.nanospain.org. [En línea] [Citado el 30 de septiembre de 2014].

Capítulo tercero

Desarrollo de nanotecnologías capacitadoras para seguridad y defensa

Julio Plaza del Olmo
Unidad de Fotónica – Instituto Tecnológico la Marañosa

Introducción

El desarrollo de la tecnología en el ámbito de defensa tiene como objetivo obtener una superioridad respecto del adversario. Esta superioridad puede darse en ámbitos tradicionales como pueda ser la potencia de fuego, pero también en áreas cada vez más importantes como la obtención de información, comunicaciones, furtividad, mitigación de daños, etc.

Desde el final de la Segunda Guerra Mundial a mediados del siglo pasado, hemos pasado en poco tiempo de conflictos en los que dos ejércitos en igualdad de condiciones se enfrentan de forma abierta, a una guerra asimétrica donde terroristas o guerrillas operan de forma encubierta en entornos urbanos, mezclados entre la población civil, y/o atacando de forma irregular, inesperada e indiscriminada: ataques con explosivos improvisados, dispersión de agentes químicos, piratería y secuestros, etc....

Frente a ellos, las fuerzas de paz que se despliegan en entornos como Afganistán, Líbano, el océano Índico..., o los cuerpos de seguridad del estado que hacen frente a ataques en suelo propio, requieren tecnologías capaces de prevenir, detener, mitigar y combatir este nuevo tipo de amenaza, pero que difícilmente es posible combatir con las tácticas y estrategias típicas de un conflicto abierto contra un enemigo claramente identificado y localizado.

El desarrollo de nueva tecnología que sobrepasa la anterior siempre marca un hito, un punto de inflexión que decanta la superioridad hacia uno u otro lado. El desarrollo suele ser paulatino, y poco a poco se consigue esa superioridad; pero hay ocasiones en que el desarrollo genera un salto tecnológico tan grande, que provoca el abandono total e inmediato de la tecnología anterior. Es lo que se denominan tecnologías disruptivas, y de las cuales existen varios ejemplos a lo largo de la historia, como es el comienzo del uso de hierro frente al bronce, o en tiempos más cercanos, podemos encontrar en la invención del transistor, o el uso de reactores frente a la propulsión a hélice, ejemplos de tecnologías que permitieron un gran salto tecnológico.

El desarrollo de la nanotecnología, que como se ha explicado en capítulos anteriores, aborda un nuevo campo en el que la fenomenología ocurre a nivel molecular y atómico, representa avances que se espera sean disruptivos. La propiedad de combinar distintos campos del conocimiento como física, química, biología y matemáticas, implica poder abordar distintas facetas de la naturaleza y poder emplearlas en nuestro favor para el desarrollo de aplicaciones que nos permitan tener esa superioridad frente a las amenazas hoy día existentes, y ser capaces de neutralizarlas a tiempo.

El desarrollo de tecnología

Desde el descubrimiento de un nuevo fenómeno, hasta la puesta en operación de un sistema, el desarrollo de la tecnología capacitadora conlleva una secuencia de pasos determinados para su maduración. La Agencia Europea de Defensa (*European Defence Agency*, EDA) ha adoptado como clasificación una serie de niveles de madurez tecnológica (*Technology Readiness Level*, TRL) que abarcan todo el proceso, y que se han resumido en la figura 3-1.

La primera fase del desarrollo tecnológico comienza con la observación de un fenómeno. Con su estudio y comprensión se consigue idear aplicaciones que pueden explotarlo, y posteriormente realizar pruebas de concepto para confirmar su viabilidad. Esta fase comprendería los tres primeros TRL, y se puede equiparar a un nivel de investigación básica, de ciencia.

Seguidamente, los primeros componentes que aprovechan la ciencia detrás de los fenómenos, son validados en un entorno de laboratorio, y entornos relevantes para la aplicación que se desea desarrollar, para posteriormente ser integrados en sistemas demostradores. Estos sistemas en su conjunto son también validados en entornos relevantes. Esta segunda fase corresponde a TRL desde el 4 al 6, que se enfoca habitualmente desde el punto de vista de la investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación.

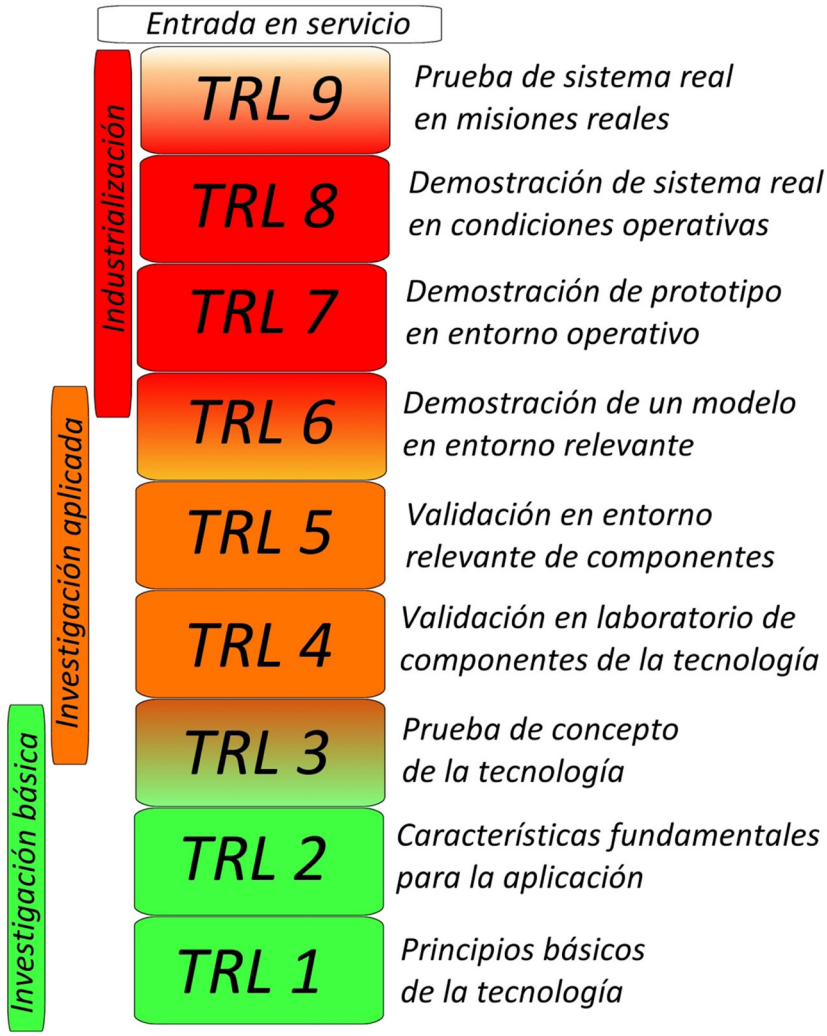


Figura 3-1. Niveles de madurez tecnológica (Fuente: el autor del capítulo)

Por último, los prototipos han de ser validados en condiciones operativas, a la vez que se trabaja en su industrialización, para finalmente obtener sistemas en servicio. Son los tres últimos TRL (7 a 9).

Hay cierto solapamiento entre TRL, no existe una diferenciación estricta, sino que hay cierta flexibilidad, pues cada tecnología tiene sus propias características. Pero aún así, la clasificación de madurez en TRL es de gran ayuda para conocer el estado del arte de la tecnología, prever el desarrollo posterior, realizar prospectiva tecnológica, y establecer hojas de ruta que ayuden a invertir de forma inteligente desde las administraciones e instituciones, tanto nacionales como internacionales.

Para el desarrollo de tecnología, se pueden identificar dos tipos de aproximación. En ningún modo hay que considerarlas excluyentes, sino muy al contrario, deben ser consideradas complementarias.

En la primera aproximación, se parte de la observación de fenómenos naturales. Se identifican sus factores claves, se estudian y comprenden, hasta estar en disposición de idear aplicaciones que exploten estos fenómenos, y que puedan aprovechar potenciales usuarios finales. Es una aproximación que podríamos denominar *bottom-up*, en la que se parte de la ciencia, y se desarrolla una tecnología hasta llegar a su aplicación.

La aproximación complementaria comienza en cambio con un usuario final exponiendo cual es su necesidad, qué problema concreto necesita resolver. A partir de ahí, se estudian distintos tipos de tecnologías, sus ventajas e inconvenientes a la hora de resolver el problema planteado hasta encontrar la tecnología más adecuada. Esta aproximación se puede denominar *top-down*, en la que se parte de unas necesidades que deben ser resueltas con la tecnología disponible, o con el desarrollo de nueva tecnología.

Ambas aproximaciones son complementarias, pues comienzan en los extremos opuestos, e idealmente deberían converger a mitad de proceso: la investigación aplicada, el desarrollo tecnológico e innovación orientados a generar aplicaciones finales. Es en esta fase donde el usuario final establece los requisitos del sistema que necesita, y que solventa su problema. Es también en esta fase donde científicos y tecnólogos establecen los límites de la tecnología, y entre todos evalúan su idoneidad para la aplicación propuesta.

Existen en nuestro entorno varios foros específicos de seguridad y defensa cuya utilidad es precisamente poner en contacto a todos estos actores para el desarrollo de tecnología, como son la EDA, y la Organización de Ciencia y Tecnología (*Science and Technology Organization, STO*) de la OTAN. En el ámbito de la seguridad y defensa, los usuarios finales son principalmente las fuerzas armadas, los cuerpos de seguridad del estado, y la industria que comercializa y desarrolla los sistemas que finalmente entran en servicio.

En el otro extremo, los actores no están tan estrictamente identificados, en el sentido de que la investigación básica y aplicada puede ser desarrollada en cualquier universidad, centro tecnológico, *spin–off* o PYME. La ciencia y tecnología detrás de cualquier aplicación militar es la misma que pueda haber detrás de una aplicación civil. Es por ello que cada vez más se intenta concienciar en el desarrollo de tecnología dual, desarrollo de tecnología que puede ser usada indistintamente en aplicaciones de seguridad y defensa, o en aplicaciones de ámbito civil. La orientación final de la aplicación la determina el usuario final, pero la tecnología y ciencia subyacentes es en esencia la misma. El desarrollo de la tecnolo-

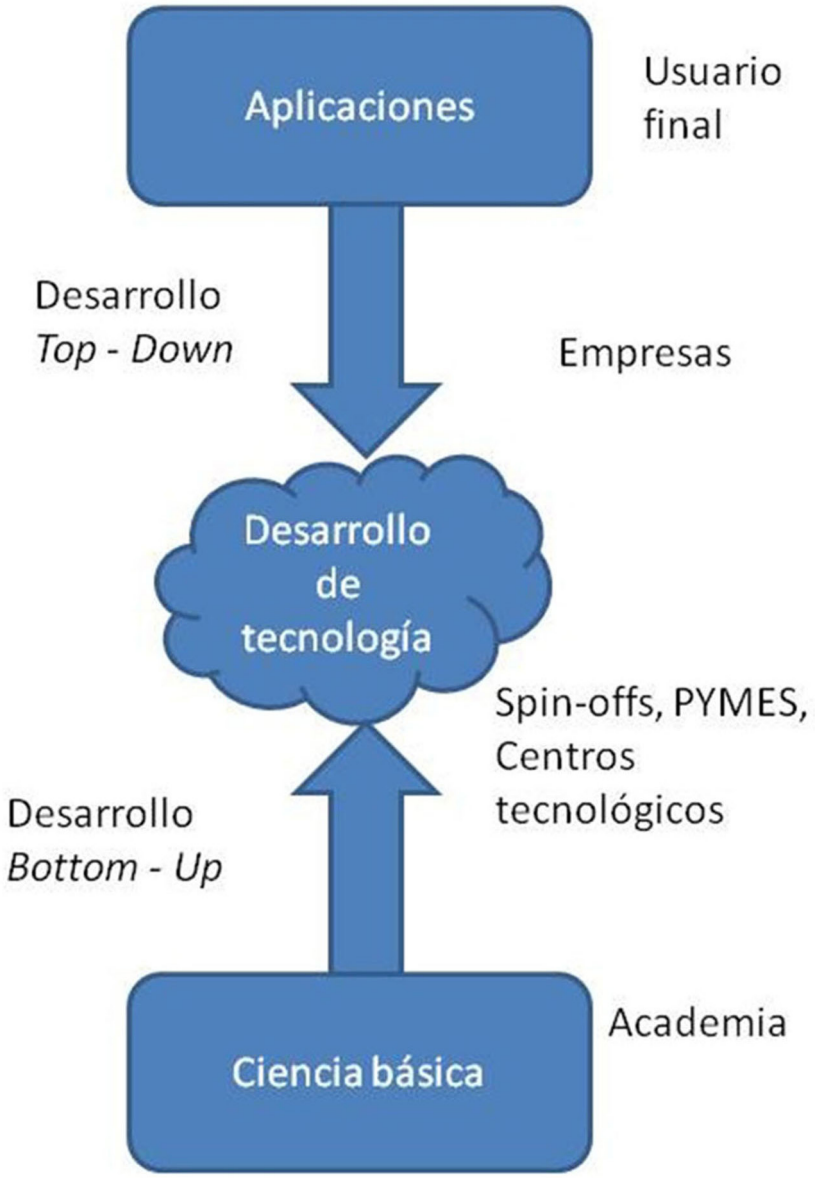


Figura 3-2. Aproximaciones bottom-up y top-down para el desarrollo de la tecnología (Fuente: el autor del capítulo)

gía capacitadora con esta visión dual optimiza los recursos necesarios si existe una sinergia, y se aprovechan desarrollos de ambos mundos.

Cuando hablamos de nanotecnología hay que tener en cuenta un aspecto que no por pasar desapercibido es menos importante: la fenomenolo-

gía a la que se quiere dar aplicación aparece en la escala nanométrica. Sin embargo, vivimos en un mundo macroscópico. Siempre tendrá que existir una interfaz entre el mundo macro y nano, que permita al usuario recuperar la información generada a través de esa fenomenología. Por eso mismo, cuando se habla de nanotecnología y sus aplicaciones, se está hablando frecuentemente del desarrollo de los componentes que habilitan una serie de aplicaciones, que abren la puerta a resolver ciertos problemas; pero que por sí solos no forman un sistema.

La luz puede interaccionar con la materia, producir una corriente eléctrica, difractarse, generar plasmones de una u otra frecuencia, y un sinfín de efectos más sobre los que se puede fundamentar la detección de agentes químicos y biológicos, por poner un ejemplo. Pero de poco sirven si no se tiene una electrónica de bajo ruido para amplificar la corriente eléctrica, una óptica adecuada, o una algoritmia rápida de procesado de datos, por poner ejemplos de tecnologías que sin ser consideradas «nano», también cumplen una función indispensable en un sistema. La nanociencia y nanotecnología son la base, pero el desarrollo de un sistema y aplicación involucra otro tipo de tecnologías con las que deben ser compatibles.

En las siguientes secciones vamos a hacer una aproximación *bottom-up* a la nanotecnología. Partiremos de fenómenos que han dado lugar a distintos tipos de desarrollos en nanotecnología. Dado lo amplia que puede llegar a ser la nanotecnología, es difícil abarcar todos los campos; pero veremos que existen en la actualidad componentes bastante maduros, y desarrollos que comenzaron antes de que la actual definición de nanotecnología estuviera en boga. Por otro lado, también veremos tecnologías que son emergentes y por ende en un estado de madurez bajo, pero que en un plazo medio de tiempo (5 a 10 años) seguramente sean componentes importantes en nuevos sistemas de defensa. Posteriormente, en el siguiente capítulo, se hará una aproximación *top-down*, partiendo de necesidades y aplicaciones a las que se quiere dar solución a través de la nanotecnología.

Optoelectrónica y estructuras de baja dimensionalidad

La optoelectrónica, también denominada optrónica, nace como una combinación de óptica y electrónica, de cómo hacer una conversión entre fotones y electrones tanto en un sentido como en el contrario. Hablamos así de emisores cuando a partir de una corriente eléctrica, se puede generar un haz de fotones, ya sean LED (Light Emitting Diode, diodo emisor de luz) o láseres. Y hablamos de sensores o detectores cuando un haz de luz se convierte en una corriente eléctrica. Ambos tipos de aplicaciones están basados en principios muy similares, y a nivel práctico, las estructuras que se necesitan fabricar son también bastante similares a primera vista.

El desarrollo de la epitaxia de haces moleculares (MBE), mencionado anteriormente en el capítulo dos, es en gran parte responsable de que este tipo de tecnología se haya desarrollado rápidamente en años en los que aún no se hablaba de nanotecnología; no es raro encontrar hoy día en el mercado dispositivos y componentes tanto emisores como detectores desarrollados con esta técnica de crecimiento. Estamos pues ante una tecnología que como componente está plenamente maduro para ser integrado en cualquier sistema con una aplicación que requiera detección o emisión de luz.

La principal ventaja, ya sea de la MBE o cualquier técnica similar de crecimiento *bottom-up*, es la posibilidad de crecer estructuras con un control a nivel por debajo incluso del nanómetro, ideal para crear las llamadas estructuras de baja dimensionalidad como pozos cuánticos, donde los electrones ocupan estados de energía muy concretos que se pueden controlar sólo con cambiar el tamaño de la estructura.

Los electrones en un material semiconductor se organizan en bandas o rangos de energía. La última banda de energía ocupada total, o casi totalmente por electrones se denomina banda de valencia, mientras que la siguiente banda, que está vacía o casi vacía, es llamada banda de conducción. Entre ambas bandas se crea un banda de energía que representa energías que un electrón no puede adquirir, y se denomina «banda prohibida, banda del gap, o simplemente gap». Esta banda prohibida determina en gran medida el comportamiento óptico del material, ya que los electrones de la banda de valencia puede «saltar» a la de conducción al absorber un fotón igual o mayor que la energía de la banda prohibida. Lo

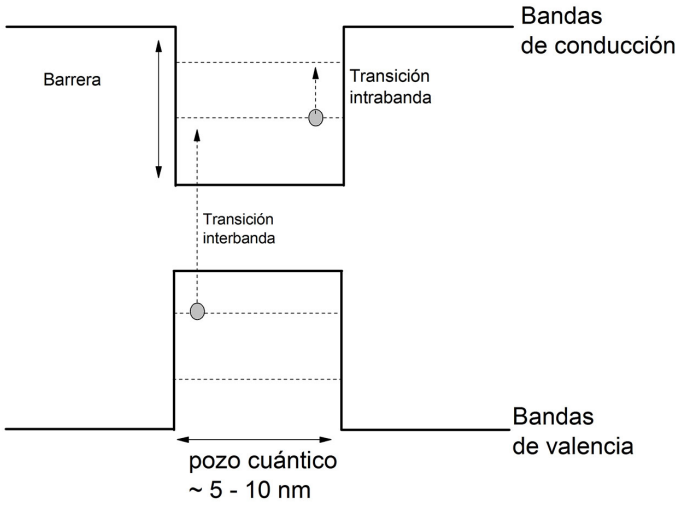


Figura 3-3. Esquema de pozos cuánticos y posibles transiciones de un electrón al absorber un fotón (Fuente: el autor del capítulo)

que en principio no puede ocurrir, es que un electrón absorba energía de un fotón para quedarse dentro de la banda prohibida. Y al revés, cuando un electrón que «baja» de la banda de conducción a la de valencia, emite un fotón con una energía igual a la de la banda prohibida.

Un pozo cuántico se forma cuando se juntan dos materiales con bandas prohibidas de distinto tamaño. Al rodear un material con una banda prohibida pequeña de un material con una banda prohibida mayor, las bandas de valencia y conducción generan una zona estrecha donde los electrones se hallan confinados. En estas circunstancias, la mecánica cuántica predice que los electrones no ocuparán todos los posibles estados dentro de la banda de valencia o de conducción, sino sólo unos estados de energía concretos, entre los que se pueden inducir transiciones a un nivel mayor por la absorción de luz, o a un nivel inferior, emitiendo radiación.

Las estructuras de pozo cuántico son fácilmente sintonizables durante la fabricación; esto es, con tan sólo variar la anchura del pozo o la altura de las barreras, se puede controlar la energía de los estados permitidos de los electrones. Y en función de la necesidad, es posible provocar que la emisión o detección de fotones se haga por mecanismos distintos. Un fotón que pueda ser absorbido desde uno de los estados permitidos de la banda de valencia, saltará la banda prohibida hasta uno de los estados permitidos de la banda de conducción, en lo que se denominan transiciones interbanda. Otra situación es en la que un fotón tiene energía suficiente para que dentro de la misma banda, haga que un electrón salte de un estado a otro, en transiciones intrabanda.

La diferencia entre estas transiciones es la energía del fotón que la provoca (o la energía del fotón que se obtiene, si hablamos de emisión). Mientras para la primera situación se necesitan energías ligeramente superiores a la de la banda prohibida del semiconductor usado como pozo, en la segunda situación la energía necesaria es bastante menor. De esta forma, con una sola familia de materiales es posible abarcar distintos rangos de longitudes de onda. Favorecer una u otra depende del diseño concreto de la estructura.

La estructura puede determinar en gran parte las propiedades de absorción y emisión de luz, pero no sólo ella. Los semiconductores son generalmente materiales de un solo átomo (como el silicio y el germanio), o binarios[1] (como GaAs o CdTe). Si estuviéramos restringidos a este tipo de materiales, las opciones para crear estructuras se reducirían a jugar con la anchura de los pozos. Afortunadamente, otra de las ventajas de los crecimientos epitaxiales es poder alear distintos semiconductores para

[1] La familia más conocida es la de semiconductores III-V, compuestos por un elemento de la columna III, y otro de la columna V de la tabla periódica. Existen otras familias, como la IV-VI (PbS, PbSe), o la II-VI (CdTe).

generar semiconductores binarios (SiGe), ternarios (InGaAs, CdHgTe), e incluso cuaternarios (InGaNAs), con un buen control de la composición que permite sintonizar según la necesidad los valores de la energía de la banda prohibida. Ajustar tanto la energía de los pozos, como las energías de las barreras da un grado más de libertad a la hora de diseñar estructuras que cumplan la función que deseamos.

Como se ha dicho anteriormente, la madurez de esta tecnología es en general alta. Materiales como GaAs, Silicio, InGaAs, InSb, CdHgTe son habituales en todo tipo de sensores y emisores. A un nivel bajo de madurez en cambio, se puede encontrar el estudio de nuevos materiales, y la ciencia que permite crecerlos antes de entrar a hacer tecnología; pero gracias a la ya dilatada experiencia, es un estado que en un corto plazo de tiempo (apenas un par de años) puede avanzar hacia el desarrollo de nanoestructuras y aplicaciones.

Podemos encontrar ejemplos recientes del uso de esta tecnología en defensa en el proyecto SIRIO (Sistema de detección IR para Investigación Optrónica), financiado con el programa COINCIDENTE de la por entonces Subdirección de Tecnología y Centros (hoy de Planificación, Tecnología e Innovación) de la Dirección General de Armamento y Material. El desarrollo, totalmente nacional, fue realizado a petición de la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL) de la Armada, y contó con la participación del Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA), la Universidad Carlos III,

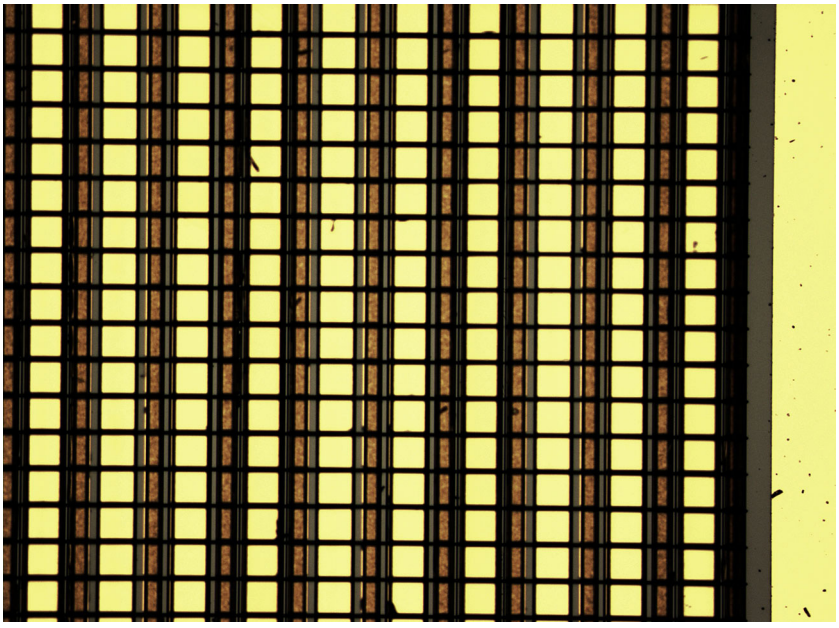


Figura 3-4. Imagen de Microscopio de la matriz de plano focal tricolor del sistema SIRIO (Fuente: CIDA/ITM – Ministerio de Defensa).

Indra Sistemas y el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM). El objetivo del proyecto fue el desarrollo de un demostrador de un sistema de alerta temprana para buques contra misiles rozaolas, con el objetivo final de alcanzar una madurez entre TRL 6 y 7 con un demostrador de la tecnología.

En el corazón del sistema se podía encontrar un detector basado en superredes de pozos cuánticos para generar una matriz de plano focal tricolor. Combinando distinta periodicidad y aleaciones de las superredes de AlGaAs y GaAs, se controlan las transiciones intrabanda para poder generar finalmente tres imágenes de un escenario en tres longitudes de onda dentro del rango de infrarrojo medio (3 a 5 mm en longitud de onda, también denominada Banda II). Como se ha comentado anteriormente, el desarrollo del detector es la parte que contiene la nanotecnología, habilitadora del sistema completo, pero que necesita de otros componentes para formar el sistema completo. Así, el detector necesita de un criostato para la refrigeración con nitrógeno líquido; una óptica que no solo lleve la imagen al plano focal del detector, sino también un sistema de barrido para generar una imagen en un campo extenso; la electrónica de lectura y control, y un procesado de imágenes que permitan detectar un posible blanco amenaza con una baja tasa de falsas alarmas. Aunque la nanotecnología se halla en el detector, cada componente o subsistema necesita su propio desarrollo, y unir todos en el sistema final no es trivial.

El resultado final del proyecto llegó hasta la comprobación por separado de cada uno de los componentes de la tecnología, en particular del sensor, la óptica de barrido, y el desarrollo de algoritmos para la detección de amenazas con una baja tasa de falsas alarmas. Un sistema como el propuesto era por tanto viable, si bien aún faltaron algunos pasos para la integración completa del sistema.

La experiencia y conocimientos adquiridos ha servido como base en la participación a nivel internacional en grupos de trabajo para poner en común el desarrollo de este tipo de sistemas, dentro del grupo de Defensa contra Misiles en el Teatro Marítimo (*Maritime Theatre Missile Defence*, MTMD), con participación de Estados Unidos, Canadá, Italia, Reino Unido y España. El objetivo de estos grupos es especificar los requerimientos necesarios para que este tipo de sistemas puedan ser operativos en entornos relevantes, y, no menos importante, abaratar los costes con un desarrollo compartido por varias naciones. El objetivo final del desarrollo de estos sistemas de alerta temprana contra misiles rozaolas es su integración en los programas de mástil integrado para buques.

Sistemas equivalentes con el uso de tecnología similar, y con el mismo concepto de desarrollo compartido entre varias naciones, están en desarrollo actualmente, y cabe destacar entre ellos el Sistema Alertador de Misiles (*Missile Warning System*, WMS) del nuevo Airbus A400M, con intención objeto de ser un sistema que entre en operación en un corto plazo.

Sin embargo, no todo pueden ser ventajas, y uno de los principales inconvenientes de esta tecnología es que necesita ser refrigerada para alcanzar una buena sensibilidad de los sensores. El hecho de integrar el sensor con un sistema de refrigeración, típicamente de nitrógeno líquido, complica el diseño del sistema, lo encarece notablemente, e incluso condiciona su uso, pues por un lado se necesita un tiempo para alcanzar la temperatura de operación, y por otro los continuos ciclos de calentamiento – enfriamiento reducen el tiempo de vida del sistema.

Hoy día se buscan fórmulas para aumentar la temperatura de operación lo más posible hasta la temperatura ambiente; soluciones que pueden pasar por el uso de otros materiales, y por reducir la dimensionalidad de las estructuras. Un material presenta una dimensionalidad 3D, es decir, los electrones pueden moverse en las tres dimensiones del espacio. Un pozo cuántico reduce la dimensionalidad a dos dimensiones (2D), ya que en una de ellas, la dirección en que se forma el pozo, se hallan confinados pero no en las otras dos. El confinamiento en otra dirección más provoca una dimensionalidad unidimensional (1D), donde sólo una dirección de movimiento libre es posible. Este tipo de estructuras son llamadas hilos cuánticos. Y por último, el confinamiento en las 3 direcciones del espacio es lo que se ha llamado dimensionalidad 0D, que es la que presentan los llamados puntos cuánticos y nanopartículas.

En resumidas cuentas, la optrónica basada en el desarrollo de estructuras de confinamiento cuántico es una tecnología madura hoy día, que es la base para el desarrollo de multitud de aplicaciones de interés en la defensa.

Tecnología fotónica. La tecnología habilitadora transversal

Tal como se comentaba al comienzo de esta monografía, se puede buscar el inicio de la nanociencia y nanotecnología en el desarrollo de las teorías del electromagnetismo y de la mecánica cuántica. No es extraño pues que las ondas electromagnéticas y su interacción con la materia tengan un lugar destacado en el desarrollo de aplicaciones, ya sean para un uso civil o militar.

La fotónica desarrolla tecnología que trata principalmente de la generación, manipulación y detección de fotones. Desde el mismo comienzo de la mecánica cuántica, es conocido que las ondas electromagnéticas pueden ser consideradas como partículas con una energía determinada por su frecuencia. Pero, mientras en aplicaciones de radiofrecuencia se usa una descripción clásica con ondas electromagnéticas caracterizadas por una frecuencia (microondas, UHF, VHF,...), en la fotónica sin embargo se emplea una descripción cuántica, mucho más adecuada para partículas con energías correspondientes a longitudes de onda de infrarrojo, visible y ultravioleta.

Así, los fenómenos que se dan en fotónica están descritos por la energía del fotón, y de su intercambio con la materia, principalmente con los electrones, que a su vez se hallan ordenados en bandas de energía, o en estructuras de tamaños comparables a su longitud de onda que provocan la absorción y emisión de fotones, o controlan su dispersión y propagación.

Entre medias, queda el rango de ondas milimétricas y terahercios, como un rango que todavía está por explotar, y al que hay acercamiento desde ambos extremos. Como ocurre frecuentemente, los distintos puntos de vista se topan con ciertas dificultades de comunicación, pues donde unos hablan de frecuencias y ondas, otros hablan de longitudes de onda, partículas y energía.

La principal característica de la tecnología fotónica es que es una tecnología transversal. Es una tecnología capacitadora en la que se emplean los mismos fundamentos para aplicaciones radicalmente distintas. Y en la que además existe una importante cantidad de empresas dispuestas a desarrollar la tecnología tanto para aplicaciones civiles como militares. En los últimos años se ha creado una plataforma industrial, Photonics 21 (1), con el objetivo de hacer entender y cuantificar la importancia de la tecnología a la Comisión Europea. Fruto de este trabajo, la Comisión Europea ha designado la fotónica como Tecnología Habilitadora Clave (*Key Enabling Technology*, KET), lo cual se ha reflejado en las convocatorias de desarrollo tecnológico del programa Horizon 2020.

En España existe una réplica de tal plataforma, Fotónica 21 (2), que agrupa a la mayor parte de empresas, centros tecnológicos y universidades que ejecutan el I+D+i en fotónica en nuestro país, con similares objetivos a la plataforma europea, pero teniendo en cuenta las peculiaridades o diferencias de España respecto de Europa; en ambos casos, la seguridad y defensa no es ajena a las plataformas, y existen sendos grupos de trabajo para dar cuenta de las peculiaridades, potencialidades y necesidades de dicho sector.

Dentro de la fotónica podemos encontrar distinto tipo de fenomenología, pero siempre orientada al control de la propagación de la luz, a través de distintos métodos.

Los cristales fotónicos

En ese control de la propagación de la luz, es inmediato pensar en tratar de controlar las propiedades ópticas del material por el que se está propagando. Este control puede pasar por permitir la transmisión o atenuación de ciertas longitudes de onda, la reflexión total, confinamiento de luz, interferencia, difracción, etc. Este tipo de efectos pueden ser

aplicados en componentes y sistemas para láser, computación de alta velocidad, o espectroscopía, por citar algunos. Los materiales en general pueden presentar dos tipos de morfología: pueden ser amorfos, cuando ningún tipo de periodicidad aparece en la ordenación de sus átomos, o pueden ser cristalinos, cuando los átomos se ordenan de forma periódica a lo largo del espacio. Esta ordenación periódica es la que provoca la aparición de las bandas de energía ocupadas por electrones y las bandas de energía prohibida, sobre los que se puede posteriormente trabajar para desarrollar aplicaciones como hemos visto en el apartado anterior.

Este concepto de periodicidad y bandas es extrapolable a los fotones, sólo que esta vez, en lugar de hablar de átomos que tienen distintas propiedades electrónicas, hay que hablar de materiales con distintas propiedades ópticas. Estructuras que presentan una periodicidad en la constante dieléctrica o equivalentemente, el índice de refracción, provocan la aparición de bandas donde la propagación de luz es posible, y bandas donde esta propagación se elimina que se han llamado, por analogía, gaps ópticos, mientras que los materiales con estas propiedades se han denominado cristales fotónicos.(3)

A pesar de esta nueva denominación, el fenómeno ya era conocido desde hace tiempo. Un recubrimiento de tipo multicapa es una sucesión periódica de dos o más capas con distinto valor del índice de refracción. Es un problema resuelto por Lord Rayleigh en 1887, en base a interferencias constructivas y destructivas que se dan con la reflexión y transmisión de la luz en cada una de las capas, y aprovechado en la fabricación de recubrimientos ópticos como espejos dieléctricos[2], o filtros Fabry - Perot.

Sin embargo, también se puede plantear como un problema de un cristal fotónico, en el cual existen bandas de propagación de la luz, y bandas donde la propagación no es posible. Una multicapa se puede describir como un cristal fotónico, y obtener idénticos resultados a los de Lord Rayleigh. Es en principio una descripción alternativa de la misma estructura y del mismo fenómeno, pero la gran ventaja aparece al generalizar el concepto a dos y tres dimensiones, y predecir el comportamiento de la luz al atravesar estas estructuras.

La micro y nanotecnología actual permite de forma sencilla crear cristales fotónicos: Partiendo de una supercifie de silicio, por técnicas de

[2] Un espejo normalmente es un recubrimiento metálico que refleja la luz, porque la luz no puede propagarse hacia su interior. Un espejo dieléctrico está hecho por un recubrimiento de materiales semiconductores (dieléctricos) que en principio sí permiten la transmisión de luz, pero que al combinarse pueden formar estructuras que sí son capaces de impedir la transmisión, reflejando la luz de la misma forma que lo hace un metal, al menos en un rango de longitudes de onda.

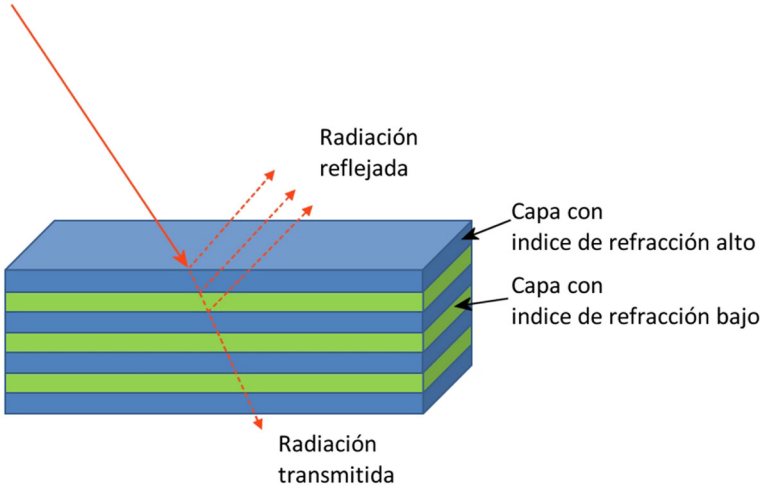


Figura 3-5. Esquema de una multicapa dieléctrica, alternando materiales con distinto índice de refracción. Según la solución de Lord Rayleigh, la reflexión y transmisión de la radiación en cada capa provoca interferencias que permiten la transmisión o reflexión de determinadas longitudes de onda (Fuente: el autor del capítulo)

ataque es posible bombardear y erosionar la superifice de forma controlada, generando una red bidimensional de columnas. De esta forma, a lo largo de la superficie se consigue que el índice de refracción tenga una variación periódica, pasando de silicio a aire. Esta periodicidad crea las distintas bandas de propagación de la luz, y bandas donde la propagación no es posible, como se ha explicado más arriba. Por analogía a los semiconductores, la banda de energía donde la propagación no es posible se denomina banda óptica prohibida, o *gap óptico*. Si la forma de la red es cuadrada, o hexagonal, si el material es uno u otro son ya parámetros que permiten variar la respuesta en busca de la que interese en cada momento.

Los cristales fotónicos tienen aplicaciones desde el punto de vista de la manipulación de la luz, o de un preprocesado de ésta antes de llegar por ejemplo a un sensor. La banda óptica prohibida de un cristal fotónico impide la propagación de luz en una banda de longitudes de onda determinada. Con esta configuración básica, un cristal fotónico ya sea en cristal uni-, bi- o tridimensional, actúa como un filtro de rechazo de banda ancha. La inclusión de defectos en este cristal, hace aparecer bandas estrechas de transmisión dentro de la banda óptica prohibida, de forma que el filtro de rechazo de banda puede convertirse en un filtro de paso-banda estrecho.

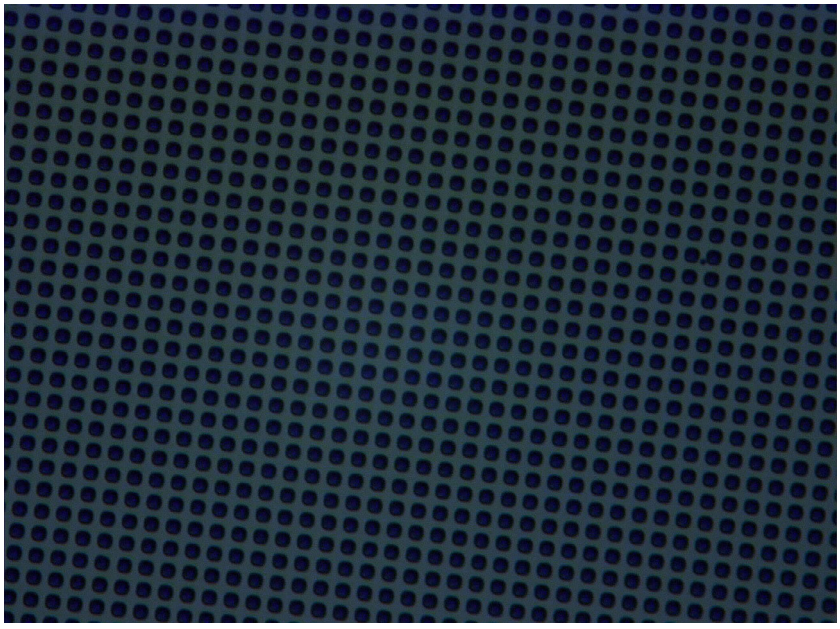


Figura 3-6. Cristal fotónico realizado grabando huecos de aire sobre silicio de forma periódica (Fuente: ITM – Ministerio de Defensa)

Por simple que sea su función, el filtrado de la radiación es un factor importante en sistemas optoelectrónicos. Es una forma de mejorar la relación señal/ruido de un sistema, pues elimina radiación que genera una fotocorriente no deseada. En campo abierto, para aplicaciones por ejemplo relacionadas con detección de blancos, el sol es una fuente muy importante de radiación no deseada y de falsas alarmas, que puede llegar por visión directa, o de forma más incontrolada por un reflejo sobre cualquier superficie. El sol emite un espectro continuo, con la típica forma de un cuerpo negro a 5.500 K. Un filtrado para eliminar la mayor parte de esta radiación facilita que la señal transmitida hasta un sensor sea en su mayor parte proveniente de la fuente de interés, y no del sol, evitando falsas alarmas. Otro tipo de soluciones pasan por la combinación de distintos filtros para una detección multiespectral. La comparación de señales obtenidas en cada canal o longitud de onda, permite discernir si corresponde al sol o a otro tipo fuente.

Frente a un filtrado clásico, donde un sustrato con un recubrimiento se coloca como un elemento en el camino óptico del sistema, el cristal fotónico basado en tecnología de semiconductores permite una integración monolítica con otro tipo de dispositivos micro y nanoelectrónicos. Es una reducción de tamaño y un aumento de la robustez considerable, ideal por ejemplo para aplicaciones de espacio, o para sistemas de vehículos no tripulados, donde la carga de pago es un factor fundamental. Y en parti-

cular si hablamos de una detección multi e hiperespectral, pues la integración de distintos filtros y sensores de forma monolítica puede ahorrar espacio y peso.

