

LÍNEA NANOTECNOLOGÍA Y NUEVOS MATERIALES

Guía introductoria al tema:

"Motores Moleculares y Nanomáquinas"

1. Introducción

La nanociencia, la nanotecnología y los nuevos materiales han sido considerados, de forma conjunta, una de las cinco líneas estratégicas en todas las anteriores ediciones del Programa Investiga IDI (<http://www.programainvestiga.org/>). Esta elección se debe a que estas dos temáticas se han ido configurando como temas claves en la investigación en los países más desarrollados del mundo, tanto a nivel público como privado. Cabe mencionar que hace ya 19 años que los EE.UU. se puso en marcha la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI, <http://www.nano.gov/>) que tiene como finalidad lograr que dicho país fuese líder mundial en la aplicación de la nanotecnología en diversos sectores. Por su parte, la Unión Europea ha considerado a la nanotecnología como un eje estratégico de investigación tanto para el VII Programa Marco (2007-2013) como para el Programa Horizonte 2020 (H2020) que se ha extendido de 2014 a 2020. En particular, dentro del programa H2020 la nanotecnología es una pieza clave de las Tecnologías Clave Facilitadoras (KET, en inglés), indicando que este conocimiento está saltando desde los centros de investigación y universidades a las empresas, que convierten este conocimiento en productos y servicios muy variados. Hay que mencionar que China, junto con otros países asiáticos como Japón y Corea del Sur, ha emergido con gran fuerza en el panorama mundial de la investigación y en estos momentos lidera la producción científica en nanociencia y nanotecnología la vez que aumenta su posición en el ranking de patentes.

Una característica de la nanotecnología es su **carácter transversal**, es decir que tiene aplicación en muchísimos sectores productivos, lo que ha permitido que en cada edición del Programa Investiga I+D+I se haya podido abordar un aspecto diferente: (i) la nanotecnología en general, (ii) la nanotecnología y su aplicación en los deportes, (iii) el impacto de la nanotecnología en agricultura, alimentación y cosmética, (iv) los nano-robots, (v) el fascinante y versátil grafeno, (vi) la nanotecnología para llevar puesta, (vii) la relación entre la nanotecnología y las ciudades inteligentes, (viii) la nanotecnología y el desarrollo sostenible, (ix) las aplicaciones médicas (nanomedicina) y (x) las aplicaciones en el ámbito de la energía y el medioambiente. Parece que los temas se van agotando, pero no es así, y dado el carácter transversal de la nanotecnología, en este documento se propone un tema de trabajo para el curso 2019-2020 que quizás está menos cercano a una aplicación real, hoy por hoy, pero en el que se investiga mucho a nivel de laboratorio por sus importantes implicaciones. Nos referimos al campo de los **Motores moleculares y Nanomáquinas**, un tema de perfil básico, fundamental, que tiene conexión con diferentes campos de aplicación en los que se requiera una movilidad controlable de objetos de tamaño nanométrico, como en dispositivos médicos, en sensores, etc. De alguna manera este tema está enlazado con el de los nano-robots o con el de la nanomedicina, pero no adelantemos acontecimientos.

La nanotecnología es, además, un tema de **carácter multidisciplinar** que se configura a través de aportaciones de diferentes ciencias “tradicionales” (física, química, biología) por lo que tiene gran amplitud y proporciona diferentes enfoques en el estudio de cualquier temática que parezca más específica. De esta forma un tema aparentemente simple como el de los Motores moleculares y Nanomotores se puede desarrollar pensando desde la biología y sus innumerables ejemplos, o desde la física y la ingeniería. La elección de la temática de este año supone un reto para los participantes: (i) por un lado estos se deben adentrar en el fascinante mundo de la nanotecnología, identificando sus peculiaridades, y mostrando su enorme potencial para generar nuevos materiales y dispositivos; y (ii) por otro lado deberán converger, enfocarse, en la temática propuesta, que representa una pequeña parte de todo el universo nanotecnológico. El reto, como en ocasiones anteriores, es plantear un trabajo en el que se combine la comprensión de lo que es la nanotecnología con la aplicación concreta en el ámbito de los Motores Moleculares y Nanomáquinas, a los que nos vamos a referir a partir de ahora con el **acrónimo MMNM**.

Se debe mencionar que otro objetivo de esta incursión en el mundo de la nanotecnología es hacer ver a los estudiantes participantes que la nanotecnología tiene también un lado menos positivo, como ocurre con prácticamente todas las tecnologías. El automóvil, los productos químicos, las centrales nucleares, o los productos pesticidas, son ejemplos de tecnologías que han aportado progreso a la humanidad pero que llevan implícitos una serie de riesgos, que debemos gestionar de una forma adecuada, aplicando regulaciones y normas, de forma que los efectos positivos sean muy superiores a los negativos y estos últimos sean manejables y controlables. Tener en cuenta estos aspectos durante el desarrollo del trabajo es un aspecto que será valorado positivamente en la evaluación del mismo.

En resumen, el trabajo es una ocasión para aprovechar la fascinación que produce lo diminuto para fomentar la curiosidad por la ciencia, aumentar los conocimientos sobre las tecnologías que se están comenzando a aplicar, y fomentar el espíritu crítico de los participantes, quienes serán los ciudadanos del futuro, todos como consumidores y usuarios, algunos como emprendedores, otros como investigadores científicos y, los menos, quizás como líderes políticos.

