

La nanorobótica: fundamentos epistemológicos e impacto social *

A nanorobótica: fundamentos epistemológicos e impacto social

Nanorobotics: Epistemological Bases and Social Impact

Domingo Fernández Agis y Jabel A. Ramírez Naranjo **

En este artículo presentamos una caracterización filosófica de la nanorobótica y sus relaciones con la racionalidad tecnocientífica, la economía y la sociedad. Las mayores dificultades y peligros de este campo proceden de la incertidumbre que le es consustancial, así como del poder que tiene capacidad de desplegar. Por otra parte, a causa de la necesidad que la nanorobótica tiene de acceder a dimensiones de la realidad recónditas por su extrema pequeñez, existen conexiones profundas entre esta tecnología y otras como la de la simulación computacional o la realidad virtual. En consecuencia, realizamos aquí una aproximación a las dificultades derivadas de la caracterización epistemológica de la nanorobótica, por su radical novedad. Estudiamos las principales características de la nanorobótica aplicada a la biomedicina, dada la importancia de esta disciplina y el carácter paradigmático que juega en el desarrollo de la nanorobótica. Por último, analizamos algunas de sus consecuencias económicas y sociales.

Palabras clave: nanorobótica; racionalidad; economía; epistemología; biomedicina

* Recepción del artículo: 23/09/2016. Entrega de la evaluación final: 24/03/2017. El artículo pasó por dos instancias de evaluación.

** *Domingo Fernández Agis*: profesor titular de la Universidad de La Laguna, España. Correo electrónico: dferagi@ull.es. *Jabel A. Ramírez Naranjo*: doctorando en la Universidad de La Laguna, España. Correo electrónico: jabel.ramirez.82@ull.edu.es.

Neste artigo apresentamos uma caracterização filosófica da nanorobótica e suas relações com a racionalidade tecnocientífica, a economia e a sociedade. As maiores dificuldades e perigos deste campo provêm da incerteza que lhe é inerente, bem como do poder que é capaz de desenvolver. Além disso, devido à necessidade que a nanorobótica tem de aceder às dimensões da realidade recônditas por sua extrema pequenez, existem conexões profundas entre esta tecnologia e outras, como a da simulação computacional ou a da realidade virtual. Consequentemente, realizamos aqui uma aproximação das dificuldades derivadas da caracterização epistemológica da nanorobótica por sua radical novidade. Estudamos as principais características da nanorobótica aplicada à biomedicina, em razão da importância desta disciplina e do caráter paradigmático que desempenha no desenvolvimento da nanorobótica. Finalmente, analisamos algumas de suas consequências econômicas e sociais.

Palavras-chave: nanorobótica; racionalidade; economia; epistemologia; biomedicina

In this article we present a philosophical characterization of nanorobotics and its relationships with techno-scientific rationality, the economy and society. The greatest difficulties and dangers in this field stem from its inherent uncertainty, as well as from the power that it has the capacity to deploy. On the other hand, due to the need that nanorobotics has to access the innermost dimensions of reality due to its extreme small size, there are deep connections between this technology and others such as computational simulations and virtual reality. Consequently, we carry out an approximation of the difficulties that derive from the epistemological characterization of nanorobotics applied to biomedicine, given the importance of this discipline and the paradigmatic role that it holds in the development of nanorobotics. Finally, we analyze some of its financial and social consequences.

Keywords: nanorobotics; rationality; economy; epistemology; biomedicine

*Science/technique/économie sont les moteurs
qui tendent à la fois à augmenter l'homme et à le détruire.*

Edgar Morin (@edgarmorinparis)

Introducción

Este trabajo tiene como objetivo analizar el avance en la elucidación de los fundamentos epistemológicos de la nanorobótica, así como someter a consideración reflexiva algunas de sus consecuencias sociales. A modo de introducción es pertinente realizar un trabajo preliminar, con objeto de situar en un marco conceptual adecuado esta tecnociencia. La nanorobótica se encarga de construir máquinas que trabajen a escala molecular. Se trata de máquinas moleculares compuestas de un ensamblaje de elementos de tamaño nanoscópico que están diseñados para realizar movimientos análogos a los de una máquina macroscópica; para ello se necesita un estímulo externo que impulse el movimiento. Sus aplicaciones son múltiples y se despliegan en muy diversos sectores industriales. Sin embargo, es en el ámbito de la salud donde la incertidumbre de sus consecuencias puede llegar a hacer patente una cierta problematización tanto desde el punto de vista epistemológico como desde la ética.

En el campo de otras tecnociencias ya ha sido discutida con cierta amplitud la conveniencia o no del avance en la investigación y en el desarrollo tecnológico; en este sentido Guerra ha planteado un análisis ético de la biotecnología y sus consecuencias sociales (Guerra, 2002), quedando patente que es requisito necesario para el juicio ético aquilatado el conocimiento de la esencia de la tecnología y del alcance de su impacto social. La nanorobótica, teniendo características comunes a la biotecnología, puesto que ambas son tecnociencias y comparten propiedades como la hibridación entre ciencia y técnica, la convergencia con otras tecnociencias y la practicidad en sus fines (Nordmann, 2008); también tiene particularidades que serán enunciadas más adelante, ya que merecen un análisis propio. Por otra parte, si aceptamos las tesis de La Mettrie en su famosa obra *El hombre máquina*, la nanorobótica sería una forma válida de acercamiento entre lo humano y lo artificial, puesto que, si el hombre puede ser considerado una máquina, es totalmente lícito que sus capacidades sean mejoradas por otras máquinas, aunque éstas sean minúsculas. Un argumento similar es empleado por Harris aplicado al campo de la biotecnología. Harris afirma que, si el ideal de la perfección es lo que determina la naturaleza humana, no existe razón para oponernos a las mejoras biotecnológicas (Harris, 1998). Pero si contemplamos este fenómeno de la “maquinización” del ser humano desde el punto de vista de las relaciones entre el avance del conocimiento y el despliegue de poder, esta visión no estaría exenta de cierto desasosiego, habida cuenta de que las aplicaciones tecnocientíficas actuales permiten una mayor capacidad de manipulación de la naturaleza y del propio ser humano, y su uso irresponsable podría provocar consecuencias graves.

11

Un punto fundamental estaría constituido por la falta de categorías que permitan una utilización funcional del conocimiento. En efecto, ¿cómo categorizar el conocimiento nanotecnológico? ¿Qué categorías utilizar para manejar un saber que hasta ahora se ha desarrollado fundamentalmente en un ámbito meramente pragmático? Hay todo un trabajo que realizar en este ámbito. Se trata de una tarea epistemológica con muy relevantes consecuencias, tanto en el terreno teórico -ya lo pensemos desde una perspectiva científica, ya lo contemplemos desde un ángulo filosófico- como en el práctico. No en vano podría hacerse extensiva esta cuestión al conjunto de las tecnociencias, puesto que en ellas “los límites tradicionales, las categorías bien establecidas y las dicotomías presupuestas están deviniendo borrosas o lo han sido siempre” (Schmidt, 2011).