En el lado de los inconvenientes, la detección multi o hiperespectral, requiere una potencia de cálculo elevada para procesar los datos y extraer la información necesaria; en especial si hablamos de cámaras para generación de imágenes hiperespectrales. Actualmente, existen algoritmos para descartar rápidamente la información innecesaria para poder centrarse en la que puede ser útil, pero la gran cantidad de datos que proporciona un sistema multiespectral hace muy difícil aplicaciones de tiempo real. Es en este tipo de problemas cuando se ve la necesidad de integrar distintas tecnologías o nanotecnologías, pues si hablamos de capacidad de cálculo, nos podemos remitir fácilmente a la computación cuántica como una posible futura solución, que pueda permitir un procesado en tiempo real.

La plasmónica y la transmisión extraordinaria

Cuando a un gas se le aumenta la temperatura, llega un momento en que los electrones tienen energía suficiente como para superar la atracción electrostática de sus núcleos, y desligarse de ellos. El gas, entonces, es un gas que contiene partículas cargadas, y se considera un nuevo estado de la materia, denominado plasma. El ejemplo más típico de un plasma es la ionosfera, una de cuyas propiedades es impedir la propagación de ondas de radiofrecuencia. La onda es entonces reflejada, un fenómeno muy conocido en telecomunicaciones.

Sin embargo, también se puede encontrar plasma más cerca: en los metales. Un metal es un buen conductor de la electricidad, debido a su concentración de electrones. Tanto por su concentración como por su movilidad, usualmente los electrones de un metal son considerados como un gas de electrones que se mueven libremente por el metal, y por tanto, se adaptan a la definición de plasma.

El gas de electrones de un metal no sólo comparte definición, sino que también comparte propiedades con un plasma. Es bien conocido que un metal es básicamente opaco a la luz, porque impide la propagación de luz hacia su interior, haciendo que sea reflejada. Hacia el interior sólo penetra un campo evanescente que desaparece en una distancia de apenas un centenar de nanómetros. En general, a partir del ultravioleta los metales se vuelven transparentes, una transición que ocurre cuando la constante dieléctrica cambia de un valor negativo a uno positivo, a una frecuencia llamada frecuencia de plasma, y que está determinada por la concentración de electrones libres en el metal.

Esta frecuencia de plasma se entiende como la frecuencia natural de oscilación del gas de electrones libres que se propaga por el metal como

una onda. Y como ocurre habitualmente en la mecánica cuántica, las ondas presentan una dualidad que permite considerarlas como partículas. De esta forma, un plasmón es la partícula asociada a las oscilaciones del gas de electrones de un metal. Y con una energía determinada por esa misma frecuencia de plasma.

Estos plasmones se propagan a través de todo el volumen de un material, pero junto a estas excitaciones de volumen, existen también oscilaciones de superficie que ocurren en la frontera entre un metal y un material dieléctrico, plasmones de superficie. Estos aparecen como un acople entre las oscilaciones del gas de electrones del metal y un campo electromagnético externo, de forma que se genera una propagación de plasmones a lo largo de la frontera entre el metal y el dieléctrico (4). Es un fenómeno debido a la interfase que separa una zona de constante dieléctrica positiva (el dieléctrico), y una constante dieléctrica negativa (el metal, cuando la frecuencia de la radiación es menor que la del plasma). Y que puede funcionar de forma inversa, es decir, a partir de unos plasmones de superficie, estos inducen la emisión de fotones.

Se puede entonces proponer un ciclo completo en el que a partir de una radiación se generan plasmones, se manipulan estos plasmones para concentrarlos en un espacio menor y posteriormente son de nuevo reemitidos como radiación, con una mayor intensidad fruto de la concentración previa de los plasmones en un punto concreto.

El principal fenómeno descubierto a través de la interacción de radiación y plasmones es la llamada transmisión extraordinaria. La teoría clásica de transmisión de luz a través de rendijas predice que para aberturas de un tamaño mucho mayor que la longitud de onda de la radiación, ésta la atraviesa con una transmisión cercana al 100%. Al aumentar la longitud de onda hasta tamaños comparables a la rendija, además de los efectos de difracción, se encuentra que la intensidad transmitida de radiación se reduce y decae de forma inversa con la cuarta potencia de la longitud de onda. Para aberturas menores que la longitud de onda (denominadas «sub-lambda»), rápidamente encontramos que no hay transmisión.

Sin embargo, en 1998 Ebbesen demostró experimentalmente que era posible encontrar transmisión de radiación a través de una matriz de aberturas sub-lambda (5), y la explicación está relacionada con la aparición de plasmones de superficie en la cara donde incide la radiación. Estos plasmones se propagan por la superficie y a través de las rendijas, para re-emitir la radiación por la otra cara de la matriz. Como es natural, este efecto depende de varios parámetros de la estructura, que son controlables en la fabricación, como la periodicidad, tamaño de abertura, o espesor del metal.

Posibles aplicaciones de esta tecnología pasa por la concentración de luz, con posible uso en la mejora de la señal en detectores (6). Para ello,

se generan plasmones en una superficie diseñada con una serie de hendiduras, que dirigen y concentran los plasmones sobre una apertura. Al atravesar la abertura sub-lambda son re-emitidos como radiación. Con estructuras de este tipo, se han predicho un aumento de la radiación transmitida en torno a 50-70 veces la transmisión de la abertura sin hendiduras, aunque aún falta por demostrar la integración con detectores para comprobar la ganancia real de un sensor completo usando tecnología plasmónica. En España existen grupos dedicados a este tema, entre los que cabe destacar al grupo de García Vidal (Universidad Autónoma de Madrid), y de León Pérez (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza). Se puede decir que el estado de la tecnología se halla en torno a una madurez entre TRL 2 y 3.

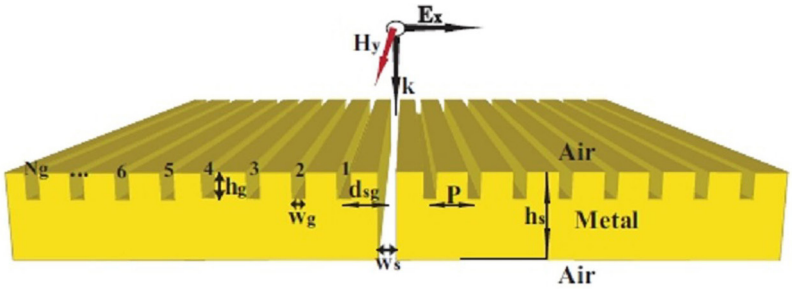


Figura 3-7. Esquema de estructura plasmónica para recolección de luz (Fuente: el autor del capítulo)

Otra de las aplicaciones propuestas para la tecnología plasmónica, se encuentra en la detección de moléculas de agentes químicos y biológicos. Como se ha dicho, el fenómeno aparece fundamentalmente ligado a la interfase entre un metal y un dieléctrico, como puede ser el aire. Sin embargo, también se pueden usar otros dieléctricos sobre los que depositar anticuerpos. Cuando los anticuerpos encuentran una bacteria o virus, éstos son capturados y el conjunto completo presenta unas propiedades ópticas distintas. Existe pues una respuesta óptica distinta entre una superficie dieléctrica, una superficie funcionalizada con anticuerpos, y una superficie con anticuerpos y agentes biológicos capturados. Distintas respuestas que se pueden usar para determinar la presencia de estos agentes biológicos.

Fotónica y optoelectrónica para sensores de agentes químicos y biológicos

El ejemplo recién expuesto de uso de tecnología plasmónica para la detección biológica es un ejemplo paradigmático de cómo combinar los campos de la biología, química y física a través de la nanotecnología en distintos aspectos, algo sobre lo que ya se habló en el segundo capítulo

de esta monografía. Si bien el objetivo final es provocar un cambio en la respuesta óptica como fenómeno explotable en una aplicación, el paso previo consiste en funcionalizar una superficie dieléctrica anclando anticuerpos sobre ella, y no es un paso trivial de realizar. Requiere de un desarrollo y comprensión de la nanociencia detrás de las interacciones químicas y biológicas que se dan entre la superficie y los anticuerpos.

En cualquier caso, existen varios proyectos realizados y otros en marcha de demostradores para la detección de agentes químicos y biológicos, que han madurado distintos tipos de configuraciones hasta TRL en torno a 6. La EDA, como organismo de defensa de ámbito europeo ha sido una fuente importante de financiación en estos casos. La división actual de la EDA en grupos de trabajo o *Cap Techs* incluye temas como protección NBQ, y desarrollo de componentes y sistemas ópticos, entre otros.

Uno de los demostradores de sistemas ópticos para detección de agentes químicos, CANARIO (7), fue desarrollado entre Italia y España, con participación del Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada[3], está basado en la detección de la firma de absorción de gases. Las moléculas de estos gases son complejos de átomos enlazados, que vibran y rotan cuando absorben luz de una energía determinada, comúnmente en el infrarrojo lejano y medio. A pesar de que las moléculas son distintas, presentan grupos similares que permiten agruparlos en distintas familias de agentes: nerviosos, vesicantes, pulmonares, sanguíneos,...

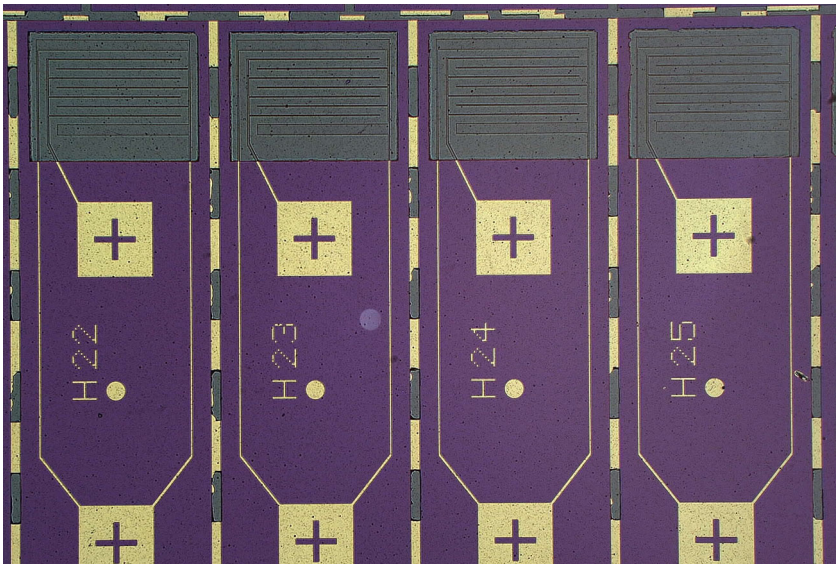


Figura 3-8. Detectores de PbSe para infrarrojo medio depositados sobre un filtro interferencial paso banda (imagen en color real). Proyecto CANARIO (Fuente: CIDA/ITM - Ministerio de Defensa)

[3] Posteriormente integrado en el Instituto Tecnológico la Marañosa

El núcleo del proyecto CANARIO consistió en combinar detectores de infrarrojo medio (3 a 5 mm de longitud de onda) y lejano (8 a 12 mm) para obtener un espectro de absorción. Dentro de una cámara estanca, una cavidad óptica proporcionaba a una fuente de radiación un camino óptico de metro y medio hasta llegar a los detectores.

Al introducir un agente químico en baja concentración, las moléculas absorbían parte de la radiación, creando el espectro de absorción, que se comparaba con una base de datos de 400 agentes, para determinar el gas presente en la cavidad, con una baja tasa de falsas alarmas. Las pruebas finales se llevaron a cabo en el *Centro Tecnico Logistico Interforze* (CETLI-NBC), en Civitavecchia (Italia), y permitieron comprobar que a concentraciones del orden de 10 partes por millón, el sistema era capaz de identificar y reconocer el gas introducido en un tiempo entre 7 a 10 segundos.

El reto tecnológico del proyecto era fundamentalmente la integración de sensores de infrarrojo lejano basados en microbolómetros, de respuesta lenta, junto con sensores de infrarrojo medio, de respuesta más rápida. La discriminación espectral en infrarrojo medio se realizó integrando monolíticamente los sensores sobre filtros Fabry-Perot con un paso banda muy estrecho centrados en las longitudes de onda características de las familias de gases. De esta forma, el algoritmo de procesado se orientaba ya hacia la detección de una familia concreta de gases, ahorrando tiempo de cálculo, mientras se generaba el espectro de infrarrojo lejano, de adquisición más lenta.

También como demostrador de detección de gases químicos, se ha desarrollado a través de la EDA el proyecto NANOCAP (8), con participación de universidad y empresas españolas (Centro de Nanofotónica de Valencia y DAS Photonics), francesas e italianas. El proyecto proponía el uso de un chip fotónico integrado (Photonic Integrated Circuit, PIC) para dos aplicaciones: una relativa a telecomunicaciones, y una segunda orientada a la detección de agentes químicos. Es un ejemplo de transversalidad, de cómo una misma tecnología es capaz de abarcar campos muy separados entre sí.

En relación al segundo objetivo de detección químicos, el chip fotónico consta de una guía de onda por la que se propaga un haz de fotones. Aunque la transmisión de luz se realiza a lo largo de ésta, en el lateral de la guía hay una parte de luz que se pierde a través de un campo evanescente, que decae rápidamente con la distancia. Al colocar en las proximidades otras guías de ondas, en este caso con forma de anillos, el campo evanescente es capaz de transmitirse hasta éste, y la luz comienza a propagarse por el anillo. Esto sólo ocurre para una longitud de onda determinada, que depende de la geometría y las propiedades ópticas. Al hacer un barrido en longitud de onda, con un láser sintonizable, y medir la transmisión a través de la guía de ondas, aparece una banda de absor-

ción, originada en la pérdida de luz desde la guía al anillo. Al depender esta transmisión de las propiedades ópticas, el anillo se puede recubrir de proteínas específicas para atrapar moléculas cuya presencia de desea detectar. En el caso de NANOCAP, se realizaron pruebas con dimetil metilfosfonato DMMP, un simulante de gas sarín.

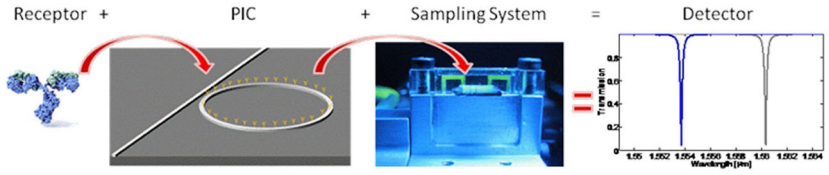


Figura 3-9. Esquema de anillo resonante usado en el proyecto NANOCAP, y desplazamiento de la respuesta óptica esperada (Fuente: DAS Photonics / NTC)

Al hacer pasar un líquido con moléculas de DMMP, éstas se enlazan con las moléculas que se han depositado en el anillo, y las propiedades ópticas cambian. Esta variación produce una variación en las características de transmisión de la guía de ondas original, y es posible por tanto, con una calibración adecuada, llegar a cuantificar la densidad de DMMP presente en el líquido. Las pruebas realizadas durante el proyecto llegaron a detectar hasta 200 partes por billón.

Basado en el mismo concepto y desarrollo que NANOCAP, actualmente se desarrolla el proyecto BIOTYPE (9), con el mismo consorcio más la participación del Instituto Tecnológico la Marañosa. Con el mismo concepto de anillos resonantes en un PIC, en este caso se incluye una funcionalización de varios anillos con distintos anticuerpos sensibles a moléculas de ántrax y de ricina.

El sistema completo necesita de un sistema que muestree el aire, y lo concentre en un líquido que se hace pasar por el PIC con varios anillos. Cuando una bacteria o virus es capturada por el anticuerpo, cambian las propiedades ópticas del conjunto, produciendo el desplazamiento en el espectro de transmisión del sistema. El sistema completo cuenta además con un láser sintonizable, y un fotodetector para poder registrar el espectro de transmisión a través de la guía de onda. De nuevo, las variaciones en la transmisión pueden ser calibradas para estimar la concentración presente en el líquido, y de ahí calcular cual es la concentración en aire de los agentes biológicos.

Este tipo de detección es altamente selectivo, pues depende de una funcionalización específica con anticuerpos. Por otro lado, la estructura del chip fotónico tiene un tamaño de tan sólo uno pocos milímetros, pero es suficiente como para fabricar varios conjuntos de anillos. Una funcionalización distinta en cada anillo es posible, de forma que un mismo PIC puede servir para la detección simultánea de varios agentes.

Los tres demostradores descritos están pensados como sistemas que puedan ser integrados en edificios, espacios cerrados o con gran acumulación de gente, para realizar una vigilancia no atendida con un mantenimiento mínimo. Su colocación debería hacerse en puntos estratégicos como pueden ser los conductos de aire acondicionado. En caso de detectarse un agente químico o biológico, se activaría una alarma, que señalaría la necesidad de evacuación del recinto. La identificación del agente en cuestión es importante para que cuando los servicios de emergencia acudan, lo hagan con una idea clara de a qué tipo de amenaza se están enfrentando, y por tanto el protocolo de actuación esté claro.

Aunque el núcleo del sistema, lo que contiene realmente la nanotecnología, es el chip fotónico, la necesidad de los demás subsistemas (muestreador, láser, electrónica de lectura) le da volumen y peso al sistema completo, por no hablar del consumo eléctrico que supone. El reto para el futuro pasa por poder disminuir el peso, reducir el volumen y usar una menor potencia eléctrica para que el sistema pueda ser integrable en plataformas no tripuladas, que puedan introducirse en un área contaminada, e informar inalámbricamente a los servicios de emergencia del resultado de la detección.

Fotónica para telecomunicaciones

Hay que remontarse hasta el siglo XIX para encontrar el origen del empleo de las ondas electromagnéticas para la emisión y recepción de comunicaciones. Los nombres de Maxwell, Hertz y Marconi de sobra son conocidos. Más de un siglo después, seguimos empleando ondas electromagnéticas, si bien se han mejorado diferentes aspectos: emisores, receptores, modulación de señal, encriptado, señales analógicas y señales digitales.

Tradicionalmente, el rango de frecuencias empleado es el de radiofrecuencia y microondas. Poco parece que pueda aportar la fotónica en telecomunicaciones, teniendo en cuenta además que la atmósfera atenúa y dispersa la luz a frecuencias ópticas, salvo en ciertas ventanas de transmisión.

Sin embargo, la aportación de la fotónica la podemos encontrar en el desarrollo de componentes que permiten la digitalización de una señal analógica de radiofrecuencia. El empleo de componentes fotónicos para la fabricación de convertidores analógico–digital (Analog to Digital Converter, ADC) viene siendo un reto desde los años 70. Durante este periodo tanto componentes como láseres han mejorado considerablemente, pero la rápida evolución de la electrónica ha hecho que aún no haya disponibles ADC fotónicos.

La función de un ADC, ya sea electrónico o fotónico, es muestrear una señal analógica para pasarla a una serie de niveles discretos. En esta

discretización o digitalización, intervienen parámetros como la frecuencia a la cual se toman muestras de la señal analógica (la frecuencia de muestreo), y el número total de niveles entre los cuales se cuantifica cada muestra (número de bits por muestra). Cuanto mayor sean ambos parámetros, más fiel será la digitalización a la señal analógica. Pero a cambio de incrementar la cantidad de datos que habrá que procesar posteriormente.

Si hablamos de un ADC electrónico, los bits de salida son señales eléctricas que presentan dos estados: tensión o no tensión, corriente o no corriente eléctrica. Eso no quiere decir que sean inmunes al ruido, ya que pueden existir errores en la amplitud de la señal, o errores temporales en la adquisición. Estos errores limitan el número efectivo de bits que se emplean para digitalizar una señal, y también afectan a la frecuencia de muestreo, y a su vez limitan el uso que se puede hacer del procesado digital de señales.

En busca de una alta velocidad y resolución, son los ADC fotónicos los que se presentan como posible solución, aprovechando además la alta madurez tecnológica de componentes como láseres, detectores, guías de onda, cristales fotónicos, interferómetros, y donde ya hemos visto que la nanotecnología puede entrar de lleno. Se busca aprovechar ventajas tales como la posibilidad de generar trenes de pulsos de alta frecuencia (en torno a 10 GHz), con una precisión temporal mucho mayor que en ADC electrónicos. Y sobre todo aprovechar una alta limpieza en el tratamiento óptico de la señal, que elimina posibles ruidos una vez muestreada la señal.

Una aplicación inmediata se puede encontrar en aquellas circunstancias en las que se requiere obtener una señal, y trasladarla hasta un centro de mando o de procesado a una gran distancia. Una digitalización óptica hecha cerca de la antena de RF más una transmisión por fibra óptica, mejora la recepción final de una señal con bajo ruido, e inmune a interferencias. Una vez en el centro de proceso, la señal óptica puede ser convertida de nuevo a señal eléctrica para un procesado más habitual. Es inevitable pensar en su aplicación en sistemas como el mástil integrado de buques.

Existen distintas arquitecturas de un ADC fotónico. Obviamente, el funcionamiento es también distinto, e incluso los resultados finales. Se puede hablar de ADC asistidos fotónicamente, donde un láser pulsado se emplea para controlar el reloj de muestreo y reducir el ruido debido a esta causa. Este tipo de ADC en realidad sigue haciendo el muestreo electrónicamente.

Los ADC de muestreo fotónico, emplean la señal analógica para modular la amplitud de los pulsos del láser. Los moduladores típicos son interferómetros de Mach–Zender, en los cuales la respuesta óptica es controla-

da por la señal eléctrica que se quiere muestrear. Estos pulsos son posteriormente captados por un fotodiodo, y se recupera una señal eléctrica que ya ha discretizado la señal analógica original. Con estos sistemas se pueden alcanzar frecuencias de muestreo de hasta 10 Gigamuestras por segundo. La frecuencia de muestreo es uno de los parámetros más importantes a aumentar, debido a que establece límites sobre la información que se puede digitalizar. El teorema de Nyquist-Shanon determina que para muestrear correctamente una señal, la frecuencia de muestreo deber ser superior al doble de la frecuencia de la señal. Una frecuencia de muestreo alta permite un mayor ancho de banda de la señal original, y por tanto, mayor contenido de información a transmitir.

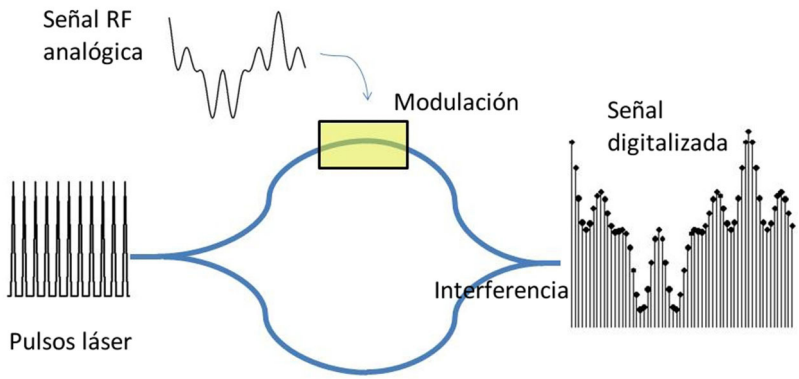


Figura 3-10. Esquema de interferómetro Mach-Zender. La luz se divide en dos caminos, y la señal eléctrica de RF modula la propagación de uno de ellos. Al volver a unirse los caminos, los haces interfieren constructiva, o destructivamente, según la perturbación creada por la señal eléctrica (Fuente: el autor del capítulo)

Para los ADC de cuantificación fotónica, la señal analógica modula la longitud de onda de un láser sintonizable. El láser se refleja en una red de difracción, y finalmente atraviesa una rendija que redirige el haz hacia una matriz de detectores que genera un código binario (0's y 1's), según cada píxel esté o no iluminado. Cada uno de estos códigos representa un nivel distinto de amplitud de la señal analógica original. Así pues, es un sistema más orientado a actuar sobre los bits con los que se discretiza la señal, donde el tamaño de la matriz determina el número de bits de la señal muestreada.

Por último, un ADC de muestreo y cuantificación fotónica actúa sobre los dos parámetros: frecuencia de muestreo y número de bits.

El método más simple es una modulación por intensidad. Empleando varios moduladores en paralelo de distinta longitud sobre la fuente de pulsos láser, de cada modulador se obtiene un 1 o un 0 en función de las condiciones de cada modulador. El número de bits corresponde con el

número de moduladores empleado, y a la vez se aprovecha la velocidad de la modulación Mach–Zender.

Por otra parte, están los moduladores Delta–Sigma($\Delta\Sigma$) que operan de una forma diferente a los moduladores explicados hasta ahora. En este tipo de modulación, existe una realimentación de la señal de entrada, con un tren de pulsos generados por la propia entrada, y controlados por un reloj externo. Tiene como principal ventaja la posibilidad de aumentar la frecuencia de muestreo. Si bien un modulador $\Delta\Sigma$ electrónico puede operar a 20 Gigamuestras por segundo, uno óptico, cuyo reloj vendría controlado por un láser pulsado, podría obtener frecuencias de muestreo de hasta 50 Gigamuestras por segundo, e incluso más. Sin embargo, el reto tecnológico está en fabricar un modulador $\Delta\Sigma$ totalmente óptico en chips fotónicos.

La fabricación de ADC fotónicos, en suma, combina las capacidades de la optoelectrónica y de la fotónica que hemos mencionado previamente: láseres, detectores, control de la propagación,... En general, la fotónica y la optoelectrónica son campos relacionados e incluso complementarios. Actualmente estas tecnologías tienen un nivel de madurez entre medio y alto, y aplicaciones concretas pueden desarrollarse relativamente rápido, en un plazo de tiempo corto a medio (entre 2 y 10 años). Son además tecnologías transversales, cuya aplicación puede resultar útil en diversos escenarios para la obtención y tratamiento de la información.

Terahercios, en tierra de nadie

Comentábamos más arriba que entre los dos rangos de frecuencias más comunes, microondas y ópticas, está el rango de frecuencias de terahercios, y de ondas submilimétricas.

Es un campo que aún está por explotar, y al que hay acercamientos desde los dos extremos. El interés en este rango de frecuencias viene motivado por la capacidad de penetración de la radiación a través de ciertos materiales como tejidos, mientras que ante los metales sufre una fuerte reflexión.

Entre las potenciales aplicaciones de esta tecnología, una contemplada principalmente es su uso en sistemas de escaneo en busca de objetos ocultos, tales como armas ocultas bajo la ropa, o de explosivos improvisados (*Improvised Explosive Devices*, IED) enterrados a pocos centímetros de la superficie. Son aplicaciones muy ligadas a la seguridad en lugares de tránsito como aeropuertos, o acceso a edificios, y también para la seguridad ante ataques terroristas a convoyes.

El principal problema al que se enfrenta esta tecnología es la falta actual de componentes y dispositivos: emisores, receptores, e incluso dispositivos equivalentes a lentes para guiar, enfocar o expandir el haz. Las

soluciones actuales pasan por microtecnología y el uso de matrices de antenas como fuentes y detectores, lo que es una aproximación fundamentalmente hecha desde el lado de radiofrecuencia y microondas.

En cambio, la aproximación desde la parte óptica del espectro pasa por el uso de técnicas típicas de optoelectrónica, como el crecimiento epitaxial en semiconductores III-V. Es una tecnología obviamente poco madura, pero que desde organismos como la EDA se está empezando a potenciar, y donde la nanotecnología puede tener su contribución.

Materiales de gap ancho: nitruro de galio

Entre los materiales con mayor potencial de futuro, hay que destacar aquellos que presentan una banda prohibida de energía particularmente ancha. En concreto, estamos hablando de materiales como nitruro de galio (GaN) y carburo de silicio (SiC). La elevada energía de la banda prohibida ha permitido extender el rango de funcionamiento de LED y diodos láser hasta la región del azul y el ultravioleta, si nos fijamos en aplicaciones en el campo de la optoelectrónica; pero en el campo de la defensa están cobrando una fuerte importancia sus propiedades electrónicas, que les hacen especialmente adecuados para aplicaciones de alta frecuencia y de alta potencia, dos características necesarias principalmente en sistemas radar.

Hace ya varios años que diversos Ministerios de Defensa han considerado como estratégico el desarrollo de la tecnología de transistores de potencia basados en GaN. Este material es por el momento el que mejores prestaciones puede dar respecto a tamaño de dispositivos, peso, potencia de salida, características térmicas y robustez en el campo de la radiofrecuencia, y se espera que tenga un gran impacto al integrar dichos dispositivos en sistemas radar.

Actualmente, ya existen sistemas que integran esta tecnología, pero cuyo origen es externo a Europa. De esta forma, nos hallamos expuestos a un cambio en la consideración de la tecnología por los países fabricantes. Por el momento, Japón considera la tecnología de GaN como de uso dual, pero un cambio que los considere como ítems de exportación controlada haría muy complicada la integración de dichos componentes en sistemas de defensa europeos. El principal objetivo de desarrollar esta tecnología a un nivel completamente europeo es pues no depender tecnológicamente de países como Japón o Estados Unidos, que se hallan en posición de ventaja en el desarrollo de esta tecnología.

Así, desde la década pasada, se han ido financiando desde la EDA distintos proyectos para avanzar en este desarrollo: KORRIGAN, MAGNUS, MANGA,... Los primeros pasos comenzaron por obtener la capacidad de procesar capas de GaN para fabricar transistores de alta movilidad (*High*

Electron Mobility Transistors, HEMT), y sobre todo analizar la fiabilidad y las causas de fallo de los mismos.

Durante el desarrollo de los dispositivos, se ha entendido que la obtención de capas de buena calidad de GaN sobre SiC es indispensable, por lo que los siguientes pasos han ido en el sentido de asegurar la cadena de suministro, y potenciar actores europeos capaces de suministrar sustratos, junto con capas de alta calidad GaN obtenidas con la ya mencionada técnica de epitaxia de haces moleculares.

La aplicación de la tecnología de GaN en defensa pasa principalmente por su aplicación en dos vertientes principales. La principal, que como se ha dicho es considerada estratégica, es la referida a electrónica de potencia en microondas. El desarrollo de componentes como HEMT, amplificadores de potencia, amplificadores de bajo ruido, convertidores de potencia, conmutadores, etc., tendrán su impacto en tecnología radar, guerra electrónica, distribución de energía en plataformas, aviónica, e incluso aplicaciones de espacio.

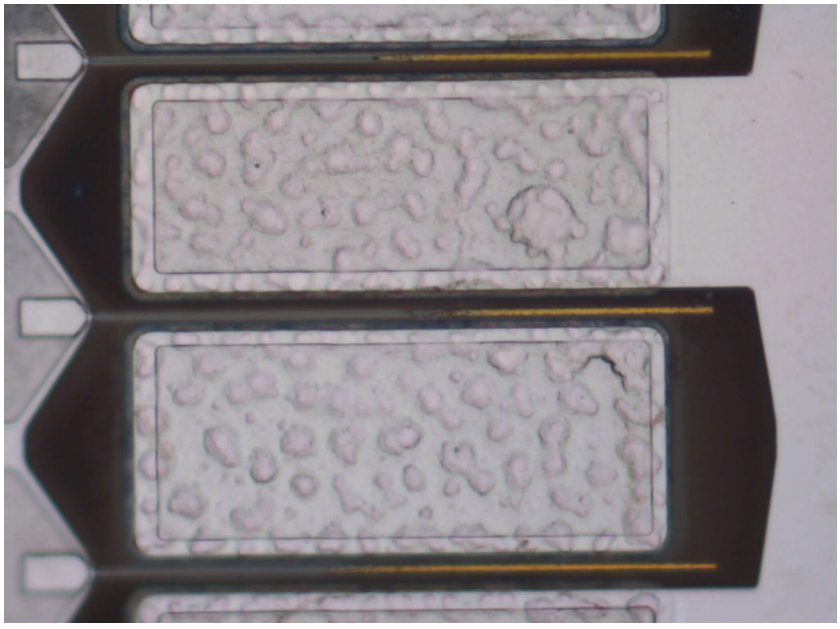


Figura 3-11. Transistor de alta movilidad de electrones (High Electron Mobility Transistor, HEMT), desarrollado durante el proyecto KORRIGAN (Fuente: CIDA/ITM – Ministerio de Defensa)

La segunda vertiente está enfocada a aplicaciones de optoelectrónica, donde detectores y emisores de radiación principalmente en azul y ultravioleta se pueden integrar en sistemas de alarma contramisiles, detectores de fuego de armas portátiles, comunicaciones seguras. Incluso se está investigando en comunicaciones ópticas submarinas, aprovechando

una banda de baja atenuación en el azul que presenta el agua. Sin embargo, parece por el momento que estas comunicaciones tendrían un rango de unos centenares de metros, y destinadas a la comunicación entre un vehículo submarino no tripulado y su estación base.

Es pues una tecnología, que al menos en lo que se refiere a Europa está a medio madurar. La fabricación de dispositivos de GaN es posible, y se ha identificado exactamente el tipo de aplicaciones en los que se necesitan. Sin embargo, en Europa aún se debe terminar de desarrollar las capacidades necesarias para asegurar productos finales con una buena fiabilidad. En cualquier caso, la estimación es que en un corto plazo será posible superar los problemas aún existentes.

Carbono: del nanotubo al grafeno

Como hemos comentado varias veces a lo largo de este libro, la nanotecnología abre la puerta a un nuevo mundo con nueva fenomenología que puede ser explotada. Esta fenomenología la encontramos en las propiedades ópticas, físicas, químicas y biológicas de los materiales.

Un material sin duda singular es el carbono, o más correctamente, algunas de las formas alotrópicas del carbono. Además de ser la base para el ADN y permitir la vida en la Tierra, cuando hablamos del carbono podemos estar hablando de un material duro, transparente, aislante y sobre todo caro como el diamante; o por el contrario, un material frágil, opaco, conductor de electricidad y barato como el grafito. Estas dos formas del carbono son las dos más conocidas.

En 1985 se descubrieron nuevas formas del carbono, los fullerenos, que partiendo de la estructura básica del grafito, se estructuran a escala nanométrica con forma aproximadamente esférica. El fullereno más común es el llamado C60, que contiene 60 átomos dispuestos en hexágonos y pentágonos. Este descubrimiento les mereció el premio Nobel de química en 1996 a Robert Kurl Jr., Sir Harold Kroto y Richard Smalley.

Posteriormente en 1991, el japonés Sumio Iijima descubre los nanotubos de carbono (10). En 2008, fue premiado con el premio Príncipe de Asturias junto a los estadounidenses Shuji Nakamura, Robert Langor, George Whitesides y Tobin Marks. Los nanotubos de carbono presentan una forma de cilindro a partir del enrollamiento de capas de grafito, en una estructura que se puede considerar casi unidimensional. El diámetro típico de los nanotubos está en el orden del nanómetro. Este enrollamiento, además, puede ser múltiple, por lo que se habla de nanotubos de pared múltiple (*Multiwall Carbon Nanotube*, MWCNT), o una sola capa, en cuyo caso es un nanotubo de pared simple (*Single Wall Carbon Nanotube,* SWCNT).

Desde el punto de vista eléctrico, el nanotubo puede comportarse como un metal o como un semiconductor. El principal impulso para el desarrollo de aplicaciones en este sentido ha sido comprobar si los nanotubos podían usarse como «cables» por los que los electrones pudieran desplazarse de forma balística, y con muy baja resistencia. La unión de distintos nanotubos con distintas propiedades podría actuar como dispositivo electrónico molecular, conmutador, rectificador o transistor de único electrón.

Las técnicas de depósito de vapor químico asistido por plasma (PE-CVD) junto con el uso de catalizadores y técnicas de fotolitografía permiten tener el control requerido en micro y nanoelectrónica para un crecimiento de los nanotubos en el lugar preciso, y con una orientación determinada. Con este tipo de técnicas se ha intentado desarrollar detectores de infrarrojo, aprovechando las características semiconductoras y las propiedades ópticas de los nanotubos.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, los nanotubos de carbono se emplean como fibras para reforzar materiales compuestos (*composites*), aprovechando su módulo de Young por un lado, y por otro su ligereza: materiales ligeros pero resistentes.

Por último, también se ha propuesto el uso de nanotubos de carbono como «almacén» de hidrógeno para células de combustible.

A pesar de todo el potencial que desde su descubrimiento se sabe que podrían tener los nanotubos de carbono, el grado de madurez es todavía bajo (no más de TRL 3 o 4), y ni siquiera hay aplicaciones claramente definidas específicas para defensa, sino más bien de tipo dual. Aún así, el estudio del carbono y sus propiedades ha dado un nuevo impulso con el desarrollo del grafeno, y que ha supuesto la concesión del premio Nobel de Física en 2010 a Andrei Geim y Konstantin Novoselov.

La principal característica del grafeno es que es una capa puramente bidimensional de átomos de carbono, con la misma estructura que el grafito, y que de nuevo presenta propiedades prometedoras de cara al futuro. Básicamente, el grafito es la estructura básica de donde se pueden obtener fullerenos, nanotubos, y grafeno; pero a pesar de que el grafeno es una estructura más simple, que además ya había sido estudiada teóricamente en los años 40 y 50, ha sido más fácil encontrar y fabricar fullerenos y nanotubos, que aislar una única capa atómica de grafito, y medir sus propiedades.

El grafeno presenta una excelente conducción eléctrica y térmica, y es 100 veces más resistente que una capa equivalente de acero, por lo que se especula con su uso como conductor flexible, con posibles usos en dispositivos flexibles o enrollables, como pantallas. También se especula con su posible uso en blindajes, y en aplicaciones de almacenamiento de energía como supercondensadores.

El grafeno se considera actualmente una tecnología emergente, y existen centros en España con líneas de investigación centradas en este material, y en la exploración de sus propiedades. Es un campo todavía inmerso en la nanociencia, pero que en el medio plazo podría estar en disposición de comenzar a desarrollar tecnología y aplicaciones.

Los metamateriales. O cuando la luz se curva al revés

Los metamateriales son materiales artificiales con unas propiedades ópticas bastante peculiares y han sido objeto de investigación en la última década. Sin embargo, su origen hay que buscarlo en el año 1967, cuando Veselago publicó un artículo teórico analizando las consecuencias de un material que manifestara de forma natural una constante dieléctrica ε y una permitividad magnética μ con valores negativos (11).

En la figura 3-12 se muestra un típico cuadrante de materiales en función de sus valores de ε y μ. El caso más habitual es que ambos valores sean positivos, lo que ocurre en materiales dieléctricos. En estos materiales las ondas electromagnéticas pueden propagarse, si bien con una velocidad menor que la de la luz en el vacío. La relación entre estas velocidades es el índice de refracción, que a su vez puede obtenerse a partir de los valores de ε y μ.

El segundo cuadrante representa una constante dieléctrica negativa, lo cual ocurre en la naturaleza en situaciones con una alta concentración de cargas libres. Tal es el caso de la ionosfera, donde las ondas electromagnéticas son reflejadas. Una situación análoga se da en metales, que presentan una alta concentración de electrones en su banda de conducción. Su constante dieléctrica es negativa, impidiendo la existencia de ondas electromagnéticas a través de él, al menos hasta frecuencias cercanas al ultravioleta.

No tan frecuentes son las situaciones en las que la permitividad magnética es negativa, lo que correspondería al cuarto cuadrante. Sería el equivalente a un plasma magnético, y existen algunos ejemplos de materiales antiferromagnéticos que muestran resonancia en alguna banda de microondas donde la parte real de μ es negativa. Al igual que su región simétrica de plasma electrónico, la propagación de ondas electromagnéticas no es posible en este tipo de materiales.

Veselago en su trabajo demostró que para el tercer cuadrante del diagrama, que corresponde a un valor negativo simultáneo de ε y μ, sí es posible obtener propagación de ondas electromagnéticas, y que además, tiene sentido definir un índice de refracción con valor negativo en el material que posea tales características. Al considerar este tipo de índice, aparecen una serie de fenómenos anti intuitivos, siendo el principal que la velocidad de fase de la onda es anti paralelo con la dirección de propa-

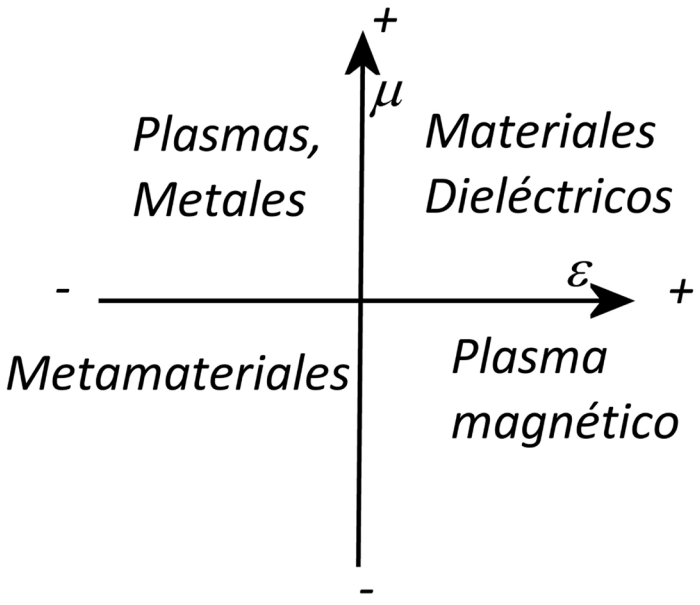


Figura 3-12. Diagrama de valores de constante dieléctrica y permitividad magnética y tipo de materiales en cada región (Fuente: el autor del capítulo)

gación; es decir, la dirección en la que parecen moverse las oscilaciones de la onda es contraria la dirección en que se desplaza ésta. En un nivel menos académico, sino más fenomenológico, esta circunstancia se traduce en una refracción negativa cuando se considera la ley de Snell, un efecto doppler inverso, o emisión Cerenkov invertida. Veselago bautizó estos materiales como materiales zurdos.