En la segunda sección de este documento se repasan los principales aspectos que caracterizan a la nanotecnología. La tercera sección se dedica a esbozar varias ideas sobre el tema planteado en esta edición del Programa Investiga I+D+I, incluyendo una serie de preguntas y temas particulares que pueden utilizarse para participar en el Foro abierto del Programa Investiga I+D+I, en el que se intercambiarán ideas con las que construir los trabajos que los alumnos desarrollarán más adelante. La cuarta sección proporciona unos consejos sobre la elaboración de los trabajos. Se termina el documento con un pequeño conjunto de referencias que pueden ser de utilidad para iniciar las investigaciones bibliográficas o en la web.

2. Nanociencia y Nanotecnología: aspectos claves

Se puede definir la “nanociencia” como la acumulación estructurada de conocimientos interconectados que permiten entender cómo funciona la naturaleza cuando es observada a una escala diminuta, la denominada “**nanoescala**”, es decir, cuando se observan objetos con un tamaño de unos cuantos nanómetros y se estudian sus propiedades. Un nanómetro es una unidad de

longitud realmente pequeña: un nanómetro equivale a 0,001 micrómetros o micras, a 0,000001 milímetros, o a 0,000000001 metros. Se puede escribir la misma cadena de equivalencias usando notación científica: $1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m}$. ¡Un nanómetro equivale a la millonésima parte de un milímetro! Cuesta imaginarse estos tamaños. El prefijo "nano" (que procede del griego "nanos", diminuto) se utiliza para referirse a las cosas muy, pero que muy, pequeñas.

Por su parte la "nanotecnología" va más allá de la nanociencia, relacionada con el conocimiento más básico, y pretende convertir los conocimientos que esta nos aporta para diseñar materiales y dispositivos con nuevas propiedades, con los que mejorar bienes, productos o servicios e incluso proponer otros radicalmente nuevos. Por tanto, la nanotecnología tiene que ver esencialmente con la aplicación del conocimiento que surge de la nanociencia, pero las cosas no son blancas o negras, y en los grupos de investigación por lo general se abordan estudios básicos en muchas ocasiones poniendo el ojo en una posible aplicación. La generación del conocimiento más básico se desarrolla fundamentalmente en universidades y centros de investigación, mientras que la aplicación del conocimiento se suele desarrollar en centros tecnológicos y empresas. Por cierto, esta generación del conocimiento requiere grandes inversiones (contratación de personas muy preparadas, instalaciones adecuadas, equipamientos de última generación, apoyo administrativo eficiente), que pueden retornar como beneficios si dicho conocimiento se pone en marcha.

Muchas veces se piensa que la nanociencia y la nanotecnología son términos modernos o casi futuristas, con los que nos encontramos de bruce en comics, películas, novelas o series de televisión. Sin embargo, no son tan novedosos ya que las investigaciones en nanociencia llevan fraguándose en los laboratorios de investigación durante casi cincuenta años. Ya en el año 1959, el Premio Nobel de Física Richard Feynman anticipó muchos de los conceptos y de los instrumentos que se manejan actualmente en esta fascinante disciplina. Sin embargo, es cierto que ha sido durante los últimos 20-30 años cuando la nanociencia y la nanotecnología han experimentado un espectacular impulso gracias a las inversiones efectuadas por parte de gobiernos, instituciones y empresas, que se han percatado de sus enormes posibilidades. Como ya se ha mencionado antes la primera iniciativa de grandes dimensiones para fomentar la nanotecnología se puso en marcha en los EE.UU. y se denominó "National Nanotechnology Initiative" (<http://www.nano.gov/>) que invierte cada año, solo en ese país más de 1200 millones de dólares. Con estas inversiones se han puesto en marcha nuevos laboratorios, se han formado científicos e ingenieros expertos en estas temáticas, se han realizado prototipos y demostradores, etc. Por cierto, dado que el término "nanotecnología" es el que más ha impactado en los medios de comunicación y en la sociedad, a partir de este momento será el que se utilizará en este documento tanto para referirse a los aspectos básicos como más aplicados.

Volviendo a la nanoescala, que también suele denominarse "nanomundo", nos damos cuenta que es un "escenario" poblado por diferentes tipos de "nanoobjetos" y "nanoestructuras", muy diferentes tanto en composición como en forma. El nanomundo es tan rico y variado como el mundo macroscópico al que estamos habituados. Entre la "fauna" que puebla el nanomundo podemos incluir átomos, moléculas (algunas pequeñas pero otras muy grandes y complicadas), nanopartículas, nanoporos, nanotubos de carbono, el grafeno, nanohilos metálicos y semiconductores, cadenas de ADN, proteínas, ribosomas, virus, etc. Esta "nanofauna" es interesante porque en algunas ocasiones manifiesta una serie de fenómenos que no se pondrían de manifiesto si su tamaño fuese mucho

mayor. Por poner un ejemplo una fibra de carbono, que puede verse a simple vista, tiene unas buenas propiedades mecánicas, pero sus "hermanos pequeños", los nanotubos de carbono tienen aún mejores propiedades. Esto es lo que da a todo lo "nano" un gran valor añadido con respecto a los "micro" o lo "macro" y por eso se dice que lo "nano" es diferente, pero además aporta un elevado valor añadido, por lo que se busca sus aplicaciones tecnológicas.