El verbo griego *kategorein* sigue haciéndonos reflexionar. Seguimos dándole vueltas a la idea de las categorías, al fundamento de esas proto-estructuras por medio de las cuales damos forma a nuestra percepción del mundo. Ciertamente, nuestra reflexión no puede ir más allá de los límites que las propias categorías le imponen. La complejidad de la cultura ha provocado que sean necesarias nuevas formas de razonamiento, acumulación de conocimiento y búsqueda de soluciones. A pesar de todo esto, hemos de concentrar nuestra atención, dada la orientación cada vez más vinculada al sector industrial de la tecnociencia, en la relación entre categorización, conocimiento y repercusiones sobre el individuo y la sociedad. En ese punto estamos fallando cada vez más. Un ejemplo que puede ser ilustrativo, a este respecto, es el siguiente: hay unas 140.000 moléculas químicas registradas con interés comercial. De la mayoría de ellas se desconocen los efectos que puedan tener sobre la salud.

12

En síntesis, la hipótesis de partida que orientará este trabajo hace referencia al nuevo horizonte que se abre en las relaciones entre saber y poder. Se plantea la hipótesis de la apertura de un nuevo escenario epistemológico con la nanorobótica, en el que sus condicionamientos físicos modifican la manera de observar y manipular la naturaleza hasta el punto de operar en su concepto mismo; esto provocará efectos importantes en el desarrollo científico e industrial y, por ende, en la sociedad. La nano es específica no sólo por su tamaño, sino por el cambio de paradigma tecnocientífico, que busca cambiar la vida desde su interior, esto nunca se había intentado con recursos no-biotecnológicos. Esta capacidad puede llegar a alterar al ser humano como ente y como objeto de conocimiento. Por tanto, afirmamos que es importante el control social de la tecnología, que está generando nuevos problemas. Es necesario indagar en los antedichos planteamientos epistemológicos, ya que la falta de categorías definitorias de la nanorobótica, en gran parte causada por la incertidumbre en el comportamiento de las nanomáquinas inherente a la escala nano, podría generar extravíos en el conocimiento y repercusiones prácticas importantes.

En el siguiente apartado, introduciremos los atributos principales de este nuevo escenario planteado por la nanorobótica; veremos cómo sus propias condiciones físicas modifican radicalmente las dimensiones del espacio epistemológico clásico de las ciencias, por ejemplo confundiendo nociones básicas como interior y exterior, o natural y artificial. Esto plantea la necesidad de buscar nuevas vías epistémicas. En el apartado segundo se indagará en la búsqueda de nuevas categorías que sean

capaces de responder al desafío epistemológico planteado. A continuación estudiaremos la categoría de simulación, que consideramos primordial para comprender la nanorobótica como un campo a medias entre lo real y lo virtual. También analizaremos las relaciones entre la capacidad predictiva de la virtualidad y sus consecuencias. Tomaremos el ejemplo de la nanorobótica en el campo biomédico como paradigma de las novedades, los desafíos y las promesas que produce esta tecnociencia en el ámbito social. En el cuarto apartado haremos un breve desarrollo teórico acerca de las consecuencias del impacto socioeconómico de la nanorobótica. Por último apuntaremos algunas conclusiones que pueden ser de interés.

1. Panorama epistemológico de la nanorobótica

La nanorobótica es una de las ramas más recientes y revolucionarias de la nanotecnología; al igual que ésta tiene como objetivo el control de la materia a escala atómica y molecular. Los rangos dimensionales con los que trabaja la nanotecnología oscilan entre 1 y 100 nm. Recordemos que 1 nm es la billonésima parte de un 1 m, lo cual podría compararse con 1/80.000 del diámetro de un cabello humano, o diez veces el diámetro de un átomo de hidrógeno. A diferencia de otras ramas de la nanotecnología centradas en la fabricación de nuevos materiales a escala atómica, con propiedades físicas y químicas novedosas, la nanorobótica está encaminada a diseñar, construir, programar y controlar máquinas de tamaño nanoscópico. El objetivo de estos robots minúsculos sería manipular la materia a escala nanométrica.

De manera más precisa, un nanorobot es cualquier objeto a nano escala capaz de actuar, sentir, señalar, procesar información o mostrar un comportamiento en red o inteligente. Entendemos aquí, por sensación, la captación de un estímulo reconocible espontáneamente por el nanorobot que transmite información sobre la cual puede tomar decisiones de forma autónoma; por ejemplo, la detección de un tipo de célula en el organismo. Asimismo, inteligencia, en este contexto, sería la capacidad de automodular el comportamiento en función de las sensaciones captadas y con vistas al fin para el que haya sido programado. En otras palabras, podríamos decir que el nanorobot no tiene la capacidad de elegir sus fines, pero sí lo hace con los medios.

Tal y como dijimos en la introducción, un nanorobot es una máquina molecular. Ahora bien, ¿qué es una máquina molecular? Se trata de un ensamblaje de varios componentes de tamaño molecular que están diseñados para realizar movimientos análogos a los de una máquina macroscópica; para ello requiere a su vez la intervención de un estímulo externo en forma de energía. Estas máquinas constituyen la base para la fabricación de nanorobots.

De la misma forma que un robot, un nanorobot requiere que se realice el diseño de sus componentes y que se controle perfectamente el ensamblaje de sus piezas; de hecho, el correcto funcionamiento de la máquina depende del movimiento relativo y autocontrolado de sus partes como respuesta al acoplamiento de una fuente externa de energía (Ramström, 2016). Sin embargo, el caso de los nanorobots es más complicado que el de los robots de escala macro, puesto que la nano escala de sus elementos requiere la invención de nuevas técnicas de manipulación de la materia, y

no sólo eso, debe además ser capaz de responder de modo eficiente a las fluctuaciones térmicas que provocarían un movimiento aleatorio y descontrolado -es decir: browniano- de sus componentes (Ramström, 2016).

De forma consensuada, se podría decir que existen unas características comunes deseables para cualquier ingenio nanorobótico. Estaríamos hablando de un tipo de inteligencia descentralizada, abierta a un comportamiento cooperativo, con la capacidad de reproducción y ensamblajes autónomos, capacidad de procesamiento de información a escala nano, programabilidad, así como de la posesión de un interfaz de comunicación entre los mundos nanoscópico y macroscópico (Ummat *et al.*, 2006). Como veremos, las capacidades teóricas de estos ingenios superan en una escala casi inimaginable a las de los robots de tamaño normal. Además, su eficiencia material y energética es casi del cien por cien. Sin embargo, las leyes que gobiernan estas nanomáquinas son también mucho más complejas que las del mundo macroscópico. En esas dimensiones tan reducidas entran en juego la mecánica cuántica y la física estadística. Esto significa que la apariencia determinista en la que se mueven las máquinas a escala macro queda sustituida por la incertidumbre. Siempre existirá una barrera insalvable en el conocimiento de sus magnitudes físicas y una aproximación probabilística a su comportamiento.