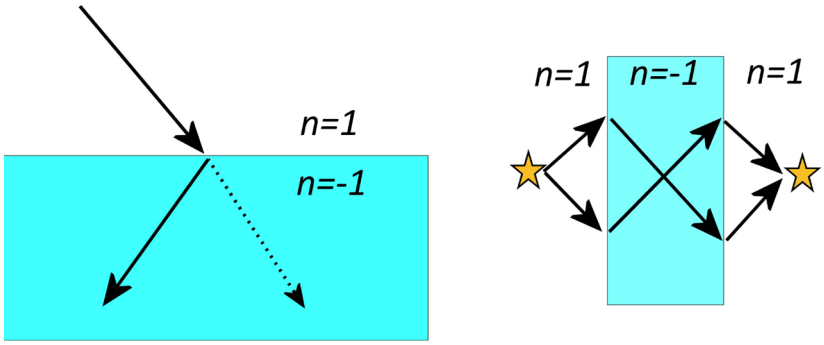


Figura 3-13. Refracción negativa en un metamaterial con índice de refracción negativo y lente plano paralela (Fuente: el autor del capítulo)

Entre las primeras posibles aplicaciones de este fenómeno, Veselago ya apuntaba el uso de metamateriales como lentes plano paralelas. La luz

de fuente colocada en un lado de tal lente, la atravesaría sufriendo la refracción negativa en ambas caras de la lente, y se generaría una imagen de la fuente a su salida. Treinta y tres años después, Pendry retomaría la idea para añadir que además, este tipo de lentes permitirían superar el límite de difracción, convirtiéndose en superlentes (12), no sin levantar bastante debate y controversia.

Si bien el estudio teórico de estos materiales comenzó a finales de los años 60, el estudio experimental tuvo que esperar hasta finales de los 90, cuando se ideó una forma de fabricar estructuras que pudieran presentar una constante dieléctrica y pemitividad magnética negativa de forma simultánea (13).

La idea básica consiste en realizar una estructura periódica, tal que su periodicidad es mucho menor que la longitud de onda de la luz incidente. De esta forma, la luz percibe un material con una ε y μ efectivos, resultado de promediar los valores de los materiales que la componen.

Así, partiendo de cilindros metálicos, que presentan de forma natural una ε negativa, su colocación en forma de matriz hace que sus propiedades se promedien con el aire que los rodea. Controlando la periodicidad es posible determinar la ε efectiva que interactuará con la radiación. Para la parte magnética, en cambio, se idearon unas estructuras metálicas y en principio no magnéticas, pero que se comportan como una estructura de inductancia - conductancia (un resonador LC). Estas estructuras, se denominan anillos resonantes (*Split Ring Resonators*, SRR), y su principal característica es que al menos para una banda de frecuencias, la parte real de la permitividad magnética es capaz de presentar valores negativos.

Combinando estos dos tipos de estructuras, es posible sintonizar los valores de e_{eff} y m_{eff} de forma independiente, para finalmente obtener un material que en promedio presente un índice de refracción negativo, al menos para una banda de frecuencia.

El interés en metamateriales para aplicaciones de defensa se ha acrecentado en la última década. El SOPT (Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica, perteneciente a la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación de la DGAM) a nivel nacional monitoriza el estado del arte de la tecnología. A nivel internacional, la STO también ha contado con varios grupos de trabajo de vigilancia tecnológica, y en el ámbito de la EDA se están desarrollando proyectos para la maduración de la tecnología.

Metamateriales para radiofrecuencia

Como se ha explicado unos párrafos más arriba, el diseño de metamateriales se basa en conseguir unas propiedades efectivas particulares, a partir de materiales que por sí solos no las presentan. Es en esencia una solución geométrica, basada en una *metaestructura* que se repite de

forma periódica, de forma que la longitud de la onda debe ser mucho mayor que esta periodicidad. Es sencillo entender que para trabajar en frecuencias ópticas como el infrarrojo y el visible, donde la longitud de onda varía desde unas pocas micras hasta el centenar de nanómetros, la periodicidad y tamaño de las metaestructuras puede estar en el rango de decenas de nanómetros.

Por tanto, uno de los principales escollos para el estudio experimental y el desarrollo de tecnología de metamateriales se encuentra en las dificultades de fabricación de estas estructuras. En cambio, para frecuencias más bajas, como la radiofrecuencia y microondas típicas de aplicaciones radar y telecomunicaciones, las metaestructuras pueden tener tamaños del orden del centenar de micras. Obviamente, estos tamaños se salen de la definición de nanotecnología, para quedarse en el mundo de la microtecnología; pero sin embargo, la mayor facilidad de fabricación ha permitido, por un lado demostrar los conceptos asociados a los metamateriales, y por otro la maduración de la tecnología hasta un estado aproximado entre TRL 3 y 4.

Básicamente, el desarrollo para aplicaciones en defensa está discurriendo por dos caminos: el primero, en el desarrollo de antenas y sus componentes con mejores prestaciones, menores tamaños y más baratas. El segundo, en la reducción de la sección eficaz de radar (RCS) para dificultar la detección de plataformas.

En el campo de las antenas, el metamaterial se presenta como un componente dentro de un sistema radar, o de telecomunicación. Se han desarrollado distintos conceptos como elementos radiantes, líneas de transmisión, elementos de filtrado en banda ancha...

Una de las ventajas de estos componentes con comportamiento zurdo se encuentra en un menor tamaño respecto de elementos equivalentes hechos con materiales diestros. Esta reducción de tamaño ayuda también a su integración en sistemas, y fabricar antenas empotradas en fuselajes, el casco de un soldado, e incluso se puede plantear que el propio tejido lleve integrados estos componentes. Por otro lado, tener la posibilidad de sintonizar el valor de las propiedades electromagnéticas (ε y μ) del material permite igualmente sintonizar la impedancia de antenas y líneas de transmisión que minimizan las pérdidas, y ser por tanto elementos más eficientes.

Entre los proyectos desarrollados en los últimos años, se puede destacar METALESA, financiado a través del *Joint Investment Programme – Innovative Concepts and Emerging Technologies* (JIP-ICET) de la EDA. El proyecto, liderado por la empresa española Tafco Metawireless (una *spin – off* de la Universidad Pública de Navarra), además de la participación de centros y universidades de Italia, Francia y Alemania, se ha centrado en el desarrollo de varios de estos componentes.

El objeto del proyecto era desarrollar la tecnología de radares de barrido electrónico activo (*Active Electronic Scanned Array*, AESA) a través del uso de metamateriales. En concreto, se investigó el uso de estructuras metamateriales en diversos componentes de este tipo de antenas: líneas de transmisión de bajo coste, radomos, reducción de interferencias, reducción de radiación parásita...

El proyecto fue capaz de elevar el nivel de madurez de estos componentes en general hasta TRL 3. Uno de los resultados quizás más maduros es la posibilidad de la reducción de la radiación parásita de las antenas que se da hacia los laterales y hacia atrás, por medio de unos marcos basados en metamateriales que presentan un gap electromagnético. El concepto y diseño de este marco es tal que permitiría ser acoplado a un radar real para poder comprobar su eficacia en el sistema. Y en caso de obtenerse una ventaja notable, sería de fácil implementación en sistemas operativos.

La otra aplicación mencionada es la reducción de la sección eficaz de radar. Un desarrollo de este tipo lo está haciendo actualmente el Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra. La RCS de cualquier objeto puede reducirse mediante la utilización de estructuras metamateriales formando una estructura plana en forma de tablero de ajedrez. En la figura 3-14 se muestra un detalle de las celdas de una estructura fabricada con una frecuencia de funcionamiento en banda W (75-110GHz). Las estructuras metamateriales son capaces de reflejar el campo incidente, introduciendo un desfase distinto de los 180º que típicamente produce un metal. Se puede aprovechar esta propiedad para generar una estructura tipo «tablero de ajedrez», donde las «casillas» contienen distintos tipos de celdas metamateriales periódicas (de forma equivalente a las celdas negras y blancas de un tablero de ajedrez). Al incidir la radiación electromagnética, ésta sufre desfases relativos de 180º producidos por cada uno de los tipos de casilla metamaterial. El campo reflejado resultante sufre interferencias destructivas que minimiza la reflexión en la dirección especular, redirigiendo la potencia a otras direcciones.

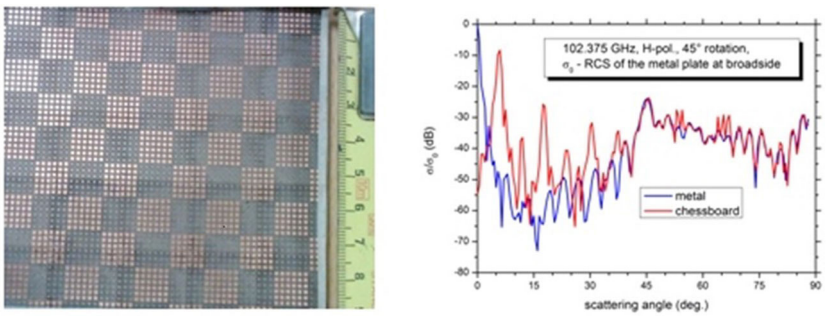


Figura 3-14. Estructura de tablero de ajedrez para banda W, y respuesta de la reflexión ante la radiación incidente (Fuente: Grupo de Antenas, Universidad Pública de Navarra)

El ángulo de reflexión resultante depende del tamaño de las celdas del tablero y de la periodicidad del mismo. También en la figura 3-14 se muestra la comparación entre el campo reflejado por un metal y el obtenido por la estructura de ajedrez, y donde se puede observar que, para un campo incidente perpendicular a la estructura, la reflexión principal ocurre en planos de ±45°, minimizando la reflexión especular y, por consiguiente, reduciendo la RCS. La estructura funciona reduciendo la RCS de un objeto tanto para incidencia normal como oblicua de la onda.

Una gran ventaja de estas estructuras es que es una estructura plana, de bajo grosor (menor de la décima parte de la longitud de onda) a la que se une la facilidad de fabricación y su adaptabilidad para poder cubrir objetos curvos, manteniendo las propiedades de reducción de la RCS. En una plataforma además, es sabido que la RCS no es igual en todas direcciones, y que algunas zonas contribuyen más que otras a la reflexión de radiación que finalmente forma la RCS. La fabricación de estructuras de «tablero de ajedrez» que combinen distintas periodicidades de las casillas, puede usarse para controlar, corregir, y minimizar la RCS de plataformas de forma global, y también actuando sobre las zonas que más contribuyan.

Metamateriales ópticos

A pesar de las dificultades de fabricación ya comentadas, eso no significa que no se hayan hecho avances para frecuencias ópticas (infrarrojo y visible). En principio, los mismos conceptos que llevan a considerar un metamaterial como una red LC son aplicables en estas longitudes de onda, si bien es cierto que los materiales presentan de partida propiedades distintas. Por ejemplo, mientras en microondas la constante dieléctrica de un metal es negativa con un valor absoluto muy elevado, su valor en frecuencias de infrarrojo y visible está más cercano a cero. Un metal aún sigue presentando la propiedad de ser opaco a la propagación de luz en visible, pero a partir de longitudes de onda de ultravioleta en cambio, la constante dieléctrica se vuelve positiva, la propagación sí es posible y el metal se vuelve transparente.

Sin embargo, el nivel de madurez de la tecnología en este rango de frecuencias no pasa por el momento de un TRL 2. Se han podido medir y comprobar las características de metamateriales en estructuras fabricadas con instrumentos de litografía con haz de electrones (*Electron Beam Lithography*, EBL). Este es un sistema de fabricación adecuado para universidades y centros de investigación, pero demasiado lento incluso para una fabricación de pequeñas series, lo que dificulta la industrialización de esta tecnología por el momento.

Otra dificultad para el desarrollo de la tecnología es que a día de hoy no hay definidas aplicaciones claras, o que se puedan considerar disruptivas, al menos en el campo de la seguridad y defensa. Sí que se ha explo-

rado la controvertida hipótesis de Pendry, acerca de las lentes perfectas. De ser correcta, este tipo de lentes permitirían recoger la emisión de un objeto cercano a la lente, no sólo los modos de luz que se propagan, sino también los llamados modos evanescentes, campo eléctrico cuya intensidad decae rápidamente, y por tanto cercano a la fuente. Dentro de un metamaterial, con constante dieléctrica y permitividad magnética negativos, estos modos evanescentes se amplifican, de forma que se recuperan en el otro extremo de la lente, y al enfocar la imagen se recolectaría toda la información: modos de propagación y campo cercano. De esta forma, sería posible enfocar un objeto sin verse afectado por efectos de difracción.

La aplicación práctica de este tipo de componentes claramente apunta a instrumentación con una mejor resolución, ya sea para caracterización, e incluso para nanofabricación. No son aplicaciones ligadas directamente a defensa, pero que sin embargo pueden tener su efecto indirecto a través de la industria, al permitir diseñar dispositivos de menor tamaño que exploten otras ramas de la nanociencia y nanotecnología.

Óptica de transformación

Sin duda, lo que más atención suscita dentro del campo de los metamateriales es la óptica de transformación, por su relación con las capas o dispositivos de invisibilidad, aunque es más dudoso que tales dispositivos sean realmente fabricables y adaptables a plataformas.

La idea subyacente es la necesidad de guiar la luz o radiación por un camino concreto que sea de interés, y a la vez tener las menores pérdidas posibles por reflexión o dispersión. No es algo extraño, ya que tenemos ejemplos en la naturaleza, como son los típicos reflejos o espejismos que se pueden ver en verano, a ras de la carretera. Las capas de aire caliente



Figura 3-15. Reflejo en el asfalto producido por el cambio en el índice de refracción debido a un gradiente de temperatura (Fuente: el autor del capítulo)

cercanas al suelo crean un gradiente del índice de refracción, de forma que la luz se curva para que cuando llegan a los ojos de un observador, aparentan provenir desde el suelo.

Reproducir este efecto de forma controlada, y diseñando caminos ópticos más o menos complejos es lo que da origen a la óptica de transformación, como una herramienta que permite calcular qué valores de constante dieléctrica y permitividad magnética debe tener el espacio por el cual se propaga la luz, para que se curve tal y como se desea. Es en el cálculo de estos valores cuando aparecen combinaciones que sólo se pueden conseguir a través de metamateriales, y de ahí su relación con éstos.

La capa de invisibilidad es el ejemplo por excelencia cuando se habla de óptica de transformación. Supongamos una zona del espacio en la que la luz se curva o dispersa a su alrededor, pero que más adelante se vuelve a unir y continúa su propagación normal. En estas circunstancias, si se coloca un objeto en la zona que la luz ha esquivado, éste se vuelve perfectamente invisible. No interacciona con la luz, y por tanto no la dispersa, ni la bloquea, ni la absorbe. Simplemente, la luz interacciona con el objeto, y un observador externo creería que la luz ha atravesado el espacio sin encontrarse nada a su paso: el objeto estaría perfectamente oculto, invisible para el observador.

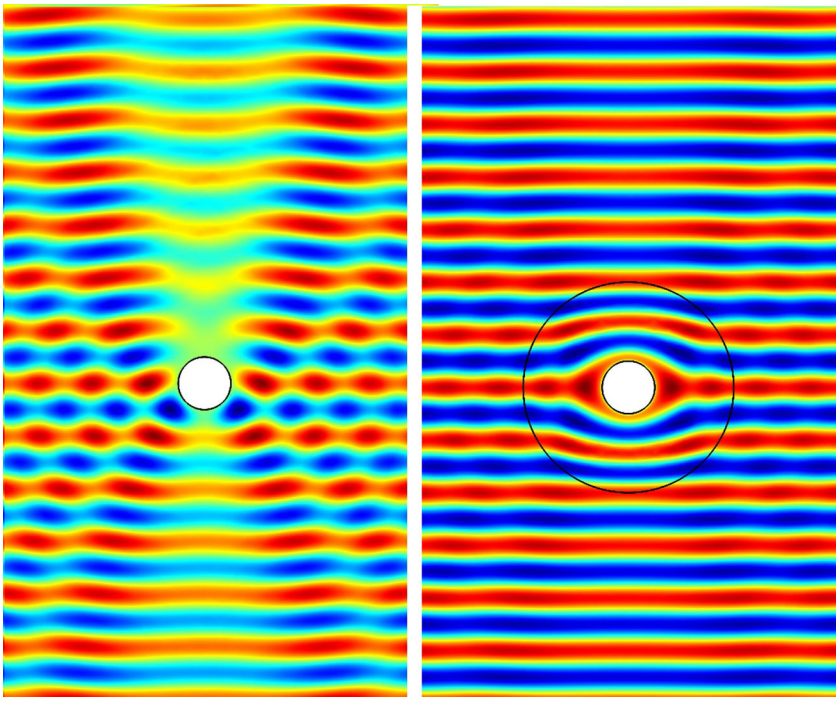


Figura 3-16. Capa de invisibilidad esférica. La luz rodea una esfera central, donde un objeto quedaría oculto (Fuente: Wikipedia)

La región del espacio que curva la luz es lo que se denomina capa de invisibilidad. Se han diseñado matemáticamente esferas y cilindros con distintas propiedades, aunque la técnica es perfectamente válida para cualquier geometría arbitraria. A nivel experimental, se han podido demostrar los principios en los que se sustenta, eso sí, en el rango de microondas. Los valores de ε y μ resultantes son en general complicados de reproducir experimentalmente, y las capas de invisibilidad tridimensionales que se han hecho son básicamente cilindros. Otro tipo de capas que se ha logrado reproducir experimentalmente son las llamadas «bajo la alfombra» (*under the carpet*), aunque hay que aceptar aproximaciones y condiciones que no hacen del dispositivo una capa de invisibilidad perfecta. En este caso, la capa de invisibilidad produce una reflexión, evitando la dispersión de la luz debido al objeto que se quiere ocultar.

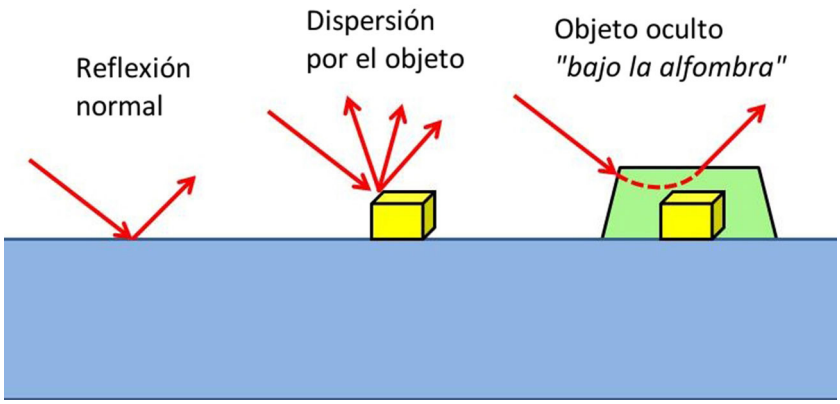


Figura 3-17. Esquema de capa de invisibilidad «bajo la alfombra». La capa de invisibilidad reproduce la reflexión que se produciría si no hubiera ningún objeto (Fuente: el autor del capítulo)

Desde un punto de vista académico, son ejemplos teóricos y experimentales que demuestran el potencial de la técnica. Pero, si bien es fácil entender las ventajas que proporcionaría hacer invisible una plataforma como una aeronave o un buque, es sin embargo muy complicado imaginar la implementación práctica. Es una técnica altamente dependiente de la geometría, que genera valores de ε y μ de difícil consecución, y que además, funciona como capa de invisibilidad para una banda generalmente estrecha de frecuencias.

Se han propuesto muy pocas aplicaciones realistas para la óptica de transformación, siendo la más realista el recubrimiento de antenas para evitar la interferencia entre ellas. Otra de ellas podría ser la posible adaptación de ciertas zonas de una plataforma con geometría simple (las turbinas de un avión por ejemplo) para conseguir una reducción en la sección eficaz de radar.

Una variante de la óptica de transformación es la llamada óptica de ilusión (*illusion optics*), una variación que en vez de manipular la luz para que aparente no encontrarse un objeto, busca que la luz sea dispersada de forma que aparente haberse encontrado un objeto distinto al que es. De esta forma, se consigue una ocultación, engañando al observador que cree ver un objeto, cuando en realidad se está ocultando otro distinto.

Metamateriales acústicos

Aunque la idea concepto de metamaterial se ha desarrollado a partir de ondas electromagnéticas, el concepto es extensible a otros campos, y en este aspecto, la acústica es uno de los campos donde también está arraigando. En este caso, las ondas son vibraciones en la materia, y son las propiedades elásticas (módulo de compresibilidad, y densidad de masa) las que determinan cómo se propaga el campo acústico.

El estado de madurez de esta tecnología es bajo, en torno a TRL 2. Aunque sin embargo es posible extrapolar la mayoría de desarrollos teóricos que se han realizado en metamateriales electromagnéticos para predecir comportamientos en el campo de la acústica. En particular, se ha desarrollado la acústica de transformación y, al igual que su homónima en óptica, se ha propuesto el efecto de invisibilidad como potencial de la técnica, aunque adolece las mismas dificultades para realizar un prototipo útil capaz por ejemplo de reducir la firma sonar de un buque o submarino. Otras aplicaciones, quizás más realistas para metamateriales acústicos pueden pasar por la mitigación de vibraciones que puedan aparecer por ejemplo en la marcha de un vehículo, que puede llevar al envejecimiento y fractura de material en lugares críticos como soldaduras, o puntos de anclaje de distintos sistemas.

En conclusión, la tecnología de metamateriales se halla aún en un estado de madurez bastante bajo, si bien hay que distinguir entre los metamateriales para radiofrecuencia, que podrían considerarse microtecnología, y metamateriales ópticos, que entran de lleno en la nanotecnología. No es probable que en el corto plazo se obtengan aplicaciones disruptivas, pero en el medio plazo sí parece razonable pensar que al menos en aplicaciones de radar y telecomunicaciones se podrá contar con dispositivos de mejores prestaciones a los actuales, que pueden suponer una ventaja en el ámbito de la defensa.

También se ha comenzado el estudio de metamateriales activos, es decir, que puedan cambiar sus propiedades de forma controlada a través de un estímulo externo controlado, estando en un estado de madurez igualmente bajo (entre TRL 1 y 2).

Por otro lado, el desarrollo de metamateriales ópticos aún necesita de una mejora en las herramientas necesarias para fabricarlos. Quizás sea

entonces cuando se puedan encontrar aplicaciones realmente revolucionarias y disruptivas, pero por el momento, sigue siendo una tecnología vigilada muy de cerca por parte de los ministerios y organismos de defensa de nuestro entorno.

Energía en el mundo nano

Tanto la generación como el almacenamiento de energía se están convirtiendo cada vez más en un tema de interés estratégico. Todo sistema o plataforma necesita una fuente de energía para poder funcionar. Enchufar un aparato a la red eléctrica no es un problema, pero sí lo es obtener energía para una plataforma como un UAV, que tiene unas limitaciones de peso, y que debe además repartir toda esa energía entre los distintos sistemas que lleva a bordo.

En ese sentido, otra «plataforma» es el propio combatiente, que como veremos en el siguiente capítulo, cada vez más se persigue el objetivo de poder equiparle con sistemas que hagan su labor más sencilla, y para ello necesita algún tipo de suministro energético. Llevar equipamiento que no se puede usar por falta de energía es peso muerto e inútil con el que cargar. Pero por otro lado, no se puede añadir más peso al que ya tiene que soportar. El problema del suministro de energía es sin duda interesante y un reto: conseguir una fuente de alta densidad energética, pero que a la vez sea ligera.

Células solares

El problema de la autonomía en la generación de energía no es nuevo. Los satélites artificiales son un ejemplo claro, y a la vez ya clásico de una necesidad de obtener energía donde no hay apenas recursos. La solución más evidente fue la de obtener energía a través del sol y células solares, que una vez más se relaciona con toda la tecnología optoelectrónica anteriormente descrita.

Los paneles solares son una buena solución para plataformas como satélites, o edificios, donde se pueden desplegar grandes paneles que absorban una gran cantidad de radiación solar. Sin embargo, no lo son para plataformas con limitación de superficie útil, como puede ser un UAV, o el propio combatiente. Existe además el problema en un combatiente de que está en movimiento, y un elemento rígido como un clásico panel solar no es lo más indicado.

La posibilidad de hacer células solares flexibles lleva tiempo abierta, con la investigación en compuestos orgánicos para emisión y detección de luz (*Organic Light Emiting Diode*, OLED). La flexibilidad les brinda la posibilidad de integrarse en compuestos textiles, por lo que el propio uniforme,

el casco, o la tela de una tienda de campaña cumplirían una función de recolección de energía, a la vez que mantienen sus funciones básicas de protección y camuflaje. La combinación de tecnologías como nanotubos de carbono, o ahora el grafeno podrían ayudar en estos objetivos.

Por el lado negativo, sin embargo, la eficiencia de estos dispositivos está aún lejos de poder cumplir las expectativas. Es necesario aumentar la madurez de estas tecnologías, avanzar en su integración, y sobre todo aumentar la eficiencia de las células solares aprovechando más rango del espectro solar en su parte visible, y además aumentando la eficiencia cuántica de las estructuras.

Células de combustible y baterías

Las células de combustible basan su funcionamiento en la transformación de iones de hidrógeno y oxígeno en agua, a través de una reacción química que produce calor. La circulación de los iones hasta el punto donde reaccionan genera una corriente eléctrica que genera la energía, y cuyo residuo final (agua) no es contaminante. En 2008, Boeing realizó en el aeródromo de Ocaña el primer vuelo tripulado de la historia de la aviación usando estos elementos como fuente de energía (14), demostrando su uso potencial en avionetas o UAV, si bien el peso del sistema es aún un punto a mejorar.

El desarrollo y mejora de la eficiencia de estas células pasa por varios pasos, en el que intervienen algunas de las nanotecnologías ya comentadas. El principal componente es una membrana en la cual se ponen en contacto el hidrógeno y oxígeno, y hace de catalizador para crear la reacción química. El platino es uno de los materiales más usados para esta función, lo que obviamente encarece el producto. Obtener un material capaz de catalizar la misma reacción, que no sea un metal precioso, y además mejore la eficiencia de la reacción será obviamente una mejora.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el uso del hidrógeno es peligroso, pues es explosivo a altas concentraciones.

Otro tipo de baterías bastante comunes actualmente son las baterías recargables de ión litio, cuya ventaja reside en su alta densidad de energía almacenada. Pero por el momento también adolecen del problema de un exceso de peso, y también de usar materiales altamente inflamables. Además, al ser baterías recargables, existen limitaciones en cuanto al número de ciclos de carga – descarga.

Comunicaciones seguras y la criptografía cuántica

La información es vital en cualquier escenario. Obtener información del escenario y de las intenciones del contrario permite tomar las decisio-

nes adecuadas. Pero lo contrario es también cierto: sin información las probabilidades de éxito se reducen drásticamente. Tan importante como obtener información y compartirla entre las fuerzas propias, es evitar que el enemigo la obtenga.

Tan viejo como hacer la guerra es el cifrado de mensajes, y es fácil remontarse a personajes como Julio César para encontrarse sistemas de cifrado simples para transmitir mensajes a sus generales. El llamado cifrado César simplemente sustituía una letra por otra un número determinado más adelante en el alfabeto. Suficiente para hacer ilegible un mensaje, pero por otro lado fácilmente descifrable una vez conocido el método.

La idea subyacente es que si el enemigo intercepta un mensaje, no le sea posible conocer su contenido si no conoce la clave, incluso si conoce el sistema de cifrado. En tiempos de Julio César la interceptación de mensajes implicaba interceptar al mensajero que lo portaba, evitando que el mensaje llegara a su destino final. Con la creación de la radio y la transmisión de ondas electromagnéticas, cualquier persona con un receptor de radio puede captar el mensaje, sin que el emisor sea necesariamente consciente de la interceptación. Así pues, en el siglo xx cobran especial importancia tanto los sistemas de cifrado, como los servicios de descifrado en los ejércitos.

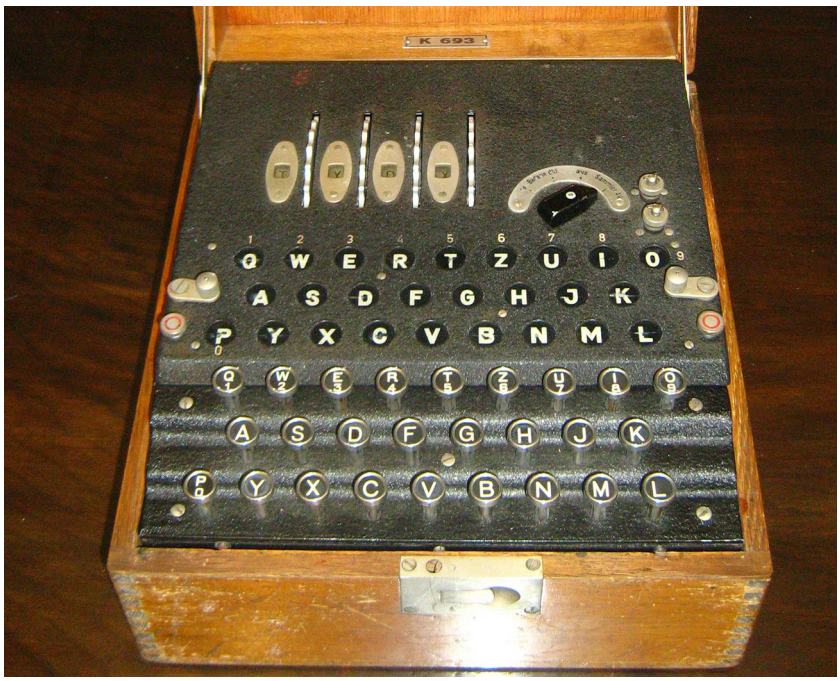


Figura 3-18. Máquina de cifrado mecánico «Enigma» usada durante la guerra civil. Museo del ITM (Fuente: el autor del capítulo)

La guerra civil española es uno de los ejemplos de la importancia de la seguridad en la transmisión de la información. Al iniciarse la contienda, ambos bandos compartían los mismos sistemas de cifrado, y por tanto eran capaces de interceptar y descifrar los mensajes del otro bando. Sin embargo, el bando sublevado fue capaz de evolucionar más rápidamente, y cambiar sus sistemas de cifrado. Cabe destacar la ayuda alemana en forma de venta de máquinas de cifrado mecánico «Enigma», que le permitió la coordinación con alemanes e italianos, y que llevó en varias ocasiones a la interceptación de barcos con suministros con destino a puertos republicanos. Así, la batalla por la información cayó rápidamente del lado nacional. (15)

También es inevitable comentar cómo durante la segunda guerra mundial, las comunicaciones alemanas cifradas con la versión militar de la máquina Enigma, eran sistemáticamente interceptadas por los ingleses y descifradas en unos barracones a 80 kilómetros de Londres del GC&CS (Government Code and Cipher School)[4]. El absoluto secretismo con que se llevó a cabo esta labor hizo que los alemanes nunca sospecharan que sus mensajes estaban siendo descifrados, y no pudieran actuar en consecuencia.

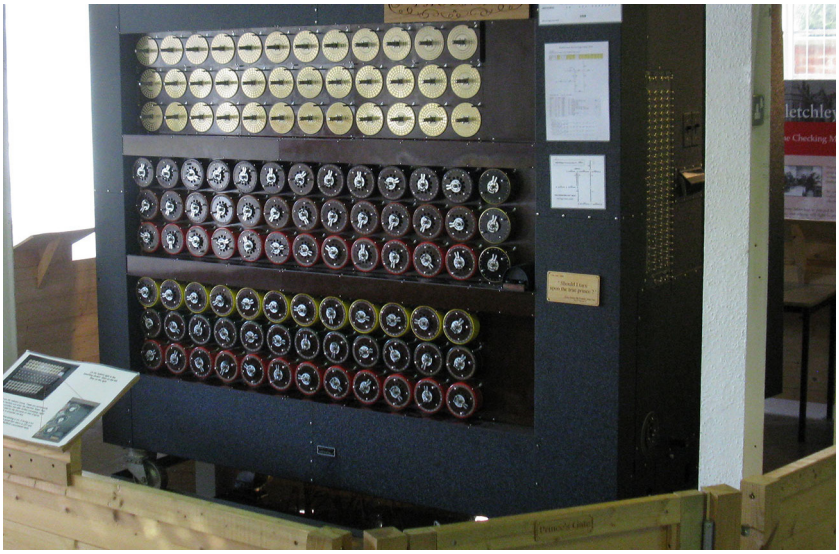


Figura 3-19. Computador electromecánico «La Bomba». Bletchley Park (Fuente: José Tomás Hidalgo Tarrero)

[4] Cabe destacar el importante papel que tuvieron las matemáticas y la ingeniería para resolver el cifrado de la máquina Enigma. Primero gracias a los polacos Rejewski, Zygalski y Rozycki quienes encontraron el cableado interno de los rotores; y posteriormente gracias al británico Alan Turing, quien centró sus esfuerzos en la máquina Enigma «naval». En ambos casos, se desarrollaron sendos sistemas electromecánicos para la deducción de la clave diaria, denominados «Bomba». Figura 3-19.

Hoy en día los sistemas de comunicación ya no son transmisiones en morse, y los algoritmos de cifrado se han vuelto bastante complejos. Pero los principios de la criptografía, tal y como lo expresaba Antonio Camazón (16), criptógrafo al servicio de la República Española durante la guerra civil, no son muy distintos, y «No hay criptograma, por el solo hecho de serlo, absolutamente indescifrable»

Tema aparte es el tiempo que se necesita invertir en llegar a «romper» un mensaje sin la clave, de forma que para cuando se consiga, la información contenida esté ya obsoleta o anticuada, y no sea útil. Pero el problema de las comunicaciones seguras es en esencia el mismo: la interceptación de los mensajes, y en caso de serlo, ser conscientes de ello para actuar en consecuencia.

La paradoja EPR y la desigualdad de Bell

En el primer capítulo se comentaba la aversión de Albert Einstein a la interpretación probabilística de la mecánica cuántica, de sus disputas con Niels Bohr y sobre lo que Dios debía o no hacer con los dados. Einstein ideaba continuamente experimentos mentales que pusieran en tela de juicio la mecánica cuántica. En particular, buscaba demostrar que había variables ocultas cuyo conocimiento eliminara la descripción probabilística y devolviera el determinismo a la mecánica cuántica.

Uno de estos experimentos mentales, propuesto junto a Boris Podolsky y Nathan Rosen en 1935, jugaba con el concepto de entrelazamiento entre dos partículas: dos partículas que se han generado o interaccionado de forma que su estado cuántico no se puede describir de forma independiente, sino que describe el sistema total formado por ambas partículas, teniendo ambas estados complementarios. Por ejemplo, un par de partículas entrelazadas de tal forma que su spin total sea cero, implica que una posea spin +1/2, mientras la otra tendrá un spin -1/2. Por otro lado, lo que predice la mecánica cuántica es que cada una de las partículas consideradas independientemente, tendrá una superposición de ambos estados, y no será hasta el momento es que se mida una de ellas cuando el estado colapsará para mostrar uno de los dos estados. En ese mismo instante, independientemente de la distancia que las separe, el estado de la otra partícula colapsa al estado complementario. Lo que Einstein, Podolsky y Rosen argumentaron, en lo que se conoce como la paradoja EPR, es que si en el momento de la creación de estas dos partículas se las separaba en direcciones contrarias, y se medía el estado de una de ellas, la otra, estando a gran distancia colapsaría al estado complementario de forma inmediata, entrando en contradicción con la teoría de la relatividad que impide la transmisión de información a velocidades más rápidas que la luz. Einstein lo definió como «una misteriosa acción a distancia».

Tuvieron que pasar 30 años hasta que el norirlandés John Bell ideara una forma de llevar a cabo un experimento que pusiera fin a la discusión. Colocando dos observadores, comúnmente llamados Alice (A) y Bob (B), en lados opuestos a una fuente de partículas entrelazadas, la correlación entre las medidas de A y B mostraría la falta de variables ocultas como propone la paradoja EPR, lo cual expresó en forma de una desigualdad. Hasta la fecha, los experimentos que se han realizado violan tal desigualdad, lo que significa que la mecánica cuántica está completa, sin variables ocultas, y tiene una naturaleza probabilística.

Comunicación cuántica

Al margen de las consideraciones fundamentales y filosóficas, nuestro interés se centra en el concepto de entrelazamiento de dos partículas con propiedades complementarias. Lo primero que hay que aclarar es que el entrelazamiento no transmite información a velocidades superiores a la luz. La información viaja con la partícula que la contiene. Es sólo el colapso de la función de onda, que ocurre de forma aleatoria y no controlable, lo que ocurre instantáneamente.

El uso del entrelazamiento en comunicaciones seguras fue propuesto durante los años 80 por Weisner (17) y Bennet y Brassard (18), donde la idea principal es el concepto puramente cuántico de que una medida perturba el sistema observado de acuerdo con el principio de indeterminación de Heisenberg. De esta forma, si Alice y Bob mantienen un canal cuántico de comunicación, y una tercera persona, comúnmente llamada Eve (E, del inglés *eavesdropper,* fisgón) intercepta la comunicación, el sistema de partículas entrelazadas es perturbado, y tanto A como B pueden detectarlo para ser conscientes de que alguien está interceptando la comunicación. Al enviar Alice una de las partículas entrelazadas a Bob, la secuencia de éste último debe ser complementaria a la secuencia de la primera. Si las secuencias difieren, cerrarían el canal para evitar que Eve obtenga la información que iban a compartir.

Sin embargo, la certeza de si Eve ha estado interceptando los mensajes sólo se puede saber a posteriori, cuando Alice y Bob comparen las secuencias aleatorias de bits y comprueben que no ha habido perturbaciones. Lo deseable, en cambio, es poder saber si el fisgón está a la escucha antes de intercambiar el mensaje. Por esta razón, hay un segundo concepto: el intercambio de información por el canal cuántico no es el mensaje a compartir, sino una secuencia de bits aleatorios, que se usarán para formar la clave de codificación del mensaje. Alice y Bob comparan tras la recepción parte de la secuencia aleatoria por un canal público de comunicación para comprobar si ha habido o no una intrusión. En caso de haberla, se cierra la comunicación, y se intentará posteriormente con una nueva secuencia

aleatoria de bits. En caso de no haber intrusión, los bits que no se han compartido por el canal público se usan para el cifrado del mensaje, el cual se puede mandar sin temor. Incluso si el mensaje es interceptado, los métodos de cifrado actuales hacen que su descifrado sea virtualmente imposible sin la clave, al menos en el tiempo de vida útil de la información.

Es en la generación de los bits aleatorios donde entran en juego el entrelazamiento y la paradoja EPR. El sistema emisor de A debe ser capaz de generar pares de partículas, que en general son fotones, cuya propiedad entrelazada es la polarización. Un fotón es enviado a B, mientras que el otro es medido por A. De esta forma, A y B obtendrán valores complementarios de la polarización que pueden comparar posteriormente. Por otro lado, si E intercepta el mensaje, produce una perturbación que puede alterar el estado de polarización del fotón enviado a B. Cuando A y B comparen sus series, observarán que éstas no están correctamente correlacionadas.

Este protocolo se basa sin embargo en la posibilidad de que A sea capaz de enviar un único fotón por bit. Si el sistema genera varios fotones simultáneamente, E podría ser capaz de interceptar uno de ellos, pero los demás seguirían su camino hasta A sin perturbar. De esta forma, Eve podría interceptar la clave sin conocimiento de Alice y Bob.

El problema tecnológico que surge es la fabricación de emisores y detectores de único fotón (*Single Photon*). Una primera solución encontrada a este problema es emplear fuentes láser con muy baja potencia, que en promedio pueden emitir un fotón por bit. Sin embargo todavía existe la posibilidad de emitir más de un fotón.

Una solución encontrada en la nanotecnología pasa por combinar las propiedades electroópticas y acústicas de los materiales. Ya hemos hablado de pozos cuánticos, y de cómo se pueden aislar electrones en éstos. Se pueden generar además con la incidencia de luz de la longitud de onda adecuada. Si por otro lado, estas estructuras se fabrican sobre un material piezoeléctrico, se pueden inducir ondas acústicas de superficie (*Surface Acoustic Wave*, SAW). Estas ondas permiten separar y transportar los electrones a una zona donde puedan bajar de la banda de conducción a la de valencia de forma controlada para asegurar que sea un único fotón el producto final (19).