¿Por qué aparecen estas nuevas propiedades? Hay varias razones. Por un lado se sabe que los átomos de las superficies se comportan de una forma diferente a los átomos que se encuentran en el interior del objeto, ya que unos y otros tienen diferentes entornos. A medida que un objeto se hace más y más pequeño se observa como la proporción de átomos de la superficie aumenta más y más. Por ejemplo en una nanopartícula de 100 nm de diámetro, un menos del 2% de sus átomos están en la superficie, mientras que en una nanopartícula de 3 nm ese porcentaje crece hasta aproximadamente el 60%. Se puede decir que la nanopartícula de 3 nm es más superficie que volumen. Por lo tanto, a medida que un objeto se hace más pequeño la importancia de la superficie se hace mayor y las propiedades de las superficies se ponen más de manifiesto.

Sin embargo no sólo se trata de la importancia de las superficies, sino que, además, a medida que el tamaño de los objetos se hace más y más pequeño, aparecen otros fenómenos que sólo la intrigante Mecánica Cuántica puede explicar. Podemos hablar de la Mecánica Cuántica como el "manual de leyes y reglas" que los científicos han escrito para entender la naturaleza. Por cierto, este manual ya tiene un siglo prácticamente, y es hoy por hoy el que se usa en ciencia porque funciona explicando el mundo en que vivimos y sirve para diseñar aparatos y productos que usamos de manera cotidiana. Estas reglas y leyes que explican cómo se forman las moléculas y otros objetos más y más complejos, y cómo estos objetos reaccionan frente a deformaciones mecánicas, campos eléctricos, campos magnéticos o la luz. No hay que alarmarse, ya que los participantes del Programa Investiga IDI no van a tener que estudiar los fundamentos de esta apasionante disciplina (solo aquello que más adelante estudien física, química, o ingeniería electrónica o de telecomunicaciones podrán profundizar su conocimiento). Por ahora deben saber que en los nanoobjetos aparecen una serie de efectos "cuánticos" que les proporcionan interesantes propiedades que no aparecen en micro o macroobjetos. Por ejemplo, los efectos cuánticos hacen que los electrones que se mueven dentro de una nanopartícula únicamente puedan poseer ciertas energías, que llamamos niveles permitidos de energía. Además, a medida que el nanoobjeto se hace pequeño los valores permitidos (niveles) para estas energías van cambiando. Como consecuencia muchas propiedades eléctricas, magnéticas u ópticas, que dependen de estos niveles de energía, también se modifican a medida que cambia el tamaño del objeto. Por ejemplo, las nanopartículas de ciertos materiales semiconductores cambian de color a medida que su diámetro crece, pasando por casi toda la gama de colores del arco iris. Obviamente esto es una propiedad fascinante que hay que estudiar, pero también es importante determinar si este fenómeno tiene aplicación. En este caso concreto las nanopartículas que proporcionan o absorben luz en un color concreto pueden usarse para fabricar marcadores en medicina, fabricar un láser, sintetizar un nuevo tinte, fabricar una crema protectora de la radiación solar o ser incorporados en los píxeles de una televisión de última generación. Esta es otra característica de la nanotecnología, la **versatilidad** del uso de algunos nanomateriales en contextos muy diferentes.

Los efectos que se han mencionado anteriormente se denominan **"efectos de tamaño"** y resultan bastante perturbadores, ya que para cada tamaño y forma que de un nanoobjeto éste muestra propiedades diferentes. Esto, que parece un problema o un descontrol, en realidad es la gran fuerza de la nanotecnología: si se controla el tamaño y la forma de un nanoobjeto, se pueden controlar sus propiedades y entonces estaremos en condiciones de sacar más provecho de ellas. La idea es fascinante. Por eso, el objetivo último de la nanotecnología es controlar, mediante metodologías físicas y químicas, la forma, tamaño y orden interno de los nanoobjetos y nanoestructuras para modificar a voluntad sus propiedades. Por ejemplo, controlando el tamaño y forma de los nanoobjetos se puede modificar su conductividad eléctrica, su color, su reactividad química, su elasticidad, etc. Se dice que podemos fabricar **"materiales a medida"** o que podemos "sintonizar" (o "tunear" en argot más juvenil) las propiedades de los materiales a nuestra voluntad. Este control de la materia a escala nanométrica se está mejorando continuamente gracias a poderosas herramientas físicas y novedosas reacciones químicas, que permiten fabricar nanodispositivos y sintetizar nanomateriales. Además, estos nanoobjetos pueden unirse entre sí, con las oportunidades y las limitaciones de las leyes físicas y químicas, para fabricar sistemas más complejos, con una mayor organización, capaces de hacer realizar múltiples funciones.

Para poder operar en el nanomundo, necesitamos unos sofisticados instrumentos, que funcionan como los "ojos" que nos permiten observar lo que ocurre en el mismo. Entre estos instrumentos podemos destacar el microscopio de efecto túnel (STM), el microscopio de fuerzas atómicas (AFM) o los poderosos microscopios electrónicos de última generación. Estas herramientas permiten la observación e incluso, en algunos casos, la manipulación directa de átomos y moléculas. Desde hace casi 30 años, el ser humano ya sabe cómo manipular los átomos, uno a uno, para realizar pequeñas estructuras artificiales. La nanotecnología se ha hecho mayor a nuestra vista y es lógico pensar que en algún momento madurará proporcionando los frutos que en el pasado solo eran propuestas imaginativas.