En la actualidad, ante la dificultad de crear nanorobots con componentes absolutamente artificiales, más bien se aprovechan partes de moléculas biológicas o inorgánicas, como piezas para las nanomáquinas, replicando el modo de hacer de la propia naturaleza. Usualmente estas máquinas moleculares toman como patrón algunos tipos de proteínas o el ADN. La principal ventaja de estos componentes naturales es su probada eficacia y su confiabilidad, pudiendo funcionar como motores, engranajes, levas, sensores, elementos de transmisión de fuerzas y soportes estructurales, entre otros (Weir *et al.*, 2005). En general, sus recursos les permitirían actuar como elementos para aplicar fuerzas, transportar materiales, vigilar o controlar procesos naturales, siempre todo ello a escala microscópica. Las aplicaciones son numerosas, desde la medicina y la biología, hasta la medición de parámetros medioambientales, o la industria textil, militar y aeroespacial. Es especialmente interesante y exitosa la aplicación a la industria médica; reparación de células, destrucción de tumores o inoculación de cantidades precisas de fármacos a nivel intracelular, son algunas de las áreas de investigación activa en nanomedicina. Por otro lado, la convergencia entre la nanorobótica y otras tecnociencias como la computación, las tecnologías de la información y la biotecnología, es también de gran relevancia.

Existe asimismo un lado negativo de esta tecnología, tal y como mencionábamos en la introducción. Un lado peligroso, incierto y cargado de riesgos. Si bien las actitudes de la comunidad científica se caracterizan generalmente por un entusiasmo y una esperanza patentes respecto de la nanorobótica, y en general de la nanotecnología, no podemos obviar que en otros sectores de la población es el miedo y la desconfianza lo que predomina. Un análisis ético y socioeconómico de esta tecnociencia requiere ante todo una visión epistemológica diáfana, ya que, como hemos dicho, se abre aquí una nueva relación entre saber y poder. Para ello es necesario sacar a la luz los nuevos paradigmas que, desde la perspectiva general, se

introducen por medio de esta técnica. A su vez, esto alumbraría un nuevo escenario de la realidad tecnocientífica y social.

En primer lugar, se produce aquí un cambio en la concepción de naturaleza. Tradicionalmente entendíamos por naturaleza todo aquello de origen ajeno a lo humano con lo que el sujeto debía confrontarse para desarrollar su vida, como fuente de recursos y como límite. Ahora, con los avances en nanomedicina y la nanobiotecnología, la naturaleza está en cierta medida conformada por el propio sujeto principalmente, puesto que el cuerpo humano se ha convertido en espacio de acción tecnocientífica. Lo natural pasa de ser algo exterior a ser algo fundamentalmente interior. En otras palabras, el sujeto humano pasa a ocupar el lugar del medio natural. Si esto coadyuva en la conquista de la libertad humana, o por el contrario supone una amenaza a ella, es algo que se discutirá en su momento. Pero es evidente que el ser humano ya no podrá verse a sí mismo sino como mera materia y al propio cuerpo como una fuerza ciega movida por estructuras físico-químicas ajenas a sus posibilidades de control. Esto modificará de forma radical la distinción entre lo natural y lo artificial, puesto que se verá alterado para siempre por la técnica el principal soporte natural bajo el que existimos: nuestro propio cuerpo.

Acompañando a este cambio radical del concepto de naturaleza, vendría también otro elemento perturbador: la conciencia de la irreductible separación entre el mundo macroscópico y el mundo nanoscópico. Uno de los principales escollos que los científicos han encontrado en la construcción y el empleo de nanorobots es la gran dificultad que presenta la comunicación entre la realidad macro y la realidad nano. Estos dos entornos, a pesar de su mutua influencia y de la pertenencia a una misma existencia, se encuentran alejados por barreras casi infranqueables a la experiencia humana. Son dimensiones independientes de la realidad. Cada una de ellas funciona con leyes físicas propias, sin aparente coherencia entre sí. Y es extremadamente complejo adquirir percepciones y emprender acciones desde una dimensión hacia la otra. Para ello han sido necesarias nuevas técnicas que recrean de forma artificial las experiencias que se producirían en ese mundo diminuto y que permiten explorarlo y actuar sobre él de forma virtual. Es decir, el ser humano ha generado una nueva dimensión intermedia, que serviría de puente entre las dos anteriores. Aunque esta nueva realidad es inexistente desde la perspectiva natural, es real para el ser humano, puesto que le permite conocer y manipular la dimensión nano. Es, al fin y al cabo, un mundo artificial a medida del ser humano, gracias al cual puede estudiar e incluso predecir el comportamiento presente y futuro de dicha esfera de la naturaleza. Las nuevas tecnologías conducentes a estos entornos están basadas en el poder de la computación y son denominadas simulación computacional y entornos de realidad virtual.

Existe otro componente que no podemos ignorar a la hora de intentar entender esta nueva tecnología. Tal elemento sería la pérdida de referentes que todo lo anterior produce, junto con una nueva característica inherente al mundo cuántico como es la incertidumbre. Serían, en consecuencia, la inestabilidad cognitiva y la incertidumbre los nuevos compañeros de viaje para los científicos, tan propensos a la certidumbre y la exactitud. Cómo orientar el desarrollo de la nanorobótica, a la hora de tomar decisiones tanto éticas como tecnológicas, sin un asidero firme en el conocimiento es

todo un reto para una disciplina tecnocientífica que, como tal, debe tener a la planificación racional como uno de sus presupuestos básicos.

Por último, para completar de alguna manera el panorama epistemológico que estamos intentando trazar, no debería olvidarse que, al hilo con lo señalado en primer lugar, desaparece de forma ostensible la diferencia entre lo biológico y lo no biológico. La capacidad de controlar la materia se acrecienta hasta tal punto que lo biológico sólo supone una forma más de combinar los ladrillos básicos de la realidad. El poder de crear y modificar la materia implica asimismo una capacidad equivalente de modificarnos a nosotros mismos como entes físicos. Todo esto es sustancialmente grave si consideramos, además, que una de las características es la invisibilidad de esta tecnología. En efecto, podríamos alterar el mundo irreversiblemente o nuestra propia naturaleza sin ni siquiera poder percibirlo.

Una vez más resulta cuanto menos paradójico y -como analizaremos- problemático que, junto a un enorme poder y control de los medios, se haya desarrollado una notable ignorancia acerca de los fines. Hemos averiguado cómo tocar, descomponer y cambiar de forma asombrosa los corpúsculos más diminutos de la naturaleza, pero no sabemos qué pasará exactamente cuándo lo hagamos y, es más, ni siquiera sabemos si puede saberse. Todo ello abre un debate necesario acerca del tipo de racionalidad que debería gobernar el desarrollo de la tecnociencia, habida cuenta de la falta de comprensión (*verstehen*) de la que este campo adolece. De esta forma, un escollo para la materialización de una ética práctica de la nanorobótica podría venir dado por la incertidumbre y la ignorancia que provocarían dos perniciosas consecuencias relacionadas con la destrucción o la pérdida de libertad. Si la racionalidad tecnológica carece de las categorías necesarias o está constreñida por límites implícitos, entonces tampoco podrá atestar la pertinencia del razonamiento ético. No olvidemos que suele suceder que la acción irreflexiva preceda a reflexión ética.

Por lo tanto, si seguimos la distinción aristotélica de saber técnico y saber moral, tenemos principalmente dos vías para avanzar. Recordemos que, siendo ambos tipos de saberes de naturaleza práctica, relacionados por tanto con lo contingente y particular, el saber técnico se rige estrictamente por la eficiencia en la relación medios-fines, mientras que el moral también contempla la idea de la vida buena y justa, es decir: está vinculado a valores. Dicho esto, es evidente que la dos vías de avance referidas comprenden, por un lado, el desarrollo de las categorías necesarias que permitan construir un discurso racional y, a partir de aquí, la definición de una estructura de valores.