En el lado contrario, Bob también debería ser capaz de tener un buen detector *Single Photon*. Idealmente, algunas de sus características son una alta eficiencia cuántica, un bajo ruido, y una alta velocidad de respuesta. En la actualidad, los fotodiodos de avalancha parecen los más indicados, o al menos los que más se acercan a las especificaciones requeridas para este tipo de aplicaciones.

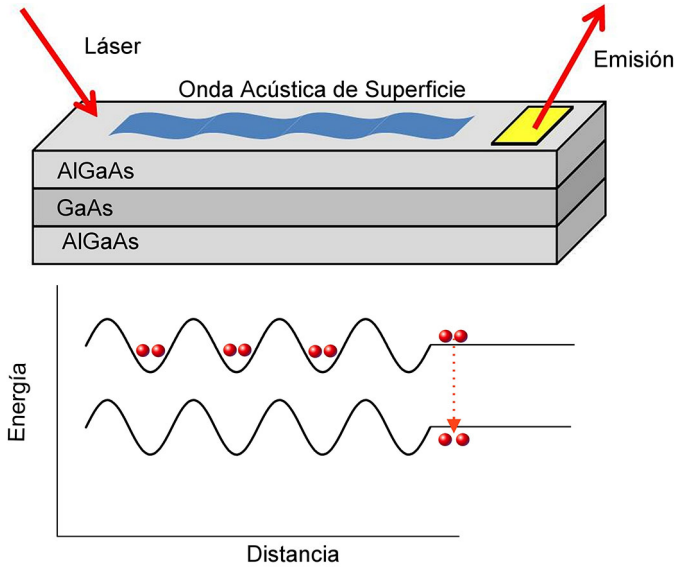


Figura 3-20. Esquema de dispositivo emisor de único fotón. Un láser genera electrones que son separados por las ondas acústicas de superficie, y transportados hasta la zona donde se recombinan y emiten un par de fotones entrelazados (Fuente: el autor del capítulo)

Conclusiones

A lo largo de este capítulo hemos visto una serie de micro y nanotecnologías con distintos grados de madurez. Algunas se hallan en un estado tal que su integración en sistemas se logra en un corto plazo. Es el caso de componentes optoelectrónicos y fotónicos, que se puede considerar que ya están contribuyendo de forma eficaz a sistemas de seguridad y defensa.

Otras tecnologías en cambio aún necesitan de mayor madurez, como es el grafeno o los metamateriales, pero ya sea en el medio o largo plazo terminarán formando parte de los sistemas de seguridad y defensa.

Entre las nanotecnologías de mayor importancia, consideradas incluso como estratégicas, podemos encontrar el desarrollo de transistores de alta potencia de nitruro de galio. Y también el desarrollo de fuentes de energía basadas en células de combustible y baterías de ión litio. Aún se necesita inversión en el desarrollo de catalizadores, o estructuras que permiten reducir el peso, sin reducir su densidad energética.

Una de las grandes ventajas del desarrollo de nanotecnología es que su ámbito de actuación en la nanoescala en gran medida no es determinante para la orientación de una aplicación. Estamos diciendo pues, que la nanotecnología es una tecnología principalmente dual, capacitadora de componentes para sistemas de aplicación en distintos ámbitos, cuya

principal ventaja es poder combinar la investigación y desarrollo tanto del mundo civil como el militar. Sin duda, la sinergia entre ambos mundos puede acelerar y abaratar el desarrollo de aplicaciones para su uso en seguridad y defensa, para beneficio de la sociedad.

Bibliografía

1. Photonics 21 - A Key enabling Technology of Europe. [En línea] http://www.photonics21.org/.
2. Fotónica 21 - Plataforma Tecnológica Española de Fotónica. [En línea] http://www.fotonica21.org/.
3. Joannopoulos, John D., y otros. *Photonic Crystals:Molding the flow of light.* s.l.: Princeton University Press, 2008.
4. Maier, Stephan Alexander. *Plasmonics. Fundamentals and Applications.* Nueva York: Springer Science + Business Media LLC, 2007.
5. Ebbesen, T W, y otros. Extraordinary optical transmission through sub-wavelenght hole arrays. *Nature.* 1998. Vol. 931, págs. 667-669.
6. Villate-Guío, F, y otros. Optimal light harvesting structures at optical and infrarred frequencies. *Optics Express.* 2012. Vol. 20, 23, pág. 25441.
7. *CWA Analyzer based on low cost IR microsystems.* 2008-2011.
8. European Defence Agency (EDA). *Novel Nanostructured optical components for CBRN detection and high performance opto-microwave links.* 2009-2012. JIP-ICET (EDA).
9. EDA. *Biosensors for point detection based on nanostructured optical components for quick deployment in an overall CBRN European operational capability.* 2013-2015. JIP-CBRN (EDA).
10. Iijima, Sumio. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature.* 1991. Vol. 354, págs. 56-58.
11. Veselago, V. The electrodinamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu. *Soviet Physics Uspekhi.* 1967. Vol. 10, 4, pág. 509.
12. Pendry, J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters.* 2000. Vol. 85, pág. 3966.
13. Pendry, J B, y otros. Magnetism from Conductors, and Enhanced Non-linear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques.* 1999. Vol. 47, pág. 2074.
14. Boeing. Boeing succesfully flies fuel cell powered airplane. [En línea] [Citado el: 18 de 07 de 2014.] http://www.boeing.com/aboutus/environment/environmental_report/_inc/flash-2-1-2.html.

15. Soler Fuensanta, José Ramón y López-Brea Espiau, Francisco Javier. *Soldados sin rostro.* Barcelona: Inèdita editores SL, 2007. 978-84-92400-04-1.
16. Soler Fuensanta, Jose Ramón. Criptohistoria. *Apuntes de Camazón.* [En línea] [Citado el: 14 de 07 de 2014.] http://www.criptohistoria.es/capitulo-i.html.
17. Weisner, S. Conjugate coding. *Sigact news.* 1983. Vol. 15, 1, págs. 78-88.
18. Bennet, Ch. H. y Brassadr, G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing. *Int. Conf. Computers, Systems & Signal proccesing.* Bangalore (India): s.n., Dic. 10-12 (1984). págs. 175-179.
19. Rocke, C., y otros. Acoustically Driven Storage of Light in a Quantum Well. *Physical Review Letters.* 1997. Vol. 78, pág. 4099.
20. Grisin, Nicolas, y otros. Quantum Cryptography. *Review Modern Physics.* 2002. Vol. 74, págs. 145 - 195.
21. Guerrero, Héctor, y otros. *Microsistemas y Nanotecnología para la Defensa.* Madrid: Ministerio de Defensa, 2004. 9788492079896.

Aplicaciones de la nanotecnología en Sistemas Militares

TCol. CIP. Jesús C. Gómez Pardo.
Dr. Ingeniero

Capítulo cuarto

Introducción

En este mundo cambiante en el que la innovación sigue siendo fundamental para mantener el liderazgo económico, la capacitación tecnológica que permita el desarrollo de productos innovadores deberá estar presente en las agendas estratégicas de los gobiernos. De esta manera, las instituciones supranacionales, nacionales y locales, están financiando el desarrollo de tecnologías y productos innovadores que potencien la competitividad del tejido industrial. Hasta finales de los años 80 el motor de la innovación tecnológica, a nivel global, era la investigación militar. La sociedad se beneficiaba de los resultados del I+D de la defensa cuyo único objeto era conseguir una ventaja tecnológica sobre el adversario. La caída del muro de Berlín, y con ella la política de bloques y el modelo de guerra tradicional basada en grandes ejércitos con estrategias predecibles, ha dado paso a modelos de conflicto asimétricos ante los cuales de poco sirven las técnicas prospectivas tradicionales. Las sociedades modernas son cada vez más dinámicas y demandantes de mayores desarrollos tecnológicos, también los ejércitos, en permanente transformación para adaptarse a las nuevas amenazas que surgen en el campo de batalla. El modelo se ha invertido. La investigación civil es ahora el motor de la innovación, y el sector defensa el que adapta los resultados del I+D civil a las necesidades militares. Así, el Ministerio de Defensa de España financia, mediante el programa COINCIDENTE, el desarrollo de prototipos

que resuelvan capacidades militares mediante el uso de tecnologías maduras en la vida civil.

La nanotecnología (NT) destaca como una de las tecnologías estratégicas con mayor potencial disruptivo, capacitador y de desarrollo tanto para la ciencia como para la ingeniería (ver plan nacional de I+D y programa Horizon 2020 de la Unión Europea).



Figura 4-1. Logo del programa europeo Horizon 2020 (Fuente: Comisión Europea)

En el corto plazo, la NT va a permitir integrar, en distintos sistemas, los logros conseguidos en los campos de la química, la mecánica, la biología, la física y la ingeniería informática. Como se ha visto en los capítulos 2 y 3, a escala nanométrica, mesoscópica, los materiales y estructuras se comportan, en muchos casos, de manera muy diferente a como lo hacen a escalas mayores. Una de la causas es que los nanomateriales presentan un área superficial mayor, para la misma masa, en comparación con materiales producidos a escalas tradicionales. También es relevante que los efectos cuánticos en la estructura de la materia a escala nanométrica, condicionan su comportamiento afectando a las propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas del material.

Las NT, con su enorme potencial de desarrollo, van a ser fundamentales en el sector de la defensa y la seguridad ya que van a mejorar significativamente las capacidades de combate de los nuevos sistemas de armas. Los cambios que se introducirán en los procesos productivos, gracias al enorme incremento en la capacidad de procesado de los ordenadores,

permitirán fabricar, de manera más rápida y a menor coste, grandes series de armas que serán cada vez más potentes y precisas. Las NT ya son una realidad consolidada en los sistemas de defensa. Así, en el campo de las TIC cabe destacar, a través de los logros conseguidos por la nanoelectrónica, el desarrollo de sistemas de realidad virtual basados en nanoestructuras electrónicas que están permitiendo la puesta en servicio de sistemas de instrucción y entrenamiento cada vez más efectivos. De la mano de la robótica, se ha logrado una mayor automatización en los sistemas de defensa lo que ha permitido mejorar las prestaciones de los vehículos de combate y disminuir la presencia del hombre en el campo de batalla (valga como ejemplo el controvertido empleo táctico de los UCAV) y por tanto el riesgo de nuestras tropas.



Figura 4-2. Robot artillado (Fuente: Wikipedia commons)

En el campo de las plataformas, las NT han permitido el desarrollo de plataformas con mayores prestaciones, menores costes del ciclo de vida, más operativas (probabilidad de fallo cada vez más pequeña) y de vulnerabilidad reducida (mejores blindajes, enmascaramiento adaptativo, etc.), redundando todo ello, en la mejora de la capacidad de combate y la supervivencia de las tripulaciones. En el campo de los sensores, cabe resaltar el desarrollo de sensores, algunos ya en servicio, cada vez más rápidos y eficaces para la detección de agresivos químicos, biológicos y nucleares, y para el tratamiento de bajas tras un ataque NBQ. Asimismo, la nanotecnología aportará importantes capacidades a la hora de desmilitarizar los sistemas de armas, última fase del ciclo

de vida de un sistema, desarrollando «nanobots» para actuar selectivamente contra determinados metales, lubricantes, pólvoras, explosivos, etc. (valga como ejemplo las dificultades que tenemos en nuestras FAS para la desmilitarización de pólvoras y explosivos cumpliendo la reglamentación vigente).

A lo largo de este capítulo se van a revisar las aplicaciones de las NT en los sistemas de defensa. En primer lugar se analizará el entorno de la batalla del futuro que condicionará los desarrollos de los sistemas de armas. Posteriormente, y antes de entrar en las aplicaciones propiamente dichas, se definirá el marco conceptual que servirá de estructura para ir introduciendo las aplicaciones de las NT en los distintos sistemas de defensa. Este marco conceptual no será otro que el marcado por la Estrategia de Tecnología e Innovación de la Defensa (ETID). En los siguientes apartados se analizará cómo las NT están influyendo y van a influir en los nuevos desarrollos de los sistemas de defensa. Se presentará de manera secuencial siguiendo las Áreas de Actuación Funcional de la ETID: Armamento, ISTAR (Inteligencia, vigilancia, adquisición de objetivos y reconocimiento), Plataformas; Protección personal; Protección de plataformas e instalaciones y TIC (Tecnologías de la información, comunicaciones y simulación). Finalmente, se presentarán unas conclusiones sobre el impacto que las NT están teniendo y tendrán en el futuro, en los desarrollos de los sistemas de defensa.

El entorno de la batalla del futuro

Las NT modificarán sustancialmente el entorno de la batalla del futuro. El escenario previsto por la OTAN se caracteriza porque las operaciones se llevarán a cabo centradas en red. Esto se conseguirá mediante el empleo de sistemas multimodales capaces de procesar las cantidades ingentes de información procedentes de las distintas fuentes del campo de batalla y del entorno próximo del combatiente. Para la toma de decisiones, el mando operativo dependerá cada vez más de la capacidad de procesado, interpretación y distribución de la información que pueda disponer a través de sistemas con procesos automatizados.

Cada combatiente transportará en su equipo de combate un «asistente digital» al que controlará mediante comandos de voz. El «asistente digital» proporcionará al combatiente inteligencia y capacidad para actuar en la red del campo de batalla; así por ejemplo, podrá procesar la información recibida por el conjunto de sensores disponibles en los distintos subsistemas de su equipo de combate: uniforme, arma, casco, etc., dotándole de capacidad para localizar objetivos, asignar prioridades o identificar puntos de interés sobre el terreno. Asimismo, podrá monitorizar sus constantes biológicas y dispondrá de herramientas de apoyo a la decisión.

El combatiente llevará un uniforme inteligente que le ofrecerá protección balística y NBQ. El uniforme estará fabricado con tejidos adaptativos que le proporcionarán capacidad de enmascaramiento multiespectral (reducción de firma en varias zonas del espectro electromagnético). Se emplearán los tejidos del uniforme para embeber dispositivos electrónicos (paneles solares, antenas, elementos de visualización y entrada de datos, etc.) y servirá de anclaje para otros elementos tales como los exoesqueletos, amplificadores de fuerza muscular.



Figura 4-3. Concepto de combatiente del futuro estadounidense (1)

La presencia de UAV, USV y UCAV en el campo de batalla será cada vez mayor. Estos sistemas se están diseñando para apoyar y en muchos casos sustituir al combatiente en las operaciones. El hombre será necesario en las operaciones más relevantes como puede ser la consolidación del terreno. La tendencia cada vez mayor hacia la automatización y operación remota de los sistemas de armas, reducirá drásticamente el número de combatientes en el campo de batalla, pero aquellos involucrados en el combate dispondrán de una mayor capacidad de fuego individual, de conciencia situacional, de una mejor protección balística y de una mayor movilidad.

Los futuros conflictos armados seguirán siendo asimétricos, ocasionados por bandas y grupos terroristas o actores no gubernamentales. Las NT jugarán un papel trascendental en las operaciones militares ofreciendo mayores capacidades de medida por los sensores y mejores tecnologías de la comunicación que son necesarias para que con un número pequeño de unidades, con gran potencia de fuego, se pueda neutralizar al adversario. La guerra convencional demanda el empleo de la tecnología más sofisticada, mientras que la guerra asimétrica se basa en una inteligencia más sofisticada y un soldado mucho más eficiente mediante el uso de la nanotecnología.

La estrategia de tecnología e innovación de la defensa. Líneas de actuación funcional

El proceso de planeamiento del recurso material y financiero a largo plazo establece los recursos materiales (RM) que deben conseguirse para

lograr las capacidades militares (CM) futuras de nuestros combatientes. Con este objetivo, la Dirección General de Armamento y Material (DGAM), organismo del MINISDEF responsable de dicho proceso de planeamiento, elabora el plan de I+D. El marco estratégico para la elaboración y ejecución de dicho plan, viene dado por la ETID que, aunque no forma parte del proceso de planeamiento en sí, constituye la guía de referencia para el desarrollo tecnológico de la industria de la defensa. A su vez, la ETID está alineada con la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación.

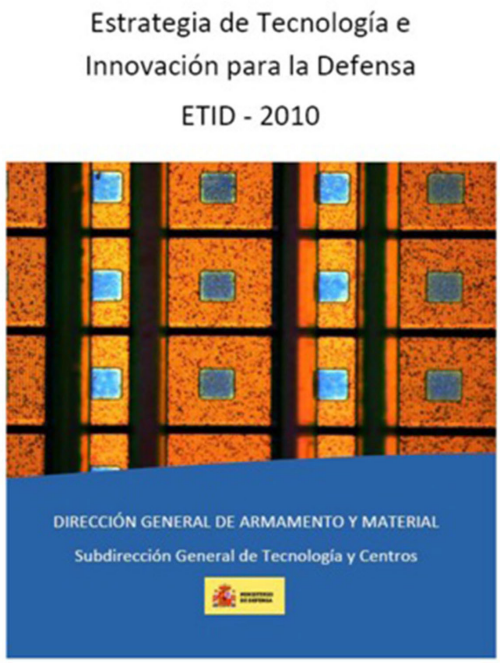


Figura 4-4. La Estrategia de Tecnología e Innovación de la Defensa (ETID) (2). Detector tricolor de pozos cuánticos (Fuente: Ministerio de Defensa)

La planificación del recurso material y la gestión de la I+D corresponde a la DGAM a través de la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN), mientras que su ejecución es responsabilidad de los Centros Tecnológicos de la Secretaría de Estado de Defensa: INTA, CEHIPAR, ITM y LABINGE, recientemente unificados en un único centro.

La ETID recoge las actividades de investigación, tecnología e innovación hasta niveles de madurez tecnológica que, en el caso de algunas tecnologías estratégicas, puede alcanzar el nivel TRL-7 «validación operativa» (ver capítulo 3). Se definen 6 áreas de actuación funcional (AAF) que relacionan las actividades de I+T con las necesidades militares expresadas en el objetivo de capacidades militares (OCM) y que cubren el espectro completo de tecnologías de interés para la defensa:

- Armamento.
- ISTAR (Inteligencia, vigilancia, adquisición de objetivos y reconocimiento).
- Plataformas.
- Protección personal.
- Protección de plataformas e instalaciones.
- TIC (Tecnologías de la información, comunicaciones y simulación).

Las AAF se dividen en líneas de actuación funcional (LAF) para las que se establecen una o varias metas tecnológicas (MT) que sirven de guía fundamental a la hora de determinar las actividades de investigación y tecnología (I+T) en el periodo 2011-2014 (ETID 2010, a lo largo del año se publicará la ETID 2014 para el periodo 2015-2020).

En el presente capítulo analizaremos la contribución de la nanotecnología a los futuros sistemas militares. Para su desarrollo seguiremos el esquema trazado por la ETID. Del estudio de la estrategia, podemos observar que la nanotecnología está presente en muchas de las metas tecnológicas que fija la ETID. A lo largo del capítulo analizaremos estas aplicaciones pero no nos limitaremos a ellas ya que pretendemos dar una visión global de los desarrollos nanotecnológicos que se están llevando a cabo en las instituciones más punteras del mundo para su aplicación en sistemas militares.

Armamento

El empleo de las nanotecnologías (NT) en el desarrollo de nuevos sistemas de armas permitirá mejorar notablemente sus prestaciones. Los sistemas de armas serán cada vez más ligeros y autónomos, tendrán mayor capacidad de respuesta ante una agresión y estarán totalmente integrados en red. A su vez, las municiones estarán dotadas de microsistemas de guiado cada vez más sofisticados que reduzcan la probabilidad de error sobre el objetivo disminuyendo el consumo y evitando daños colaterales. El desarrollo de armas no letales será otro campo en el que se espera que las NT tengan un importante impacto.

Los nuevos sistemas de armas convencionales, en los que la presencia de las NT será elevada, tendrán una mayor letalidad sobre el objetivo minimizando el daño sobre la población civil y estructuras próximas que no constituyan objetivo militar. Esto se conseguirá reduciendo el peso, mediante el empleo de los nanomateriales; aumentando la velocidad y el alcance, mediante el empleo de propulsantes con mayor impulso específico; mejorando la precisión y la probabilidad de impacto, mediante la incorporación de microsistemas de guiado; mejorando su balística de efectos, cargando las municiones con explosivos optimizados; y todo ello con una reducida firma multiespectral, mediante el empleo de nanomateriales y metamateriales, que disminuye la vulnerabilidad del sistema de armas y aumenta, en consecuencia, la probabilidad de supervivencia de

tripulaciones y sirvientes. A su vez las NT contribuirán notablemente al abaratamiento del proceso de fabricación y del coste final de producción.

Siguiendo la taxonomía de la ETID se va a analizar a continuación el impacto de las NT sobre las distintas líneas de actuación funcional del área de armamento. Estas son: munición; municiones complejas; espoletas, sensores y dispositivos de actuación; señuelos pirotécnicos; sistemas de armas; medios no letales; tecnologías de aplicación general.

Munición

El arma propiamente dicha la constituye la munición. Como acabamos de ver, el desarrollo de nuevos sistemas de armas y municiones cada vez más ligeros y de prestaciones mejoradas viene de la mano de los logros de las NT en el campo de los nuevos materiales. Los objetivos de diseño para las nuevas municiones serán disminuir el peso e incrementar la velocidad para aumentar el alcance, mejorar el guiado, incrementar la capacidad de penetración y en general optimizar sus efectos balísticos. Para ello, las municiones deberán disponer de micro/nanosistemas a bordo que les proporcionen la inteligencia necesaria (municiones inteligentes). En ese sentido, habrá que desarrollar sensores *built-in* (sensores embebidos) que permitan monitorizar el estado general de la munición, principalmente en el caso de misiles, microantenas de RF, sensores combinados GPS e inercial miniaturizados y fuentes de alimentación para el funcionamiento de estos sensores que analizaremos más en detalle en el siguiente subapartado

Municiones complejas

El empleo de materiales nanoestructurados permitirá disponer de municiones más pequeñas y más ligeras lo que facilitará el despliegue, la manipulación y en general las operaciones logísticas. La disminución de peso y volumen de las partes estructurales dejará mayor espacio para la carga explosiva que a su vez tendrá un mayor poder explosivo y por tanto mayor letalidad. La miniaturización de la electrónica permitirá reducir el volumen dedicado al sistema de guiado aumentando su precisión. En definitiva, los sistemas de armas verán incrementada notablemente su potencia de fuego al poder transportar mayor cantidad (menos volumen, menos peso por munición) de munición de altas prestaciones, es decir, munición de mayor precisión y letalidad.

A continuación se va a analizar el impacto que el desarrollo de los materiales nanoestructurados está teniendo en el campo de las municiones. En primer lugar, desde el punto de vista de los materiales no energéticos utilizados para mejorar las capacidades de perforación de las nuevas municiones, en segundo lugar, desde el punto de vista de los materiales

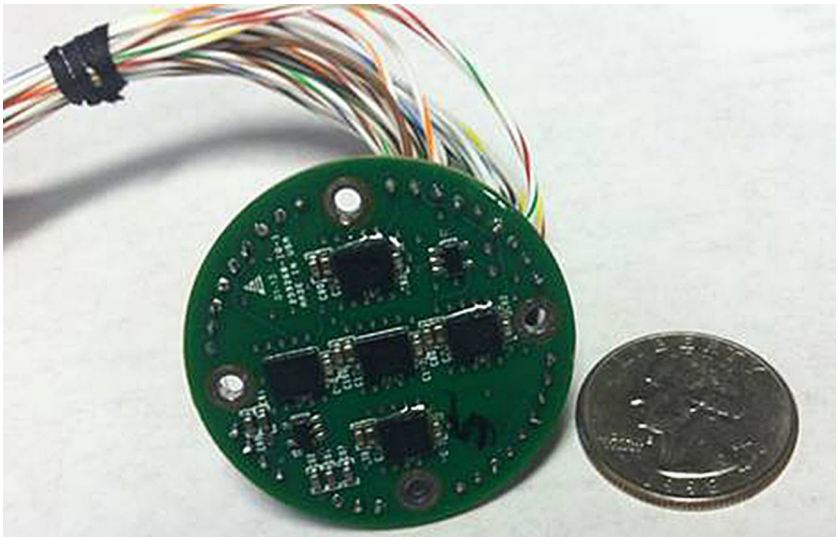


Figura 4-5. Sensores inerciales para el guiado de munición de artillería convencional (Fuente: Picatinny Arsenal)

energéticos utilizados para mejorar la propulsión y la balística de efectos de estas municiones, y finalmente desde el punto de vista de la logística de la munición.

Materiales no energéticos

Entre los nuevos materiales no energéticos con aplicación para municiones de energía cinética cabe destacar el desarrollo de los materiales superpenetrantes. El empleo de wolframio nanocristalino mejora las capacidades de penetración de los actuales proyectiles de energía cinética incluso las del proyectil de uranio empobrecido, prohibido por sus potenciales riesgos para la salud de las personas. Para otras aplicaciones balísticas es interesante el desarrollo del tantalio nanocristalino por sus atractivas propiedades físicas (elevada densidad, ductilidad y procesabilidad) y por un proceso de fabricación barato y que permite elevados volúmenes de producción.

Asimismo, las aleaciones metálicas de base titanio o circonio, también llamadas metales líquidos, combinadas con partículas nanocristalinas, presentan buenas capacidades de penetración además de otras propiedades características muy interesantes para aplicaciones balísticas.

Materiales energéticos

El empleo de nanocompuestos en pólvoras y explosivos, permite aumentar significativamente el impulso específico y la velocidad de combustión

gracias a la elevada superficie de combustión que se consigue reduciendo el tamaño de partícula y la distancia entre las mismas. En esta línea, se están desarrollando nuevos materiales, con una relación energía/masa muy elevada, basados en nanopartículas de aluminio. El empleo de estas partículas, muy energizantes, en nuevos propulsantes permitirá una disminución importante en el peso que unido a su incremento en el impulso específico, se traducirá en un aumento considerable de la velocidad del proyectil y por tanto del alcance. Por el contrario, se incrementará su firma multiespectral, lo que facilitará la identificación del lugar desde el que se ha producido el lanzamiento y por tanto, las acciones de contravigilancia. Mediante la aplicación de revestimientos adecuados sobre las nanopartículas de aluminio puede controlarse la estabilidad de la reacción y la velocidad de combustión.

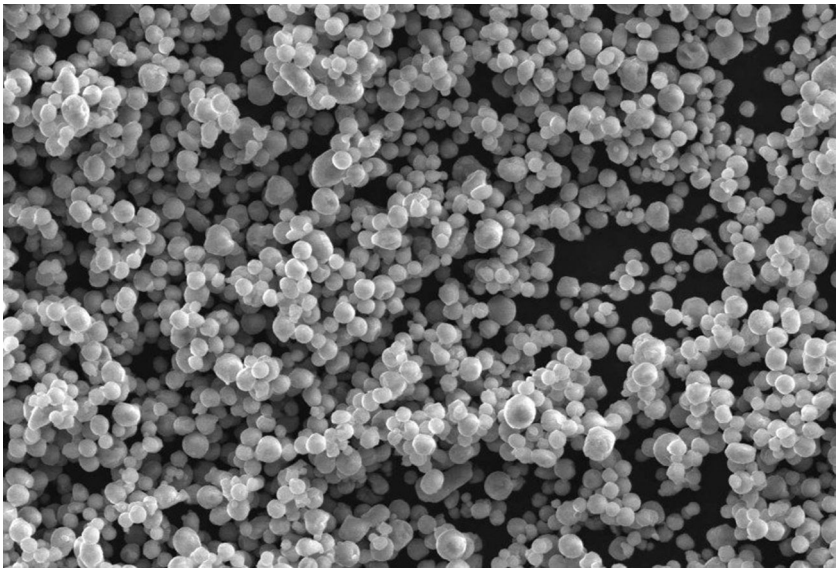


Figura 4-6. Nanopolvos de aluminio (Fuente: Zhejiang Bainianyin Industry & Trade Co., Ltd.)

En el caso de los explosivos, el potencial detonador puede incrementarse, al igual que en el caso de los propulsantes, modificando el tamaño de partícula. De esta manera, se tiene control sobre la sensibilidad del explosivo que puede optimizarse mediante el empleo de granos de tamaño nanométrico. La carga explosiva puede configurarse mezclando diferentes explosivos de manera que se optimicen sus efectos. Aquí también serán de aplicación los nanopolvos de aluminio.

Otra línea importante en la que las NT contribuirán con toda seguridad, es en el desarrollo de explosivos y propulsantes insensibles. Se trata de explosivos que, sin disminuir sus capacidades balísticas, sean cada vez menos sensibles a estímulos no deseados tales como la detonación por

simpatía, el impacto de bala, o el sometimiento a fuego rápido o a calentamiento lento.

Además de los desarrollos de materiales nanocompuestos muy energéticos, para aplicación en municiones de alto impacto, las NT permitirán el desarrollo[1] de micro bombas nucleares y de fusión.

Logística de municiones

El empleo de las NT facilitará notablemente las tareas logísticas. Los nuevos materiales empleados reducirán el volumen y el peso de las municiones. Asimismo, la utilización de nanocompuestos en la fabricación de vainas, envases y empaques, aligerará y abaratará el producto final. Tanto los explosivos y propulsantes como los distintos subsistemas de las municiones, espoletas, sistemas de guiado y control, dispositivos de seguridad y armado, etc., serán cada vez más pequeños y fiables. El desarrollo de nanosensores permitirá monitorizar, de manera continua, el estado real de las municiones. De esta manera, se tendrá control sobre el ciclo de vida de la munición abaratando las operaciones de mantenimiento. Por otra parte, se dispondrá de sensores de temperatura, humedad, golpes, vibraciones, y emisiones químicas, como por ejemplo sensores para la detección de vapores de trilita. Ya no serán necesarias las «pruebas de vigilancia». El empleo de las municiones será cada vez más seguro y la desmilitarización, lo que actualmente es un verdadero problema, se resolverá sin dificultades.

Municiones complejas

Se está trabajando intensamente en el desarrollo de micro-nanosistemas (MEMS micro-nanosensores y micro-nanoactuadores). Esto permitirá la miniaturización de los «kits de guiado» de munición y el control aerodinámico de superficies (3). En el ITM se están llevando a cabo varios proyectos para el guiado de municiones: el proyecto GRETA-DAD (empresa AERTEC) está desarrollando un sistema de guiado terminal láser de cohetes de 70 mm para dar cumplimiento a un Requisito de Estado Mayor (REM) del Jefe del Estado Mayor de la Defensa (JEMAD). Esta tecnología también se está integrando en el desarrollo de un cohete para UAV y es susceptible de aplicarse también en el guiado de bombas de aviación. Por otro lado, el proyecto MIURA (fundación EVERIS) pretende dotar a

[1] Juvale en su libro *Military nanotechnology* (13) describe el impacto que las NT tienen en las armas nucleares analizando en primer lugar el impacto sobre las tres generaciones existentes así como sobre la cuarta generación en desarrollo. Se trata de bombas nucleares que se fabrican utilizando instalaciones de fusión confinada inercial (ICF) y otras tecnologías muy avanzadas, y que cumplen totalmente con los requisitos exigidos por los tratados CTBT (*Comprehensive Test Ban Treaty*). Ver páginas 260-264.

munición de artillería, cohete MC25, de un sistema de guiado INS-GPS. En ambos casos, se están utilizando dispositivos microelectrónicos de bajo coste que controlan a unos microactuadores, colocados en el interior de la munición, capaces de desplegar unas superficies aerodinámicas que permiten el control aerodinámico de la trayectoria. El desarrollo de estos proyectos permitirá a España cumplir con el *Roadmap* marcado por la PGA (*Precision Guided Ammunition* de la EDA) para el 2020.



Figura 4-7. EXCALIBUR. Munición de 155 mm guiada (Fuente: Wikipedia commons)

En el campo de los misiles antiaéreos de guiado pasivo IR ya está en servicio la cuarta generación (*Imaging Infra Red* IIR). Se caracterizan por disponer de una matriz de detectores en banda II (3-5 mm) en plano focal (FPA). Normalmente, para evitar ser perturbados, estos misiles están dotados de dos tipos de detectores en plano focal, uno en banda II para la banda de trabajo (emisión principal del avión, tobera y chorro de gases), y el otro en una banda, que dependerá de la tecnología del país de origen, y que se activa mediante la lógica de anticontramedidas cuando aparece una contramedida en el campo de visión –FOV– del misil (el IGLA 18 ruso conmuta a banda, de 1,7-2,7 mm, mientras que el Stinger Post utiliza el UV). Las NT harán evolucionar este tipo de misiles a la quinta generación que se caracterizará por utilizar una matriz hiperespectral de detectores en plano focal. Para que el misil pueda procesar en tiempo «cuasi real», a efectos de guiado, la enorme cantidad de información que le proporciona el sensor hiperespectral será necesario que a bordo disponga de elevadas capacidades de computación lo que será posible gracias a las NT (ver apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)**). El desarrollo de nuevos algoritmos inteligentes para el procesado de imágenes hiperespectrales que permitan la detección de blancos sin falsas alarmas, deberá caminar en paralelo a la capacidad de computación (proyecto DABIH detección de anomalías y blancos en imágenes hiperespectrales; Programa COINCIDENTE (4)).

Asimismo, las tecnologías de la propulsión permitirán el desarrollo de misiles hiperveloces. En paralelo, habrá que desarrollar materiales de gran resistencia a las altas aceleraciones en el lanzamiento y elevadas temperaturas que se generan por calentamiento aerodinámico. En este

campo, las NT y los nuevos materiales nanoestructurados, tendrán mucho que decir. En el ITM, y en colaboración con el INTA se está poniendo a punto un banco de estatocohetes y desarrollando una munición *ramjet* de 30 mm que permita un vuelo propulsado a Mach 4 con un motor de este tipo. Esta tecnología podrá escalarse a otros motores de misiles de mayor tamaño.



Figura 4-8. Misil hiperveloz de la NASA. Mach 20 (Fuente: NASA)

Los desarrollos de las NT en el campo de los sensores, materiales y comunicaciones serán también de aplicación para las minas submarinas. Estos dispositivos montarán un conjunto de sensores de campo eléctrico, electromagnético, acústico y sísmico que proporcionarán gran capacidad de detección y reconocimiento de buques. Será de aplicación lo dicho anteriormente en referencia a explosivos con mayor poder detonante, pero insensibles a estímulos no deseados. La seguridad se verá, asimismo, incrementada sustituyendo las espoletas tradicionales por MEMS lo que las hará más fiables. Estarán dotadas de un sistema de comunicación de manera que puedan ser controladas desde submarinos y buques de superficie.

En cuanto a las tecnologías de minado y desminado, éste es otro inmenso campo en el que las NT tendrán gran relevancia. La facilidad para sembrar un campo de minas y las enormes dificultades para su desactivación ha hecho que muchos países se planteen la eliminación de las minas antipersonal de sus arsenales. Mientras se avanza hacia el cumplimiento de los acuerdos de la Convención de Ottawa (1997) la realidad es que existen millones de minas activas desplegadas por distintas zonas del globo que causan al año miles de muertos y terribles amputaciones. Además de los métodos de desminado tradicionales por remoción mecánica, detección de metales o empleo de perros rastreadores y ratas, hay multitud de tecnologías en desarrollo que podemos

agrupar de la siguiente manera: Métodos electromagnéticos avanzados (radar de penetración y radar de doble sensor), detección biológica (por medio de abejas, bacterias, mamíferos y plantas); detección acústica y detección nuclear. Se amplía esta información en el apartado **PROTECCIÓN PERSONAL**, subapartado ***Lucha contra IED***. A menudo se emplean métodos combinados, a título de ejemplo, es interesante el desarrollo danés (5) que combina cuatro tecnologías distintas en un único dispositivo para la detección de las minas.

Los países occidentales ya trabajan en encontrar soluciones alternativas al minado y empleo de los campos de minas. El desarrollo de sistemas que puedan cumplir las mismas misiones asignadas a los campos de minas pero que obvien sus efectos negativos es una prioridad. Estos sistemas estarán basados en la tecnología MEMS. Integrarán microsensores, microactuadores y procesadores que permitan un mejor control del campo de batalla. Básicamente, deben cumplir la función disuasoria de los campos de minas pero no las tareas de protección que deberán ser encomendadas a otros sistemas de armas. El avance tecnológico en el campo de las municiones (ver subapartado ***Munición***), información y comunicaciones (ver apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)**), permitirá cumplir con esta misión disuasoria.

Espoletas, sensores y dispositivos de activación

Asegurar la cadena de fuego, manteniendo al mismo tiempo la seguridad es un compromiso que no es fácil de cumplir. Las espoletas actuales son mecanismos de alta precisión, caros y que montan un dispositivo de seguridad y armado (DSA) que garantiza la seguridad en el empleo y manipulación de las municiones y la activación de la cadena de fuego en el momento del impacto sobre el objetivo, pero que produce un número elevado de fallos de funcionamiento de la munición sobre el objetivo. El empleo de los micro-nanosistemas, con capacidad para realizar todas las funciones de una espoleta pero de una manera mucho más fiable y barata, es ya una realidad. Los dispositivos estarán diseñados para soportar las elevadas aceleraciones que se producen en un tiro de artillería a máxima distancia. Además, el volumen de estos dispositivos es mucho menor dejando mayor espacio para el explosivo o microdispositivos de guiado. Se dispondrá, por tanto, de municiones mucho más eficientes (poder detonante y precisión sobre el objetivo) lo que hará que el consumo de munición para batir un objetivo sea mucho menor (ver en este apartado, los subapartados ***Munición*** y ***Municiones complejas***). Por otro lado la miniaturización de estos dispositivos y su bajo coste, permitirá que sean montados en municiones de pequeño calibre, a las que actualmente resulta imposible colocarles una espoleta, aumentando su seguridad y sus niveles de eficiencia sobre el objetivo.

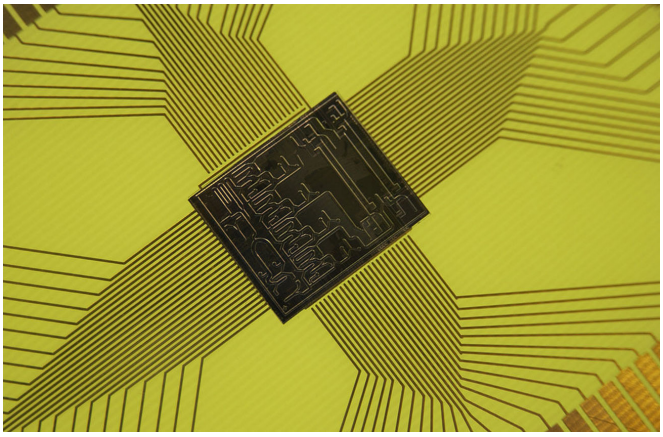


Figura 4-9. Imagen de un MEMS. Lab-on-chip (Fuente: Wikipedia commons)

Estos microsistemas estarán adicionalmente dotados de dispositivos de autodestrucción/neutralización/desactivación de manera que, en el caso de un mal funcionamiento sobre el objetivo, se activarán con posterioridad al impacto contribuyendo así a la limpieza del campo de batalla.

Para sensores ver apartado **SISTEMAS DE INTELIGENCIA, VIGILANCIA, ADQUISICIÓN DE OBJETIVOS Y RECONOCIMIENTO (ISTAR).**

Señuelos pirotécnicos

En el campo de los señuelos pirotécnicos, el empleo de materiales nanoestructurados introducirá mejoras similares a las ya mencionadas para el caso de las pólvoras y explosivos. Además de las ventajas logísticas, consecuencia de la reducción de peso y volumen, y operativas, mayor número de municiones más eficientes y selectivas para el mismo volumen, se conseguirán mezclas con las que se podrá reproducir el perfil de combustión deseado (niveles de intensidad radiante frente a longitud de onda), en particular el perfil multiespectral de la plataforma a defender, de tal manera que sea posible el engaño de la amenaza cualquiera que sea la tecnología de anticontramedidas que tenga implementada. Así por ejemplo, se desarrollarán nuevas bengalas espectrales con la adecuada «relación de color» para contramedir misiles de tercera generación con tecnología bicolor (dos sensores trabajando en bandas distintas, banda II/banda I del IR, para el caso de misiles rusos, y banda II/banda UV, para misiles occidentales (ver en este apartado, el subapartado ***Municiones complejas***)); bengalas autopropulsadas para misiles de tercera generación con anticontramedidas de predicción de trayectoria; bengalas de área extensa para ocultación de la aeronave y con capacidad para contramedir misiles de hasta cuarta generación (matriz de detectores en plano

focal); bengalas oscuras que no emiten en visible, para evitar la identificación visual, pero que proporcionan los niveles adecuados de señal en la banda de trabajo (banda II del IR). La empresa EXPAL, está finalizando el desarrollo de dos tipos de bengalas avanzadas, espectrales y autopropulsadas en el marco del proyecto del Ministerio de Defensa SAVIR en el que el ITM lleva la Dirección Técnica.

Asimismo, para el combate terrestre, se desarrollarán cortinas de humo con capacidad de ocultación multiespectral que resolverán el problema actual, asociado al tamaño de partícula, incrementando el tiempo de permanencia de la cortina.