Es importante comentar que las estrategias de fabricación átomo a átomo, de manera manual, son muy bellas e impactantes pero no son transferibles para la fabricación a gran escala de dispositivos o materiales, salvo que se automaticen, se hagan ultra-rápidas y sin perder precisión. Aún se está muy lejos de lograr esto. Esto es un ejemplo de que no todos los descubrimientos o desarrollos de la ciencia básica se pueden transferir a la industria de buenas a primeras.

Las ideas y herramientas que se usan en nanotecnología evolucionan de manera imparable gracias a las aportaciones que realizan biólogos, químicos, físicos, ingenieros, matemáticos y médicos. La nanotecnología es un campo absolutamente multidisciplinar, abierto en muchos frentes. Esto es así porque los componentes de la materia, átomos y moléculas, son los mismos para todas estas especialidades científicas. En la nanoescala todos usamos los mismos "ladrillos" fundamentales: átomos y moléculas. Se puede decir que la nanotecnología es un ejemplo de fusión de disciplinas, de **"convergencia tecnológica"**, convergencia que se sigue fraguando día a día en los laboratorios de todo el mundo.

No se debe olvidar que la biología juega un papel clave dentro de la nanotecnología, ya que la vida en sí misma es nanotecnología pura. No hace falta más que observar el interior de una célula para

darse cuenta que realiza todas sus funciones gracias a **"máquinas nanométricas"**, que funcionan a la perfección gracias a larguísimo proceso evolutivo. Además, la biología nos presenta ante nuestros ojos un gran arsenal de soluciones y estrategias que nos permiten resolver problemas concretos. La biología es una inagotable fuente de **"bioinspiración"** que puede aportar soluciones a problemas que se presentan en otras áreas como la ciencia de materiales o la química. Este aspecto es bastante importante, como se verá más adelante en el tema planteado en esta edición, ya que muchos de los procesos dinámicos que ocurren a nivel celular requieren de mecanismos móviles, de "accionadores", que permiten abrir o cerrar un poro, producir el movimiento de un flagelo, el transporte de una proteína de un lugar a otro, o la apertura y cierre de las flores de algunas especies vegetales. La vida es una fuente continua de conocimiento sobre los MMNM.

Para terminar esta introducción no se debe olvidar mencionar que los "nanoproductos" concebidos a partir de la nanotecnología están invadiendo poco a poco la totalidad de los sectores económicos: materiales, electrónica, informática y comunicaciones, energía y medioambiente, transporte, construcción, sector textil, biotecnología, salud, agricultura, alimentación, etc. Se dice que la **nanotecnología es "transversal y ubicua"**. La nanotecnología ya comienza a ser un gran negocio y se puede afirmar que el futuro será, en parte, "nano". En este nuevo contexto, es muy importante tener en cuenta los posibles efectos secundarios (generalmente negativos) que pueden tener los avances de la nanotecnología. Estos posibles impactos negativos no son exclusivos de la nanotecnología, todas las tecnologías tienen su cara amable y su lado oscuro: la energía nuclear, las centrales térmicas, los vehículos, los aviones, etc. En el caso de la nanotecnología se sabe que ciertos nanomateriales son potencialmente peligrosos para la salud y el medioambiente. Es muy **importante que el uso de las nanotecnologías sea lo más inocuo posible** para todos nosotros y para el medioambiente, por lo que se están haciendo estudios para lograr que no sean percibida como una amenaza por la sociedad, frenando así expectativas sobre su desarrollo. Es muy importante estar informados de los pros y los contras de cada tecnología (sea "macro" o "nano") para que, como ciudadanos formados y con espíritu crítico, podamos conocer las repercusiones de todo tipo que los nanoproductos puedan tener, y así actuar exigiendo que haya normativa y reglamentación adecuadas que garanticen una fabricación, una comercialización, un consumo, un reciclado seguros tanto para las personas como para el medioambiente, y exigir también la vigilancia del cumplimiento de dichas normas.

3. La mecánica en la nanociencia: Motores Moleculares y Nanomáquinas (MMNM)

El mundo nanométrico está plagado de objetos con diferentes propiedades: ópticas, magnéticas, electrónicas, etc. Por lo general estos nanobjetos no requieren cambios de posición o de forma para realizar sus funciones. Por ejemplo, un punto cuántico semiconductor tiene una posición estable dentro de un pixel, introducido en una matriz de otro material (un polímero por ejemplo) y durante toda su vida útil no requiere cambios posicionales. Lo mismo sucede con una nanoestructura magnética que realice las funciones de un "bit" en un disco duro, pues se espera que ocupe la misma posición durante toda su vida útil, o de lo contrario sería imposible controlar la información que almacena. Sin embargo, es posible que en algunos casos necesitemos que una nanoestructura vaya de un sitio a otro para llevar a cabo su función o que realice un movimiento oscilante entre dos posiciones. Vamos a ilustrar esto con ejemplo concretos.