2. La simulación como nueva categoría

A través de las categorías podemos clasificar y ordenar el mundo. Con ellas podemos encajar e interpretar cada idea singular en un concepto general. Por consiguiente, no bastaría con aprehender la experiencia sensible para conocer. Las categorías son necesarias para conformar y ordenar el conocimiento. Hemos visto que en el campo nanotecnológico, especialmente en nanorobótica, son necesarias nuevas categorías

que permitan generar un marco adecuado de conocimiento para ordenar el saber práctico. Al mismo tiempo existe el problema de una cierta falta de experiencia directa del mundo nanoscópico que pueda ser ordenada mediante categorías. Pero, en cualquier caso, es innegable que el enorme poder de transformación que posee debe emanar de un conocimiento, por funcional que éste pudiera ser.

Entonces, partiendo de los nuevos presupuestos que hemos revelado en el apartado anterior, una consecuente búsqueda de categorías debe ser uno de los objetivos principales para la correcta disposición de una racionalidad técnica que actúe como directriz. Diremos que el nuevo escenario de la nanorobótica se caracteriza por:

- I. Un concepto renovado de naturaleza más inclusivo que el tradicional y que transforma la idea de sujeto.
- II. Una separación radical de la experiencia de las esferas macroscópica y nanoscópica que impide que el ser humano obtenga sensaciones de la escala nano o sólo pueda tenerlas de forma muy limitada.
- III. Una incertidumbre inherente a las leyes de la física y una pérdida de la solidez de los referentes cognitivos, producto de los condicionantes anteriores.
- IV. Una indiferenciación entre lo biológico y lo no biológico.
- V. Una capacidad de manipulación de la materia en sus unidades primigenias, y en consecuencia de automanipulación, todo ello de modo invisible para los humanos.

17

Estos enunciados aluden a la existencia, al saber y a la acción. Debemos, pues, alumbrar categorías que, partiendo de estas premisas, sirvan para vertebrar el conocimiento práctico que se vaya generando. Una de las categorías que podrían ser de utilidad es la de simulación, puesto que podría ayudar como vehículo que conduzca la reflexión sobre la nanorobótica. El mundo simulado es al mismo tiempo una contraposición del mundo real y un medio para explorarlo, y a la luz de los presupuestos segundo y tercero es imprescindible en este campo. Un análisis de esta categoría será esclarecedor para nuestros propósitos.

Es precisamente la incapacidad de obtener experiencias del mundo nanoscópico lo que califica a la categoría de simulación. Ciertamente, si atendemos a la concepción aristotélica de categoría como análisis de la estructura ontológica de la realidad, donde se expresa el concepto de ser a partir de los géneros supremos a los que deben poderse subordinar los demás entes (Reale, 2003: 147-148), la ausencia de percepción de la sustancia impediría el *synolon*, o encuentro entre materia y forma que requiere la asistencia de la forma categorial. De forma que cualquier categoría que no fuera explícitamente aplicable a lo inmaterial, pero que además pudiera referir a la sustancia, tal y como existe a nivel nano, sería impracticable. Ésta es precisamente la capacidad de la simulación numérica: representar lo material a partir de pura forma.

En uno de sus trabajos divulgativos, los investigadores A. Ummat, A. Dubey, G. Sharma y C. Mavroidis escriben:

“Los nanorobots son invisibles a simple vista, lo cual los hace difíciles de manipular y de trabajar con ellos. Técnicas como la Microscopía de escaneo electrónico (SEM) y la Microscopía de fuerza atómica (AFM) están siendo empleadas para establecer un interfaz visual y háptico que permita sentir la estructura molecular de estas máquinas a nanoescala. Las técnicas de realidad virtual (VR) están actualmente siendo exploradas en investigación en nano-ciencia y biotecnología como medio para mejorar la percepción del operador (visual y háptica) a través de una aproximación más o menos a un estado de inmersión total o telepresencia. El desarrollo de nanorobots o de componentes para nano máquinas presenta dificultades de fabricación y desafíos para su control. Estos aparatos operarán en microambientes cuyas características físicas difieren de aquellas encontradas por partes convencionales. Como estos aparatos a nanoescala no han sido aún fabricados, evaluar posibles diseños y algoritmos de control requiere el uso de estimaciones teóricas y ambientes virtuales. Estas simulaciones pueden operar a varios niveles de detalle, compensando la exactitud física con el coste computacional, el número de componentes y el tiempo durante el que la simulación sigue el comportamiento del nano objeto. Ellos pueden permitir extender a los nanocientíficos sus ojos y manos en el nano mundo y también facilitar nuevos tipos de exploración y toda una nueva clase de experimentos en ciencias físicas y biológicas. Las simulaciones de realidad virtual pueden además ser usadas para desarrollar ensamblajes virtuales de nano y bionano componentes en ligaduras móviles y predecir su comportamiento” (Ummat *et al.*, 2006: 3).

18

Queda claro a través de estas declaraciones que la simulación computacional y, en general, el uso de técnicas de virtualización de la realidad son necesarias tanto para controlar como para diseñar y fabricar los nanorobots. Y no se trata de un caso aislado, sino más bien de la tónica general. Un pionero de la nanorobótica, Adriano Cavalcanti, ha reiterado en numerosas ocasiones la importancia capital de las técnicas de simulación computacional y realidad virtual en esta disciplina. Su equipo ha llegado a desarrollar su propio *software* de realidad virtual denominado *Nanorobot Control Design* (NCD). Y en numerosos papers hace referencia al uso de simulaciones 3D y al empleo de técnicas de simulación como la dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) (Cavalcanti, Wood, Kretly y Rosenfeld, 2006).

Pero, ¿qué entendemos por simular un ambiente o un proceso físico? Las técnicas propias de la computación científica se apoyan en teorías que presumen poder reducir un dominio infinito a otro finito y mensurable, con una pérdida mínima de propiedades. La totalidad de cualquier realidad es inabarcable, pero el recurso a esquemas eidéticos, junto con el poder computacional aplicado a lo recursivo y modular, permite obtener un modelo que, de la misma forma en que el territorio se puede reconocer en el mapa, en teoría retendría la esencia de lo estudiado. En este sentido, la simulación es una metáfora numérica, por la cual una realidad se podría expresar a través de otra realidad, pasando de un plano exterior y ajeno a lo humano, a otro concernido por la inteligencia. De cualquier forma, una simulación jamás deja

de ser una aproximación, que en este caso nos permite percibir la realidad del nano mundo y poder actuar en él.

