

Soñando con microbots y nanobots

Gerardo Mora Aquino
Agustín Leobardo Herrera May

En los últimos años, se ha usado el término Robótica a Escala Pequeña para referirse a aquellos sistemas robóticos cuyas dimensiones pueden estar desde el orden de los nanómetros hasta los milímetros. Los robots a escala pequeña pueden clasificarse en milibots, microbots y nanobots. Los milibots son dispositivos robóticos con dimensiones características en milímetros. En cambio, los microbots tienen componentes con dimensiones menores a un milímetro y mayores a un micrómetro. Por otro lado, los nanobots tienen elementos con tamaño en el orden de nanómetros y menores de un micrómetro. Sin embargo, con frecuencia algunos autores utilizan el término microbot, para referirse a dispositivos robóticos cuyas dimensiones son diminutas, en comparación con los robots convencionales.

Las potenciales aplicaciones para robots a escala pequeña son diversas, incluyendo la manufactura, rescate, vigilancia, monitoreo, defensa y medicina. Sin embargo, estos robots aún son considerados como una curiosidad científica, dispositivos que solo se encuentran en laboratorios de investigación o son utilizados por un pequeño número de empresas especializadas. Para que estos robots puedan comercializarse, primero deben superarse numerosos retos relacionados con su fabricación, control y suministro de energía, para lograr la autonomía que distingue a todo dispositivo robótico.

HISTORIA DE LA ROBÓTICA A ESCALA PEQUEÑA

El origen de la robótica a escala pequeña se remonta al año 1959, cuando el doctor Richard Feynman, Premio Nobel en Física, impartió su conferencia “Hay mucho espacio en el fondo”. Esta conferencia fue una invitación para ingresar a un nuevo campo de la física, llamado nanotecnología. Feynman mencionó la posibilidad de manipular, controlar y construir objetos de pequeñas dimensiones, estableciendo la base de robots a escala pequeña. Con el desarrollo de las tecnologías de microfabricación para circuitos integrados y la aparición del microcontrolador en la década de 1970, se crearon los medios para producir máquinas cada vez más pequeñas y potentes. En 1983, Richard Feynman mencionó la posibilidad de fabricar robots a escala pequeña y propuso aplicaciones para este tipo de robots, especialmente aquellas relacionadas con la medicina. En la década de 1980 se desarrollaron importantes avances tecnológicos, como el microscopio electrónico de barrido y el microscopio de sonda de barrido. Estos avances, junto a mejores técnicas de microfabricación, permitieron el desarrollo de los sistemas microelectromecánicos (MEMS), los cuales integran sensores, motores y mecanismos para los robots a escala pequeña.

En 1988, Anita Flynn propuso el uso de un enjambre de robots pequeños, baratos y desechables para reemplazar un robot complejo. Por otro lado, Pister, Katz y Kahn (1999) plantearon el uso de múltiples dispositivos MEMS controlados inalámbricamente, para la detección de parámetros como vibraciones mecánicas, temperatura, campos magnéticos y sustancias químicas. Estos dispositivos diminutos están equipados con todo lo que un robot móvil a escala pequeña necesita, exceptuando actuación y propulsión. En el 2000, se inició el desarrollo de sistemas de nanopartículas diseñadas para la administración de fármacos. En 2006, se fabricaron los primeros robots a microescala utilizando tecnología MEMS. Actualmente, se

encuentran en desarrollo robots a escala pequeña con capacidad de implementar secuencias de nanomanipulación sofisticadas y el diseño de enjambres de robots inteligentes para la industria militar y la biomedicina.

DISEÑO

La idea fundamental del funcionamiento de un robot es imitar las funciones de un ser vivo. Los seres vivos recolectamos información del entorno (sensado); dicha información es procesada y se extraen



Figura 1. HAMR es un milibot diseñado por el Instituto Wyss de la Universidad de Harvard para asemejarse a cucarachas (Wyss Institute, 2017).