Sistemas de Armas

Las NT permitirán el desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en los nuevos sistemas de armas. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de plásticos de alta resistencia y nanocompuestos, para reducción de peso, de materiales biomiméticos de elevada resistencia para reducción de firma, de materiales para absorción radar, y de materiales inteligentes con sensores incorporados que veremos con más profundidad en el apartado **PLATAFORMAS**. Asimismo, se están desarrollando materiales superpenetradores y propulsantes y explosivos de alta energía para su aplicación en nuevas municiones, de los que ya hemos hablado en el subapartado ***Munición***. Otro desarrollo importante es el de las estructuras cuánticas para la miniaturización de armas de energía dirigida tales como cañones de microondas y sistemas láser de alta energía que pueden actuar como perturbadores direccionales o cañones dependiendo de la potencia del láser. A título de ejemplo, INDRA está trabajando en la miniaturización del láser de su *Direct Infra Red Countermeasure* (DIRCM) MANTA, el sistema que actualmente tiene la tecnología más avanzada del mundo en la perturbación de misiles antiaéreos de guiado IR, pero que tiene el grave problema de su tamaño y peso que hace que únicamente pueda ser montado en aviones de transporte. Finalmente, el uso de materiales nanoestructurados permitirá desarrollar sistemas (de localización) para responder a las acciones de contrabatería del enemigo.

En el campo de los sensores, los futuros sistemas de armas estarán dotados con sensores avanzados tales como microradares, microbolómetros IR, matriz de sensores acústicos para guiado de municiones; sensores de condición para la monitorización del estado del sistema y de la munición; o sensores para la identificación por radiofrecuencia (RFID).

Mediante el empleo de estos nanosensores avanzados, el uso de redes de sensores distribuidas y comunicaciones inalámbricas se aportarán nuevas funcionalidades a los sistemas de armas. En un futuro próximo se dispondrá de sistemas de armas teleoperados mediante el uso extensivo de los sensores y redes inalámbricas; de municiones con capacidad de



Figura 4-10. DIRCM-MANTA de INDRA (Fuente: INDRA)

selección del blanco (autoadaptativas), a partir de la información recibida de disparos previos; de nano y microrobots, miniaturizados, autónomos y de control remoto pero con una gran potencia de fuego.

Medios no letales

En el caso de las armas no letales, se busca potenciar la capacidad de neutralizar temporalmente al adversario. Actualmente se consigue mediante el empleo de varias tecnologías novedosas (espumas, ultrasonidos, etc.), en las que la aplicación de las NT puede introducir notables mejoras. Los avances en este campo, serán asimismo de relevante aplicación para los Cuerpos y Fuerzas de la Seguridad del Estado. Se trata por tanto de tecnologías duales. También se está trabajando en el desarrollo de armas personales con capacidad para neutralizar grupos de personas. La reducción del tamaño y peso de los sistemas, gracias al empleo de las NT, y su aplicación a sistemas de microondas, microláseres y generadores de onda, en los espectros acústico y de radiofrecuencia, hará posible esta capacidad de neutralizar grupos de personas.

Tecnologías de aplicación general

Las dos metas tecnológicas que marca la ETID para esta LAF están relacionadas con las capacidades de ensayos de los sistemas de municiones y armas, así como con la potenciación de las capacidades de modeliza-

ción de los sistemas de municiones y armas. La aplicación de las NT en estos campos va a asociada al enorme impacto que tendrá en el incremento de la capacidad de procesado de datos de los nuevos ordenadores y sistemas en red. De ello se hablará más adelante en el apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)**.

Sistemas de Inteligencia, Vigilancia, Adquisición de Objetivos y Reconocimiento (ISTAR)

En esta AAF, se va a analizar el impacto de las NT sobre el concepto ISTAR (*Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaisance*). Los sistemas ISTAR son sistemas militares capaces de adquirir, procesar, explotar y diseminar información de inteligencia de manera integrada y en el tiempo adecuado que permita ser utilizada en el planeamiento y desarrollo de las operaciones militares. En esta AAF se establecen cinco LAF siguiendo el ciclo de inteligencia: adquisición de datos de sensores; proceso y explotación de datos, análisis de la información y producción de inteligencia; distribución de información e inteligencia; dirección del ciclo de inteligencia; arquitectura ISTAR.

Adquisición de datos. Sensores

Este es uno de los campos en el que la presencia de las NT va a permitir desarrollos espectaculares. Gracias a la miniaturización y al empleo

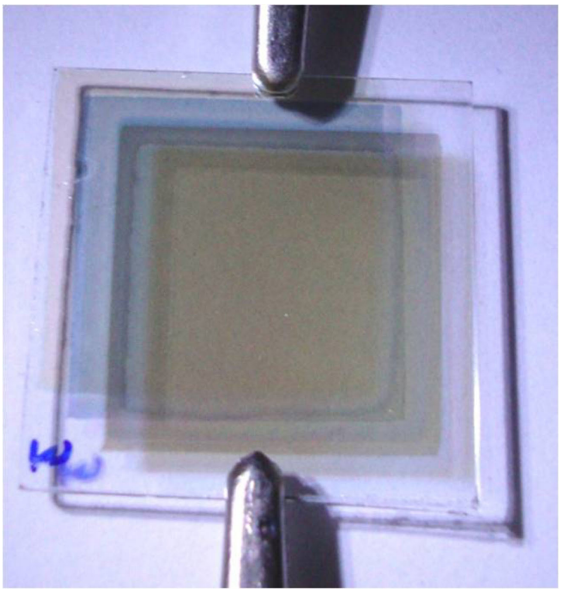


Figura 4-11. Dispositivo electrocrómico (Fuente: Wikipedia commons)

de electrónicas de menor consumo, se están consiguiendo capacidades como: la integración funcional de sensores de modo que en un único chip se pueden realizar las funciones de obtención, proceso y almacenamiento de la información, así como el envío de datos mediante comunicaciones inalámbricas; el análisis multiparalelo para realizar análisis de elevado rendimiento; el desarrollo de matrices de sensores multiespectrales y de sensores individuales a nivel célula/molécula de alta sensibilidad y direccionalidad; y en general, el desarrollo de sensores multifuncionales, capaces de funcionar en red, de gran eficiencia térmica y bajo consumo, con gran capacidad para la obtención de energía (sensores solares, térmico, mecánicos, etc.), portátiles, desechables, integrados en textiles, de bajo coste, con cierto grado de autonomía, de control remoto o autocontrolados, etc.

Los avances en la nanoelectrónica, permitirán que los futuros sensores incorporen capacidad multiespectral (ultravioleta, visible, infrarrojo, radio y microondas). Así por ejemplo: el empleo de los llamados *Smartdust* (polvo inteligente) constituye una verdadera red de sensores distribuidos que pueden ser dispersados en miles de motas con capacidad para detectar cualquier tipo de señal (luz, vibraciones o temperaturas) y realizar labores de vigilancia de zona; las nanopolianilinas (PANI) se utilizarán como sensores para el almacenamiento de energía y memorias digitales no volátiles, así como para la fabricación de nanofibras que se utilizarán como electrodos en pantallas electrocrómicas (*Electro Chromic Display - ECD*) y células fotoelectrocrómicas autoabastecidas; los nanosensores por resonancia plasmónica superficial (SPR) permitirán incrementar la sensibilidad y la relación señal/ruido de las fibras ópticas; o el uso del nanocirconio, que aprovechará su elevada conductividad iónica y que se trata de un material fotoluminiscente, para utilizarse en la fabricación de sensores y células de combustible de óxido sólido (SOFC).

El uso extensivo de sensores en el campo de batalla hará crecer de manera ingente el volumen de datos a transmitir para lo que será necesario potenciar las comunicaciones ampliando los anchos de banda para la emisión de datos y mejorando la seguridad de las transmisiones. La entrada masiva de datos en los puestos de mando, requerirá incrementar las capacidades de procesado, interpretación e integración de la información recibida (ver apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)**).

Sensores radar

Las NT pueden contribuir notablemente al desarrollo de radares cada vez más precisos rápidos y ligeros pero también más difíciles de localizar (furtividad). Los radares futuros estarán dotados de memorias más densas, mayor capacidad de almacenamiento de datos y velocidades de

proceso mayores. El consumo de los dispositivos electrónicos y cambios de frecuencia será menor. Será posible integrar sensores radar construidos con materiales conductivos capaces de emitir ondas de RF a frecuencias elevadas, en la estructura de las plataformas proporcionando una mayor capacidad para la detección. Por otro lado, la firma radar y visible será menor. Así por ejemplo, en EE.UU. ya se ha desarrollado un nano-SAR que puede montarse en cualquier tipo de plataformas, UAV, carros de combate o barcos pequeños. Pesa alrededor de 1kg incluyendo el sistema de navegación, antenas, cableado, procesador en tiempo real y emisor de RF. Se ha diseñado con requisitos de pequeño tamaño, bajo peso, consumo y coste para que pueda ser montado en pequeños UAV. En la figura 4-12 puede verse el desarrollo de la EDA.

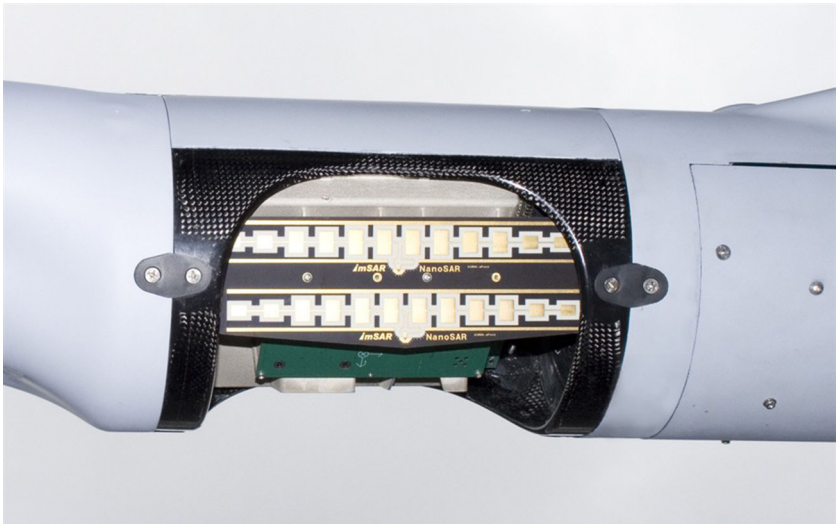


Figura 4-12. NanoSAR. Proyecto SIMCLAIRS de la EDA (Fuente: EDA)

Otras tecnologías de aplicación al radar, son los desarrollos de silicio-germanio que mejoran las prestaciones del arseniuro de galio o del fosfuro de indio, siendo un material más barato. También son importantes los esfuerzos que se están realizando en el desarrollo de la tecnología del nitruro de galio GaN para su aplicación en transistores con un consumo hasta 10 veces menor que la tecnología actual de arseniuro de galio. Estos dos desarrollos están dando paso a la tercera generación de las tecnologías RF (primera generación silicio, segunda generación arseniuro de galio y fosfuro de indio). Está llamada a tener un elevado impacto en los sistemas de defensa y en sistemas comerciales. Se caracterizará por su incremento en las prestaciones del sistema, reducción de tamaño y peso y simplificación de su logística.

En el desarrollo de antenas se están utilizando los polímeros de cristal líquido que por su flexibilidad permitirá la construcción de antenas mu-

cho más ligeras. También se puede utilizar en la construcción de paneles de circuitos de alta frecuencia para aplicaciones radio en vehículos eliminando las pesadas cajas metálicas que actualmente protegen estos paneles. También se están desarrollando antenas de plasma invisibles al radar (no reflejan). Está compuesta de dos tubos paralelos de cristal, plástico o cerámica rellenos de un gas que se ioniza al hacer pasar una corriente eléctrica a través suyo funcionando como un cable tradicional. Con estos tubos se construye la antena en fase que puede emitir y recibir señales radar con un campo de cobertura elevado y sin necesidad de rotación. Cuando los tubos no están alimentados eléctricamente, son invisibles al radar.

Sensores mecánicos

Se basan en los desplazamientos diferenciales de diminutas ménsulas, haces o nanocables al ser sometidos a fuerzas mecánicas de tipo inercial, vibratoria o variaciones de presión. El desplazamiento puede medirse electrónicamente (transistor de efecto campo), ópticamente (desplazamiento del haz láser), a través de la variación en la capacitancia del sistema o a través de un piezoeléctrico de efecto de carga superficial (ZnO). Estos sensores son capaces de detectar fuerzas muy pequeñas de hasta 10^{-18} N. En el mercado pueden encontrase ya sensores de aceleración 3D, sensores de presión y sensores de vibración con múltiples aplicaciones en los sistemas de defensa.

Sensores electromagnéticos

La radiación electromagnética puede recogerse mediante nanosensores constituidos por antenas dipolo de tamaño nanométrico conectadas a una matriz de detectores bolométricos. Para una detección más precisa, pueden utilizarse estructuras de pozo cuántico en las que se generan electrones de efecto túnel a partir del estímulo provocado por la radiación incidente. De esta manera se garantiza una elevada relación señal/ruido. En un chip, el número de pozos cuánticos es elevado lo que se traduce en una importante señal de salida. La principal aplicación de estos sensores es en las bandas del infrarrojo y de los THz (terahercios).

Sensores químicos y biológicos (QB)

La NT permitirá el desarrollo de sensores QB cada vez más pequeños, más sofisticados, con mayor capacidad para la detección de agresivos químicos y biológicos, que podrán integrarse en los uniformes y textiles, y que, además de detectar, tendrán la capacidad de responder a la agresión de agentes químicos o biológicos. El uso masivo de estos sensores, lleva-

rá asociado la mejora de los textiles para la protección QB (ver apartado **PROTECCIÓN PERSONAL**, subapartado ***Tecnologías del combatiente***).

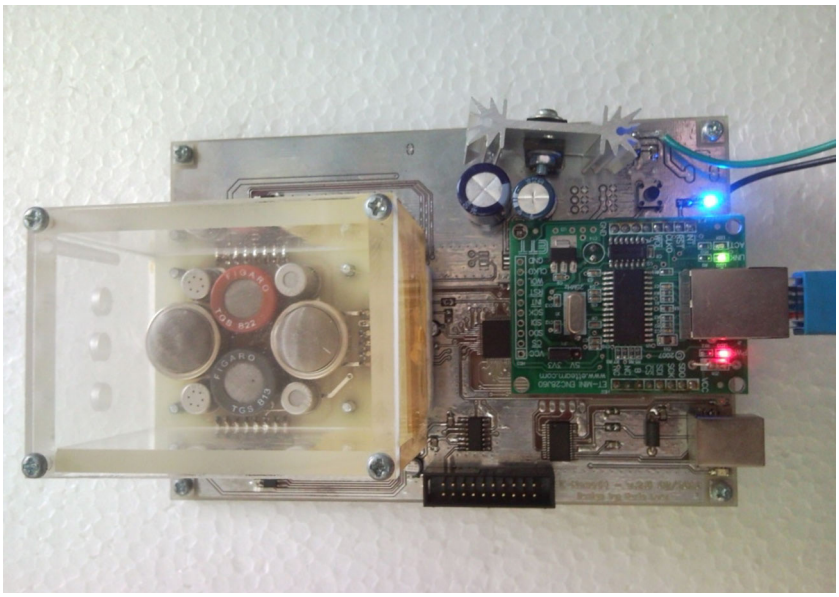


Figura 4-13. Nariz electrónica para detección de gases (6)

Para la fabricación de sensores químicos, las distintas NT se aplican en combinación con microsistemas llamados «*lab-on-chip*» que son microsistemas que realizan las funciones de procesamiento del fluido, filtrado y pretratamiento, en un único chip. Si la muestra se presenta en forma líquida, se utilizan varias NT sobre el «*lab-on chip*» entre las que cabe destacar el uso de puntos cuánticos fluorescentes, partículas magnéticas, superficies nanoestructuradas o guías de onda planas, con las que pueden conseguirse sensibilidades de hasta 10^{-16} moles/litro. Así por ejemplo, DAS Photonics está liderando el proyecto de la EDA BIOTYPE, en el que participa ITM, para la detección rápida de ántrax. Se trata del desarrollo de sensores nanofotónicos basados en el concepto «*lab-on-chip*» (LoC), que permiten detección rápida (minutos) y altamente sensible de amenazas bioquímicas, muy útil en el equipamiento del combatiente o en vehículos terrestres no tripulados, en el campo de batalla.

Si la muestra se presenta en forma gaseosa, la detección se realiza midiendo, bien la transferencia de electrones sobre superficies nanoestructuradas, nanotubos o nanocables, o bien el depósito de partículas en suspensión sobre superficies nanoestructuradas o sensores mecánicos, tales como ménsulas resonantes o nanocables. En estos casos se pueden alcanzar sensibilidades de hasta 10^{-12} ppm y 10^{-21} ppm respectivamente.

También se utilizan sensores basados en la espectroscopía Raman con capacidad para la detección remota, en aeropuertos y aviones, a temperatura ambiente, la presencia de explosivos y de sustancias prohibidas. Con estos sensores pueden detectarse partes por trillón (ppt=10^{-6} ppm, trillón anglosajón) de sustancias explosivas tales como la trilita, el hexógeno, el dinitrotolueno, el triperóxido de triacetano, la pentrita o el explosivo C4, así como trazas de cocaína y otras drogas. Así por ejemplo, el proyecto EDA-NANOCAP, liderado por DAS Photonics, busca el desarrollo de sensores para la detección de trazas de TNT en IED, con una sensibilidad demostrada de 20 x 10^{-6} ppm.

Otros sensores

Los sensores magnéticos que se están desarrollando son aquellos que se basan en las técnicas magnéticas conocidas como GMR y TMR (*Giant and Tunneling Magnetic Resistance*) y que utilizan la espintrónica, es decir, el efecto cuántico del flujo de electrones confinados en una nanocapa y que se produce al ser sometida a un campo magnético. Se han conseguido sensibilidades de hasta 10^{-9} Tesla.

Los nanotubos de carbono son emisores de electrones muy eficientes por lo que se utilizan como fuente de electrones miniaturizada para los generadores de rayos-X.

Proceso de explotación de datos, análisis de la información y producción de inteligencia

En esta línea de actuación funcional se engloban las actividades tecnológicas que permiten desarrollar y mejorar el proceso de elaboración y transformación de los datos y de la información obtenida en inteligencia mediante su compilación, evaluación, análisis, integración e interpretación. El incremento en la capacidad de computación de los ordenadores gracias a la aportación de las NT (ver apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)**) permitirá implementar nuevos algoritmos inteligentes y de *Hardware* (HW) avanzado que optimicen la explotación de datos para obtener inteligencia.

Distribución de información e inteligencia

Hemos visto que las operaciones del futuro se caracterizarán por estar centradas en red y que el mando operativo dependerá cada vez más para la toma de decisiones, de la capacidad de procesado, interpretación y distribución de la información. Estas tecnologías están asociadas a la mejora de las comunicaciones. El impacto de las NT sobre las comunica-

ciones se analizará en el apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)**.

Dirección del ciclo de inteligencia

Mejorar el ciclo de inteligencia, que implica la determinación de las necesidades de inteligencia, el planeamiento del esfuerzo de obtención, la emisión de órdenes y peticiones a los órganos de obtención y el control continuo de la productividad de dichos órganos, pasa por mejorar la capacidad de proceso y las comunicaciones. Al igual que en los casos anteriores se remite al apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)** donde se analizará el impacto de las NT sobre estos dos aspectos.

Arquitectura ISTAR

El objetivo de esta LAF es emplear el concepto de arquitectura NAF (*NATO Architecture Framework*) en la identificación de requisitos técnicos de los sistemas ISTAR nacionales y proporcionar herramientas para el desarro-



Figura 4-14. Sistema ISTAR móvil (Fuente: Rafael)

llo de una arquitectura de referencia ISR nacional. Esta LAF es más de ámbito conceptual y no se va a considerar en este estudio.

Plataformas

En esta AAF se engloban todas aquellas funciones relacionadas con el desarrollo de todo tipo de plataformas, terrestres, aéreas, navales y espaciales así como de aspectos transversales a todas ellas como son la generación, el almacenamiento y la distribución de la energía y las tecnologías relacionadas con el desarrollo de los materiales que las constituyen, campos en los que las NT están produciendo una verdadera revolución.

En este punto se va a analizar el impacto de las NT sobre las distintas líneas de actuación funcional del área de plataformas. Estas son: comunes-plataformas; materiales; energía; plataformas terrestres; plataformas navales; plataformas aéreas; plataformas espaciales.

Comunes-plataformas

Esta línea de actuación funcional incluye aspectos tecnológicos comunes a todas las plataformas, en concreto, los que tienen que ver con la obtención de capacidades militares relacionadas con la supervivencia de la plataforma, su ciclo de vida y su interacción con el hombre y con otras plataformas. La aplicación de las NT en la mejora de estos conceptos, lo iremos viendo en los siguientes puntos de este apartado.

Materiales

La aplicación de las NT en el campo de los materiales para plataformas, es muy amplia y el impacto previsto, elevado. Así, en lo relativo a blindajes, el uso de las NT aporta las siguientes ventajas: reducción de peso, mediante la sustitución de los metales tradicionales por plásticos nanocompuestos de alta resistencia que, sin disminuir sus capacidades balísticas, reducen peso y firma radar; incremento del número de componentes inteligentes, sensores de carga y sensores embebidos (*built-in)* para monitorizar el estado y condición de los subsistemas del vehículo de combate de cara a las operaciones de mantenimiento (en el largo plazo se dispondrá de materiales con capacidad de autoreparación); desarrollo de estructuras adaptativas, que permitan al vehículo adaptarse a los cambios de condición, así por ejemplo, el vehículo dispondrá de camuflaje adaptativo para el enmascaramiento o tendrá la capacidad para pasar de suspensión rígida a flexible; furtividad *(stealth)* mediante el empleo de revestimientos que absorben el radar y disminuyen la firma IR; protección avanzada mediante la inclusión de nanopartículas y nanofibras

reforzadas para estructuras de protección balística o blindajes reactivos a base de nanopartículas y nanotubos de carbono que permitan la absorción de ondas de choque.



Figura 4-15. Estructura adaptativa para carro de combate. AMX-30 Stealth (Fuente: Giant Industries)

Los materiales a utilizar en la fabricación de nanoblindajes, deben tener una dureza y un módulo de elasticidad elevado, pero baja porosidad y relación de Poisson. También es deseable una masa específica baja para conseguir el menor peso posible. Para ello, las planchas de blindaje de los vehículos blindados y acorazados se fabricarán a base de nanomateriales estructurales tales como nanofibras, nanotubos de carbono, metales, cerámicas nanocristalinas o combinaciones de nanocompuestos de tal manera que el blindaje resultante tenga una elevada dureza, mejor flexibilidad y tenacidad, alta resistencia al impacto y peso reducido.

Ya se han conseguido nanocerámicas estructurales y nuevas formas de aleaciones metálicas, tales como los metales amorfos fabricados a base de granos de metales nanocristalinos, con durezas similares a las del diamante. Estos materiales se utilizan en la fabricación de planchas de blindaje cerámicas con mayor resistencia al impacto y flexibilidad. La incorporación de los nanotubos de carbono o de nanopartículas esféricas de silicio o de óxido de titanio en un polímero, proporciona al material una resistencia mayor y un incremento notable en la flexibilidad.

A continuación vamos a analizar brevemente los materiales estructurales más avanzados para su aplicación en la fabricación de planchas de blindajes.

Carburo de boro nanocristalino

Este material presenta una mayor dureza y ductilidad que las cerámicas tradicionales. Si en una plancha de blindaje para ensayo, colocamos una capa fina de nanocerámica estructural de carburo de boro nanocristalino, la resistencia al impacto de bala aumenta significativamente respecto a otra placa de cerámica estructural fabricada con tecnología tradicional.

Superhilos de nanocompuestos

Se espera que el uso de polímeros reforzados con nanofibras/nanopartículas reduzca el peso de los blindajes balísticos hasta en un 60%. El empleo de los materiales nanocompuestos para la fabricación de blindajes de vehículos, tales como el poliuretano reforzado con nanoarcillas, o de telas a base de fibras de muy alta resistencia con aglomerantes nanocompuestos, para blindajes ligeros, van a mejorar notablemente la supervivencia en combate, tanto del vehículo como del combatiente. Además, se reduce sustancialmente el peso y el coste de producción. Otro importante desarrollo en el campo de los materiales para blindajes es el de las fibras superresistentes de nanotubos de carbono, tales como los superhilos combinados con aglomerante nanoreforzados. Estos materiales tienen una resistencia al impacto de bala entre 3 y 4 veces mayor que los blindajes actuales con una notable disminución de peso y mejora en la flexibilidad.

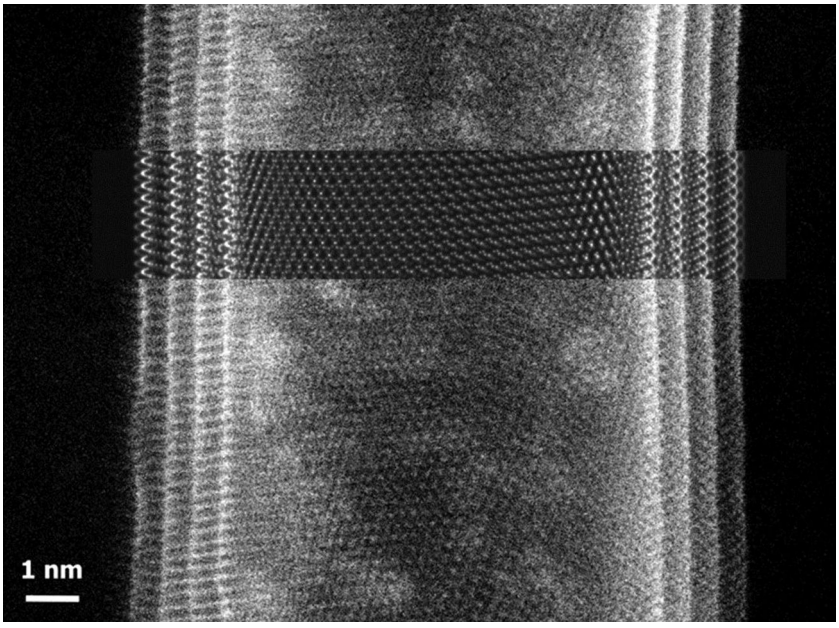


Figura 4-16. Fulereno inorgánico. Nanotubo de WS2 (7)

Fulerenos inorgánicos

Estos compuestos presentan estructuras similares a las de los nanotubos de carbono pero están fabricados a partir de disulfuro de wolframio (en la figura 4-16 puede apreciarse un nanotubo de WS_2) o de disulfuro de titanio (no son exactamente fulerenos pero se llaman así por la similitud de estructura). Estos materiales presentan un grado extremadamente alto para absorber choques y se utilizan para aplicaciones en las que se requiera alta resistencia al impacto, tales como protección balística para el personal, chalecos antibala, blindajes de vehículos, escudos para antidisturbios, cascos y recintos de protección. Estos materiales pueden llegar a tener el doble de resistencia al impacto que los materiales actuales de blindaje con mejores prestaciones (carburo de boro o de silicio) y hasta cinco veces más que el acero. Y todo esto, como siempre, con menos peso.

Acero transparente

La Universidad de Michigan ha desarrollado un material plástico compuesto tan resistente como el acero pero mucho más ligero y transparente. Se fabrica utilizando capas de nanocerámicas y polímeros solubles en agua, embebidos en un aglomerante blanco. En futuros desarrollos se conseguirán materiales más ligeros y blindajes más resistentes tanto en protección balística para combatientes y policías como en planchas de blindaje para vehículos acorazados y blindados.

Nanoblindaje líquido

Está basado en fluidos similares a los geles, en los que una de las caras del material contiene un número elevado de nanopartículas de silicio. El material se aplica sobre el metal o el textil. La superficie resultante tiene capacidad ante impacto de bala. Cuando el proyectil impacta sobre el material, las nanopartículas se ven sometidas a presión y se produce su apelmazamiento con lo que el líquido se transforma en un material compuesto muy duro. En su estado gel la flexibilidad del blindaje es muy elevada.

Energía

En el campo de la energía, las NT van a tener una importancia relevante. Para el combatiente del futuro la necesidad de poder transportar generadores de energía y sistemas de almacenamiento suficientemente miniaturizados, con los que alimentar los dispositivos electrónicos y dar servicio a todas sus funcionalidades, es crítica. Esto exige el desarrollo

de fuentes de energía transportables y sistemas de almacenamiento, de poco peso y tamaño. Los desarrollos más importantes, que se están llevando a cabo y que analizaremos más detenidamente en el punto correspondiente al subsistema fuente de alimentación (ver apartado **PROTECCIÓN PERSONAL**, subapartado ***Tecnologías del combatiente***), son los siguientes: células solares flexibles para recarga de baterías, microcélulas de combustible que funcionan con diésel o biocombustibles; baterías micronucleares, de larga duración, recolectores de energía, a partir de las vibraciones por ejemplo, para aplicaciones en las que se requieran consumos pequeños.



Figura 4-17. Panel flexible con nanocélulas solares (Fuente: Recycled goods)

Para plataformas terrestres (vehículos, blindados, acorazados, sistemas de armas, [...]), el foco está puesto en el desarrollo de sistemas de generación de energía más eficientes y ligeros y que a la vez permitan reducir su firma térmica, radar y acústica. En este sentido, se están desarrollando motores híbridos, eléctricos y de combustión más eficiente que reduzcan el consumo y la firma multiespectral. Además, se están desarrollando células de hidrógeno, así como microcélulas de combustible y baterías micronucleares de especial aplicación para vehículos no tripulados como los USV o robots.

Para plataformas navales se está trabajando con el mismo objetivo buscando cascos hidrodinámicamente más eficientes, motorizaciones más eficientes y estructuras más ligeras y con materiales que disminuyan la

firma multiespectral de la plataforma. Los buques actuales de las Armadas desarrollan el concepto de barco totalmente eléctrico y de baja firma. Por tanto son de aplicación los desarrollos de células de combustible, principalmente de hidrógeno, así como los desarrollos de microcélulas de combustible y baterías micronucleares para los UUV.

En el caso de plataformas aéreas los desarrollos van por la misma línea que en los casos anteriores. No obstante, deben reseñarse algunos específicos de aplicación en misiles, que ya se han comentado anteriormente, como pueden ser el empleo de materiales energéticos nanocompuestos y microcohetes para la propulsión y control en la etapa final de misiles y armas hiperveloces.

El objetivo sigue siendo el mismo para plataformas espaciales (satélites) en las que los desarrollos anteriores junto con el desarrollo de células solares fotovoltaicas muy eficientes de bajo peso y flexibles, serán de aplicación en satélites pequeños.

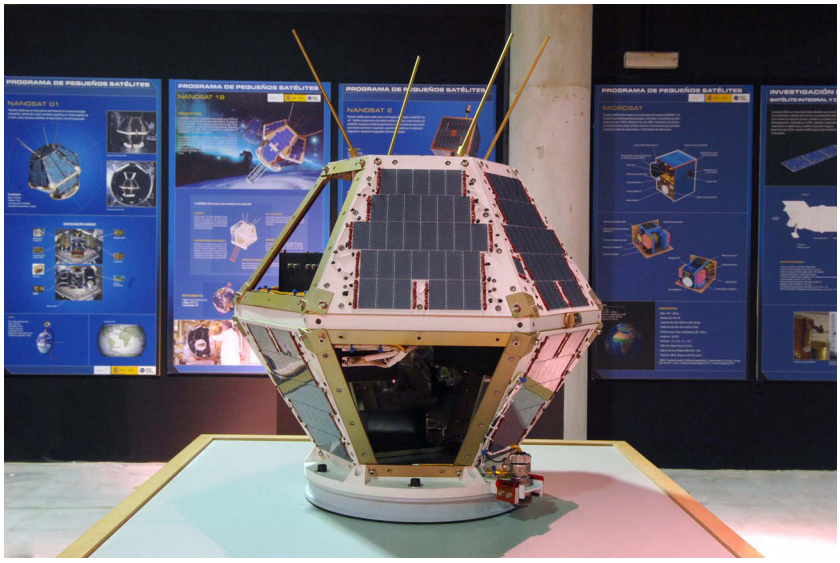


Figura 4-18. Nanosat del INTA (Fuente: INTA)

Plataformas terrestres

El futuro de los vehículos blindados y acorazados se va a ver muy influenciado por los nuevos materiales que está aportando la NT.

El gran reto para las plataformas terrestres es conseguir una mayor aerotransportabilidad (en los aviones de transporte C-130 o A-400M). Los nuevos materiales permitirán reducir el tamaño y disminuir el peso de las plataformas terrestres y por tanto podrán aerotransportarse un número mayor de vehículos.

Además, al futuro carro de combate se le requerirá que sea más rápido y letal en el campo de batalla. En el seno de la OTAN se está debatiendo si el carro de combate del futuro debe estar dotado de una torre con un cañón de gran calibre, configuración actual, o bien de lanzadores de micro misiles crucero. Esta decisión y el empleo de nuevos materiales para el blindaje, tendrán un impacto directo sobre los requisitos de aerotransportabilidad, movilidad, letalidad y protección balística. Con los nuevos materiales nanoestructurados, se están desarrollando cubiertas ligeras de nanoblindaje y planchas de nanocompuestos, para cubrir las partes vitales de los vehículos de combate blindados y acorazados. También se están diseñando blindajes con reo fluidos magnéticos. Además, las capas exteriores del vehículo estarán provistas de un revestimiento para la absorción y desactivación de agresivos químicos y biológicos (QB). En el largo plazo, los blindajes estarán fabricados a base de polímeros de nanopuntos, sintonizables en distintos rangos de frecuencia, de manera que pueda conseguirse el enmascaramiento multiespectral. Los nanomateriales también pueden emplearse en otros sistemas y microsistemas vitales de la plataforma como pueden ser la munición, el radar (micro-nano radares), las pantallas de presentación de datos en la torre de combate, los sensores de condición de los distintos sistemas del carro (motor, ruedas cadenas, [...]) que faciliten las operaciones de mantenimiento, etc.

Los vehículos actuales ya se están diseñando para cumplir requisitos de furtividad rompiendo las formas características y utilizando nanorecubrimientos que reduzcan las firmas visible (VIS), infrarroja (tanto en el in-



Figura 4-19. Vehículo 8x8. Patria AMV (Fuente: Patria)

frarrojo cercano NIR como en el térmico TIR), magnética y radar del vehículo. Para más detalles ver en este apartado, el subapartado ***Materiales***.

En definitiva, los futuros vehículos de combate serán más ligeros y multipropósito, podrán pilotarse por control remoto o disponer de autopiloto, serán de bajo consumo, seguros y fiables, ofrecerán protección balística frente a las amenazas esperadas en el campo de batalla y elevado confort a las tripulaciones, dispondrán de los sensores necesarios para llevar a cabo tareas de detección, reconocimiento e identificación de objetivos, así como labores de vigilancia del campo de batalla, reconocimiento e inteligencia (ISTAR), dispondrán de los sensores de condición adecuados que faciliten el sostenimiento, y sobre todo estarán dotados de un potente armamento que les conferirá una elevada letalidad.

En cuanto a las TIC, los vehículos de combate futuros dispondrán de las capacidades de posicionamiento y señalización, por GPS, de seguimiento, designación de objetivos e identificación, mediante sistemas de RFID de vigilancia y otras capacidades ISTAR a base de microradares, microbolómetros o sensores acústicos, estos últimos para la detección de francotiradores. El vehículo operará en una red externa distribuida inalámbrica, la red interna de sensores será también inalámbrica y estará conectada a la red externa. Dispondrá de un sistema de comunicaciones direccional por radiofrecuencia. La direccionalidad se conseguirá mediante un conjunto de microantenas de bajo consumo y firma radar reducida.

Con las NT, los vehículos de combate podrán disponer de sensores avanzados y capacidades de comunicación inalámbricas que podrán ser utilizadas para que el vehículo sea guiado por control remoto a grandes distancias. En base a estos nuevos sensores los vehículos de combate podrán fusionar los datos procedentes de la red integrada de sensores y procesar la información. Esta capacidad se traducirá en inteligencia sobre el campo de batalla y permitirá además el control remoto de la plataforma. En definitiva, se podrá disponer de vehículos de combate, autónomos y no tripulados. Las NT son esenciales para la miniaturización de los sistemas, disminuyendo el peso, tamaño y consumo, lo que es necesario para el guiado y control a larga distancia.

El avance de la nanoelectrónica y de la capacidad de procesado de los ordenadores está permitiendo el desarrollo de microrobots artillados (ver figura 4-2) dotados de múltiples sensores y diverso armamento que pueden utilizarse para labores de vigilancia, reconocimiento y apoyo logístico en zonas hostiles, principalmente en el combate urbano.

La miniaturización de sensores y los avances en la inteligencia artificial ha permitido el desarrollo de interfaces cerebrales (ver apartado **PROTECCIÓN PERSONAL**, subapartado ***Tecnologías del combatiente***, punto *Sistemas Ss 6* «*Sostenimiento*» *y Ss7* «*Preparación*») que pueden implantarse en pequeños mamíferos o insectos convirtiéndolos en robots

controlados remotamente. Suelen emplearse de manera colaborativa reduciendo el coste humano en determinadas operaciones. Ya se utilizan ejércitos de robo-ratas para localización de personas en grandes catástrofes o enjambres de grandes escarabajos con implantes neuronales.

En cuanto a las motorizaciones, como ya se ha dicho el objetivo es conseguir plantas de potencia más eficientes y de baja firma (ver en este apartado, el subapartado ***Energía***) para lo que se están desarrollando motores híbridos, eléctricos y de combustión más eficiente que reducen el consumo y la firma así como células de combustible principalmente de hidrógeno.

Plataformas navales

Al igual que en el caso de las plataformas terrestres y aéreas, los barcos del futuro, serán cada vez más ligeros, sus estructuras serán multicasco frente a las estructuras monocasco actuales, su consumo de energía será muy bajo comparado con los estándares actuales, su diseño minimizará la firma multiespectral y dispondrán de blindajes adecuados para la protección de sus tripulaciones lo que se compatibilizará con un interior muy confortable. Dispondrán de una red de sensores ubicados a lo largo de toda la estructura, que proporcionará un nivel muy alto de inteligencia para el control automático y las labores de mantenimiento. Asimismo, estarán dotados de una elevada capacidad para la detección y vigilancia, especialmente de misiles antibuque (rozaolas) y de misiles balísticos.



Figura 4-20. Sea shadow Stealth ship (Fuente: Wikipedia commons)

El empleo de las NT en la construcción de barcos va a permitir disponer de cascos y estructuras más ligeras mediante el uso de plásticos nanocompuestos de alta resistencia que irán sustituyendo progresivamente a las aleaciones metálicas empleadas en la construcción de barcos y que además permitirán disminuir su firma multiespectral. Se emplearán masivamente materiales inteligentes, con sensores integrados (componentes *built-in)* y sensores de carga, para monitorizar el estado de la estructura y de los distintos subsistemas del barco y con capacidad de autoreparación. Asimismo se construirán utilizando estructuras activas que permitan adaptarse a distintas condiciones de trabajo como por ejemplo, estructuras hidrodinámicas adaptativas, estructuras con posibilidad de cambio «flexible a rígido», etc. Se utilizarán pinturas y cubiertas que absorban la radiación radar y se avanzará hacia el empleo de los metamateriales a distintas frecuencias para conseguir la invisibilidad (*cloaking*) en las bandas de interés del espectro electromagnético.

En lo relativo a las TIC, los barcos del futuro estarán equipados con sensores de posicionamiento y señalización que pueden ser: por GPS; por medida del sonido mediante un sensor de burbuja de aire nanoscópica; mediante sensores acústicos para la navegación submarina; giróscopos y sensores de guiado; y sensores para el trazado y seguimiento de blancos. Al igual que el resto de plataformas, dispondrán, de sensores de identificación por radiofrecuencia RFID con capacidad de identificación remota, así como de microradares y microsensores acústicos para labores de vigilancia.

El desarrollo de sensores avanzados y de las comunicaciones inalámbricas, consecuencia del avance imparable de las NT, ya permite el guiado a larga distancia de cualquier vehículo en el campo de batalla apoyándose en redes de sensores distribuidas. Los microsensores diseminados por toda la estructura y los distintos subsistemas del barco, tendrán capacidad para recoger, procesar y distribuir la información, proporcionando de esta manera, la inteligencia necesaria para el control remoto y el guiado no tripulado a larga distancia. Estos desarrollos se enfocan principalmente a la construcción de sistemas autónomos y no tripulados tanto de superficie como submarinos. Las NT son cruciales para minimizar el tamaño, el peso y el consumo de energía, necesario para el control remoto a larga distancia.

En cuanto a la generación de energía los esfuerzos se están focalizando en el desarrollo de motores y sistemas de energía cada vez más ligeros, más eficientes y con emisiones reducidas que minimicen su firma multiespectral, principalmente radar, optrónica (VIS e IR) y acústica. Estos desarrollos serán de aplicación en el barco del futuro que responderá al concepto «todo eléctrico, baja firma». También se está trabajando en el desarrollo de células de hidrógeno cada vez más potentes. Para vehículos de control remoto, tanto de superficie como submarinos, serán de aplicación los desarrollos de microcélulas de combustible.