Es relevante señalar que las técnicas de simulación persiguen, en la medida de lo posible, reproducir una realidad genérica, contingente. Ello aporta valiosa información acerca del funcionamiento del mundo. Con todo, cuando lo que se busca es una caracterización exacta de un comportamiento futuro de determinado sistema, ya no estamos interesados en conocer una perspectiva genérica sobre cómo es o cómo podría comportarse tal o cual cosa. Buscamos hacer predicciones. Simular no es lo mismo que predecir; ambos verbos no poseen idéntico valor epistémico. Predecir posee un valor superior y una relación distinta con la realidad. Simular es desmenuzar lo posible y separarlo de lo imposible, adoptar una imagen de analogía con lo real. De esta forma la realidad puede entenderse y pueden descubrirse algunos de sus secretos. Predecir es simular el futuro, aprehender un conocimiento lo más exacto posible para nuestros fines del comportamiento factual de la naturaleza. Por ello debe estar mucho más determinado que una simulación, y su detalle mucho más estudiado.

Tanto la simulación como la predicción tienen un asidero en lo real y ambas proceden de similares operaciones intelectivas. Se trata, en cierta manera, de una teoría que se transforma en un modelo matemático, que se reconvierte a su vez en un algoritmo y finalmente se programa en un software. Por otra parte, el aumento de la capacidad del cálculo permite evaluar operaciones matemáticas cada vez más difíciles, largas y complejas; esto conduce a construir nuevas visiones del mundo. Cuanto mayor sea la fuerza de evaluación, mejor será la capacidad de predicción, puesto que podrán ensayarse muchas más opciones posibles en menor tiempo. Por consiguiente, el poder de manipular el mundo aumentará.

19

En nanorobótica este fenómeno es singularmente trascendental. Con el fin de ilustrar lo enunciado veamos un ejemplo presentado a un congreso sobre avances en nanotecnología molecular en Palo Alto, Estados Unidos. Adriano Cavalcanti y Tad Hogg presentaron una ponencia titulada “Simulando nanorobots en fluidos con un bajo número de Reynolds”. El número de Reynolds es un parámetro que caracteriza fundamentalmente la turbulencia de un fluido. En el resumen nos hablan de la dificultad que presenta el diseño, la fabricación y el control de nanorobots. Dificultades que, a falta de información empírica, fuerzan a buscar alternativas en la simulación numérica. En concreto dicen:

“Para ayudar en la investigación de algoritmos de control presentamos un simulador con base física. Usamos un conjunto típico de parámetros para robots que operan en un ambiente fluido simplificado inspirado en microambientes médicamente relevantes. El simulador trata a los robots como simples objetos geométricos capaces de moverse en un fluido a través de fuerzas viscosas [...] el simulador también incluye la difusión del movimiento browniano [...] pero el simulador no muestra explícitamente los mecanismos internos del robot [...] el simulador puede seguir el comportamiento de hasta diez robots de tamaños en el orden de centenares de nanómetros, durante periodos de hasta un segundo, todo ello con

un esfuerzo computacional razonable. El simulador ofrece una visualización gráfica del movimiento de los objetos [...] hemos ilustrado el funcionamiento del simulador para una tarea sencilla: Robots encontrando biomoléculas que se desplazan en el fluido, y transportándolas a los emplazamientos objetivo en su ambiente” (Cavalcanti *et al.*, 2003).¹

Como hemos visto, los autores recurren al desarrollo de métodos de simulación para superar los obstáculos que el entorno físico les plantea. Esencialmente han modelado un fluido virtual con características simplificadas respecto a la realidad, pero funcionales con respecto a sus propósitos. Los nanorobots son sustituidos por formas geométricas sencillas pero asimilables a la realidad. Se ha aplicado el poder de cálculo para obtener una representación razonable, aunque inexacta, del comportamiento real. Destacan que los resultados son ofrecidos de forma sensorialmente perceptible.

Esto revela la auténtica esencia de una técnica como la nanorobótica, a medio camino entre lo real y lo virtual, impregnada de incertidumbre y conocimiento parcial, pero con unas posibilidades de experimentación y de investigación que le confieren unas capacidades potenciales de muy alto impacto en la sociedad. La esfera biomédica es una parcela de la ciencia con grandes expectativas en la nanorobótica, puesto que la mayoría de las aplicaciones de las nanomáquinas están en dicho campo, como por ejemplo biocomponentes que imitan virus o bacterias o, en general, organismos inteligentes con capacidad de sensación y control.

20

3. La aplicación de la nanorobótica en el ámbito biomédico

Requiere cierto esfuerzo intelectual situarnos en la escala en que nos vamos a mover a lo largo de las páginas que siguen. Para ayudarnos a ello, baste decir que, si una nanopartícula tuviese el tamaño de un balón de fútbol, un glóbulo rojo tendría las dimensiones de un estadio.

En relación a la nanorobótica es frecuente encontrar, en los ámbitos más diversos, llamadas de atención cuyo punto de partida es una desconfianza creciente hacia esta tecnología, que viene a incrementar la tecnofobia subyacente en la que este tipo de críticas se sustentan. Es frecuente que se hable de la progresiva implementación de recursos nanotecnológicos como si de una revolución silenciosa se tratara. Desde esta perspectiva, se viene a subrayar que tales recursos están ya presentes en casi todos los ámbitos de nuestra vida, sin que aún seamos conscientes de su presencia y mucho menos de los efectos que dicha presencia puede tener sobre nuestra salud.² La utilización de nanorobots en el ámbito médico es el que más inquietud suscita. En ese sentido, se pone en cuestión el uso de esa tecnología sin haber acumulado

1. Más información disponible en: <http://www.foresight.org/Conferences/MNT11/Abstracts/Cavalcanti/>.

2. Más información disponible en: <https://detenganlavacuna.wordpress.com/tag/nanorobots/>.

previamente un conocimiento suficiente acerca de su potencial toxicidad y sus efectos negativos sobre el sistema inmunológico.

Desde una perspectiva contrapuesta, se viene a subrayar la posibilidad de dirigir los nanorobots a células concretas, para administrar la cantidad exacta de sustancias químicas que han de ser liberadas allí, en el contexto del diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades. En este sentido, se pone el énfasis en la revolución que en el ámbito biomédico supondrá la extensión de esta tecnología. Se considera así que su utilización vendría a completar la revolución que supuso la ingeniería genética. Los nanorobots son dispositivos del tamaño de una bacteria. Las expectativas que la utilización de estos dispositivos suscita son extraordinarias. Desde un punto de vista médico, sus aplicaciones se han centrado hasta ahora en los campos del diagnóstico y el tratamiento de enfermedades. En este sentido, tanto en aspectos como el diagnóstico precoz como en el del incremento de la eficacia en la dispensación de medicamentos, han demostrado ya su utilidad. Esto no ha impedido el surgimiento de diversas inquietudes, debido a los problemas que su minúsculo tamaño podría provocar en el organismo. Sin embargo, los mayores motivos de preocupación se suscitan en lo referido a la computación biomolecular y la construcción de bio-computadores. En este terreno, el fantasma de la introducción en el cuerpo humano de minúsculos mecanismos que puedan controlar procesos celulares y regular así la bioquímica interna del organismo provoca una creciente desconfianza. Pero más aún lo hace todo lo que se refiere a la hipotética influencia de nanorobots instalados en el cerebro y en el sistema nervioso periférico sobre la conducta humana.