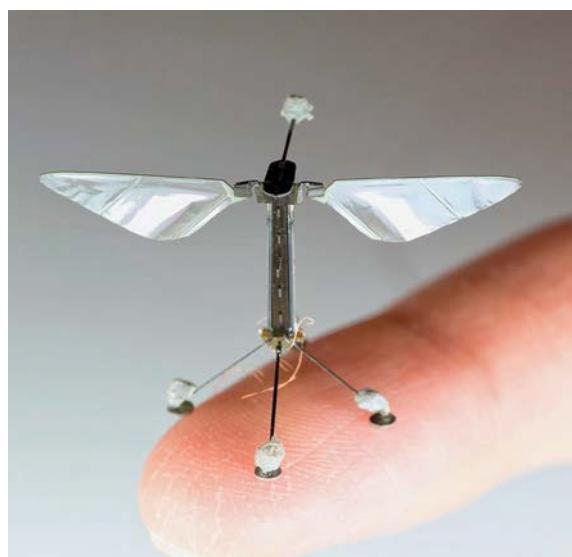


Figura 2. RoboBee es un milibot con forma similar a una abeja desarrollado por el Instituto Wyss de la Universidad de Harvard (Wyss Institute, 2013). Este milibot fue desarrollado para búsqueda, rescate y agricultura.

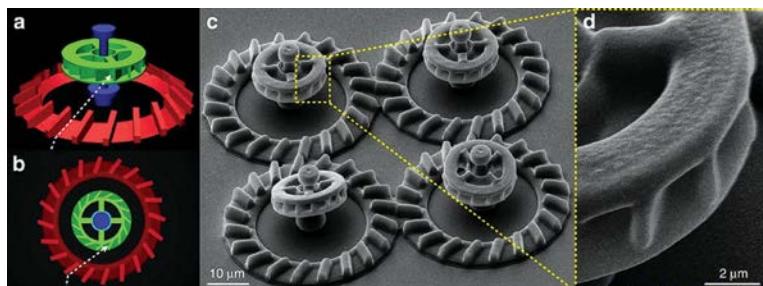


Figura 3. Micromotores impulsados por bacterias y que podrían usarse para microbots híbridos cuyo diseño combina elementos sintéticos y orgánicos para lograr la movilidad (Vizsnyiczai *et al.*, 2017). (a, b) Diseño de los micromotores, sus piezas individuales se marcan con colores diferentes. c) Imagen SEM de micromotores. d) Imagen SEM de las microcámaras del micromotor en las que se alojan las bacterias.

los datos más relevantes para tomar una elección (control) e implementarla para ajustar nuestro comportamiento (actuación). Para la implementación de las funciones anteriores, es necesario que exista un suministro de energía constante.

No existe una recomendación simple para construir un robot convencional porque sus características son regidas por su aplicación. En el caso de la robótica a escala pequeña, la necesidad del problema a resolver determinará la escala del robot, su rango de movimiento y fuerza, los tipos de sensores y compatibilidad con el ambiente, así como su proceso de fabricación.

Los milibots pueden incorporar elementos de control, sensores, actuadores y suministro de energía mediante técnicas de microfabricación. Algunos diseños de milibots usan la fisionomía de insectos, con la intención de lograr su capacidad para levantar varias veces su propio peso, o construir estructuras (hormigas), o saltar con aceleraciones superiores a 400 g (saltamontes), o tener una alta sensibilidad en vuelo para entregar una carga (abejas en el proceso de polinización). La Figura 1 muestra un milibot desarrollado por el Instituto Wyss, de la Universidad de Harvard, con morfología similar a una cucaracha, el cual tiene potencial aplicación para el rescate, monitoreo de estructuras e inspección de ambientes peligrosos.

Uno de los milibots más representativos es RoboBee (Figura 2), diseñado por la Universidad de Harvard, el cual está basado en la configuración de una abeja con aplicaciones potenciales en agricultura, vigilancia, búsqueda y rescate. RoboBee mide aproximadamente la mitad del tamaño de un clip, pesa menos de la décima parte de un gramo

y vuela usando “músculos artificiales” compuestos de materiales que se contraen cuando se aplica un voltaje. Un desafío para el desarrollo de este tipo de insectos robóticos es la obtención de energía eléctrica del medio ambiente usando materiales piezoelectricos, triboeléctricos, flexoelectricos o híbridos.