Imaginemos que en un proceso biológico se requiere que una proteína producida por otro organismo y que está almacenada en un sitio concreto llegue a otro sitio específico para cumplir su misión (funcional o estructural). En este caso, la naturaleza ha generado "transportadores" de tamaño nanométrico. Un ejemplo lo encontramos en la kinesina. Se recomienda ver la espectacular animación que muestra el funcionamiento de una kinesina transportando una vesícula mientras se mueve "caminando" de una manera muy peculiar por la superficie de un microtúbulo (<https://www.youtube.com/watch?v=y-uuk4Pr2i8>). Sin duda, esta animación nos muestra lo complejo del funcionamiento de los seres vivos. Otros ejemplos extraídos de la biología los encontramos en las moléculas diseñadas para realizar movimientos de apertura y cierre en bombas de iones situadas en las membranas celulares, o en el funcionamiento de la proteína denominada miosina que se encuentra en nuestros músculos para lograr los movimientos de estiramiento y contracción, o en las proteínas que se encuentran en un ribosoma, orgánulo que se encarga de transcribir código del ARN en secuencias de aminoácidos, es decir proteínas. También encontramos máquinas o motores moleculares en los sistemas de propulsión de algunos sistemas unicelulares (bacterias, espermatozoides) que son los responsables del movimiento de cilios y flagelos. No debemos olvidarnos tampoco de los sistemas biomecánicos usados por los virus para almacenar el ADN o ARN en sus cápsidas, que permiten empaquetar a muy alta densidad las cadenas de ácidos nucleicos. Podríamos poner decenas de ejemplos en los que el movimiento en la nanoescala es un asunto de gran importancia para el funcionamiento de los seres vivos.

Pongamos un segundo ejemplo. Imaginemos un agujero de tamaño nanométrico, con forma cilíndrica, que se hace en un material (que bien pudiera ser silicio por poner un ejemplo bien conocido) con alguna técnica litográfica (aquella que permite hacer estructuras y patrones sobre una superficie usando haces de electrones, iones o luz). Imaginemos una superficie con cientos de miles de estos agujeros y supongamos que en los mismos somos capaces de introducir moléculas de alguna sustancia (fármaco, nutriente, bactericida,...) que deseemos almacenar pero que además queremos poder liberar al entorno cuando deseemos, a voluntad. Si cada poro o agujero que hemos fabricado no tiene tapa, el resultado será que tras su almacenamiento las moléculas se escaparán libremente al no tener un obstáculo que las retenga y al poco tiempo los "nanodepósitos" que hemos construido estarán vacíos. Esto puede ser interesante si eso es justo lo que deseamos para lograr una rápida distribución de estas moléculas en el medio donde deseamos difundirla. Si no deseamos que escapen libremente, la solución puede ser poner una especie de tapón en cada uno de los agujeros (un "nanotapón"). Por ejemplo, ese tapón podría ser otra molécula del tamaño adecuado que con el tiempo se degrade mediante reacciones químicas inducidas por un cambio de pH la presencia de luz, etc.. De esta forma se lograría que el "nanotapón molecular" desapareciese o cambiase de tamaño logrando que las moléculas salgan de forma más lenta de esos depósitos. Pero podemos ir más allá e intentar poner una compuerta, que se abra y se cierre a voluntad, aplicando luz, un campo eléctrico o un campo magnético, por ejemplo. Esta "nanocompuerta" se podría abrir entonces cuando se desee (aplicando el correspondiente estímulo exterior) y lograr así la liberación del fármaco, nutriente o bactericida en los momentos que sea más conveniente. ¿Qué se necesitaría? Un primer sistema mecánico de dos posiciones (abierto, cerrado) que funcionaría como tapa o compuerta, y un segundo sistema que convierta energía de algún tipo (química, luz, calor, electricidad, etc.) en energía mecánica que permita al primer sistema cambiar de posición entre las dos posibles opciones, es decir se requiere algún tipo de motor en la nanoescala, que podríamos

llamar "nanomotor". Dicho motor puede estar constituido por una sola molécula, que puede tener una estructura muy compleja. Estaríamos hablando de un "motor molecular". Al conjunto de "nanocompuerta" y motor molecular se le podría llamar "nanomáquina".

Se han puesto dos ejemplos de tipos sistemas nanométricos que son muy diferentes, unos que funcionan en sistemas biológicos haciendo funciones muy diferentes, y otros fabricados por los hombres para realizar otras funciones que, por lo general, no han sido requeridas por los seres vivos. En algunos casos, comprender cómo funcionan los motores moleculares biológicos nos servirá para diseñar motores moleculares para usos médicos como la regeneración de tejidos o para el transporte de fármacos a lugares específicos. En estos casos se habla de **nanotecnología "bioinspirada"**. Llegados a este punto se puede definir una máquina molecular como un dispositivo que se forma mediante el ensamblado de diversas moléculas capaces de responder a determinados estímulos de forma que pueda realizar movimientos mecánicos y de esta forma llevar a cabo misiones concretas. Por su parte las nanomáquinas, además de los nanomotores o los motores moleculares, pueden integrar otras moléculas y otras estructuras no moleculares como barras metálicas, nanoestructuras dentadas, cavidades para depósitos de moléculas, compuertas, etc.