Desde una perspectiva general, es cierto que el desarrollo de la nanorobótica plantea particulares dificultades de fabricación y de control de los nanorobots. A priori, este campo de aplicación de la nanotecnología es prometedor, pero los retos que plantean la construcción y el control de los mecanismos más diminutos que el ser humano haya fabricado jamás son enormes. Tales problemas nos sitúan frente a apasionantes retos intelectuales. En efecto, no se trata sólo de elaborar la más pequeña máquina jamás concebida para resolver un problema de salud, lo que ya en sí mismo es extraordinario: además hay que resolver otras cuestiones como su durabilidad, su eventual retirada del organismo y su control durante su período operativo.

Si consideramos en primer lugar esta última cuestión, hemos de pensar en que los nanorobots, tanto por razones de diseño como de eficacia funcional, han de ser autónomos en su funcionamiento. Sin embargo, esto plantea diversos problemas que han de ser abordados con la necesaria seriedad. Ante todo, la posibilidad de tomar el control sobre el ingenio nanotecnológico, si fuera necesario; además, el problema de la coordinación del funcionamiento de varios nanorobots, cuando éstos estén actuando al mismo tiempo en un mismo organismo. A nuestro entender, ninguna de estas cuestiones ha sido aún abordada en profundidad. En cuanto al aspecto de la durabilidad, ha de tomarse en cuenta todo un conjunto de derivaciones comerciales. El peligro mayor es que éstas sean colocadas por encima de los intereses reales de los pacientes. Por último, la eventual retirada del organismo de los nanorobots plantea problemas particulares, ya que ésta puede realizarse a través de una degradación programada, que lleve al propio organismo a eliminar el ingenio

nanorobótico que se ha introducido en él, cuando su funcionamiento sea ya innecesario. Otro recurso consiste en la utilización de nanorobots dedicados a tareas de recuperación de los nanorobots inservibles. Frente a las dificultades que tales sistemas de recuperación plantean, el recurso dialéctico a la idea de inocuidad constituye una tentación en la que es fácil caer. Sin embargo, el precio a pagar -ante todo en términos de la salud a largo plazo, pero también en el cuestionamiento futuro de esta tecnología- es más que considerable.

No en vano estos tres aspectos mencionados -la durabilidad, la retirada del organismo y el control operativo- son las variables que permitirían controlar los principales peligros de la nanorobótica, tales como la autoreplicación destructiva sin restricciones y el ataque de los nanobots a los organismos a los que debería ayudar. En efecto, un nanobot fuera de control, de duración ilimitada y sin medios para ser eliminado del organismo o del medio ambiente, constituye un desafío mortal para la humanidad. La teoría de la plaga gris describe un escenario apocalíptico en el que un grupo de nanorobots comienza a autoreplicarse y a destruir toda la materia que encuentra a su paso. El fenómeno sería observado como una masa gris que no deja de aumentar y fagocitar todo aquello con lo que entra en contacto. El desenlace del proceso podría llegar a ser la propia destrucción del planeta, que quedaría convertido en una masa de nanorobots. Esta teoría no se encuentra más allá de los límites de la realidad posible. Todo lo contrario: se ha llegado a estimar el tiempo que requeriría un nanorobot en autoreplicarse hasta utilizar todos los átomos de carbono del planeta. Siendo el resultado la espeluznante cantidad de 113 replicaciones, que tomarían sólo tres horas (en realidad: algunas semanas considerando la velocidad de movimiento de los nanobots) (Kurzweil, 2006).

22

Todo esto lleva a considerar de máxima importancia la concepción de nuevos métodos de defensa cuyo desarrollo debe ser paralelo a la creación de la propia tecnología en nanorobótica. Algo así como no crear un veneno sin su antídoto. Como hemos dicho, se propone aumentar los niveles de seguridad a través del diseño de métodos que utilizan la durabilidad, el control y expulsión del nanorobot para garantizar su correcto comportamiento. Se postulan soluciones tales como la implantación de códigos encriptados que sean necesarios para el proceso de réplica, la creación de interruptores de seguridad en los nanorobots, la sustitución del proceso individual de réplica por grandes sistemas de manufactura de nanobots integrados, el uso de materiales degradables con el paso del tiempo, o la generación de un sistema inmunológico que pudiera actuar en contra de los nanorobots llegado el caso. Sin embargo, cada sistema pensado tiene siempre su punto débil; todas las defensas son vulnerables y, por lo tanto, ninguno es totalmente seguro. Al fin y al cabo, es una evidencia más de la necesidad del principio de precaución, puesto que cuanto mayor es el poder del instrumento generado, mayor será el beneficio potencial que podría aportar, así como mayor la destrucción que podría acarrear. Son dos caras inseparables de la misma moneda.

4. El desafío socioeconómico de la nanorobótica

La nanorobótica es la rama de la nanotecnología con mayor impacto social y económico. Sin duda presenta numerosas prestaciones e infinitas posibilidades puesto que un nanorobot o nanobot es teóricamente, o se espera que sea en el futuro, capaz de desplazamiento, aplicación de fuerzas, transporte de sustancias, coordinación con otros nanobots, autoreplicación, procesamiento de información e incluso toma de decisiones lógicas. Todo esto, unido a la indetectabilidad por la capacidad perceptiva humana, a la falta de información sobre sus efectos en el medio ambiente -así como en el propio organismo- y a un considerable secretismo sobre su inclusión en productos alimenticios o farmacológicos, ha causado cierta polarización en la opinión pública respecto de su investigación y uso. Por un lado están aquellos que afirman que los efectos que podría producir esta tecnología son peligrosos, perjudiciales y de consecuencias catastróficas e irreversibles. Sin embargo, un gran número de personas espera con ansia a que esta tecnología solucione la mayor parte de las enfermedades y los problemas ecológicos. También hay quienes confían en que impulse un nuevo desarrollo tecnológico basado en la nanobiocomputación.

Sin duda la aplicación de la nanorobótica que más interés suscita es la desarrollada en el ámbito de la nanobiotecnología. La salud es la principal beneficiaria de esta tecnología, dando lugar a una nueva disciplina denominada nanomedicina. Tal y como vimos en el apartado dedicado al ámbito biomédico, las potencialidades de esta tecnología son amplias y han dado lugar, en el imaginario popular, a soñar con terapias casi milagrosas contra el cáncer, el SIDA y las enfermedades genéticas, así como con la reparación de órganos y otros tejidos corporales. Por ejemplo, puede leerse en documentos que fácilmente se encuentran en internet que en el futuro bastará tomar un jarabe que esté compuesto por una disolución con nanobots para reparar arterias obstruidas o curarse del SIDA, ya que estos microingenios, que formarán una suerte de ejército benevolente, estarán programados para detectar y atacar las células o virus maliciosos.³ A algunos esto les traerá a la memoria cierta serie de dibujos animados que alcanzó gran fama hace unos años. En todo caso, también pueden leerse vaticinios poco creíbles, como que a corto plazo se remediará el envejecimiento o se podrá cambiar de aspecto gracias a la acción de nanobots fractales, capaces de adoptar cualquier configuración que se necesite. Algunos científicos llegan al extremo de prometer que los nanobots nos deberían hacer -al menos en teoría- inmortales, puesto que serán enviados a reparar preventivamente cualquier indicio de daño orgánico, gracias a la vigilancia de otros nanobots que estarán "patrullando" el cuerpo humano constantemente.⁴ Sea como fuere, la realidad es que nada de esto existe de momento, puesto que los nanobots son aún ensayos primitivos que a duras penas pueden detectar y pegarse a determinadas moléculas biológicas para servir como biomarcadores o para el guiado por campos magnéticos, situándose todavía muy lejos de las capacidades que se les suponen.