Los microbots son más pequeños que los milibots y sus diseños son similares a los de algunos microorganismos (Figura 3). La incorporación de baterías en microbots es complicada y por ende son energizados con fuentes externas. La integración de capacidades de sensado y control en microbots, son áreas de oportunidad para investigación.

Los nanobots son dispositivos de escala submicrométrica que pueden usar bloques de construcción de origen biológico, como el ADN. Los nanobots pueden moverse a través de un fluido, pero experimentan fuerzas de arrastre que dificultan su propulsión y control. El desplazamiento de estos nanobots depende del movimiento aleatorio del fluido circundante. Ejemplos de estos nanobots son los sistemas de nanopartículas para suministro de medicamentos de quimioterapia, que pueden seleccionar a las células cancerosas y liberar el medicamento. Otro tipo de nanobots usan actuadores químicos dirigidos, con capacidad de propulsión controlada. Rouville y colaboradores (2018) desarrollaron nanovehículos para la Primera Carrera de Nanoautos efectuada en abril de 2017, en la cual consideraron un modelo de un nanoauto con un chasis plano, y un diseño optimizado de nanoauto con un chasis curvo.

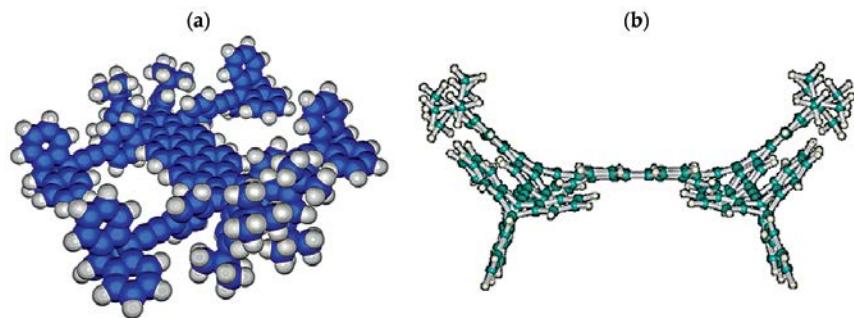


Figura 4. Nanovehículos reportados por Jacquot de Rouville y colaboradores (2018) para la Primera Carrera de Nanoautos. a) Modelo de un nanoauto con un chasis plano. b) Vista lateral del diseño optimizado de un nanoauto con chasis curvo.

Los nanobots son dispositivos de escala sub-micrométrica que pueden usar bloques de construcción de origen biológico, como el ADN. Los nanobots pueden moverse a través de un fluido, pero experimentan fuerzas de arrastre que dificultan su propulsión y control. El desplazamiento de estos nanobots depende del movimiento aleatorio del fluido circundante. Ejemplos de estos nanobots son los sistemas de nanopartículas para suministro de medicamentos de quimioterapia, que pueden seleccionar a las células cancerosas y liberar el medicamento. Otro tipo de nanobots usan actuadores químicos dirigidos, con capacidad de propulsión controlada. Rouville y colaboradores (2018) desarrollaron nanovehículos para la Primera Carrera de Nanoautos efectuada en abril de 2017, en la cual consideraron un modelo de un nanoauto con un chasis plano, y un diseño optimizado de nanoauto con un chasis curvo.

MATERIALES

La elección del material depende de la aplicación y tamaño del robot, aunque los criterios de su elección pueden ser la fuerza deseada, el rango de movimiento, los costos de fabricación o la compatibilidad con el entorno. Los materiales piezoelectrónicos son una opción debido a su propiedad de deformarse mediante la aplicación de un voltaje. El silicio es otro material adecuado para microbots cuando se usan técnicas de microfabricación como MEMS. Por ejemplo, en tecnología MEMS se han desarrollado micropinzas electrostáticas de alta

precisión basadas en silicio. Además, se pueden emplear polímeros para la implementación de actuadores para robots de escala pequeña. Sin embargo, cuando se está considerando el funcionamiento de un robot de escala pequeña en el interior del cuerpo humano, la compatibilidad biológica y la toxicidad se convierten en las limitantes principales.