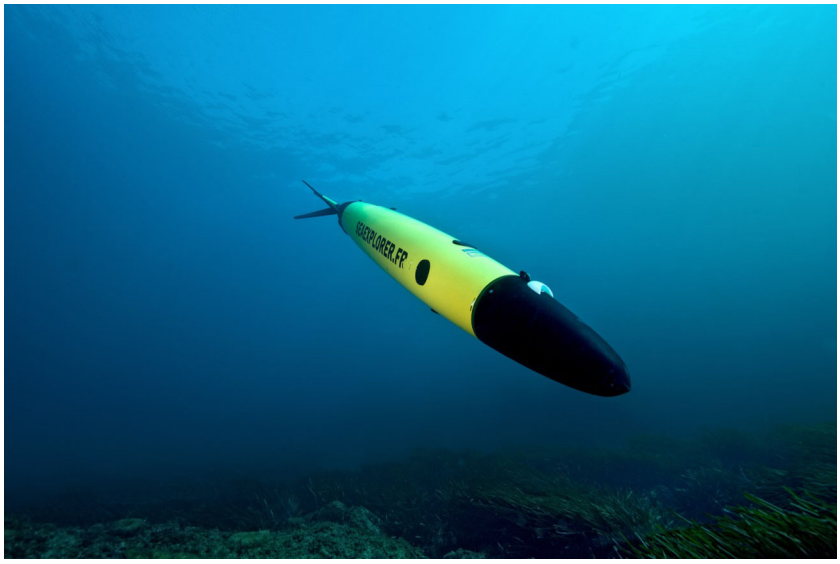


Figura 4-21. Imagen del AUV «SeaExplorer glider» (Fuente: Wikipedia commons)

En el campo de los UUV ya existen desarrollos, como el «Centinela (Sentry)» estadounidense, dotados de un sistema de guiado que permite su operación remota y autónoma preprogramada, en misiones de vigilancia de aguas profundas. El sistema tiene capacidad de navegación y toma de decisiones, apoyándose en el fondo marino. Para ello dispone de una brújula magnética, de un sistema de triangulación en base a la señal procedente de balizas submarinas para navegación a larga distancia, un sistema de guiado inercial muy sofisticado, así como sensores acústicos para navegación a menos de 200 m del fondo marino y que le va a permitir monitorizar su posición y velocidad con enorme precisión. Su forma hidrodinámica le permite descender a gran velocidad y le proporciona gran estabilidad cuando atraviesa fuertes corrientes marinas. Está dotado de más de 1.000 baterías de ion litio similares a las de los ordenadores portátiles aunque adaptadas para condiciones de presión extrema. Actualmente tiene una autonomía de 18 horas, un radio de acción de 58 km y capacidad de navegar a más de 5.000 m de profundidad.

Plataformas aéreas

Los aviones tripulados del futuro, helicópteros, UAV y misiles serán cada vez más ligeros, con una firma radar, visible e IR cada vez más reducida, tendrán una elevada maniobrabilidad y dispondrán de inteligencia para el guiado y control automático y para facilitar las operaciones de mantenimiento. Las NT introducirán avances notables en los sensores y en los sistemas de armas. Se desarrollarán sensores con elevada capacidad

para detección de blancos y vigilancia (operaciones ISTAR). Las aeronaves tendrán la capacidad de procesar la información de los sensores y actuar adaptando su forma y estructura con propósitos aerodinámicos o de enmascaramiento. Se utilizarán materiales avanzados de alta resistencia y bajo peso que permitirán disponer de células aerodinámicas muy ligeras. También se emplearán materiales resistentes al fuego, materiales inteligentes, con memoria de forma y capacidad de autoreparación. Se emplearán materiales con índice de refracción variable para el enmascaramiento activo así como recubrimientos de protección para determinadas zonas del espectro electromagnético. Se desarrollarán combustibles más eficientes y propulsantes más energéticos.



Figura 4-22. F-117 Stealth (Fuente: Wikipedia commons)

Al igual que hemos mencionado en los párrafos anteriores, las NT aportarán nuevas funcionalidades en el campo de los materiales y blindajes. A base de plásticos nanocompuestos de alta resistencia y estructuras biomiméticas se conseguirá la resistencia estructural adecuada para permitir el vuelo a muy alta velocidad y elevada maniobrabilidad, así como una firma multiespectral reducida.

Una de las características fundamentales de las aeronaves de combate es la furtividad. Para conseguir reducir su firma multiespectral e intentar lograr un enmascaramiento casi perfecto, aumentando por tanto la probabilidad de supervivencia de la plataforma, se utilizan varios desarrollos de las NT. Cabe destacar el empleo de los metamateriales, materiales con un índice de refracción negativo, analizados en el capítulo 3, que

harán «invisibles» a la plataforma en la banda de trabajo del metamaterial. Ya se han desarrollado metamateriales en la bandas del radar, existen prototipos para el visible, desarrollos para el enmascaramiento de la firma acústica y para minimizar las perturbaciones del campo magnético terrestre. Por otro lado, las estructuras de las aeronaves de combate se cubren con materiales de absorción radar (RAM) para minimizar su firma radar. Existen pinturas a base de esferas de carbonilo de hierro o ferrita que transforma la radiación radar en calor. También se están desarrollando materiales a base de hojas de polímero de neopreno con granos de ferrita, con carbón negro o nanotubos de carbón embebidos en una matriz polimérica que se diseñan con unas propiedades electromagnéticas tales que la radiación inicialmente reflejada por el material es igual en magnitud pero de fase opuesta a la suma de todas las radiaciones emergentes como resultado de las reflexiones internas en el material. Otro desarrollo en el campo de la absorción radar es el de los polímeros de líquido iónico en el que los cationes y aniones están separados y que tienen una gran capacidad para la absorción de microondas.

Las aeronaves del futuro estarán dotadas de sensores de carga y de monitorización de la condición, sensores *built-in*, que permitirán la autoreparación y recuperación de zonas dañadas. También dispondrán de estructuras adaptativas y de forma que les permitan adaptarse a distintas condiciones de vuelo y modificar su enmascaramiento en función de la zona en la que estén operando (recubrimientos para absorción del radar, enmascaramiento térmico, [...]).

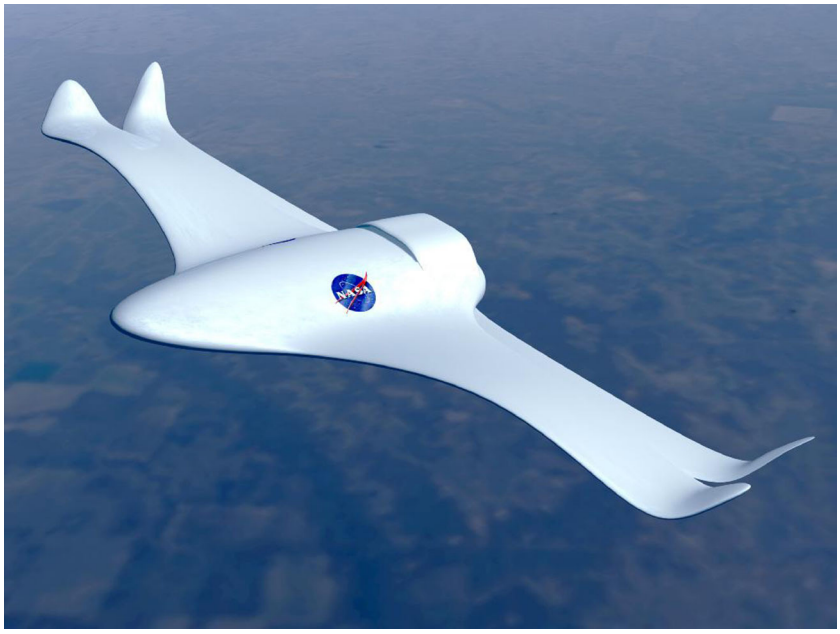


Figura 4-23. Morphing airplane (Fuente: NASA)

En relación con el desarrollo de nuevos motores, el reto fijado es conseguir motores de menos peso y con un mayor rendimiento energético pero que a su vez presenten una firma multiespectral menor que los motores actuales. Para ellos se extenderá el uso de los materiales energéticos nanocompuestos para la propulsión de misiles, así como el uso de microcélulas de combustible y microcohetes para el guiado final de misiles (pif-paf).

En las últimas décadas, el desarrollo de los UAV ha sido espectacular. De cara al futuro se espera que estas aeronaves no tripuladas, que hasta ahora habían sido diseñadas para misiones de vigilancia, se las dote de sistemas que les capaciten para otros tipos de misiones. Estarán dotadas de microcohetes para movimientos precisos, de motores de turbina de gas inteligentes con sensores para la toma de aire y control del flujo, de sistema de guiado con acelerómetros y giróscopos MEMS, de una estructura diseñada con formas disruptivas para la disminución de firma y cubierta con materiales absorbentes al radar. Se utilizarán aleaciones con memoria de forma para modificar su perfil aerodinámico adaptándolo a las condiciones de vuelo. La estructura se fabricará a base de plásticos que se reforzarán con nanocompuestos para componentes y zonas de la estructura que requieran elevada resistencia. Los enfibrados de carbono, darán paso a los nanocomopuestos a base de nanotubos de carbono o de nanofibras que reforzarán a los compuestos plásticos. También, se utilizarán materiales de alta resistencia del tipo seda de araña. En la estructura se integrarán antenas de RF, sensores ópticos para controlar posibles daños estructurales y sistemas para la descongelación del borde de ala.



Figura 4-24. Micro UAV táctico (Israel) (Fuente: Bluebird Aerosystems)

En definitiva, se podrá disponer de micro-UAV para reconocimiento y ataque, misiles con alta precisión de guiado, aeronaves que cambian de forma y aviones de combate con menor peso y mayor maniobrabilidad.

Plataformas espaciales

Las NT y los microsistemas, han permitido el desarrollo de componentes miniaturizados para el uso en satélites muy pequeños con una notable reducción de peso y tamaño respecto a los satélites actualmente en servicio. El espacio para la carga útil se incrementa aportando mayor valor a la misión. Por satélites pequeños se entienden aquellos clasificados como: mini (<500 kg), micro (<50 kg), nano (<10 kg) y pico (<1 kg) satélites.

Otro factor a mejorar es la fiabilidad. Los satélites se diseñan para fiabilidad al tener una vida útil de al menos 15 años sin mantenimiento. El desarrollo de materiales estructurales con capacidad para incorporar sensores de condición y con capacidad de autoreparación es fundamental. Asimismo, la fiabilidad puede aumentarse mediante la redundancia lo que se consigue, como veremos a continuación, con el empleo de los enjambres o constelaciones de satélites. Los futuros satélites, serán en consecuencia, mucho más baratos de fabricar y de poner en órbita al ser más ligeros y de menor tamaño.

La miniaturización de los satélites va a permitir el lanzamiento de varios satélites de la misma familia constituyendo lo que se llama una constelación de satélites, que se caracteriza por estar todos ellos conectados, de forma inalámbrica, compartiendo información. Con una red de sensores distribuida, en la que cada satélite actúa como un sensor, se consiguen mejoras funcionales (mejores capacidades de detección, mayor precisión, vuelo en formación, etc.), mayor fiabilidad (redundancia) y menor coste que con el lanzamiento de un satélite grande con las mismas prestaciones. Cada satélite, estará dotado de su propia fuente de energía, normalmente a base de paneles solares, de su sistema de sensores, de un sistema de posicionamiento y control de órbita y actitud, para lo que dispondrá de un sistema de propulsión a base de microcohetes y de sensores de navegación, y finalmente transportará, asimismo, su propia carga útil. Se espera que la tendencia al lanzamiento de satélites cada vez más pequeños siga incrementándose en los próximos años. Las constelaciones o enjambres de satélites tienen una aplicación militar muy clara como sistemas ISTAR de largo alcance para misiones de observación, inspección, comunicaciones, etc., estando conectados en tiempo real a los sistemas de procesado y distribución de la información y al sistema de control. Estos satélites pueden proporcionar imágenes de muy alta resolución. Pueden estar, incluso, dotados de armamento para misiones de defensa antimisil y antisatélite. Estos satélites «espía», con capacidad de destrucción pueden adherirse a satélites grandes sin ser vistos y proce-

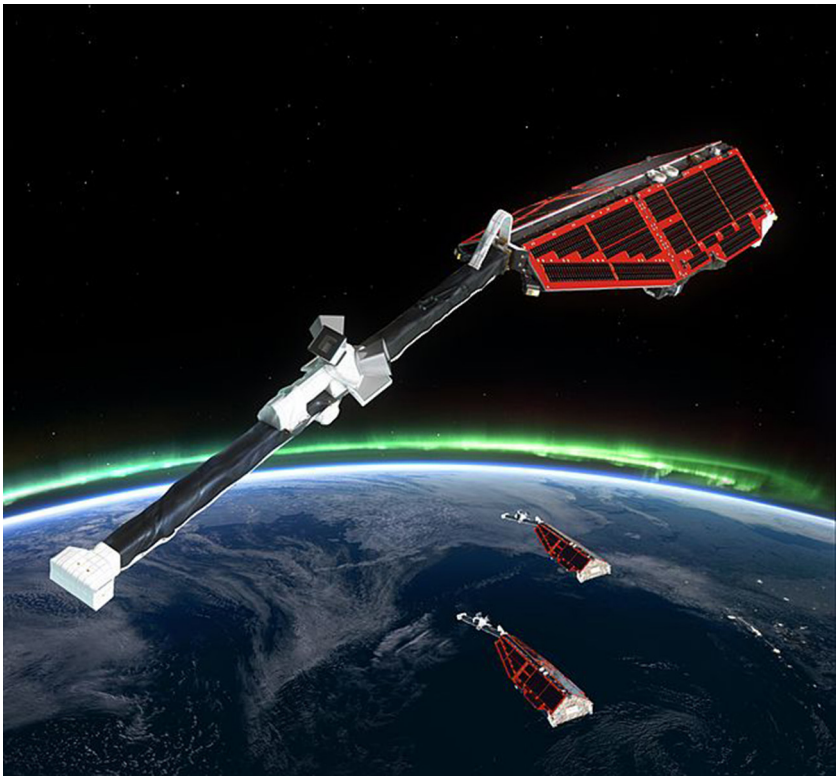


Figura 4-25. Enjambre de tres satélites para la medida del campo magnético terrestre (Fuente: ESA)

der a su destrucción total o parcial interrumpiendo sus comunicaciones o sus observaciones de la tierra, en el caso de tratarse de satélites espías.

Las NT están revolucionando el campo de las plataformas espaciales. La aparición de los nanomateriales con una notable reducción de peso para las mismas prestaciones estructurales está disparando su empleo en los pequeños satélites. Así, el empleo de los nanocompuestos de alta resistencia para la reducción de peso de las estructuras, la fabricación de los sistemas de despliegue y de los actuadores, o el uso de los materiales en la construcción de paneles solares avanzados, o el empleo de materiales inteligentes para el control estructural y para fuentes de energía más eficientes, o de propulsantes más energéticos, son alguna de las principales aplicaciones.

En cuanto a las cargas útiles (*payload*), al tratarse de satélites miniaturizados estarán basadas en microsistemas que permitan su integración con el resto de los subsistemas del satélite. Tecnologías maduras a base de estos microsistemas, permiten ya disponer de sensores para misiones de comunicación, a base de sensores de radiocomunicación; de ob-

servación de la tierra, mediante sensores de posicionamiento, guiado y seguimiento basados en microradares, microcámaras, microbolómetros y ópticas de alta resolución; misiones científicas para lo que estarán dotados de microsensores de rayos X, microbolómetros, interferómetros ópticos y de radiofrecuencia, cámaras y «*lab-on-chip*», etc. También será importante el uso de la tecnología fotónica integrada (chips fotónicos) como parte de los llamados «transpondedores fotónicos» que sustituirán a los actuales transpondedores de RF que componen las actuales cargas útiles. A modo de ejemplo, la empresa DAS Photonics está desarrollando dichos transpondedores fotónicos en el ámbito de la ESA y con diversos integradores de satélites internacionales. Dichos transpondedores fotónicos permiten una reducción significativa de peso y tamaño, comparados con los de RF, lo que permite desarrollar satélites más pequeños y con una capacidad a bordo superior al terabit por segundo.

En cuanto a las fuentes de energía y sistema de almacenamiento, las NT han permitido el desarrollo de nanocompuestos y materiales de alta energía, células solares foto-voltaicas flexibles, de bajo peso y muy eficientes y, para aplicación en picosatélites, el desarrollo de microcélulas de combustible y de microcohetes para el control de actitud y órbita del satélite.

Protección personal

El combatiente del futuro es uno de los sistemas que más se va a potenciar con el desarrollo de las NT. El gran reto para el sistema, es cumplir con el requisito OTAN 25/24 por el cual, el combatiente debe ser capaz de combatir durante 24 horas, sin requerir apoyo logístico, con un peso máximo de 25 kilos. Este reto está aún bastante lejos de conseguirse actualmente y obliga a avanzar hacia la miniaturización de los distintos subsistemas. Se entiende que el sistema combatiente necesite de las NT para reducir el peso por unidad de volumen en los distintos subsistemas y componentes, así como el consumo de energía para funciones específicas. Se aprovecharán las propiedades de las nanopartículas y nanofibras, que presentan mayor área superficial, para incorporar sensores o para proporcionar a los textiles del uniforme mayor capacidad de absorción, lo que es fundamental en ambiente NBQ. El uniforme estará tejido a base de estructuras multifuncionales en la que se integrarán distintas funciones mecánicas, optoelectrónicas, químicas y biológicas, y hará las veces de interfaz entre el combatiente y el ambiente. El combatiente del futuro será muy letal, tendrá capacidad de auto-apoyo, estará equipado con subsistemas que le proporcionarán la inteligencia requerida para cada situación de combate y estará dotado de protección balística y NBQ.

Las NT permitirán obtener productos que resuelvan las necesidades del combatiente en los campos de la protección balística y NBQ, del acondi-

cionamiento medioambiental y refrigeración, del enmascaramiento, de la integración de sensores, de la conciencia situacional y de la vigilancia y control del estado físico y emocional del individuo.

Esta AAF engloba todas aquellas funciones relacionadas con la protección del combatiente ante todo tipo de amenazas, incluidas la amenaza NBQ y los artificios explosivos improvisados o IED. Asimismo, en esta Área se incluyen las tecnologías orientadas a la detección, identificación y neutralización de este tipo de amenazas.

A lo largo de este punto, vamos a analizar la aplicación de las NT en las tres LAF del Área de Protección Personal y que son: lucha contra IED; protección NBQ; tecnologías del combatiente. Esta última se analizará siguiendo la organización funcional, en siete subsistemas, propuesta por el programa combatiente del futuro español, es decir: Ss1 armamento; Ss2 fuente de alimentación; Ss3 eficacia de fuego; Ss4 información y comunicación; Ss5 supervivencia; Ss6 sostenimiento y Ss7 preparación.



Figura 4-26. Combatiente del futuro español (Fuente: Ministerio de Defensa)

Lucha contra IED

Los campos de minas y los artificios explosivos improvisados (IED) constituyen uno de los mayores retos para el éxito de las operaciones en el combate moderno. De todos es conocido el problema que al comienzo de la guerra, tuvieron las tropas multinacionales desplegadas en Afganistán con este tipo de artificios. Los combatientes deben poder actuar con éxito contra estos dispositivos lo que supone disponer de capacidad para la detección, la exposición del dispositivo (por ejemplo cavando y sacándolo a la superficie, en el caso de una mina enterrada) y la neutralización. La detección y desmantelamiento de los campos de minas antipersonal, es una de las tareas más difíciles en los conflictos terrestres actuales y que aún está lejos de ser resuelta.

El papel de las NT en este campo es crítico. Se utilizarán estructuras cuánticas y tecnologías de matriz para la fabricación de microchips que permitan el desarrollo de sistemas de detección de minas basados en generadores de microondas cada vez más pequeños, potentes y capaces. Las estructuras cuánticas se emplearán, asimismo, en la fabricación de láseres de alta potencia más pequeños que puedan destruir o al menos desactivar los IED y las minas terrestres a distancia. Las NT también pueden aplicarse para la fabricación de una nueva generación de minas más seguras y más pequeñas, pero con mayor capacidad explosiva y con subsistemas que permitan minimizar daños colaterales (ver apartado **ARMAMENTO**, subapartado ***Municiones complejas***).

Para la detección, los sistemas de microondas, o radar de penetración terrestre (geo-radar), suelen utilizarse en combinación con sistemas de identificación del tipo redes neuronales. Estos sistemas mixtos se emplean en zona de operaciones para la detección e identificación de IED enterrados en caminos y carretera, marcando el lugar donde se ha localizado el artefacto explosivo mediante un spray de pintura para, posteriormente, proceder al desenterrado y detonación. Van montados sobre vehículos antiminas y tienen capacidad para explorar una zona semicircular de 180º a una velocidad tal que permite al convoy avanzar al paso de un combatiente. Tiene capacidad para la detección no solo de dispositivos metálicos, estado del arte de la tecnología actual, sino también de artificios plásticos.

Otro sistema empleado en la detección de IED y minas terrestres, es la resonancia cuadripolar nuclear (NQR), técnica de espectroscopía de RF que sirve para la detección de sustancias químicas en fase sólida y que combina las capacidades de localización espacial del geo-radar o de los detectores de metales, con la capacidad de detección específica que proporcionan las técnicas de detección química. Ya hay vehículos de desminado con estos sistemas instalados. Suelen utilizarse junto con los vehículos de limpieza de campos minados. Se están desarrollando sistemas portátiles

de detección de minas que puedan ser transportados por el combatiente individual. El desarrollo de la tecnología NQR, es el único avance reseñable en los últimos 10 años en la lucha contra IED y campos minados.

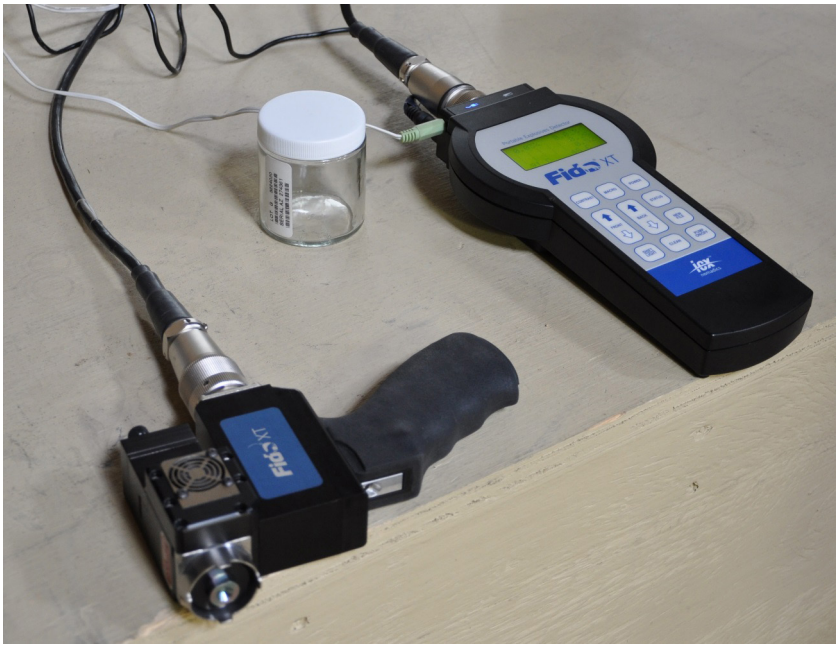


Figura 4-27. Equipo portátil para la detección de explosivos FIDO (Fuente: FLIR Systems)

Otra tecnología aplicable es la que utilizan los sistemas FIDO (empresa canadiense), familia de detectores de explosivos portátiles y de gran precisión para cantidades de explosivos de algo más de 1 kg, desarrollados por *FLIR (Forward Looking Infra Red) Systems Inc*. y resultado de un proyecto de *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA). Utilizan polímeros amplificadores de fluorescencia capaces de detectar trazas de explosivo en partes por cuatrillón (ppq=10^{-9} ppm, notación anglosajona). Este nivel de detección es similar al olfato de los perros mejor entrenados, que es el método más efectivo hasta la fecha para la detección de explosivos. Los equipos FIDO detectan tanto vapores de explosivo como partículas sin necesidad de introducir ninguna modificación en el ambiente. Han generado grandes expectativas y se prevé su instalación en los equipos de detección de explosivos. A nivel nacional, ya hemos mencionado el proyecto EDA-NANOCAP, liderado por DAS Photonics, para la detección de trazas de TNT en IED.

Protección NBQ

Para el combatiente es esencial poder disponer de una alerta temprana que le avise cuándo se encuentra sometido a un ataque biológico, quí-

mico o nuclear, o en presencia de una amenaza NBQ. Para la detección inmediata de la amenaza y generar una respuesta para su neutralización, el combatiente debe transportar un sistema con capacidad para detectar, al menos, los agresivos más comunes (gas VX, gas somán, gas mostaza o lewisita). Estos sensores estarán, en un futuro próximo, integrados en el uniforme formando parte o no del tejido. Estarán formados por estructuras de nanofibras funcionalizadas con capacidad para detectar, absorber y desactivar agentes biológicos y químicos, y para bloquear el sistema de ventilación del uniforme, cuando se requiera, creando así una estructura adaptiva para la protección QB.

Los sensores QB futuros se integrarán, junto con los sensores de parámetros vitales del combatiente, en una tarjeta semiactiva o pasiva, del tamaño de una tarjeta de crédito, que se comunicará de forma inalámbrica con el *Personal Digital Assistant* (PDA) o el reloj del soldado. Se fabricarán distintas tarjetas con diferentes configuraciones de sensores que podrán colocarse o bien en el uniforme o bien en el casco del combatiente. A modo de ejemplo, se podría combinar un chip de silicio para RFID, con una antena de radiofrecuencia y un nano-biosensor en una misma tarjeta colocada en el casco inteligente del combatiente.

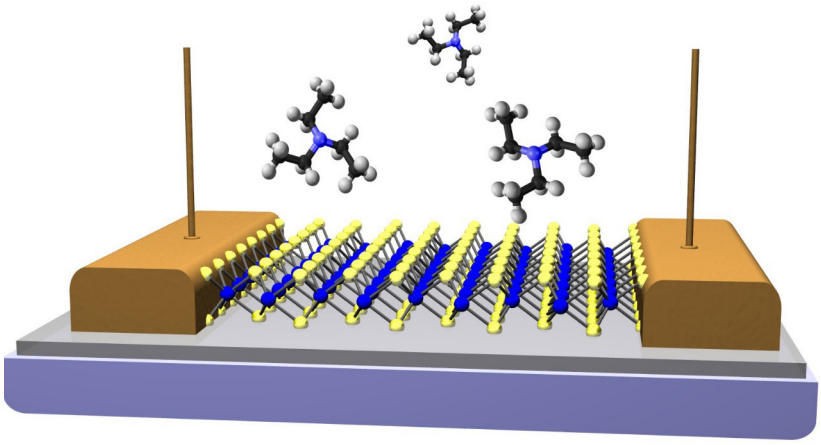


Figura 4-28. Material monocapa para la detección de agentes de gas nervioso (Fuente: US Naval Research Laboratory)

El uniforme, del que se hablará más extensamente en el punto *Subsistema Ss5* «supervivencia» (ver el siguiente subapartado ***Tecnologías del combatiente***), además de protección balística y otras importantes funcionalidades, debe proporcionar al combatiente protección QB. El tejido del uniforme se cubrirá, para ello, con láminas de nanoarcillas dispersas, de manera que cada micra de espesor de la capa de recubrimiento QB estará formada por cientos de estas láminas. Este recubrimiento

obliga a las moléculas tales como el oxígeno o las moléculas aromáticas constituyentes de los agresivos QB, a seguir un camino largo y tortuoso constituyendo una barrera muy eficiente del sustrato principal del uniforme. En el mercado pueden encontrase tejidos que presentan una permeabilidad a este tipo de partículas de hasta 100 veces menor que el tejido principal con el que está fabricado el substrato del uniforme. Además, este recubrimiento es transparente y por tanto muy útil para ser utilizado en envases y paquetes ya que puede verse a través de él. También se utiliza para fabricar guantes y trajes de protección en laboratorios e industria química, presentando grandes ventajas como pueden ser: menor espesor, lo que permite mayor habilidad en las manipulaciones manuales; mayor comodidad; mejor protección química y menos inflamabilidad.

Tecnologías del combatiente

El combatiente del futuro se caracterizará por su capacidad de supervivencia basada en una alta movilidad, elevada protección, capacidad de auto-apoyo, inteligencia, conciencia situacional y gran letalidad. Estará integrado en red y dispondrá de los sensores necesarios que permitan la comunicación con sus compañeros de pelotón. Para ello, estará dotado de un PDA/teléfono móvil, de un casco inteligente con visor en el que se proyectará la información recogida por los distintos sensores, de un reloj de combate, de armamento ligero con su munición de dotación y de sensores integrados en el uniforme o distribuidos por todo el cuerpo. Tendrá capacidad de recoger y procesar e intercambiar datos a través de la red de sensores distribuida, a la que estará permanentemente conectado, y a través de ella en contacto con su mando y compañeros de unidad. Dispondrá de los sensores adecuados para conocer y transmitir en tiempo real su posición, su estado físico y mental, el estado de su equipo y de los suministros necesarios (munición, comida, energía, etc.) A través del reloj, del PDA/teléfono móvil y de los sensores distribuidos por su cuerpo será capaz de realizar funciones básicas como establecer su posicionamiento, comunicarse de manera inalámbrica, realizar labores de identificación por radiofrecuencia RFID o medir sus constantes vitales tales como el ritmo cardiaco o los niveles de deshidratación y de glucosa. Transportará la comida necesaria y las drogas/medicamentos adecuados para contrarrestar el ataque de agentes biológicos y químicos o actuar para corregir las constantes vitales fuera de rango. El combatiente será en sí mismo un nodo de la red de sensores distribuida en el campo de batalla, con capacidad para recoger, procesar y distribuir información de todo tipo a través de sus microsensores IR, microradares, sensores de gas, nano-biosensores, etc., que adecuadamente integrados, le permitirán funcionar como un sistema autónomo de inteligencia.



Figura 4-29. Combatiente del futuro alemán (Fuente: Rheinmetall)

Para poder llevar a cabo todas estas funciones, el combatiente contará con un uniforme de combate que será ligero y confortable, y le proporcionará protección balística y NBQ, mediante el uso de nanomateriales combinados con micro y nanofibras, y sensores QB integrados en nanofibras absorbentes, con capacidad de identificación, catalogación y desactivación del agresivo y su posterior descontaminación. El uniforme le protegerá contra proyectiles de distintos calibres, fragmentos de granadas, y los ya mencionados agentes biológicos y químicos. Le proporcionará además enmascaramiento multiespectral, aislamiento del exterior, ventilación y acondicionamiento térmico para adaptarse a las condiciones externas del combate.

Dispondrá asimismo de un armamento ligero, conectado a su PDA/teléfono móvil, al visor y a la red de sensores distribuida del campo de batalla. La letalidad será máxima gracias a que el combatiente dispondrá de un arma de elevada precisión, con capacidad de tiro indirecto y remoto, y que utilizará municiones optimizadas.

El casco inteligente será la plataforma principal para la ubicación de sensores y elementos de filtrado constituyendo además un elemento de protección balística importante por su blindaje a base de nanopartículas (nanotubos de carbono y nanofibras) combinadas con fibras altamente resistentes, embebidas en una matriz polimérica.

Finalmente el combatiente dispondrá de elementos auxiliares que transportará en su mochila de combate. Entre estos elementos, cabe desta-

car: un kit de supervivencia, para el tratamiento primario de heridas o ampollas y para contrarrestar el efecto de agresivos químicos y biológicos; un laboratorio miniaturizado (*lab-on-chip*) para tratar determinadas muestras que proporcionen información sobre la pureza del agua, y el ambiente que le rodea en el campo de batalla o para obtener datos sobre el estado y condición del combatiente (medida de parámetros fisiológicos vitales). Llevará además un micro-UAV que le permitirá obtener información e inteligencia que distribuirá a través de la red.

A continuación, se va a analizar en mayor profundidad, la aplicación de las NT en los distintos subsistemas del combatiente del futuro siguiendo la estructura del programa nacional «combatiente futuro».

Subsistemas Ss1 «armamento» y Ss3 «eficacia de fuego».

Los nanomateriales en forma de compuestos poliméricos se están empleando en la fabricación de las partes estructurales del armamento ligero del combatiente así como en componentes del sistema automático de fuego. Ya se han logrado materiales adaptativos para la fabricación de estructuras inteligentes que son capaces de corregir el tiro contrarrestando los movimientos no deseados que el combatiente realiza en el momento de hacer fuego. Estas estructuras se pueden colocar bien en la culata o bien en el pistolete del arma. Otras tecnologías que podrían integrarse en el futuro armamento ligero del combatiente serían: a) identificadores por radiofrecuencia RFID; b) sistemas que faciliten el reconocimiento e identificación del blanco por medio de una microcámara IR



Figura 4-30. Sistema FELIN (Fr) de tiro en desenfilada (Fuente: Wikipedia commons)

colocada en el arma o en el PDA, un microradar, un conjunto de sensores de RF para identificación, un sistema de terahercios (THz), etc.; c) comunicaciones inalámbricas con el PDA y el casco inteligente, de manera que el soldado pueda disparar el arma a distancia (concepto de tele-arma); d) diferentes tipos de municiones (cerámica conformada, proyectiles/balas blandos y de alta penetración, munición con explosivo insensible que minimice los daños colaterales, etc.; e) sensores de todo tipo como por ejemplo el *smart dust* (polvo inteligente).

El fusil de asalto tendrá capacidad de tiro indirecto y remoto. Para ello, el arma estará dotada de un disparador no mecánico que podrá activarse de forma inalámbrica desde el PDA/teléfono móvil o el casco inteligente del combatiente. Ya existen armas con capacidad para hacer fuego sin visión directa. El combatiente puede disparar desde una posición en cubierto utilizando una cámara y una pantalla LCD (ver figura 4-30). La capacidad de fuego remoto permitirá al combatiente accionar su arma a distancia e incluso, en situación comprometida, que pueda ser accionada por su mando directo o por algún compañero de combate.

En el futuro, ya se está trabajando en ello, se desarrollará el cañón láser miniaturizado que podrá ser transportado y usado por el combatiente como arma principal de combate.

Las NT aportarán a estos desarrollos reducción de peso, mediante el uso de nuevos materiales, y precisión en el apuntamiento, mediante el empleo de nuevos sensores VIS, IR y acústicos miniaturizados.

La aplicación de las NT al desarrollo de nuevas municiones, ya ha sido analizada en el apartado **ARMAMENTO**. Las nuevas municiones proporcionarán al combatiente una notable potencia de fuego lo que, junto con las capacidades de tiro indirecto, remoto, y todo tiempo (día, noche, condiciones meteorológicas adversas, etc.), conseguidas a través de la red de sensores integrados en el arma, hará del combatiente futuro un sistema de alta letalidad.

Subsistema Ss2 «Fuente de alimentación»

Este es uno de los grandes retos para las NT: «que el combatiente pueda disponer de fuentes de energía miniaturizadas, que proporcionen los niveles de potencia requeridos, con la duración necesaria para desplegar, en el cumplimiento de su misión, todas las funcionalidades posibles». Actualmente, se están desarrollando sistemas generadores de energía miniaturizados para conseguir niveles de potencia elevados (potencia de pico) pero de corta duración (supercondensadores), niveles de potencia medios y duración intermedia (baterías de capa delgada flexible) y sistemas de larga duración con niveles de potencia bajos (baterías micro nucleares y células de hidrógeno) o medios (motores de microcombustión).

El mayor esfuerzo se está realizando en la investigación de sistemas híbridos de baterías recargables por un lado y captadores de energía por otro. Así por ejemplo, para el caso de baterías solares, se combina el funcionamiento de las baterías de capa delgada flexible con una capa delgada adicional de células solares. También se están desarrollando las de carga remota por RF.

Entre las células de combustible cabe destacar las células de hidrógeno que utilizan H_2 y oxígeno gas para obtener energía a partir de la reacción básica $2H_2+O_2=2H_2O$. Esta reacción no tiene ningún problema medioambiental. La aplicación de las NT en la fabricación de estas células, contribuirá a hacerlas más pequeñas y más eficientes.

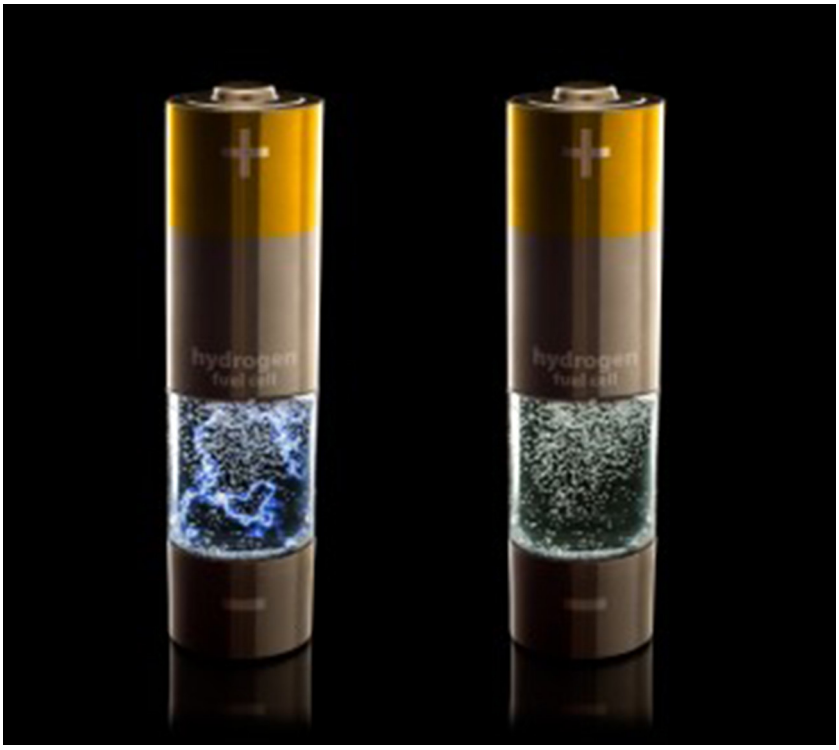


Figura 4-31. Células de hidrógeno (Fuente: SMP)

Una tecnología interesante es el desarrollo de células de metanol de larga duración. El prototipo de I+D (programa estadounidense) ha proporcionado 9 horas de duración con una envolvente de potencia de 20 W (el doble de capacidad que las baterías de los portátiles más avanzados pero con un 70% de reducción de peso). La célula de combustible utiliza cartuchos reemplazables de una mezcla de metanol, al 67%, y agua, al 33%.

El estado actual del I+D en células de combustible viene dado por los resultados muy prometedores de la investigación, en EEUU, en células

de combustible de óxido sólido (SOFC). Se han realizado pruebas de verificación y validación sobre un prototipo de 50 W fabricada con un 20% de nanomateriales (membranas, electrodos y catalizadores), que ha sido diseñado para el combatiente del futuro americano y que va a permitir que el combatiente reduzca hasta 17 kg de peso en baterías. En vez de hidrógeno, el prototipo utiliza gas propano muy fácil de encontrar y muy barato. La cantidad de nanomateriales empleados para fabricar estas células irá aumentando progresivamente. De esta manera la tecnología se irá abaratando, haciéndose cada vez más eficiente y aumentando el rango de sus aplicaciones.

Además de los generadores de energía y de los sistemas híbridos, el combatiente dispondrá de sistemas captadores de energía que «cosecharán» la energía del sol, de los movimientos del cuerpo humano y de las vibraciones medioambientales en el entorno del combatiente.

Las NT introducirán notables mejoras en la eficiencia de las células solares. Se está trabajando en el desarrollo de células solares orgánicas y de silicio, mejoradas con electrodos de nanohilos; de células solares basadas en nanotubos de carbono y fulerenos; y de células solares basadas en puntos cuánticos con un rendimiento de potencial muy elevado.

La mejor manera de aprovechar la energía residual del cuerpo humano es desarrollando captadores de movimiento colocados en la musculatura del combatiente. Se están estudiando distintas ubicaciones (tobillos, rodillas, etc.). Hay desarrollados captadores ubicados en rodilla que generan 5 W cuando el combatiente camina a un paso normal. Son dispositivos mucho más eficientes que aquellos dispositivos iniciales que se colocaban en la planta del pie y que eran básicamente generadores piezoeléctricos que proporcionaban hasta 1 W de energía caminando a paso normal (5km/h). Existe un prototipo desarrollado para el combatiente del futuro español ubicado en el museo del ITM y que emplea una pequeña dinamo escondida en el tacón de la bota del combatiente.