23

3. Más información disponible en: <http://es.slideshare.net/VanePinilla/nanorobots-en-la-medicina-14941115>.

4. Más información disponible en: <https://www.quora.com/Can-medical-Nanorobots-theoretically-make-us-immortal>.

Sorprendentemente, un campo muy promisorio es el de la construcción de biocomputadores. La computación biomolecular permitirá crear nanoingenios capaces de procesar mucha mayor información que los computadores actuales. Todo ello gracias al uso del ADN como base de cálculo principalmente, aunque otros polímeros biológicos podrían cumplir también dicha función. Adicionalmente esta tecnología permitirá desarrollar capacidad lógica de los nanorobots. Recientemente se ha sido publicado un estudio de la universidad Bar-Illán en Israel, que afirma haber logrado producir nanorobots con puertas lógicas que permiten su programación, actuando en presencia de ciertas señales químicas.⁵ Desconocemos si todas estas promesas y augurios se deben al optimismo de una investigación prometedoras o a maniobras publicitarias de ciertos laboratorios en busca de fondos económicos. Pero en cualquier caso parece que el mercado siente un gran interés por esta tecnología, quedando desbancado progresivamente el Estado como principal financiador de investigaciones en nanorobótica, en beneficio de compañías privadas de carácter multinacional. No en vano, de cumplirse una pequeña parte de lo que parece que advendrá, el impacto económico puede ser gigantesco, modificando no sólo gran parte de las tecnologías actuales, sino incluso el modo de vida de las personas (UNESCO, 2007). Sin ir más lejos, la aplicación de la nanorobótica en la medicina podría suponer un aumento considerable de la esperanza media de vida. Este cambio modificaría todas las pautas de consumo y supondría previsiblemente una carga para los servicios públicos. Paralelamente es probable que estas terapias marquen una tendencia hacia la desigualdad en su acceso.

24

Si la lógica del mercado toma el relevo en la financiación de la investigación, es muy posible que estos efectos adversos se produzcan junto con prácticas peligrosas de introducción de productos sin la garantía adecuada sobre sus efectos a largo plazo, e incluso malas prácticas de discriminación, eugenismo (latente o manifiesto) y dominación social. Por ello es necesaria la adopción de medidas de información ciudadana y también de control democrático, cuando se considere que los riesgos superan el umbral del principio de precaución. La evaluación participativa de riesgos, junto con la evaluación ética, es imprescindible para cada desarrollo tecnológico concreto en nanorobótica. Ello no es óbice para que paralelamente se desarrolle el sistema jurídico y se impongan comités éticos como norma general.

Todas estas prácticas de contención y juicio crítico quedarían más que justificadas a la luz de los problemas que, según algunas voces críticas, ya existen en la actualidad con productos de la nanorobótica y la nanotecnología en general, que han sido incluidos en bienes de consumo de manera silenciosa y casi opaca, aprovechando un cierto vacío legal y desconocimiento del público. Tomemos el caso de las nanopartículas. Se trata de partículas de distintos materiales que no superan los 100 nm, lo que les otorga propiedades especiales. Sus aplicaciones son innumerables, desde protectores solares, parches para heridas, ceras para esquíes, partículas explosivas generadoras de gas, pinturas, productos de limpieza,

5. Más información disponible en: <http://www.sophimania.pe/tecnologia/robotica-e-inteligencia-artificial/estudio-nanorobots-inyectados-en-cucarachas/>.

desinfectantes de todo tipo, hasta nanopartículas inteligentes para la entrega de medicamentos en dianas biológicas.⁶ Citaremos como ejemplo una nanopartícula consistente en un caparazón vacío de carbonato de calcio destinado a actuar en el estómago. Una vez en él, el medio fuertemente ácido disolverá el caparazón de mineral, liberando los contenidos. Las alarmas han sonado con respecto a estos productos debido a los riesgos inherentes que acarrearán, siendo algunos de ellos los siguientes: mayor capacidad reactiva que las partículas más grandes, mayor acceso a nuestros órganos que las partículas más grandes, mayor biodisponibilidad y mayor bioactividad, efectos negativos en el sistema inmunológico, posibles efectos patológicos a largo plazo. Todo esto nos lleva a pensar en un incremento de la toxicidad.

En vista de lo anterior, pensamos que la nanorobótica tiene un futuro muy prometedor y también un presente en el que ya demuestra una utilidad social, aunque desde luego sin los efectos espectaculares que se anuncian. Pero su gran problema es la incertidumbre que la rodea y, hasta cierto punto, un afán quizás precipitado por obtener rendimiento económico a toda costa.

Conclusiones

Para concluir este trabajo, se apuntarán algunas conclusiones que resumen los argumentos desgranados a lo largo del mismo y resaltan las cuestiones más importantes para los estudios CTS (ciencia, tecnología y sociedad) en nanorobótica, tanto en epistemología como en lo relativo al impacto social:

- El ser humano podría ser considerado una máquina; por ello es admisible que pueda ser mejorable a partir de otras máquinas (nanorobots). Esto plantea nuevas incertidumbres respecto a la capacidad de poder que aporta el avance en el conocimiento. Las aplicaciones tecnocientíficas actuales permiten una manipulación de la naturaleza y del propio ser humano hasta el punto de provocar pavor debido las posibles consecuencias de la aplicación irresponsable de la tecnociencia.
- Es importante el control social de la tecnología, que está generando nuevos problemas. La nanorobótica es específica no sólo por su tamaño, sino por el cambio de paradigma tecnocientífico, que busca cambiar la vida desde su interior. Esto nunca se había intentado con recursos no-biotecnológicos.
- En la nanorobótica existe una relación entre la utilización funcional del conocimiento y sus categorías, o más bien la falta de ellas. En la exploración del mundo no podemos ir más allá de lo que nuestras categorías abarcan. Esta falta de categorías en nanorobótica viene causada por las especiales características en cuanto a la incertidumbre y la orientación eminentemente práctica de su

6. Más información disponible en: <https://detenganlavacuna.wordpress.com/tag/nanorobots/>.

investigación. Y causa una pérdida de referentes a la hora de una planificación ética y responsable de la tecnología.

- En la búsqueda de nuevas categorías debemos definir las características epistemológicas del nuevo escenario que plantea la nanorobótica. Las principales que se proponen son la incomunicabilidad de las esferas nanoscópica y macroscópica, la manipulación invisible de la materia, la indiferenciación entre lo biológico y lo no biológico, la incertidumbre inherente causada por las leyes físicas y la reformulación del concepto de naturaleza y de sujeto.

- Esto nos lleva a proponer la categoría de simulación como herramienta para el estudio epistemológico de la nanorobótica, ya que permite la representación de la sustancia a partir de pura información. No de forma infructuosa la simulación numérica se emplea activamente en el estudio y diseño de los nanorobots, puesto que permite no sólo proponer los diseños más eficientes, sino que también pone al alcance del investigador la predicción del comportamiento del nanobot. A día de hoy, la simulación numérica es un elemento imprescindible dada la carencia de tecnología que permita una percepción real y directa del nanorobot durante su aplicación.