En otras ocasiones no es necesario acudir a la naturaleza y podemos inspirarnos en motores similares a los que hacemos los humanos en el mundo macroscópico. Un ejemplo de propulsor de escala nanométrica que se puede gobernar externamente mediante campos magnéticos se ha desarrollado en el Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC) por el Grupo de Bionanodispositivos Inteligentes. Ejemplos de estos dispositivos se pueden encontrar en <https://www.ibecbarcelona.eu/nanodevices>. Este tipo de dispositivos nos recuerdan a los propulsores usados en los viajes espaciales, pero en realidad sirven para viajar por el nanomundo y hacer funciones tan diversas como atacar bacterias dañinas o eliminar sustancias contaminantes. Desde luego la nanotecnología brinda soluciones muy imaginativas para resolver problemas, pero evidentemente, esto es así porque los científicos y las científicas que las desarrollan son muy creativas.

Los MMNMs que diseñen los humanos podrán integrarse en otras estructuras que hagan unas funciones diferentes de tal manera que podamos construir un dispositivo nanométrico "multifuncional". Pongamos un ejemplo. Imaginemos un motor molecular inspirado en los flagelos de algunas bacterias que se une a un liposoma (estructura hueca con fosfolípidos en su exterior) que en su interior contiene moléculas de un fármaco capaz de atacar una célula tumoral (quimioterapéutico). Además a esta estructura se le añade una proteína capaz de identificar las membranas celulares de los tumores y también capaz de anclarse a las mismas mediante una reacción química. Este conjunto podría verse como una especie de "fármaco inteligente" pero también podríamos pensar en términos de una "nanomáquina" compleja (que algunos puede llamar incluso un "nano-robot") cuya misión es aniquilar el cáncer funcionando como un "misil rastreador" hace siguiendo la estela de calor de un avión. Hay otras aproximaciones que usan el movimiento para eliminar células tumorales. Imaginemos que logramos insertar nanopartículas magnética dentro de células tumorales evitando que penetren en células sanas. Imaginemos ahora que aplicamos campos magnéticos oscilantes que hacen moverse a la partícula de un lado a otro o que inducen una rotación de la partícula dentro de la célula dañando sus orgánulos y membrana. De esta forma la

célula tumoral sería destruida por el movimiento, aunque en este caso no usaríamos un motor molecular sino que se induciría movimiento desde el exterior. En cualquier caso, está claro que los verdaderos "nano-robots", cuando existan realmente, requerirán nanomáquinas que integrarán (además de sensores, sistemas de anclaje, almacenes de carga, o nanoantenas para emitir datos de posición) motores moleculares u otros tipos de motores tanto para su propulsión como para hacer funciones como abrir la membrana, inyectar moléculas de fármacos, abrir o cerrar compuertas, etc.

Los MMNMs abren una nueva posibilidad, la del movimiento de las nanoestructuras o nanoobjetos, y por eso van a jugar un papel clave en el futuro de la nanotecnología y sus aplicaciones. Sin embargo, el estudio de los motores moleculares no es nuevo y arranca hace más de cincuenta años! pues ya fue sugerido en 1959 por Richard Feynman, al que hemos mencionado anteriormente. Hubo que esperar unos cuantos años hasta que estas ideas se hiciesen realidad gracias a la construcción de moléculas complejas usando conceptos de la denominada **química supramolecular**. Entre los protagonistas de estas investigaciones no podemos dejar de nombrar a tres investigadores, Jean-Pierre Sauvage, Sir J. Fraser Stoddart y Bernard L. Feringa, quienes recibieron en 2016 el premio Nobel de Química por su contribución en "el diseño y la síntesis de máquinas moleculares". Estas máquinas, desarrolladas en los años 1980 y 1990, se basaban en moléculas de llamativos nombres, como catenanos y rotaxanos, con las que se pudieron construir "ascensores moleculares", "nanomúsculos artificiales" y "nano-coches" moleculares. Fascinante, sin duda. Desde entonces son muchos los trabajos y los estudios que se han publicado sobre estos temas, lo que se puede comprobar haciendo una visita a Google Académico (<https://scholar.google.es/>) para buscar en este repositorio gigantesco información sobre artículos publicados sobre temas concretos. Por ejemplo, a día de hoy se pueden encontrar más de 370.000 referencias sobre "molecular motors", de las que más de 17.000 se han publicado desde 2018, lo que indica que es un campo muy activo y muy amplio. Como curiosidad mencionar que la entidad francesa CNRS (una de las más grandes del mundo) ha organizado una competición para saber qué "nano-coche" es el mejor (<http://nanocar-race.cnrs.fr/classementen.php>). ¡A veces los científicos y las científicas disfrutamos como niños/as!

Precisamente, mostrar una parte de estos avances es el reto para los y las participantes en esta edición del certamen Investiga I+D+I. Es evidente que el ámbito de aplicaciones de lo "nano" es muy extenso y que se requiere poner el foco en algunas de las aplicaciones o en algunos de los nanomateriales que son protagonistas de la nanotecnología. En esta ocasión vamos a concentrar nuestro interés en conocer cómo las herramientas de la nanotecnología se han utilizado para desarrollar el campo de los motores moleculares y las nanomáquinas. Los trabajos que deben redactar y presentar los participantes de esta edición del Programa Investiga I+D+I deben basarse en indagaciones y consultas en artículos de investigación, artículos de prensa, cientos de páginas web, blogs, etc. y otro tipo de documentos. En las referencias que se adjuntan se dan unas pequeñas pistas para empezar a dar estos primeros pasos que terminarán dando lugar a los trabajos, que deben tratar aspectos que permitan responder a algunas de las preguntas (no a todas, que es imposible en un solo trabajo) que se plantean en esta lista:

- ¿Qué son las nanomáquinas y los motores moleculares?
- ¿Qué tipos hay?
- ¿Dónde se encuentran en el caso de los seres vivos?