Finalmente se están desarrollando captadores de vibraciones que utilizan piezoeléctricos basados en nanohilos de óxido de cinc. Se trata de nanogeneradores de energía que transforman la energía de una onda acústica en una corriente directa. El nanogenerador se fabrica alineando verticalmente nanohilos de óxido de cinc y colocándolos debajo de un electrodo metálico en zigzag pero muy próximos a él. La onda acústica agita verticalmente el electrodo haciendo vibrar los nanohilos. Un convertidor piezoeléctrico transforma la energía mecánica en electricidad. Se trata de un sistema adaptable, móvil y de una relación eficacia/coste elevada, que permite obtener energía del medio ambiente y que podría ser la solución definitiva para el suministro de energía a los futuros nanodispositivos y nanosistemas. Puede llegar a producir hasta 4 W de energía por centímetro cúbico lo que supone un grado de miniaturización más que suficiente para alimentar la mayoría de los sistemas del combatien-

te. En la figura 4-32 puede verse el esquema de un micro-nanosistema. Estos sistemas producen energía a partir de movimientos diferenciales mecánicos de cualquier tipo (viento, pulsaciones del corazón, [...]).

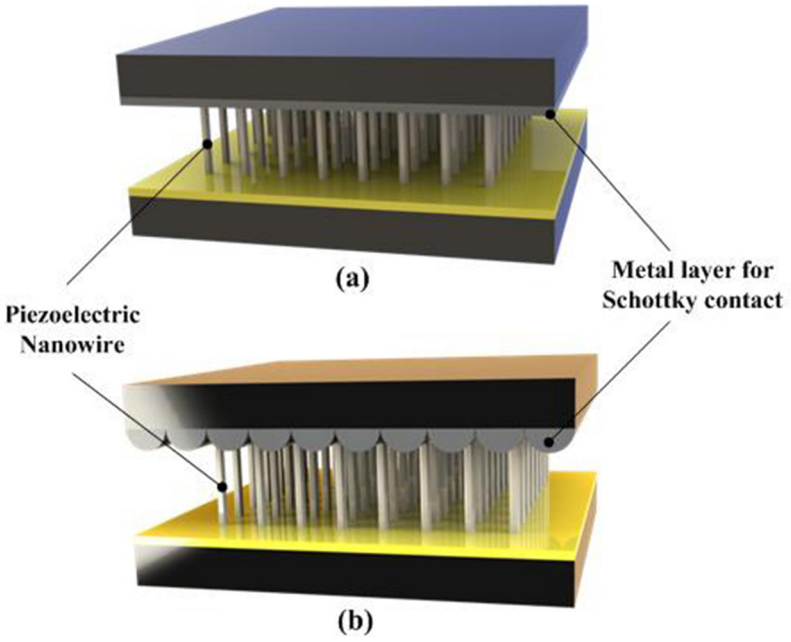


Figura 4-32. Esquema de un nanogenerador de energía (Fuente: Wikipedia commons)

En cuanto al almacenamiento de energía se utilizan tanto las baterías recargables como los supercondensadores. Ambos constituyen sistemas portátiles de suministro de energía. En baterías recargables el mercado está dominado por las baterías de litio por ser el metal electropositivo más ligero. La corriente se genera mediante la migración de los iones litio de uno de los electrodos al otro. Los supercondensadores almacenan la energía directamente cargando un conjunto de electrodos separados por un aislante y cubiertos con una capa delgada de electrolito. Ambos sistemas tienen los mismos requisitos de desarrollo: mayor densidad de energía para generar mayor potencia a la hora de alimentar dispositivos portátiles; mayor robustez para soportar un número mucho mayor de cargas y descargas; y mayor rapidez para liberar su energía cuando sea requerida, es decir, cargas y descargas más rápidas. Aquí es donde entran las NT, y su potencial para el desarrollo de nuevos materiales que puedan utilizarse en la fabricación de electrodos que cumplan estos requisitos. Así, en el caso de las baterías recargables, se están desarrollando cátodos de nanocompuestos a base de nanopartículas de óxidos metálicos que permiten mayor densidad de litio (cuando la batería está

descargada el litio se encuentra en el cátodo), mejor difusión de los iones y mayor conductividad eléctrica. Para el ánodo se utilizan aleaciones metálicas y materiales basados en el carbono que ofrecen mayor resistencia a la tracción con lo que se consigue incrementar el volumen de intercambios iónicos en los ciclos de carga.

Los supercondensadores hacen uso de la elevada área superficial de los nanomateriales, normalmente carbono nanoporoso, para almacenar la carga eléctrica. Presentan una densidad de potencia elevada, aunque menor que las baterías de ión litio, situándose entre los condensadores y las baterías. Su autodescarga es relativamente rápida y por lo tanto solo pueden emplearse para almacenar energía en el corto plazo. La densidad de potencia de un supercondensador viene dada por el área del electrodo. Por eso, el uso de materiales nanocristalinos, nanotubos de carbono y aerogeles se está extendiendo ya que proporcionan al electrodo una relación superficie/volumen muy elevada. Aunque los supercondensadores utilizan un volumen pequeño de electrolito, la superficie de cada electrodo debe diseñarse para optimizar las interacciones entre el electrodo y el ión electrolítico correspondiente. Muchos supercondensadores utilizan electrolitos orgánicos existiendo una diferencia notable entre los tamaños de los cationes y aniones por lo que la superficie de cada electrodo debe configurarse a base de nanoporos de distintas dimensiones. La Universidad de Mariland ha desarrollado un nanocondensador electroestático que tiene una capacidad de almacenamiento de energía

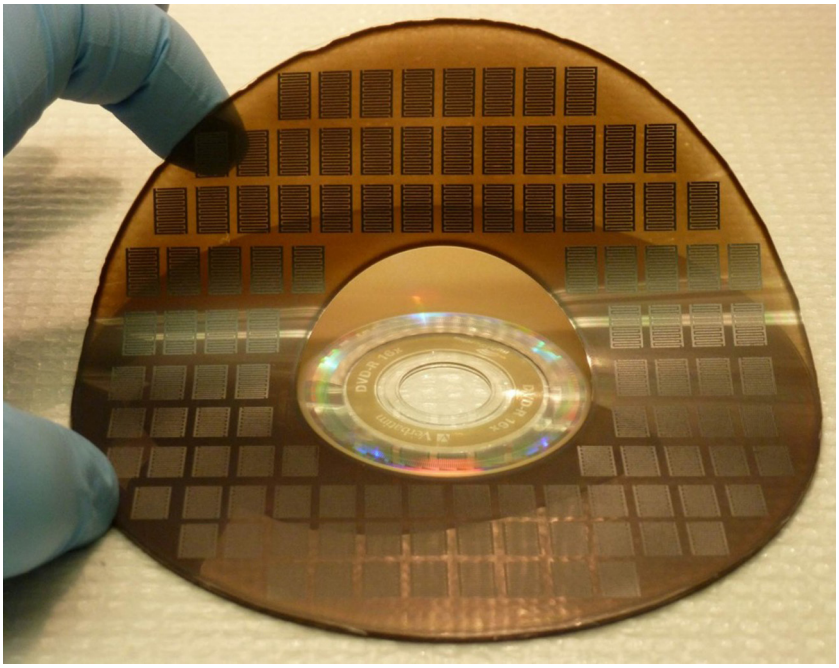


Figura 4-33. Supercondensadores de grafeno (Fuente: UCLA)

10 veces mayor que la de los mejores condensadores actualmente en el mercado. Los dispositivos electroestáticos están ya al mismo nivel que los condensadores electroquímicos. Es otra tecnología con gran potencial de desarrollo. Los nanocondensadores electroestáticos, se fabrican depositando secuencialmente una capa atómica de metal, aislante y metal sobre un sustrato de óxido de aluminio anódico nanoporoso.

La aparición del grafeno ha generado muchas expectativas. Se trata de un nuevo material con múltiples aplicaciones. La que aquí nos interesa, es el desarrollo de supercondensadores. El grafeno tiene una estructura basada en el carbono del grosor de un átomo. Esta estructura delgada, a modo de hojas de papel, le proporciona gran capacidad para el almacenamiento de energía. La carga eléctrica puede almacenarse rápidamente en la estructura del grafeno y también puede liberarse rápidamente. Se estima que su capacidad de almacenamiento es el doble que la de los mejores sistemas de almacenamiento de energía que actualmente pueden encontrase en el mercado.

Subsistema Ss4 «Información y comunicación»

La función más importante del subsistema de información y comunicación es la de proporcionar al combatiente la capacidad para operar en la red inalámbrica del campo de batalla de manera segura y eficaz. Para ello, el subsistema estará dotado de un HW miniaturizado formado por sensores, transductores, pantallas y radio transmisores integrados principalmente en el PDA/teléfono móvil o en el casco inteligente, que proporcionan acceso seguro al equipo, mediante identificación biométrica, y a la información recibida, mediante identificación digital. Asimismo, el subsistema tendrá capacidad para la fusión de los datos procedentes de los nano-biosensores. Estos datos se procesarán por los equipos que transporta el combatiente, proporcionándole capacidad de autodiagnóstico e información para el tratamiento de constantes vitales fuera de rango, para curar heridas y enfermedades básicas, y para neutralizar un ataque QB, mediante la administración de drogas y medicamentos que contrarresten el ataque de agresivos QB.

Los desarrollos de la nanoelectrónica permitirán disminuir notablemente el consumo eléctrico de cada proceso mejorando la relación señal/ruido e incrementando la velocidad de los procesos. Asimismo, los tiempos de transición disminuirán y se incrementará la densidad de función.

Tanto la informática como las tecnologías de la información evolucionarán notablemente de la mano de las NT. La nanoelectrónica permitirá el desarrollo de dispositivos de pequeño tamaño, bajo consumo pero con una capacidad de computación muy elevada que se utilizarán en redes de sensores, inteligencia artificial, interfaces cerebrales, etc. Se desarrollarán matrices de detectores (nanosensores) para una rápida identificación

de agresivos QB y en general para la detección rápida de amenazas NBQ en el campo de batalla bien por el propio combatiente o por redes distribuidas de sensores.

PDA/teléfono flexible. El PDA sustituirá a la radio tradicional. Este dispositivo de pantalla táctil podrá estar dotado de un GPS de alta resistencia, de un lector de RFID, de una microcámara de alta resolución, de conexión inalámbrica de RF, de un microrradar, de la capacidad de control remoto del armamento y de la posibilidad de enviar datos encriptados. Las NT permitirán disponer para la fabricación de componentes y sistemas de materiales flexibles, elásticos, transparentes y muy resistentes. Estos materiales se construyen con proteínas fibrosas con las que se tejen mallas tridimensionales que refuerzan las estructuras elásticas de capa fina del material. De esta manera, se fabrican dispositivos que pueden doblarse y adaptarse ergonómicamente a las condiciones requeridas y que mantienen su flexibilidad incluso cuando llevan incorporados todos los sensores y conectores necesarios. Actualmente se están desarrollando pantallas enrollables que cumplen los requisitos exigidos por el combatiente de poder disponer de un PDA pequeño de bolsillo pero con una pantalla grande de visualización. Una vez enrollada tiene el espesor de un dedo. Son dispositivos de bajo consumo y no necesitan energía para mantener una imagen en la pantalla. Son muy ligeros, robustos e irrompibles, y pueden diseñarse introduciendo factores de forma.



Figura 4-34. Teléfono flexible (Fuente: SAMSUNG)

Además, existe la posibilidad de utilizar materiales biodegradables que sean medioambientalmente amigables que faciliten, por tanto, su retirada y reciclaje. Las NT también aportarán a estos dispositivos la capacidad de auto-limpieza, anticorrosión y mayor vida útil. Existen superficies

nanoestructuradas que repelen el agua, la suciedad e incluso las huellas de los dedos utilizando efectos similares a los empleados en algunos bio-sistemas. Dispondrán de fuentes de energía avanzadas a través de nanoestructuras captadoras de energía solar y sistemas eficientes de almacenamiento de la energía (ver en este apartado, el punto *Subsistema Ss2* «*Fuente de alimentación*»). También dispondrán de sensores para monitorizar el campo de batalla. Estos nanosensores proporcionarán información sobre la pureza del aire, la presencia de agresivos QB, estado del agua y de la comida, etc.

Reloj GPS. El reloj de pulsera actuará como un ordenador tradicional siendo, junto con el PDA (varios sensores y dispositivos podrán ubicarse bien en el reloj o en el PDA), el centro de proceso de datos, del combatiente. El reloj estará dotado de: identificador digital, GPS, reloj propiamente dicho, teléfono, sensor de ritmo cardíaco, conexión inalámbrica de RF, sensores de posición y movimiento, acelerómetros 3D y giróscopos, dosificador de drogas y sensores de condición, que también pueden ubicarse en el casco, para medir su hidratación, nivel de glucosa y en general su estado psicofísico.

El combatiente a través del PDA y del reloj estará totalmente integrado en red y podrá realizar labores de seguimiento y localización. Tendrá capacidad de navegación en 3D, de mensajería instantánea y de emergencia, de seguimiento y posicionamiento de sus compañeros de pelotón y de su mando, y de enviar su posición y localización, tanto en campo abierto como en el interior de edificios. Esto se consigue mediante la tecnología RFID pasiva para pequeñas distancias o RFID activa/radar ID para distancias mayores. Un ejemplo de esta última tecnología son los nodos WIFI que permiten la identificación y el posicionamiento (sistema activo entre 5,6-5,8 GHz) tanto en el interior como en el exterior de edificios. En el Área TIC del ITM se ha iniciado un programa para explorar tecnología que mejore la conciencia situacional de un combatiente en el interior de edificios, por medios pasivos[2]. El sensor RFID puede colocarse en cualquier parte del combatiente: casco, reloj, PDA o uniforme.

Casco inteligente. El casco constituye uno de los subsistemas más importantes del combatiente. Se trata de una plataforma sólida y flexible,

[2] Se trata de dotar de un sistema completo de mando y control a un equipo de actuación ante una situación de crisis en un entorno donde no exista cobertura GPS de manera, que el equipo pueda reaccionar adecuadamente ante un ataque terrorista, un área contaminada, un secuestro, un incendio, una gestión de masas con pánico o un edificio en peligro de colapso. Así, el comandante del equipo gestionará sus efectivos de manera óptima. Además se podrá conocer la ubicación, sin poner en riesgo vidas humanas, por medio de micro-UAVs capaces de dotar de conciencia situacional. Los efectivos desplegados para ejecutar la misión podrán navegar por la zona de operación sin cobertura GPS y sin haber dotado previamente de sensores la infraestructura, ya sea en un entorno mapeado o no.

ideal, por su forma estable y su posición (punto más elevado del combatiente), para la colocación de sensores. En el casco se integran multitud de nanosensores inteligentes que utiliza el combatiente para diversas acciones: vigilancia, localización e identificación de objetivos, comunicaciones por RF y audio, identificación de agresivos QB, detección acústica de francotiradores, monitorización de constantes vitales y procesado digital de señales.



Figura 4-35. Casco inteligente (Fuente: Revision)

Las NT permitirán reducir el peso de los equipos instalados en el casco aliviando la carga física que soporta el cuello del combatiente. Los sensores integrados, tendrán cada vez mayor precisión y ocuparán un espacio menor y más plano. Se describen a continuación, los sensores más importantes que se integrarán en el casco inteligente. En primer lugar, el combatiente dispondrá de una micro cámara VIS/IR con 360º de campo de visión para operaciones que requieran visión nocturna. Estos desarrollos ya están disponibles en el mercado. Se avanzará en la miniaturiza-

ción y capacidad de proceso. Para aquellas aplicaciones que requieran un procesado de señal sencillo, como puede ser la localización de designadores láser, los sensores se integrarán en el propio casco.

También se integrará en el casco un conjunto de antenas de RF para identificación amigo/enemigo por radiofrecuencia (RFID) y para comunicaciones dirigidas de bajo consumo y alta eficiencia. Gracias al desarrollo de nuevas técnicas de fabricación, las antenas ya no tienen porqué ser planas por lo que pueden integrarse perfectamente en el casco adaptándose a su curvatura. Para RFID, frecuencia de 60 GHz, la antena plana integrada en el casco facilita la formación del haz. Este haz de comunicaciones puede orientarse en la dirección que interese. Pueden utilizarse como antenas radar con la ventaja que no necesitan dispositivos mecánicos para dirigirlas. En este caso la antena puede usarse para identificación y posicionamiento en el interior de edificios lo que resulta, como ya se ha comentado, de vital trascendencia para el combate urbano.

El combatiente estará dotado también de un conjunto de sensores acústicos para frecuencias mayores de 1.000 Hz. Existen dos aplicaciones para la matriz de micrófonos que transportará el combatiente: formación de un haz acústico (emisión) y detección de la dirección de un disparo. Esta última tecnología será fundamental para la localización de francotiradores. La detección acústica se mejora mediante el intercambio de información, a través del sistema de comunicaciones, entre los combatientes de la unidad. Se están desarrollando sistemas biónicos para permitir la comunicación entre combatientes mediante sensores colocados en la mandíbula o en los huesos craneales que transmiten las vibraciones al cerebro. SAGEM (empresa francesa) ha desarrollado un prototipo del llamado osteo-micrófono.

El combatiente también dispondrá de sensores QB de alerta temprana. Este conjunto constará de sensores pasivos y semiactivos con un área superficial elevada para reaccionar con los volátiles presentes en el aire, procedentes de los agresivos químicos, y con ciertos organismos desplegados por un ataque biológico. La finalidad de estos sensores es alertar al combatiente para que haga uso de su equipo de protección individual (EPI). Junto a los sensores QB, el casco integrará sensores de constantes vitales, cuya información enviada en tiempo real, a través del sistema de comunicaciones del soldado, permitirá al jefe de pelotón conocer el estado físico y mental de cada uno de sus hombres. Este conjunto de sensores, tendrá capacidad para realizar principalmente, electroencefalogramas sin contacto (varias tecnologías disponibles) que permitirán medir los niveles de estrés, concentración y alerta del soldado. Dispondrá también de sensores para medir el ritmo cardíaco y los niveles de oxigenación y respiración que aplican diversas tecnologías ya disponibles o en desarrollo.

El uniforme inteligente proporcionará al combatiente protección contra distintos tipo de amenaza como pueden ser proyectiles de diversos calibres, fragmentos de granadas o agentes QB, y le permitirá monitorizar sus condiciones físicas y mentales para el combate. La combinación de los nanomateriales con la nanoelectrónica dotarán al uniforme de las siguientes funcionalidades: protección balística (nanoblindajes) mediante textiles muy ligeros y flexibles fabricados con fibras poliméricas de alta

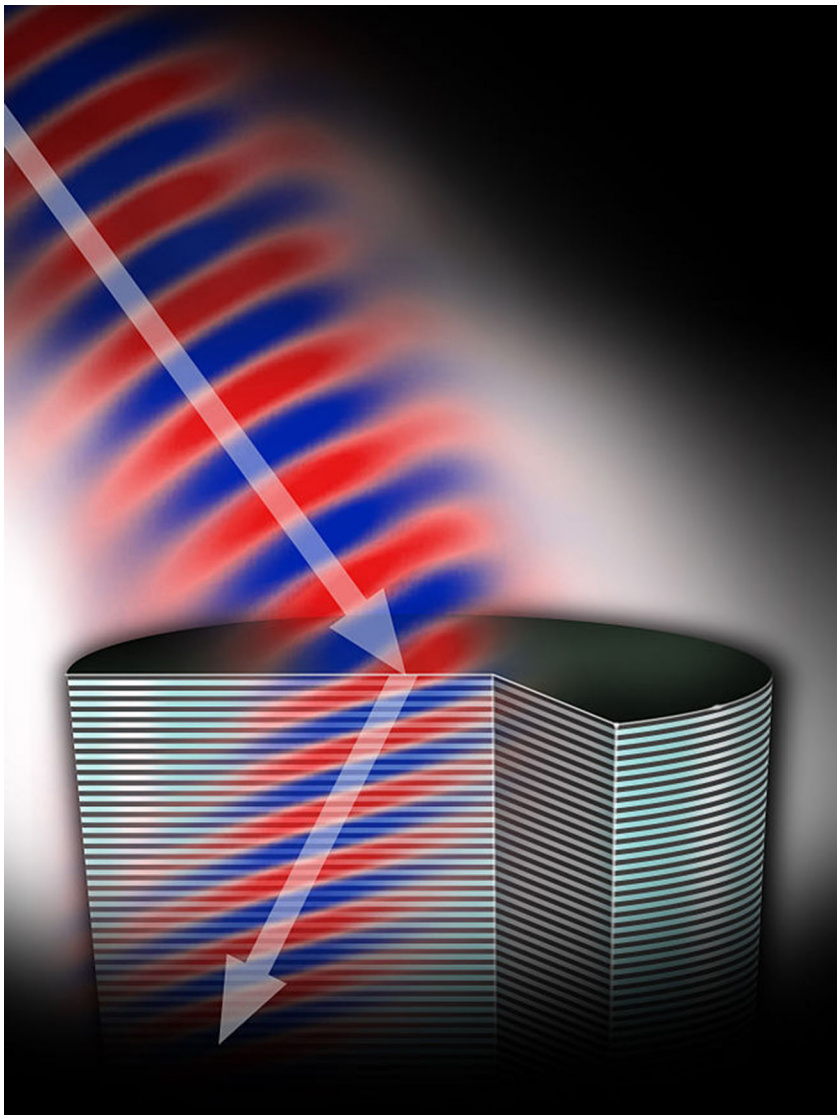


Figura 4-36. Metamateriales ópticos (Fuente: Wikipedia commons)

resistencia embebidas en una resina reforzada con nanopartículas; monitorización de constantes vitales mediante ropa interior inteligente con sensores impresos y embebidos en el textil y sensores de movimiento y de postura (acelerómetros y giróscopos MEMS en 2-3 ejes); generación de energía mediante el uso de prendas fabricadas con nanohilos de óxido de cinc que actúan como piezoeléctricos; control del dolor y recuperación de tejidos empleando coderas y rodilleras dotadas de electrodos secos, embebidos en la estructura del tejido con capacidad para generar microdescargas; control térmico mediante el empleo de nanofibras y nanotubos de carbono de alta conductividad térmica, para garantizar la microclimatización del combatiente, su aislamiento exterior y ventilación; protección QB a base de redes de nanofibras con alta capacidad de absorción, desactivación y descontaminación de agresivos QB y sensores de alerta de ataque QB, bien en el PDA o en el reloj; capacidad para comunicación, integración en red e identificación mediante la impresión, en la capa exterior del textil, de sensores de RF y antenas para la RFID y de un chip de identificación individual, posicionamiento y comunicación; enmascaramiento y reducción de firma multiespectral mediante el uso de textiles con capacidad para absorber la señal radar por medio de nanotubos de carbono enfibrados, enmascaramiento activo (camaleón) para el visible y el infrarrojo cercano mediante el uso de polímeros electrocrómicos que reproduzcan las coordenadas cromáticas del entorno, efectos de engaño óptico mediante el uso de matrices LED, uso del negro de humo sobre el textil para evitar la detección por equipos de visión nocturna, y por último, reducción de la firma térmica mediante la absorción y disipación del calor corporal; en el futuro, con el desarrollo y empleo de los metamateriales para las distintas zonas del espectro electromagnético, se conseguirá la «invisibilidad» en la banda del espectro correspondiente; capacidad de autoapoyo que analizaremos más detenidamente en el *Subsistema Ss6* «*Sostenimiento*».

Las NT han traído el desarrollo de nuevos materiales de alta resistencia, activos y con capacidad para embeber sensores en su estructura y que están permitiendo que la mayoría de las funcionalidades, que hemos analizado en el *Subsistema Ss4* «*Información y comunicación*», sean ya una realidad.

En el campo de los blindajes, el gran reto era conseguir protecciones balísticas flexibles para las extremidades que son la parte más afectada tras una explosión y la fragmentación posterior y que además generan costosos tratamientos médicos. Estos blindajes ya se han conseguido.

Los nuevos textiles deberán permitir el paso del aire y de la humedad pero no la penetración de las agentes de guerra QB. Los materiales utilizados para la fabricación de los EPI deberán ser capaces de reducir drásticamente el impacto de una agresión QB. Los futuros uniformes se fabricarán a base de nanopartículas con gran capacidad de absorción.

Por otro lado, el textil deberá tener la capacidad de neutralizar los efectos dañinos de los agentes QB, para ello, deberá poder almacenar agentes reactivos de elevada reactividad frente a distintos tipos de agresivos QB, que puedan ser diseminados cuando sea requerido.



Figura 4-37. Protección NBQ (Fuente: Ministerio de Defensa)

En definitiva, las NT facilitarán los despliegues y las operaciones incrementando la probabilidad de supervivencia del soldado y disminuyendo los daños colaterales (daños sobre los civiles próximos a las zonas de combate y al medioambiente).

El casco inteligente, además de ser una excelente plataforma para la integración de sensores, debe ser también un elemento de protección balística pero lo más ligero posible. Esto se consigue mediante el uso de materiales nanocompuestos a base de nanofibras embebidas en polímeros que proporcionan una mayor resistencia al impacto de bala con una significativa reducción de peso frente a los cascos de fibra de vidrio o kevlar actualmente en servicio. Los nuevos blindajes para cascos, combinan la fibra M5, de mayor resistencia al impacto, con nanoarcillas y todo ello embebido en una matriz polimérica. También se están desarrollando blindajes a partir de nanopartículas metálicas cubiertas con un nanorevestimiento a base de multicapas cerámicas.

El desarrollo de blindajes flexibles, permite, por un lado, conseguir las prestaciones de protección balística requeridas, y por otro, proporcionar confort al combatiente. También se está estudiando la posibilidad de utilizar como material de blindaje los nanotubos de carbono, al haberse

observado que además de la elevada resistencia al impacto de bala, ésta permanece constante incluso cuando varios proyectiles impactan en el mismo punto. Asimismo, se están desarrollando nanoestructuras inorgánicas similares a los fulerenos que han demostrado un enorme potencial para la absorción de ondas de choque siendo, por tanto, susceptibles de ser utilizadas como material para blindajes.

El conjunto de nanosensores y la capacidad de proceso del equipamiento de combatiente, aumentarán la probabilidad de supervivencia en el campo de batalla. En este sentido, es espectacular el avance de la nanomedicina que ha permitido en los últimos años, el desarrollo de: drogas específicas, para responder a las demandas mencionadas; nanopartículas con capacidades curativas, que pueden embeberse en los textiles del uniforme para curas rápidas sin la necesidad de la intervención del hombre; la medicina regenerativa mediante el empleo de la ingeniería genética para la reparación de tejidos, curación de heridas, reconstrucción de órganos dañados y otras partes del organismo, y el implante de sensores inteligentes biocompatibles que permitan tanto obtener información (sensores acústicos integrados en la mandíbula o huesos craneales) como monitorizar constantes vitales que permitan actuar en consecuencia.

Subsistemas Ss6 «Sostenimiento» y Ss7 «Preparación»

Otra de las grandes funcionalidades que debe poseer el combatiente del futuro es la capacidad de auto-apoyo. Para ello, transportará una mochila de fibra de carbono o de un nanocompuesto polimérico cubierta de un material estanco en la que transportará todos los elementos auxiliares que le permitan combatir al menos durante 24 horas. En su mochila de combate llevará material para el tratamiento terapéutico de heridas, un sistema de inoculación de drogas (medicinas, compuestos químicos que contrarresten la acción de los agresivos QB o drogas para contrarrestar situaciones físicas y psicológicas adversas), un kit sanitario, un kit de nutrición, un laboratorio miniaturizado para monitorizar sus constantes vitales, sensores para la caracterización y filtrado del agua y del medioambiente (medida de la pureza del aire y presencia de agresivos QB) y, finalmente, un micro UAV para conseguir inteligencia cercana que integrará con la información recibida a través de la red de sensores distribuida del campo de batalla.

El empleo de los nuevos materiales (nanocompuestos y nanofibras de alta resistencia) fruto de los desarrollos de las NT, permitirán la fabricación de soportes auxiliares de alta resistencia, cada vez más ligeros y el desarrollo de textiles flexibles o rígidos, según interese, que proporcionen resistencia adicional al combatiente, cuando sea requerida, y una estructura de anclaje para el exoesqueleto.



Figura 4-38. Exoesqueleto HULC (Fuente: Lockheed Martin)

Los nuevos materiales permitirán la miniaturización de los micro-UAV y robots que apoyen al combatiente en las tareas a realizar en el campo de batalla. Así, el combatiente dispondrá de un UAV de fácil despliegue (helicóptero de despegue vertical o lanzamiento manual) y puesta en operación, que podrá ser lanzado a mano y no necesitará paracaídas ni pista de aterrizaje para su recuperación. La operación será sencilla a través de un SW instalado en su PDA. Tendrá los sensores necesarios tanto diurnos

como nocturnos, para obtener imágenes, vídeo y transmitir información en tiempo real. Podrá utilizarse en misiones especiales, como por ejemplo, dotarlo de sensores QB para evaluar si en determinada zona sobre la que se va avanzar hay presencia de agresivos QB. Dispondrá de un sistema de posicionamiento que permita geo-referenciar la información recibida. El soldado tendrá capacidad para procesar e interpretar la información recibida del micro-UAV. Esta tecnología está ya conseguida. El uso de las NT ha permitido miniaturizar y aligerar estos sistemas. Ya existen desarrollos, de tamaño algo mayor que una uña, con baterías de litio y control remoto por IR. Son pequeños helicópteros de dos canales en los que el soldado puede controlar la altura y la dirección del vuelo y su tamaño lo hace ideal para el reconocimiento de habitaciones de edificios. Una carga normal lleva 20 minutos para un vuelo de unos 10 minutos. Así por ejemplo, el ejército de los Estados Unidos está desarrollando un murciélago espía de 6 pulgadas de longitud. Es un robot que utilizará células solares de punto cuántico con sistema de navegación autónomo. Este UAV es 1.000 veces más pequeño y más eficiente que los sistemas actuales con las mismas prestaciones. Utiliza un microradar de bajo consumo y un sistema de navegación nocturna muy preciso. Recarga sus baterías captando energía de diversas fuentes, sol, viento, vibraciones, etc.

En este campo de los UAV se están produciendo múltiples desarrollos en muchas direcciones pero siempre con la finalidad de poder disponer de un sistema de apoyo que proporcione al combatiente inteligencia adicional.



Figura 4-39. Micro-UAV de despegue vertical (Fuente: Prox Dynamics)

En un futuro algo más lejano el combatiente dispondrá de un exoesqueleto que le permitirá amplificar sus capacidades musculares y que será una aplicación de la mecatrónica en la que las NT, mediante el desarrollo de los MEMS, estarán totalmente involucradas. Se integrará en la estructura del uniforme.

Además, el combatiente dispondrá de un interfaz cerebral llamado también interfaz neuronal directo que permitirá la comunicación directa entre el cerebro del combatiente y un dispositivo externo, en este caso su ordenador. A través de este interfaz el ordenador podrá recibir comandos procedentes del cerebro del combatiente, procesarlos y enviarle señales respuesta. Estos sistemas están muy desarrollados en el mundo de los videojuegos tratándose de una tecnología claramente dual. A través del interfaz cerebral se captarán y procesarán señales procedentes de la actividad cerebral recogidas por un electroencefalógrafo. Esto permitirá evaluar el estado psicofisiológico del combatiente ya que podrán medirse ciertas emociones a partir del procesado de las ondas cerebrales.

Protección de plataformas e instalaciones

En esta AAF se engloban todas aquellas tecnologías relacionadas con la protección de plataformas e instalaciones. Para evitar solapes con otras AAF dentro del área de protección de plataformas, se han definido las siguientes cinco LAF: sistemas ESM y ECM de guerra electrónica; armas de energía dirigida; sistemas de autoprotección; simulación y adiestramiento sobre sistemas de guerra electrónica; sistemas de protección de instalaciones y despliegues.

Sistemas ESM y ECM de guerra electrónica

En esta LAF tienen cabida todas las tecnologías para el desarrollo de sistemas ESM (*Electronic Support Measures*) y ECM (*Electronic Counter Measures*). Los requisitos a exigir a los nuevos sistemas obligan a que sean modulares, multifuncionales y reconfigurables para simplificar la adaptación a las distintas plataformas y misiones. Las NT están jugando un papel fundamental gracias a las aportaciones de la nanoelectrónica que ha permitido el desarrollo de componentes y subsistemas electrónicos miniaturizados de manera que el peso y el volumen de los equipos de RF embarcados es cada vez más pequeño. Esto ha permitido que puedan incorporarse equipos de guerra electrónica (GE) en UAV. Asimismo, las NT están permitiendo el desarrollo de algoritmos avanzados, de amplificadores de estado sólido (basados en las tecnologías del nitruro de galio GaN), de módulos de transmisión-recepción T/R compactos o de antenas

AESA (*Active Electronically Scanned Array*) también conocido como radar de barrido electrónico[3].



Figura 4-40. Sistema táctico de guerra electrónica. Programa nacional GESTA-DUBHE (Fuente Ministerio de Defensa)

[3] Un radar de barrido electrónico activo, es un tipo de radar de antenas en fase en el que la función transmisión/recepción se lleva a cabo por un número elevado de pequeños módulos transmisión/recepción de estado sólido (TRM). Los radares AESA apuntan su haz mediante la emisión de ondas de radio por cada uno de estos pequeños módulos, que emiten de manera independiente y en distintas frecuencias. Los radares AESA avanzados, mejoran las prestaciones de los PESA (radares de barrido electrónico pasivo) mediante la propagación de las emisiones en una banda de frecuencias que hace muy difícil su detección sobre el ruido de fondo, permitiendo a los barcos o aeronaves emitir señales radar de alta potencia permaneciendo ocultos.

En la figura 4-40 puede verse una imagen del sistema táctico de guerra electrónica desarrollado por INDRA en el marco del programa nacional GESTA-DUBHE.

Estos avances se aplicarán también a los sistemas de comunicaciones que incorporarán capacidades ESM y de inteligencia (COMINT), de despliegue rápido y sencillo y que puedan ser operados en movimiento. Los sistemas de GE de comunicaciones serán de bajo coste, consumo, peso y volumen para que puedan ser embarcados en un micro-UAV. En este grupo se incluyen las tecnologías para el desarrollo de micro-nanosistemas de lucha contra dispositivos IED radiocontrolados (RC-IED).

De todo ello se ha hablado más extensamente en los apartados **SISTEMAS DE INTELIGENCIA, VIGILANCIA, ADQUISICIÓN DE OBJETIVOS Y RECONOCIMIENTO (ISTAR)** (subapartado ***Adquisición de datos. Sensores***, puntos *Sensores Radar* y *Sensores electromagnéticos*) y **PLATAFORMAS** (subapartado ***Plataformas aéreas***). En el apartado **TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)** se ampliará lo relativo a comunicaciones.

Armas de energía dirigida

El desarrollo de armas de energía dirigida de RF para inutilizar e incluso destruir los sistemas electrónicos de la amenaza (sistemas de guiado, sistemas de mando y control, sistemas de armas, sistemas de comunicaciones, etc.) mediante la generación de niveles de potencia y radiofrecuencia suficientemente elevado es el principal objetivo de esta LAF.

Estas armas requieren su integración con sistemas de localización e identificación de objetivos. Así por ejemplo el DIRCM-Manta de INDRA para defensa antimisil de aeronaves, está perfectamente integrado con el *Missile Warning System* (MWS) de la plataforma aérea que detecta el lanzamiento del misil y transfiere al perturbador su dirección para posicionamiento, enganche, seguimiento y perturbación del misil. La tecnología de los MWS también está evolucionando debido al elevado número de falsas alarmas que producen los sensores que trabajan en el ultravioleta. La tecnología actual se centra en la banda II del térmico en la que la aportación de las NT, como ya se ha visto anteriormente con los desarrollos de los microsensores bolométricos no refrigerados, está siendo importante.

En el apartado **ARMAMENTO**, subapartado ***Sistemas de armas*** se ha visto la importancia de miniaturizar este tipo de sistemas mediante el empleo de estructuras cuánticas que permitan el desarrollo de láseres, en el visible e IR, cada vez con mayores potencias de emisión pero montados en equipos más ligeros y portátiles.



Figura 4-41. Cañón láser naval (Fuente: US Naval Research Laboratory)

Para la defensa antimisil de los vehículos de combate, dentro de los llamados *Hard kill systems*, se emplean sistemas como el Droz ruso, que utiliza un radar y cohetes de 107 mm, o el ARENA ucraniano, que emplea cintas de fragmentación que cubren un arco frontal de 220º, pero que no son aptos para el combate urbano por el riesgo para las tropas propias y la población civil. Sin embargo, recientemente han aparecido sistemas direccionales a base de explosivos optimizados (ya se ha visto la aplicación de las NT al diseño de explosivos más energéticos y controlables) que desbaratan el misil por la onda de choque del explosivo sin lanzamiento alguno de partículas minimizando de esta manera los daños colaterales. Se entiende que la integración con los sistemas de alerta del vehículo debe ser muy precisa.

Dentro de este campo, también se está trabajando en el desarrollo de armas de generación de impulso electromagnético que en función de su potencia y ancho de banda, se clasifican como de banda estrecha (HPM) o banda ultra-ancha (UWB). Cabe mencionar también los desarrollos de armas de haces de partículas cargadas con gran potencial para la detección y eliminación de minas antipersonas a distancia y defensa antimisil.

Sistemas de autoprotección

En esta LAF se engloban las tecnologías a potenciar para la detección multiespectral de la amenaza y su neutralización. Como se ha comentado en el subapartado anterior, es clave avanzar hacia la mejora en las

capacidades para la detección de los sensores, en la integración con los sistemas de actuación y en la disminución de falsas alarmas, de manera que la plataforma sea capaz de detectar y clasificar la amenaza, en el menor tiempo posible, y neutralizarla con la mayor efectividad.

Los sistemas de autoprotección están formados por sensores (ya se ha comentado ampliamente la aplicación de las NT en este campo) para detectar la amenaza y de sistemas de actuación para combatirla. Estos últimos pueden ser pasivos o activos. Los sistemas pasivos se pueden clasificar a su vez en sistemas de enmascaramiento (redes miméticas



Figura 4-42. F-15 lanzando bengalas (Fuente: Wikipedia commons)

multiespectrales, pinturas de reducción de firma, sistemas adaptativos, etc.), sistemas de ocultación (aprovechamiento del terreno, cortinas de ocultación multiespectral mediante el empleo de fumígenos, etc.) y sistemas de decepción, para el engaño de la amenaza. Estos últimos pueden ser pasivos (señuelos, bengalas, bengalas avanzadas, etc.), o activos, perturbadores *(jammers*) o perturbadores direccionales (DIRCM). A estos sistemas se les conoce como *Soft Systems* frente a los *Hard Kill Systems* con capacidad de destrucción de la amenaza. La aplicación de las NT en nuevos desarrollos de estos sistemas, ha sido ampliamente explicada en apartados anteriores.

Simulación y adiestramiento sobre sistemas de guerra electrónica

En esta LAF se incluyen las tecnologías para el desarrollo de simuladores que permitan el entrenamiento de los operadores de equipos y sistemas de guerra electrónica (GE) con el fin de perfeccionar su empleo en las unidades usuarias y facilitar la planificación de las operaciones de GE. Los simuladores se desarrollan con una metodología estandarizada y modular que permita su integración en simulares operativos para la coordinación de las actividades de GE. Se aplicarán técnicas de interoperabilidad entre simuladores. La aplicación de las NT a la simulación, se verá más detenidamente en el apartado (**TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN (TIC)**).

Sistemas de protección de instalaciones y despliegues

Las actividades inmersas en esta LAF están orientadas a la protección de infraestructuras críticas en entornos terrestre y litoral y a la protección de despliegues de tropas en zonas urbanas y áreas extensas, con terreno complejo y ausencia de infraestructuras. Se identifican tres ámbitos de trabajo orientados a: infraestructuras en el entorno terrestre; protección de puertos y entorno litoral frente a la amenaza submarina; y protección frente amenazas basadas en explosivos.

Estos sistemas estarán basados en redes terrestres distribuidas de sensores, autónomas, cooperativas y remotas, dirigidas a la detección de vehículos, dirección de fuego, personas, etc., con capacidad para medir distintas propiedades del terreno (acústicos, sísmicos, magnéticos, IR, etc.) y para integrarse con sistemas de actuación, sistemas empotrados y sistemas de comunicaciones inalámbricas distribuidas. Con estos sensores se desarrollarán nodos de banda estrecha, de corto alcance, bajo consumo y coste, y de banda ancha con mayor alcance (cabezas panorámicas IR y visible, o radar para localización de fuegos). Asimismo, se desarrollarán redes de sensores submarinos distribuidos para protección de puertos. Se complementará con el empleo de vehículos autónomos no

tripulados, submarinos, que monten este tipo de sensores, acústicos y magnéticos de mayor sensibilidad pero menor coste y tamaño.

Finalmente también se incluye el desarrollo de herramientas y conocimiento para la generación de modelos, simulación, experimentación y análisis frente a IED.

La aplicación de las NT en este campo, ya ha sido ampliamente discutida en los apartados **SISTEMAS DE INTELIGENCIA, VIGILANCIA, ADQUISICIÓN DE OBJETIVOS Y RECONOCIMIENTO (ISTAR)** (subapartado ***Adquisición de datos. Sensores***) y **PROTECCIÓN PERSONAL** (subapartado ***Lucha contra IED***).

Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Simulación (TIC)

Las tecnologías de la información y comunicación constituyen un sector industrial muy relevante y de rápido crecimiento. Suele estar en las agendas estratégicas de los gobiernos por su enorme potencial innovador. En los últimos años el sector de las TIC ha evolucionado de la electrónica tradicional a la nanoelectrónica. El empleo de las NT ha supuesto un desarrollo formidable de las TIC que está impactando notablemente en nuestra sociedad, cambiando nuestra forma de trabajar e incluso la manera de relacionarnos socialmente.



Figura 4-43. Simulador de vuelo (Fuente: MPL Simulator Solutions)

La aplicación de las NT a las TIC se realizará en dos etapas (ver capítulo 3). Una primera etapa, enfoque *top-down* o de miniaturización, en la que a partir de microestructuras convencionales se descenderá hasta conseguir nanoestructuras Este es el estado actual de la tecnología. Y una segunda etapa, enfoque *bottom-up*, que permitirá la aparición de la ingeniería de los nanosistemas y de la nanoelectrónica cuando se dominen tecnologías que permitan el control de procesos auto-organizativos y de crecimiento para el ensamblaje de circuitos y sistemas electrónicos.

En esta última AAF de Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Simulación (TIC) vamos a analizar todas aquellas tecnologías que tiene que ver con la aplicación de los sistemas de información y simulación a los sistemas militares. Incluyen las tecnologías relacionadas con la gestión y transmisión de la información, haciendo especial relevancia en la seguridad, y las tecnologías para el adiestramiento y el apoyo a las operaciones. Esta AAF incluye las siguientes seis LAF: sistemas de información para mando y control (C2); comunicaciones; NEC; seguridad CIS; simulación; CD&E.

Pasamos a continuación a analizar las seis LAF.

Sistemas de Información para mando y control (C2)

El desarrollo tan espectacular de los sistemas de Información ha sido posible ya que los ordenadores y sistemas de tratamiento de la infor-



Figura 4-44. Sistema de combate AEGIS (Fuente: Wikipedia commons)

mación han incrementado espectacularmente su velocidad de proceso. Esto ha sido posible gracias a la fabricación de transistores cada vez más pequeños y baratos a través de nuevos procesos de fabricación como los que se han analizado en el capítulo 3. Este avance hacia la miniaturización ha permitido incorporar un mayor número de transistores en un circuito integrado dado, aumentando así las capacidades de procesado de los ordenadores. La ley de Moore que predice que el número de transistores que pueden colocarse en un circuito integrado dado se dobla cada dos años, sigue estando totalmente vigente. Existen aún posibilidades de continuar avanzando hacia una mayor miniaturización mediante el desarrollo de nuevos materiales semiconductores, metales y aislantes a nivel nanométrico, cuyas propiedades, como hemos visto en el capítulo 3, están determinadas por efectos cuánticos. Los circuitos integrados de nueva generación aprovechan estos efectos cuánticos.

En la figura 4-44 puede verse el sistema de combate AEGIS de última generación, que incorporan nuestras fragatas de la serie-100.

No obstante, la miniaturización no puede continuar de manera indefinida con los métodos y herramientas que se han utilizado hasta ahora, por lo que debe seguir trabajándose en el desarrollo de nuevas tecnologías.

Gracias al empleo de las NT, los dispositivos utilizados serán cada vez más rápidos y potentes, y tendrán mayores prestaciones. Se están realizando grandes esfuerzos, en la fabricación de transistores convencionales cada vez más pequeños. El diseño de nuevas arquitecturas y la puesta a punto de tecnologías de fabricación cada vez más complejas están permitiendo el desarrollo de circuitos integrados muy avanzados. Los ordenadores del futuro utilizarán las propiedades inherentes de los nanomateriales para llevar a cabo su enorme capacidad de cálculo. Ya no estarán basados en la tecnología tradicional del Silicio. Estos nuevos materiales, tales como los nanohilos o puntos cuánticos, ya están siendo utilizados.

Muchos de los componentes electrónicos empleados en computación utilizan la tecnología GMR, que ya ha sido analizada (ver apartado **SISTEMAS DE INTELIGENCIA, VIGILANCIA, ADQUISICIÓN DE OBJETIVOS Y RECONOCIMIENTO (ISTAR)**, subapartado ***Adquisición de datos. Sensores***, punto *Otros sensores*), en la que la resistencia eléctrica de la estructura, construida a base de capas muy delgadas de metales magnéticos y no-magnéticos, cambia notablemente mediante la aplicación de un campo magnético.

Los sistemas actuales de almacenamiento de la información estaban basados en transistores. Se utilizan matrices reconfigurables que permiten almacenar gran cantidad de información en un espacio pequeño, como por ejemplo, la introducción de las memorias RAM magnéticas y dispositivos túnel resonante en circuitos lógicos. Cada nanobit del dispositivo

de almacenamiento de memoria se utiliza para guardar información. Ya se está empleando la electrónica molecular, basada en los nanotubos de carbono o macromoléculas orgánicas, para la fabricación de estos dispositivos de almacenamiento de información.

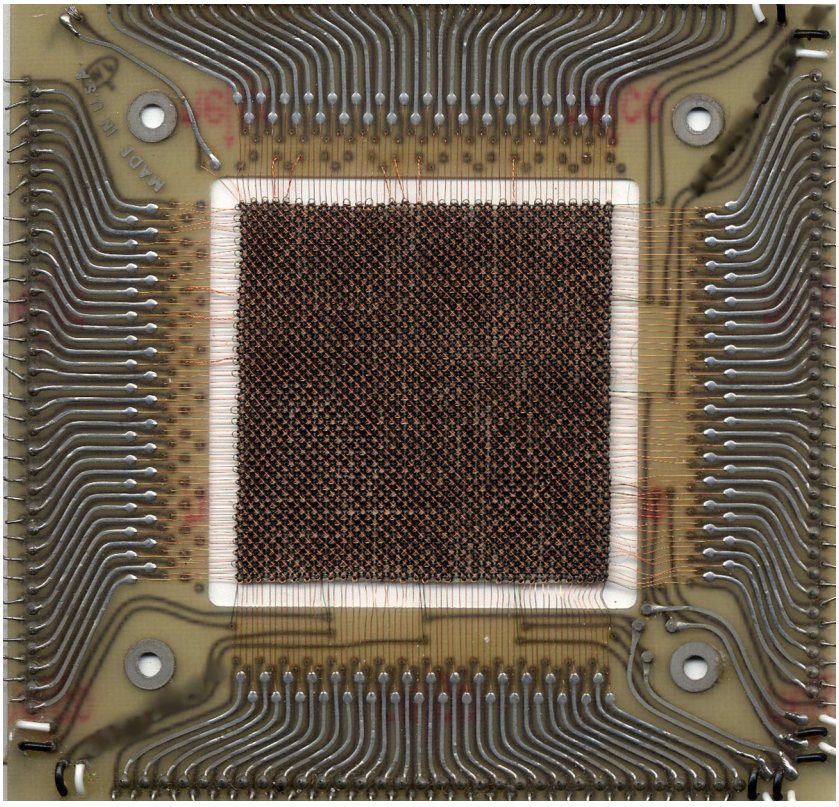


Figura 4-45. Memoria RAM magnética (Fuente: Wikipedia commons)

En el caso de la fabricación de semiconductores, con capacidad para mantener y neutralizar el flujo eléctrico, se procede en primer lugar, a un proceso de nano-amplificación. Posteriormente se lleva a cabo la integración del nanocircuito en un chip de silicio. El resultado reduce notablemente el tamaño de los procesadores. En pocos años estará disponible la tecnología *Rapid Single-Flux Quantum (RSFQ)*. Asimismo, se habrán desarrollado transistores de un único electrón.

Puede concluirse que el empleo de las NT será fundamental para incrementar la automatización de las capacidades CIS asociadas a los sistemas de mando y control militares, lo que facilitará la toma de decisiones y la interacción humana en los sistemas de mando y control, al permitir el manejo de grandes volúmenes de información, gracias al desarrollo de las capacidades de computación de los nuevos ordenadores.

Comunicaciones

El desarrollo de las TIC está teniendo lugar gracias a la aparición de productos de bajo precio (alto consumo), basados en una optoelectrónica con alto grado de integración y grandes capacidades inalámbricas, a la miniaturización de los dispositivos electrónicos, al diseño de sensores innovadores, a la producción barata de circuitos politrónicos de mayor potencia, y a las nuevas arquitecturas para sistemas innovadores[4]. Esto se conseguirá utilizando las NT (*molecular manufacturing*) en la construcción de los futuros ordenadores biomecánicos (*DNA computing*) que constituyen el interfaz entre los procesos bioquímicos y la computación cuántica y que permiten resolver problemas para los que no existen algoritmos (computación clásica) eficientes.

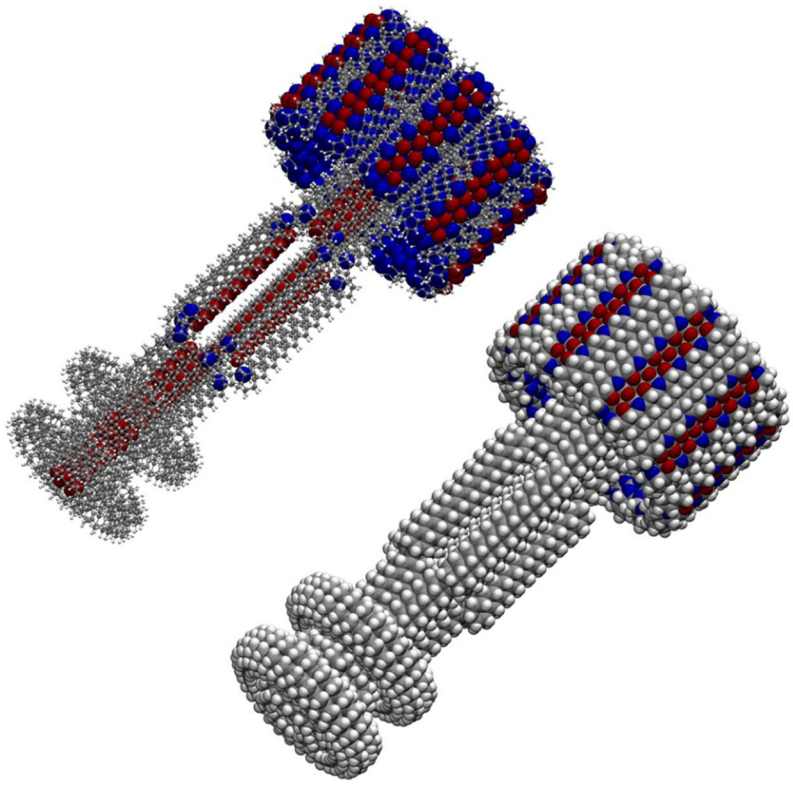


Figura 4-46. Molecular manufacturing (8)

[4] En el ITM se está llevando a cabo el proyecto «Aplicabilidad del estándar WIMAX a entornos tácticos» que tiene por objeto establecer el alcance inicial, desde un punto de vista operativo, de una futura arquitectura de un sistema de comunicaciones, basado en el estándar WiMAX IEEE-802.16, que dé servicio de comunicaciones, datos video y voz en entornos tácticos, desde el nivel combatiente hasta puestos de mando de División.

Gracias al desarrollo de componentes y dispositivos nanoelectrónicos, se ha podido desarrollar la criptografía cuántica para aplicaciones de inteligencia.

La evolución de las TIC, va a permitir que determinados dispositivos electrónicos puedan integrarse en los tejidos del uniforme del combatiente (ver apartado **PROTECCIÓN PERSONAL**) o en el medio ambiente que rodea al soldado creando una red de sensores distribuida que proporcionará la inteligencia necesaria en el campo de batalla. Los sistemas futuros de comunicaciones serán multifuncionales y con unas capacidades mucho mayores que los actuales.

Mediante el uso de nuevas técnicas de fabricación y el empleo de nuevos nanomateriales se ha conseguido la elaboración de circuitos integrados flexibles que se aplican para la fabricación de dispositivos flexibles y elásticos, tal y como se ha visto para el PDA/teléfono móvil del combatiente. Estos dispositivos, también llamados mórficos porque pueden cambiar de forma, se utilizan para sensores inalámbricos y sistemas de comunicación. Además de su forma adaptable, se caracterizan por utilizar: baterías de nueva generación (ver apartado **PLATAFORMAS** subapartado ***Energía***); electrónica transparente; soluciones innovadoras para la presentación de la información (*display*); superficies funcionales con capacidad de auto-limpiado; sensores para la monitorización del medio ambiente; y capacidad de integración en textiles. La calidad de la imagen y la resolución del dispositivo serán mucho mejores que las actuales. El nanopixelado hará que las imágenes parezcan más reales, si cabe. Asimismo, las capacidades de los dispositivos de audio se están viendo notablemente mejoradas.

En la fabricación de los *displays* se utiliza la tecnología de LEDs orgánicos (OLEDs *Organic Light Emitting Diodes*) que consiste en depositar capas muy delgadas de moléculas orgánicas sobre un sustrato. Estos dispositivos presentan grandes ventajas frente a los *displays* LCD, tecnología actual, entre las que cabe destacar: menos consumo; mejor calidad de imagen; menos peso; más finos; trabajan bien bajo el sol en cualquier ángulo. Por el contrario tienen una vida útil menor (degradación molecular), las moléculas son sensibles a la humedad (se requiere un empaquetamiento costoso), son caros (el diseño actual utiliza materiales que no son baratos para la fabricación de los electrodos).

En cuanto al proceso y transmisión de datos, se utilizarán componentes electrónicos, ópticos y opto-electrónicos avanzados. Se espera que, con los desarrollos futuros, estos componentes sean más baratos y fáciles de fabricar. El desarrollo de componentes lógicos y de almacenamiento para la tecnología CMOS, se llevará a cabo utilizando puntos cuánticos y nanotubos de carbono. Los cristales fotónicos se utilizarán en el diseño de circuitos ópticos, base de los futuros sistemas fotónicos de procesado de la información, basados únicamente en la luz.

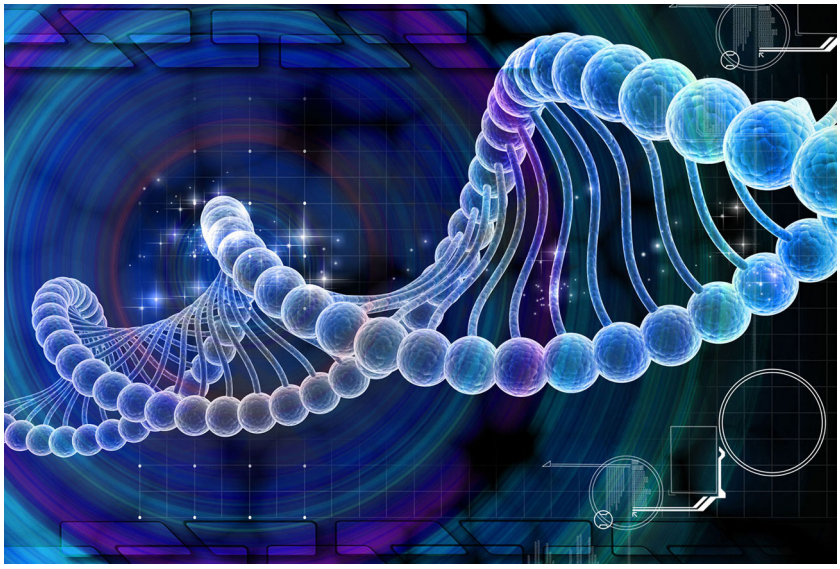


Figura 4-47. DNA computing (Fuente: mathagraphics/shutterstock)

En electrónica molecular, las NT se utilizan para el ensamblado de componentes electrónicos con nuevas características, a nivel atómico, con una densidad de empaquetamiento mayor y con grandes ventajas. Se desarrollarán componentes más pequeños, más rápidos y mejores basados en efectos cuánticos, nuevas arquitecturas y en los ordenadores biomecánicos.

NEC

Esta LAF incluye las actividades orientadas a probar la viabilidad técnica del concepto *Network-enabled capability* (NEC), a través del desarrollo de arquitecturas, herramientas y tecnologías que permitan soportar y realizar el concepto NEC nacional. La aplicación de las NT al concepto NEC va asociado a los avances en las tecnologías de comunicación y computación vistos anteriormente.

Seguridad CIS

Esta LAF busca fomentar el desarrollo de la seguridad CIS de los sistemas de información, a través del desarrollo de algoritmos y sistemas de cifrado, sistemas multinivel, biométricos, [...] Tiene aplicación lo dicho en el subapartado ***Sistemas de información para mando y control C2***, especialmente lo que a criptografía cuántica se refiere.

Simulación

Dentro de esta LAF, se incluyen las actividades de I+T relacionadas con las tecnologías de simulación, con aplicación en el adiestramiento individual y colectivo, adquisición de sistemas (*Simulation Based Acquisition SBA*), experimentación y desarrollo de capacidades, herramientas de análisis, planeamiento y apoyo a operaciones.

La influencia de las NT en esta LAF está asociada al incremento de la capacidad de proceso de los nuevos ordenadores que permitirá el desarrollo de simuladores cada vez más potentes. La miniaturización de los sensores y sus capacidades de comunicación permitirán a su vez, la integración en red y el intercambio de información en tiempo real entre simuladores avanzados, ubicados en posiciones geográficas distantes. De esta manera se podrán construir sistemas de realidad virtual y entrenadores muy sofisticados, para la instrucción y el adiestramiento del combatiente.

CD&E

Esta LAF persigue la capacitación tecnológica del Ministerio de Defensa para llevar a cabo las actividades de desarrollo y experimentación de conceptos, tanto operativos como tecnológicos, que demanda el proceso de modernización y transformación permanente de nuestras FAS. Se entiende por concepto la posible solución a un problema concreto derivado de las necesidades de las FAS. Aplica a todo el MIRADO (Material, Infraestructuras, Recursos, Adiestramiento, Doctrina y Organización).

Para desarrollar un concepto hace falta disponer de grandes capacidades de simulación para simular las distintas soluciones (conceptos) al problema dado. Las soluciones posibles se desarrollarán en forma de prototipos que serán validados en un entorno de experimentación eficiente. La aplicación de las NT en estos campos ya ha sido analizada ampliamente a lo largo del presente capítulo.

Conclusiones

El desarrollo de tecnologías para la fabricación de micro-nanosistemas, es una cuestión estratégica para muchas naciones que están invirtiendo grandes cantidades de fondos (véase Horizon 2020 para el caso europeo) en proyectos de investigación orientados a la obtención de aplicaciones tanto civiles (materiales, ciencias de la vida, electrónica, [...]) como militares (materiales estructurales, sistemas de armas, sensores, electrónica, [...]) En muchos campos las tecnologías son duales. Las organizaciones de defensa pueden aprovechar los resultados de las investigaciones civiles y adaptarlos a las necesidades de la seguridad y la defensa (p ej. Programa COINCIDENTE del MINISDEF español).

A lo largo del presente capítulo, se ha analizado el enorme potencial de las NT para su aplicación en cualquier área relacionada con el combate y la preparación del mismo. Las NT permitirán obtener sistemas y componentes más baratos, pequeños y eficientes. Así, los ordenadores militares tendrán una gran capacidad de procesado y su pequeño tamaño permitirá su integración en el armamento o en el uniforme del combatiente, en los equipos militares, en los sistemas de armas, en los vehículos, etc. Los grandes ordenadores se emplearán para la gestión de la batalla y la logística de las operaciones automatizando tareas que hasta ahora sólo podían llevarse a cabo por el hombre.

El desarrollo de sensores cada vez más potentes, pequeños, sofisticados y baratos, facilitará su dispersión en gran número en el entorno del combatiente, proporcionándole conciencia situacional y una red distribuida en el campo de batalla, de la que el mismo será un nodo, y en la que llevará a cabo sus operaciones.

Los sistemas de armas y misiles serán cada vez más pequeños y letales (precisos y potentes). La miniaturización de los sistemas de guiado permitirá el guiado de municiones de artillería convencional incluso de pequeños calibres. El desarrollo de materiales enfibrados nanocompuestos permitirá la fabricación de armas de pequeño calibre y municiones sin componentes metálicos.

Los avances en el campo de los materiales serán fundamentales para conseguir protecciones balísticas mejoradas, tanto para plataformas como para combatientes, disminuyendo el peso y abaratando los costes de fabricación. Asimismo, se desarrollarán materiales que permitirán el enmascaramiento y la reducción de firma multiespectral tanto de plataformas como de combatientes e infraestructuras, aumentando de esta manera su probabilidad de supervivencia. El empleo de estructuras adaptativas en plataformas, hará posible adaptarse a las distintas condiciones del combate.

Los vehículos serán cada vez más ligeros, ágiles y con un grupo motopropulsor más eficiente. Los RPV (*Remotely Piloted Vehicle*) en cualquier medio, serán una realidad, no solo para misiones ISTAR, sino en misiones de combate disminuyendo así la presencia del soldado en el campo de batalla y generando un debate ético/moral sobre su empleo. Por otro lado, se prevé un gran impacto de las NT en la miniaturización y eficiencia de los sistemas de generación y almacenamiento de energía necesario para su integración en los RPV de pequeño tamaño.

Todavía queda camino por recorrer en el avance hacia la miniaturización. Nuevas tecnologías de fabricación, aun no desarrolladas como la *molecular manufacturing*, permitirán la fabricación de sistemas autónomos artificiales actualmente muy difíciles y caros de construir (nanorobots). Un escalón intermedio, en el que actualmente se encuentra la tecnología,

es el uso de la modificación genética o el implante neuronal en grandes insectos o pequeños mamíferos que los convierte en robots de control remoto ideales para ciertas misiones (p ej. búsqueda de personas en catástrofes) y con capacidad de trabajar de manera colaborativa (p ej. ejércitos de robo-ratas).

Los avances en los implantes neuronales han contribuido al desarrollo de los interfaces cerebrales para el combatiente del futuro. Si a esto se añade el desarrollo de materiales biocompatibles, de ordenadores y fuentes de alimentación miniaturizados, y de nanosensores, la aplicación de las NT al combatiente del futuro harán de éste un verdadero sistema de armas en el que se podrán integrar todo tipo de sensores para la monitorización del campo de batalla, para las comunicaciones, para la mejora de sus capacidades (exoesqueletos) o para la dispensa de antídotos QB, utilizando como plataforma multisensor su casco inteligente o su uniforme de combate.

El uniforme del combatiente se constituye como un gran reto para las NT ya que debe proporcionar al soldado protección balística, contra proyectiles y fragmentos, protección contra agresivos QB, enmascaramiento, climatización para su adaptación a las condiciones climáticas y aislamiento del exterior, monitorización de constantes vitales y funciones corporales, y debe estar dotado de un tejido compresivo que actúe como apósito para heridas y con capacidad para la aplicación de medicinas (antibióticos).

La ingeniería genética y la biotecnología permitirán el desarrollo de nuevos sensores para la detección de agresivos QB y el desarrollo de nuevas vacunas y materiales de filtrado y neutralización que protegerán al soldado frente a amenazas QB.

Es obvio que el desarrollo de las NT introducirá notables mejoras tecnológicas en los sistemas de batalla que modificarán la forma del combate futuro, pero también generarán grandes incertidumbres por el mal uso que de ellas pudiera hacerse.

Los avances de las NT deben ser monitorizados por comités internacionales constituidos por expertos militares, de la seguridad y la defensa, profesionales de los acuerdos de no proliferación y representantes de la comunidad científica internacional. De esta manera, cualquier nueva aplicación con potencial militar, que se vislumbre en el horizonte de un descubrimiento científico, debe ser evaluada, fijados sus límites de actuación y establecidas sus medidas de verificación, si procediera, para de esta manera evitar un uso indebido de dichas tecnologías.

En definitiva, estamos ante una revolución tecnológica que generará grandes beneficios, que modificará notablemente los entornos: social, de la seguridad y la defensa y, en particular el campo de batalla; y que por tanto hay que potenciar pero a su vez controlar.

Bibliografía

1. http://www.armedforces-int.com/projects/future_force_warrior_system.html. [En línea].
2. Ministerio de Defensa (MINISDEF). *Estrategia de Tecnología e Innovación de la Defensa*. s.l., España: Servicio de Publicaciones del Ministerio de Defensa, 2010.
3. Guerrero Padrón, Héctor, y otros. *Microsistemas y Nanotecnología para la Defensa.* [ed.] INTA. s.l.: Servicio Publicaciones del MINISDEF, 2004. ISBN 9788492079896.
4. Alonso Rodríguez, María Concepción, y otros. Detección de anomalías y blancos en imágenes hiperespectrales. Madrid: Fundación Rogelio Segovia para el Desarrollo de las Telecomunicaciones, 2013. págs. 523-531. ISBN(13): 978-84-7402-399-2.
5. Stenbæk Schmidt, Michael, y otros. Xsense: using nanotechnology to combine detection methods for high sensitivity handheld explosives detectors. s.l.: SPIE, 2010. Vol. 7664, pág. 76641H.
6. Kerdcharoen, Teerakiat, Wongchoosuk, Chatchawal y Lorwongtragool, Panida. Malodor Detection Based on Electronic Nose.
7. Bar Sadan, Maya, y otros. Atom by atom: HRTEM insights into inorganic nanotubes and fullerene-like structures. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* Vol. 105, 41, págs. 15643–15648.
8. http://www.somewhereville.com/?page_id=10. [En línea].
9. Wood, Stephen, Jones, Rchard y Geldart, Alison. *The Social and Economic Challenges of Nanotechnology.* Economic and Social Research Council. Reino Unido: s.n., 2004. págs. 21-22.
10. Simonis, Frank y Schilthuizen, Steven. Nanotechnology. Innovation opportunities for tomorrow's defence. s.l., Holanda: TNO Science and Industry, 2006.
11. Österlund, L, y otros. Study on Nanotechnology Sciences into CBRN Defence. [ed.] FOI-The Swedish Defence Research Agency. s.l.: European Defence Agency, 2008.
12. Nasu, Hitoshi y Faunce, Thomas. Nanotechnology and the International Law of Weaponry: Towards an International Regulation of Nanoweapons. *Journal of Law Information and Science.* 2009-2010. Vol. 20.
13. Juvale, R. P. *Military Nanotechnology.* s.l.: Cyber Tech Publications, 2008. ISBN 978-8178843940.
14. Dortmans, Peter y Wang, Jung. *A Review of Selected Nanotechnology Topics and Their Potential Military Applications.* Ministerio de Defensa. Defence Science and Technology Organisation. Edinburg. Australia: s.n., 2004.

15. De Neve, Alain. Military Uses of Nanotechnology and Converging Technologies: Trends and Future Impacts. s.l., Bélgica: Center for Security and Defence Studies. Royal High Institute for Defence.
16. *Revolución nanotecnológica. Estado actual de las aplicaciones prácticas y avances de la nanociencia: desde las aplicaciones robóticas-biomédicas a las energéticas.* Madrid: Fundación Ramón Areces, 2010.
17. Propiedades y aplicaciones del grafeno. *Monografías del SOPT.* s.l., España: Servicio de Publicaciones del Ministerio de Defensa, 2013. 12.

Abreviaturas y acrónimos

AAF	Área de Actuación Funcional
AESA	Active Electronically Scanned Array
AMV	Armored Modular Vehicle
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
C2	Command and Control
CD&E	Concept Development and Experimentation
CEHIPAR	Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo
CIS	Communication and Information Systems
CM	Capacidad Militar
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
COINCIDENTE	Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas
COMINT	Communications Intelligence
DABIH	Detección de Anomalías y Blancos en Imágenes Hiperespectrales
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DGAM	Dirección General de Armamento y Material
DIRCM	Direct Infra Red Countermeasure
DNA	DesoxyriboNucleic Acid
DSA	Dispositivo de Seguridad y Armado
EAS	Equivalent Air Speed
ECD	Electro Chromic Display
ECM	Electronic Counter Measures

EDA	European Defense Agency
EEUU	Estado Unidos
EPI	Equipo de Protección Individual
ESA	European Space Agency
ESM	Electronic Support Measures
ETID	Estrategia de Tecnología e Innovación de la Defensa
EXPAL	Explosivos Alaveses
FAS	Fuerzas Armadas
FLIR	Forward Looking Infra Red
FOV	FIeld Of View
FPA	Focal Plane Array
GE	Guerra Electrónica
GMR	Giant Magnetic Resistance
GPS	Global Positioning System
HW	Harware
HPM	High Power Microwave
I+D	Investigación y Desarrollo
I+T	Investigación y Tecnología
IED	Impovised Explosive Device
IR	Infra Red
IIR	Imaging Infra Red
INS	Inertial Navigation System
INTA	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas»
ISR	Intelligence, Surveillance and Reconaissance
ISTAR	Intelligence, Surveillance, Target Acquisiton and Reconaissance
ITM	Instituto Tecnológico «La Marañosa»
JEMAD	Jefe del Estado Mayor de la Defensa
LABINGE	Laboratorio de Ingenieros del Ejército
LAF	Línea de Actuación Funcional
LED	Light-Emitting Diode
LCD	Light-Crystal Display
MANPADS	MAN Portable Air Defense System
MANTA	MANPADS Threat Avoidance
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MINISDEF	Ministerio de Defensa
MIRADO	Material, Infraestructuras, Recursos, Adiestramiento, Doctrina y Organización
MT	Meta Tecnológica
MWS	Missile Warning System
NAF	NATO Architecture Framework
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBQ	Nuclear, Biológico, Químico
NC	Nanociencia

NEC	Network-Enabled Capability
NNI	National Nanotechnology Initiative
NQR	Nuclear Quadrupole Resonance
NT	Nanotecnología(s)
OCM	Objetivo de Capacidades Militares
OLED	Organic Light Emitting Diodes
PANI	Polianilina
PDA	Personal Digital Assistant
PGA	Precision Guided Ammunition
QB	Químico, Biológico
RAM	Radar Absorbing Material / Random Acces Memory
RC-IED	Radio Controlled IED
REM	Requisito de Estado Mayor
RF	Radio Frecuencia
RFID	Radio-Frequency Identification
RM	Recurso Militar
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPV	Remotely Piloted Vehicle
RSFQ	Rapid Single-Flux Quantum
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAVIR	Señuelo Avanzado IR
SBA	Simulation Based Acquisition
SDGPLATIN	Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (DGAM)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SPR	Surface Plasmon Resonance
Ss	Subsistema
T/R	Transmisión/Recepción
TICS	Tecnologías de la Información, Comunicación y Simulación
TIR	Thermal Infra Red
TMR	Tunneling Magnetic Resistance
TRL	Technology Readiness Level
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCAV	Unmanned Combat Air Vehicle
USV	Unmanned Surface Vehicle
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
UV	Ultra Violeta
UWB	Ultra Wide Band
VIS	Visible
WIFI	Local Area Wireless Technology (WIreless local área network + high FIdelity)

Composición del grupo de trabajo

Presidente:	**D. Jesús Ildefonso Díaz Díaz** *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*
Secretario-coordinador:	**D. José Tomás Hidalgo Tarrero** *Coronel del Ejército del Aire*
Vocales:	**D. Antonio Hernando Grande** *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*
	D. Fernando Briones Fernández-Pola *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*
	D. Julio Plaza del Olmo *Unidad de Fotónica – Instituto Tecnológico la Marañosa*
	D. Jesús Carlos Gómez Pardo *Teniente coronel del Ejército de Tierra*

Relación de Monografías del CESEDEN

1. Clausewitz y su entorno intelectual. Kant, Guibert, Fichte, Moltke, Schlieffen, Lenin
2. Las Conversaciones de Desarme Convencional (CFE)
3. Disuasión convencional y conducción de conflictos: el caso de Israel y Siria en el Líbano
4. Cinco sociólogos de interés militar
5. Primeras Jornadas de Defensa Nacional
6. Prospectiva sobre cambios políticos en la antigua URSS. Escuela de Estados Mayores Conjuntos. XXIV Curso 91/92
7. Cuatro aspectos de la defensa nacional. (Una visión universitaria)
8. Segundas Jornadas de Defensa Nacional
9. IX y X Jornadas CESEDEN-IDN de Lisboa
10. XI y XII Jornadas CESEDEN-IDN de Lisboa
11. Anthology of the essays
12. XIII Jornadas CESEDEN-IDN de Portugal. La seguridad de la Europa Central y la Alianza Atlántica
13. Terceras Jornadas de Defensa Nacional
14. II Jornadas de Historia Militar. La presencia militar española en Cuba (1868-1895)

15. La crisis de los Balcanes
16. La Política Europea de Seguridad Común (PESC) y la Defensa
17. Second anthology of the essays
18. Las misiones de paz de la ONU
19. III Jornadas de Historia Militar. Melilla en la historia militar española
20. Cuartas Jornadas de Defensa Nacional
21. La Conferencia Intergubernamental y de la Seguridad Común Europea
22. IV Jornadas de Historia Militar. El Ejército y la Armada de Felipe II, ante el IV centenario de su muerte
23. Quintas Jornadas de Defensa Nacional
24. Altos estudios militares ante las nuevas misiones para las Fuerzas Armadas
25. Utilización de la estructura del transporte para facilitar el cumplimiento de las misiones de las Fuerzas Armadas
26. Valoración estratégica del estrecho de Gibraltar
27. La convergencia de intereses de seguridad y defensa entre las Comunidades Europeas y Atlánticas
28. Europa y el Mediterráneo en el umbral del siglo XXI
29. I Congreso Internacional de Historia Militar. El Ejército y la Armada en 1898: Cuba, Puerto Rico y Filipinas
30. Un estudio sobre el futuro de la no-proliferación
31. El islam: presente y futuro
32. Comunidad Iberoamericana en el ámbito de la Defensa
33. La Unión Europea Occidental tras Ámsterdam y Madrid
34. Iberoamérica, un reto para España y la Unión Europea en la próxima década
35. La seguridad en el Mediterráneo. Coloquios C-4/1999
36. Marco normativo en que se desarrollan las operaciones militares
37. Aproximación estratégica española a la última frontera: la Antártida
38. Modelo de seguridad y defensa en Europa en el próximo siglo
39. V Jornadas de Historia Militar. La aviación en la guerra española
40. Retos a la seguridad en el cambio de siglo. (Armas, migraciones y comunicaciones)
41. La convivencia en el Mediterráneo Occidental en el siglo XXI
42. La seguridad en el Mediterráneo. Coloquios C-4/2000
43. Rusia: conflictos y perspectivas

44. Medidas de confianza para la convivencia en el Mediterráneo Occidental
45. La cooperación Fuerzas de Seguridad-Fuerzas Armadas frente a los riesgos emergentes
46. La ética en las nuevas misiones de las Fuerzas Armadas
47. VI Jornadas de Historia Militar. Operaciones anfibias de Gallípoli a las Malvinas
48. La Unión Europea: logros y desafíos
49. La seguridad en el Mediterráneo. Coloquios C-4/2001
50. Un nuevo concepto de la defensa para el siglo XXI
51. Influencia rusa en su entorno geopolítico
52. Inmigración y seguridad en el Mediterráneo: el caso español
53. Cooperación con Iberoamérica en el ámbito militar
54. Retos a la consolidación de la Unión Europea
55. Revisión de la Defensa Nacional
56. Investigación, Desarrollo e innovación (I+D+i) en la Seguridad y la Defensa
57. VII Jornadas de Historia Militar. De la Paz de París a Trafalgar (1763-1805). Génesis de la España contemporánea
58. La seguridad en el Mediterráneo. Coloquios C-4/2002
59. El Mediterráneo: Proceso de Barcelona y su entorno después del 11 de septiembre
60. La industria de defensa: el desfase tecnológico entre la Unión Europea y Estados Unidos de América
61. La seguridad europea y las incertidumbres del 11 de septiembre
62. Medio ambiente y Defensa
63. Pensamiento y pensadores militares iberoamericanos del siglo XX y su influencia en la Comunidad Iberoamericana
64. Estudio preliminar de la operación: Libertad para Irak
65. Adecuación de la defensa a los últimos retos
66. VIII Jornadas de Historia Militar. De la Paz de París a Trafalgar (1763-1805). La organización de la defensa de la Monarquía
67. Fundamentos de la estrategia para el siglo XXI
68. Las fronteras del mundo iberoamericano
69. Occidente y el Mediterráneo: una nueva visión para una nueva época
70. IX Jornadas de Historia Militar. De la Paz de París a Trafalgar (1763-1805). Las bases de la potencia hispana
71. Un concepto estratégico para la Unión Europea

72. El vínculo transatlántico
73. Aproximación a las cuestiones de seguridad en el continente americano
74. Defensa y Sociedad Civil
75. Las organizaciones internacionales y la lucha contra el terrorismo
76. El esfuerzo de defensa. Racionalización y optimización
77. El vínculo transatlántico en la guerra de Irak
78. Mujer, Fuerzas Armadas y conflictos bélicos. Una visión panorámica
79. Terrorismo internacional: enfoques y percepciones
80. X Jornadas de Historia Militar. De la Paz de París a Trafalgar (1763-1805). El acontecer bélico y sus protagonistas
81. Opinión pública y Defensa Nacional en Iberoamérica
82. Consecuencias de la guerra de Irak en el Mediterráneo Occidental
83. La seguridad en el Mediterráneo. Coloquio C-4/2004-2005
84. Hacia una política de cooperación en Seguridad y Defensa con Iberoamérica
85. Futuro de la Política Europea de Seguridad y Defensa
86. Una década del Proceso de Barcelona: evolución y futuro
87. El conflicto árabe-israelí: nuevas expectativas
88. Avances en tecnologías de la información y de las comunicaciones para la Seguridad y la Defensa
89. La seguridad en el Mediterráneo. Coloquio C-4/2006
90. La externalización en las Fuerzas Armadas: equilibrio entre el apoyo logístico propio y el externalizado
91. La adhesión de Turquía a la Unión Europea
92. La seguridad en el Mediterráneo: complejidad y multidimensionalidad
93. La situación de seguridad en Irán: repercusión en el escenario regional y en el entorno mundial
94. Tecnología y Fuerzas Armadas
95. Integración de extranjeros en las Fuerzas Armadas españolas
96. El mundo iberoamericano ante los actuales retos estratégicos
97. XI Jornadas de Historia Militar. La enseñanza de la historia militar en las Fuerzas Armadas
98. La energía y su relación con la Seguridad y Defensa
99. Prospectiva de Seguridad y Defensa: viabilidad de una unidad de prospectiva en el CESEDEN

100. Repercusión del actual reto energético en la situación de seguridad mundial
101. La evolución de la Seguridad y Defensa en la Comunidad Iberoamericana
102. El Oriente Próximo tras la crisis de El Líbano
103. Los estudios de posgrado en las Fuerzas Armadas
104. Las fronteras exteriores de la Unión Europea
105. La industria y la tecnología en la Política Europea de Seguridad y Defensa
106. De la milicia concejil al reservista. Una historia de generosidad
107. La Agencia Europea de Defensa: pasado, presente y futuro
108. China en el sistema de seguridad global del siglo XXI
109. Naciones Unidas como principal elemento del multilateralismo del siglo XXI
110. Las relaciones de poder entre las grandes potencias y las organizaciones internacionales
111. Las nuevas guerras y la polemología
112. La violencia del siglo XXI. Nuevas dimensiones de la guerra
113. Influencia de la nueva Rusia en el actual sistema de seguridad
114. La nueva geopolítica de la energía
115. Evolución del concepto de interés nacional
116. Sesenta años de la OTAN ¿Hacia una nueva estrategia?
117. La importancia geoestratégica del África Subsahariana
118. El Mediterráneo: cruce de intereses estratégicos
119. Seguridad Nacional y estrategias energéticas de España y Portugal
120. Las armas NBQ-R como armas de terror
121. El futuro de las relaciones Latinoamérica-Estados Unidos
122. La influencia social del islam en la Unión Europea
123. África ¿nuevo escenario de confrontación?
124. Las nuevas guerras: globalización y sociedad
125. El impacto de la crisis económica en el área de la Seguridad y la Defensa
126. El ciberespacio. Nuevo escenario de confrontación
127. En una sociedad posheroica: la transformación del paradigma militar
128. Los ámbitos no terrestres en la guerra futura: espacio
129. Valores y conflictos. Las claves culturales en el conflicto del siglo XXI
130. Análisis prospectivo de las operaciones de multipolaridad

131. Nuevas guerras. Nuevas paces
132. Valores y conflictos. Aproximación a la crisis
133. Análisis y evaluación de la estabilidad del Magreb
134. África: riesgos y oportunidades en el horizonte de 2035
135. Enfoque integral de la seguridad en el espacio marítimo español
136. El liderazgo en las Fuerzas Armadas del siglo XXI
137. Necesidad de una conciencia nacional de ciberseguridad. La ciber–defensa: un reto prioritario
138. Racionalización de las estructuras de las Fuerzas Armadas. Hacia una organización conjunta
139. África futuro escenario de operaciones militares
140. Capacidades futuras de las Fuerzas Armadas
141. Recursos vitales y recursos energéticos. Implicaciones para la seguridad

141-B. Vital resources and energy resources. Repercussions for security



PUBLICACIONES DE DEFENSA

GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE DEFENSA

SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES Y PATRIMONIO CULTURAL

ISBN 978-84-9091-009-2