- La nanorobótica, en consecuencia, es una tecnociencia que se encuentra a mitad de camino entre lo real y lo virtual, que debe sortear una gran dosis de incertidumbre y que emplea métodos predictivos basados en la aproximación imperfecta al mundo real. Sin embargo, su poder potencial es enorme. Esto plantea incertidumbres, especialmente en el mundo biomédico.

- En el campo biomédico son grandes las expectativas que existen en torno a la nanorobótica, que de alguna manera podría completar la revolución que comenzó con la genética y la biología sintética. Se espera que su impacto en el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades sea inédito, llegando a prometer curas para enfermedades como el cáncer o el SIDA, e incluso la reparación de todos los tejidos del organismo. Sin embargo, no son pocos los retos que plantea su fabricación y operatividad. Su tamaño minúsculo y la precisión que requieren evidencian aún una gran falta de desarrollo científico hasta alcanzar la fase de su empleo normalizado. En concreto, los grandes desafíos presentados son el de la durabilidad, el control y la retirada del organismo de los nanorobots. Por otra parte, una cierta falta de transparencia en cuanto al uso de otros productos nanotecnológicos por parte de la industria alimentaria o la farmacéutica, unida a la indetectabilidad del nanobot por el consumidor potencial, ha provocado reacciones de desconfianza y rechazo hacia esta tecnología en ciernes.

- El impacto económico esperado de la nanorobótica es ingente, hasta el punto de que se espera que transforme la economía tal y como la conocemos en la actualidad. Se prevé que modifiquen la fabricación de materiales, el transporte de mercancías, la medicina, la biología y la tecnología medioambiental, principalmente. La controversia proviene de que los perjuicios podrían tener igual magnitud que sus beneficios; en efecto, un accidente podría ser catastrófico e irreversible. Y no sólo esto, sino que además la investigación creciente en manos privadas podría generar un reparto desigual de los beneficios de esta tecnología, lo cual derivaría en dominación social, eugenismo, etc. Por ello la investigación debe someterse al control social y a medidas de participación ciudadana.

Bibliografía

CAVALCANTI, A., HOGG, T. y SHIRINZADEH, B. (2006): "Nanorobotics System Simulation in 3D Workspaces with Low Reynolds Number", *IEEE MHS 2006 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*.

CAVALCANTI, A., ROSEN, L., KRETLY, L. C., ROSENFELD, M. y EINAV, S. (2004): "Nanorobotic Challenges in Biomedical Applications, Design and Control", *IEEE ICECS Int'l Conf. on Electronics, Circuits and Systems*.

CAVALCANTI, A., WOOD, W., KRETLY, L. C. y ROSENFELD, M. (2006): "Computational Nanomechatronics: Pathway for Control and Manufacturing Nanorobots", *IEEE CIMCA 2006. International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation*.

DE CÓZAR ESCALANTE, J. M. (2003): "Nanotecnologías: promesas dudosas y control social", CTS+ I: *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación*, vol. 6, nº 5.

DE CÓZAR ESCALANTE, J. M. (2013): "Dimensiones de la investigación social sobre la nanobiotecnología", *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol. 7, nº 20, pp. 91-109.

DE LA METTRIE, J. O. (1962): *El hombre máquina*, Buenos Aires, Editorial Universitaria de Buenos Aires.

27

ESQUIROL, J. M. (2011): *Los filósofos contemporáneos y la técnica. De Ortega a Sloterdijk*, Barcelona, Editorial Gedisa.

FERNÁNDEZ AGIS, D. (2013): "Economía y nanotecnología, una relación problemática", *Laguna. Revista de filosofía*, nº 32, pp. 79-88.

FERNÁNDEZ AGIS, D. y FERNÁNDEZ CASTILLO, A. (2007): "La nanotecnología, inquietudes sociales y problemas éticos derivados", *El Catoblepas, revista crítica del presente*, nº 61, p. 14. Disponible en: <http://www.nodulo.org/ec/2007/n061p14.htm>. Consultado el 23 de septiembre de 2016.

GUERRA PALMERO, M. J. (2002): "Biotecnologías: calibrando el desafío ético", *Tecnología, civilización y barbarie*, Barcelona, Ed. Anthropos.

HARRIS, J (1998): *Supermán y la mujer maravillosa. Las dimensiones éticas de la biotecnología humana*, Madrid, Tecnos.

HONG, R., MARTÍNEZ ORTIZ, C., SAUTIÉ CASTELLANOS, M., VALDÉS CRESPO, K. y HERNÁNDEZ CÁCERES, J. L. (2004): "Computación biomolecular: algunos apuntes", *Revista Cubana de informática Medica*, vol. 4, nº. 1.

KURZWEIL, R. (2006): “Nanotechnology Dangers and defenses”, *Nanotechnology Perceptions: A Review of Ultraprecision Engineering and Nanotechnology*, vol. 2, n°. 1.

MOYA, E. (1998): *Crítica a la razón tecnocientífica*, Madrid, Ed. Biblioteca Nueva.

NORDMANN, A. (2008): “Philosophy of nanotechnoscience”, en G. Schmid G *et al.* (eds.): *Nanotechnology, vol 1: principles and fundamentals*, Wiley, Weinheim, pp. 217–244.

NÚÑEZ, A. (2015): *Riesgo y participación ciudadana en la investigación científica y tecnológica. Hacia una evaluación democrática de las innovaciones nanotecnológicas*, tesis doctoral, Universidad de La Laguna.

REALE, G. (2003): *Guía de lectura de la «Metafísica» de Aristóteles*, Barcelona, Ed. Herder.

SCHMIDT, J. C. (2011): “Toward an epistemology of nano-technosciences”, *Poesis Prax*, vol. 8, n° 2-3, pp. 103-124. DOI: 10.1007/s10202-011-0104-z.

UMMAT, A.; DUBEY, A., SHARMA, G. y MAVROIDIS, C.: “Nanorobotics”. Disponible en: <http://www.fractal.org/Bio-Nano-Robotics/Nanorobotics.pdf>. Consultado el 23 de septiembre de 2016.

28

UMMAT, A., DUBEY, A., SHARMA, G. y MAVROIDIS, C. (2006): “Bio-Nano-Robotics: State of the Art and Future Challenges”, en M. L. Yarmush (coord.): *Tissue Engineering and Artificial Organs. The Biomedical Engineering Handbook*, CRC Press.

UNESCO (2007): “Ética y política de la nanotecnología”. Disponible en: <http://www.bioeticanet.info/documentos/UnescoEtyPolNanotecnol.pdf>. Consultado el 23 de septiembre de 2016.

WEIR, N. A.; SIERRA, D. P. y JONES, J. A. (2005): “A Review of Research in the Field of Nanorobotics”, *Sandia Report, Sandia National Laboratories*, Albuquerque. Disponible en: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2005/056808.pdf>. Consultado el 23 de septiembre de 2016.

Cómo citar este artículo

FERNÁNDEZ AGIS, D. y RAMÍREZ NARANJO, J. A. (2018): “La nanorobótica: fundamentos epistemológicos e impacto social”, *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad -CTS*, vol. 13, n° 38, pp. 9-28.