- ¿Cómo funcionan? ¿Qué pueden hacer?
- ¿De dónde obtienen la energía para su funcionamiento?
- ¿Funcionan en solitario o se pueden integrar en otra estructura?
- ¿Para qué pueden servir en ámbitos como la ingeniería o la medicina?
- ¿En qué otras áreas pueden tener impacto?
- ¿Tienen relación con los nano-robots?
- ¿Quiénes fueron los pioneros que trabajaron en este tema?
- ¿Qué países son activos en estas investigaciones?
- ¿Se trabaja en este tema en España? ¿En qué universidades y centros de investigación?
- ¿En qué consiste el nano-race que organiza el CNRS?

4. Consejos generales sobre la realización de los trabajos

Como puede verse la temática, como ocurre en casi todos los ámbitos de la ciencia, es muy amplia y corresponde al participante en el certamen fijarse en uno o dos temas, bucear en ellos y sus diferentes aspectos, y estructurar la información de manera lógica para elaborar un informe que refleje sus principales hallazgos y las principales conclusiones a las que llega. Evidentemente, además de los anteriores aspectos, los participantes se plantearán nuevas preguntas y nuevas respuestas, que proporcionarán gran valor añadido y originalidad a sus trabajos.

Se recomienda tener en cuenta las siguientes pautas a la hora de escribir los trabajos:

- Se debe realizar el trabajo intentando enfocarse en el tema propuesto evitando extenderse en otros temas como las aplicaciones de la nanotecnología en medicina, en deporte, en alimentación, etc.
- El trabajo debe ser concreto, no muy largo, evitando introducciones a la nanotecnología demasiado largas. Se recomienda un máximo de 20-25 páginas.
- Estructurar el trabajo en secciones y sub-secciones bien diferenciadas, que respondan a una lógica argumentativa.
- Escribir con claridad, sin faltas de ortografía y con una buena sintaxis.
- Evitar el plagio de otros trabajos o de páginas web. El "corta-pegar" no está permitido y es fácilmente detectable. Las frases que se usen literalmente deben ser entrecorilladas y su fuente tiene que ser citada convenientemente.
- Realizar una buena selección (no es necesario que sea muy larga) de referencias. Intentar minimizar las referencias a noticias publicadas en medios de comunicación, e ir a las fuentes originales (grupos de investigación, universidades, revistas científicas, libros, etc.). En la referencia indicar título del trabajo o libro, autores, volumen y página, fecha y enlace web.
- Incluir fotos o imágenes (citando su procedencia en el pie) solo si están relacionadas con el texto escrito. No incluir imágenes decorativas, sin más, ni incluir toda una batería de imágenes al final. Hay que procurar insertar cada imagen o foto en el sitio donde corresponda.
- Es muy recomendable incluir alguna actividad o experiencia de producción propia: encuestas y su análisis, entrevista a investigadores, informes de visitas a laboratorios, experimentos realizados en el aula, etc. Esto aporta valor añadido al trabajo.
- Es muy importante incluir reflexiones y opiniones propias (razonadas) en el trabajo.

- En el documento debe quedar claro el título del trabajo, la línea temática, la autoría y el colegio o instituto de procedencia.

5. Referencias y materiales de apoyo

Antes de pasar a enumerar algunas referencias de posible utilidad, hay que mencionar que un buscador en internet encuentra decenas de millones de sitios relacionados con la nanotecnología. En éste como en otros temas lo que sobra es información y, por tanto, se debe ser cauto a la hora de seleccionar las fuentes de información más adecuadas. La búsqueda de referencias veraces y útiles sobre los temas planteados es parte del trabajo que debe desarrollar cada alumno participante.

Las referencias que se muestran a continuación son de dos tipos, por un lado aquellas que están relacionadas con la nanotecnología en general y por otro se han añadido algunas relacionadas con el tema propuesto en esta edición. Estas referencias, junto con aquellas que se comparten en el foro, son tan solo el punto de partida de un largo camino que durará varios meses. ¡Buen viaje!

Referencias y enlaces relacionados con el tema "Nanotecnología"

