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.