CONTROL

En cada dispositivo robótico, la etapa de control es la encargada de mantener al dispositivo en el estado deseado. Esta etapa compara el estado actual con el deseado, y si detecta una desviación, el controlador emitirá una señal de corrección a los actuadores del robot. Así, se eliminará la diferencia entre el estado actual y el deseado, manteniendo al robot con el comportamiento diseñado.

Los milibots pueden tener elementos de control integrados que funcionan de forma reactiva; sin embargo, también se han explorado diseños que involucran el uso a modo de enjambre de robots miniaturizados. Estos dispositivos muestran una inteligencia limitada, pero son capaces de interactuar exhibiendo patrones más complejos de comportamiento, imitando el comportamiento de insectos como hormigas y abejas. Generalmente, los microbots son controlados mediante dispositivos externos a sus estructuras, como bobinas, encargadas de controlar su trayectoria. Varios microbots podrían ser controlados usando la Respuesta Selectiva de Control Global (RSCG), la cual diseña las trayectorias de los microbots. El control de nanobots dentro de un fluido puede obtenerse mediante el movimiento aleatorio de su fluido circundante para

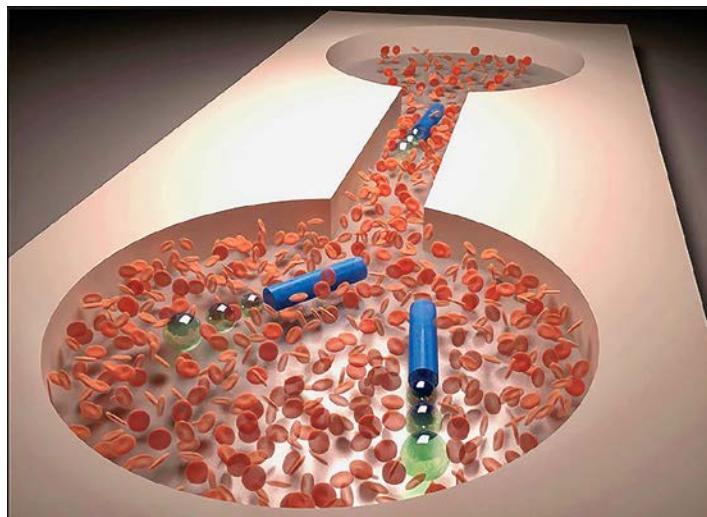


Figura 5. Microbots moviéndose en un dispositivo microfluídico, los cuales podrían usarse en conjunto para obtener diagnósticos clínicos más precisos (Soler *et al.*, 2013).

la propulsión, o el uso de proteínas motoras, como la kinesina, que permite mover sistemas nanométricos a través de microtúbulos, o encontrar el punto de entrada de una célula.

SUMINISTRO DE ENERGÍA

La implementación del suministro de energía en un robot de escala pequeña está relacionada con su tamaño y especificaciones de comportamiento. Por ejemplo, los milibots pueden tener el suministro de energía integrado, utilizando materiales piezoeléctricos, aleaciones de efecto térmico de memoria o polímeros. Existen diversas opciones para el suministro de energía en microbots que operan en un entorno líquido. Estos microbots pueden ser impulsados mediante fuerzas generadas de manera remota, como las obtenidas con el uso de bobinas magnéticas externas, o métodos de autopropulsión usando biomateriales como células o bacterias.

La conversión de energía del medio ambiente en energía eléctrica usando materiales piezoeléctricos, triboeléctricos o flexoeléctricos son una alternativa para suministrar energía a los robots a escala pequeña. El concepto consiste en la conversión de energía ambiental para impulsar pequeños dispositivos eléctricos y electrónicos con el objetivo de que sean autosuficientes. Por ejemplo, un milibot puede convertir la energía mecánica de

las vibraciones del entorno en energía eléctrica. Un robot a escala pequeña operando en el cuerpo humano podría alimentar sus celdas de energía utilizando la temperatura natural del paciente, etcétera.