- Guías elaboradas en ediciones pasadas del Programa Investiga IDI para la temática de Nanotecnología, junto a algunas de las presentaciones efectuadas por los alumnos finalistas, se pueden descargar en:
 - <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/Guiananociencia.pdf>
 - <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/quias2011/GUIANANOTECNOLOGIAPARALAALIMENTACIONYELCONSUMO.pdf>
 - http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/quias2012/GUIA_NANO-ROBOTS.pdf
 - <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/nuevosmaterialesparaeldeporte.ppt>
 - <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/PresentacionNanotecnologia.ppt>
 - <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/LINEA%204%20-%20NANO.ppt>
 - http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/guias2014-15/GUIA4_INTRODUCCION_NANOTECNOLOGIA-NANO_QUE_LLEVAMOS.pdf
 - <http://www.programainvestiga.org/pdf/guias2018-19/GUIANANOTECNOLOGIAPARARETOSENERGETICOS.pdf>
- "Unidad Didáctica de Nanociencia y Nanotecnología" (J.A. Martín-Gago, E. Casero, C. Briones y P. A. Serena, FECYT, 2008). Disponible de manera gratuita en versión digital en la página web <http://www.fecyt.es> o en la dirección <http://www.oei.es/salactsi/udnano.pdf>
- Presentación de P.A. Serena sobre la nanotecnología (formato Power Point) disponible en: <http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/presentaciones2013-14/PresentacionNanotecnologia-AutorExpertoPedroSerena.ppt>
- Presentación de P.A. Serena sobre la nanotecnología (formato PDF). Disponible en http://www.fundacionsanpatricio.com/investiga/pdf/presentaciones14_15/PresentacionNanotecnologiametodologiasymaterialesparaelaula.PedroSerena.pdf
- "La Nanotecnología" (P. A. Serena, Colección "Qué sabemos de...", Editorial La Catarata y el CSIC, Madrid, 2010)
- "El nanomundo en tus manos" (J.A. Martín Gago, C. Briones, E. Casero y Pedro A. Serena, Colección Drakontos, Editorial Crítica, 2014)

- "Los Riesgos de la Nanotecnología" (M. Bermejo y P. A. Serena, Colección "Qué sabemos de...", Editorial La Catarata y el CSIC, Madrid, 2017)
- Serie de televisión "Qué sabemos de la nanotecnología". Universidad Nacional de Educación a Distancia y CSIC. Esta serie consta de 17 capítulos a los que se puede acceder mediante el enlace <https://canal.uned.es/serial/index/id/875>
- En la página web <http://product.statnano.com/> hay un inventario de productos de la Nanotecnología en el que ya se mencionan más de 8000 productos que contienen algún tipo de nanocomponente.
- Otro inventario de productos (más de 3000) en <http://nanodb.dk/>
- La belleza del nanomundo puede observarse en la galería de imágenes finalistas del concurso internacional SMPAGE, coorganizado por el CSIC y la Universidad Autónoma de Madrid (<http://www.icmm.csic.es/spmage>). Estas galerías son de libre uso.
- El diario "El Mundo" tiene una sección completa dedicada a la nanotecnología llena de noticias, artículos y entrevistas. <http://www.elmundo.es/elmundo/nanotecnologia.html>
- En España, una gran parte de los grupos de investigación que trabajan en la temática de la nanotecnología se encuentran agrupados en la Red Española de Nanotecnología (NANOSPAIN) (<http://www.nanospain.org>). En la sección "Members" pueden identificarse más de 380 grupos que trabajan en este tema, lo que puede ser de interés para realizar entrevistas que pueden incluirse como parte del trabajo.
- Iniciativa Nacional de Nanotecnología de los EE.UU. (NNI, <http://www.nano.gov/>). Hay una sección interesante dedicada a temas educativos con muchos recursos.

Referencias y enlaces relacionados con el tema "Motores Moleculares y Nanomotores"

- Premio Nobel de Química de 2016:
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2016/
- Carlos Jaime Cardiel, Xavier Grabuleda. "Máquinas moleculares". Anales de la Real Sociedad Española de Química, ISSN 1575-3417, Nº. 2, 2001, págs. 3-13. Texto completo en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/866740.pdf>
- 1. Celedonio M. Álvarez, Héctor Barbero San Juan. "Nanotecnología: máquinas moleculares o cómo hacer que algo se mueva cuando tú quieres". Revista de ciencias, ISSN-e 2255-5943, Nº.2 (junio), 2013, págs.5-12. Texto completo en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4293888.pdf>
- Elena Casero. "Premio Nobel de Química 2016. Diseño y síntesis de máquinas moleculares". 2017. Texto en: <https://www.sebbm.es/web/es/divulgacion/acercate-nuestros-cientificos/1929-elena-casero-febrero-2017-premio-nobel-de-quimica-2016-diseno-y-sintesis-de-maquinas-moleculares>
- Jordi Díaz. "La Nanotecnología. El mundo de las máquinas a escala nanométrica". National Geographic. Junio 2018. No hay versión pública.
- Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC). Grupo de Bionanodispositivos Inteligentes: <https://www.ibecbarcelona.eu/nanodevices>
- Competición internacional de nano-vehículos organizado por el CNRS (Francia): <http://nanocar-race.cnrs.fr/classementen.php>
- Bombas iónicas para transporte de iones en membranas celulares: <https://www.youtube.com/watch?v=jaKQRRbkwds>
- Espectaculares animaciones del funcionamiento de una kinesina transportando una vesícula mientras se mueve "caminando" por un microtúbulo:

<https://www.youtube.com/watch?v=y-uuk4Pr2i8>

<https://www.youtube.com/watch?v=tMKIPDBRJ1E>

- Animación sobre el funcionamiento del músculo y el papel de la miosina y la actina en su movimiento de contracción/estiramiento:

<https://www.youtube.com/watch?v=ousflrOzQHc>

- Video sobre las máquinas moleculares que tenemos en nuestro cuerpo:

https://www.youtube.com/watch?v=X_tYrnv_o6A