APLICACIONES

Las aplicaciones de los milibots incluyen instrumentación científica, manufactura y medicina. Robots en esta escala pueden ser utilizados para estudiar nuevos materiales o muestras biológicas. Además, los milibots pueden ser empleados para fabricar una gran cantidad de pequeños robots móviles, cumpliendo uno de los objetivos previstos por Feynman para estas tecnologías. En medicina, estos robots pueden ser como una cámara encapsulada en una píldora, que puede tomar muestras de objetos como un tumor, u otras anomalías en el cuerpo humano. Existen robots en esta escala capaces de manipular y reparar el tracto intestinal.

Los microbots (Figura 5) tienen aplicación en la medicina y pueden funcionar como herramientas para cirugía no invasiva, suministro de fármacos de manera guiada e ingeniería de tejidos. Este tipo de robots podría ser utilizado para realizar el concepto de “fábrica en chip”, en el que podrían participar en el armado de microestructuras complejas. Estos microbots también podrían realizar



© Angela Arziniaga. De la serie *Estoica patria mía XXVII*. Daguerrotipo mercurial.

labores de mantenimiento para las microestructuras complejas y repararlas. Otras aplicaciones pueden ser la vigilancia y seguridad de la información, donde el tamaño de estas máquinas las vuelve casi indetectables.

Los nanobots son una alternativa para el tratamiento de diferentes tipos de cáncer, considerando sistemas de nanopartículas capaces de suministrar medicamentos en partes específicas del cuerpo humano, sin afectar las células sanas. Otros sistemas de nanobots elaborados con componentes del ADN podrían reparar cromosomas dañados. Finalmente, los sistemas robóticos podrían ser usados para remover contaminantes del agua.

R E F E R E N C I A S

Adam G, Chowdhury S, Guix M, Johnson BV, Bi C and Cappelleri D (2019). Towards Functional Mobile Microrobotic Systems. *Robotics* 8(3):69. <https://doi.org/10.3390/robotics8030069>.

Flynn A (1988). Gnat robots: a low-intelligence low-cost approach. *IEEE Technical Digest on Solid-State Sensor and Actuator Workshop* 1(1):63-66. <https://doi.org/10.1109/solsen.1988.26434>.

Jacquot de Rouville, HP, Kammerer C and Rapenne G (2018). From the Synthesis of Nanovehicles to Participation in the First Nanocar Race-View from the French Team. *Molecules* 23:612. <https://doi.org/10.3390/molecules23030612>.

Paprotny I and Bergbreiter S (2014). Small-Scale Robotics: An Introduction. *Small-Scale Robotics. From Nano-to-Millimeter-Sized Robotic Systems and Applications* 1(1):1-15. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55134-5_1.

Soler L, Martínez-Cisneros C, Swiersy A, Sánchez S and Schmidt OG (2013). Thermal activation of catalytic microjets in blood samples using microfluidic chips. *Lab on a Chip* 22:4299. <https://doi.org/10.1039/C3LC50756D>.

Vizznyiczai G, Frangipane G, Maggi C, Saglimbeni F, Bianchi S and Di Leonardo R (2017). Light controlled 3D micromotors powered by bacteria. *Nature communications* 8:15974. <https://doi.org/10.1038/ncomms15974>.

Wyss Institute. (2013). RoboBees: Autonomous flying microrobots. <https://wyss.harvard.edu/technology/robobees-autonomous-flying-microrobots/>.

Wyss Institute. (2017). HAMR: Versatile crawling microrobots. <https://wyss.harvard.edu/technology/hamr-versatile-crawling-microrobot/>.

Gerardo Mora Aquino

Universidad del Valle de México

A480043591@my.uvm.edu.mx

Agustín Leobardo Herrera May

Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología

leherrera@uv.mx