



Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador 2024



El advenimiento de la robótica a escalas nano y micro

Vinagre, B. M., Tejado, I., Serrano, A., Mancha, E.

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas, s/n, 06006, Badajoz, España.

Resumen

Uno de los empeños de la robótica ha sido imitar a la naturaleza animada, en sus acciones, en sus funciones y en sus capacidades. El descubrimiento de la vida a escala muy pequeña, de los microorganismos o de las llamadas máquinas moleculares, unido a un enfoque cibernético para entender la vida misma, han hecho que, una vez desarrollada la capacidad de miniaturización en dispositivos electrónicos y mecánicos, el campo de la robótica se haya ampliado así como el de sus aplicaciones. En este trabajo se recoge un breve recorrido por los hitos que marcaron el nacimiento de la robótica a escalas nano y micro.

Palabras clave: Sistemas Micro y Nano Mecatrónicos, Tecnología robótica, Robots móviles, Estimación y control en sistemas biológicos, Control de micro y nanosistemas, Modelado cinético y control de sistemas biológicos.

The advent of robotics at nano and micro scales

Abstract

One of the efforts of robotics has been to imitate animated nature, in its actions, its functions and its capabilities. The discovery of life on a very small scale, of microorganisms or the so-called molecular machines, together with a cybernetic approach to understanding life itself, has meant that, once the capacity for miniaturization in electronic and mechanical devices has been developed, the field of robotics has expanded as well as its applications. This work provides a brief overview of the milestones that marked the birth of robotics at nano and micro scales.

Keywords: Micro and Nano Mechatronic Systems, Robotics technology, Mobile robots, Estimation and control in biological systems, Control of micro- and nano-systems, Kinetic modeling and control of biological systems.

1. Introducción

En un artículo que Arturo Rosenbleuth, Norbert Wiener y Julian Bigelow publicaron en 1943, fruto de la colaboración entre la Harvard Medical School y el Massachusetts Institute of Technology, un artículo de lectura muy recomendable para aquellos que se adentran en el mundo del control realimentado y la robótica (Rosenbleuth et al., 1943), los autores hacían una clasificación del comportamiento de los organismos vivos y de las máquinas en la que el nivel más alto lo ocupaba el que caracterizaban como activo, con propósito, teleológico (es decir, con realimentación o autorregulado) y predictivo. Hablando de este último nivel, comentaban que si un ingeniero diseñara un robot para que tuviera un comportamiento similar al de un organismo animal, probablemente lo construiría con partes metálicas, dieléctricos y tubos de vacío, pero que tal vez en el futuro los ingenieros podrían diseñar robots no solo con el comportamiento, sino también con una estructura similar a la de los organismos vivos. Porque, escribían, «el modelo final de un gato es por supuesto otro gato, haya nacido de un tercer gato o sintetizado en un laboratorio». Los robots muy pequeños, como buena parte de

sus hermanos mayores, tratan de imitar la vida; pero una vida a escala tan diminuta que, aunque hace tiempo que supimos de su existencia, solo recientemente hemos podido intentar emularla.

En lo que sigue, se hace un breve repaso de los hitos que han marcado el advenimiento de la micro y la nanorrobótica, desde las primeras especulaciones filosóficas hasta el nacimiento efectivo de dichas disciplinas.

2. Especulaciones filosóficas y descubrimiento del inframundo

2.1. Especulaciones filosóficas

Ya los atomistas del siglo V a.C. trataron de explicar la realidad física apelando solo a lo que hoy podríamos llamar ciencia, y formularon la conjetura de que los elementos que la constituyen «únicas realidades verdaderas, eran diminutos cuerpos sólidos, demasiado pequeños para ser percibidos por los sentidos, que chocan entre sí y se rechazan en un movimiento incesante en un espacio ilimitado» (Guthrie, 1985, cap. III). Estos *átomos* eran iguales en sustancia y sus diferencias en tamaño y forma y sus posiciones relativas servían para explicar

la infinita diversidad de lo que existe obedeciendo al *azar* y la *necesidad*. Por otra parte, desde Aristóteles al menos solemos distinguir entre lo que es *por naturaleza* (natural o *secundum naturam*) y lo que es producido *por la técnica* (artificial o *contra naturam*). Los organismos, que se mueven por sí mismos, pertenecerían a la primera clase, mientras que los mecanismos, que se mueven por otro, pertenecerían a la segunda. A su vez, trescientos años antes del artículo de Rosenbleuth, Descartes en sus *Principios de la filosofía* había hecho una comparación entre máquinas y organismos y, salvando al ser humano gracias a una intervención divina, confesaba no reconocer (Descartes, 2002, IV, 203): «... diferencia alguna entre las máquinas que construyen los artesanos y los cuerpos que la naturaleza por sí misma ha formado; la única diferencia reside en que los efectos de las máquinas sólo dependen de la disposición de ciertos tubos, resortes u otros instrumentos, que, debiendo mantener una cierta proporción con las dimensiones de las manos de las personas que los construyen, son siempre tan grandes que sus figuras y movimientos se pueden ver, mientras que los tubos o resortes que causan los efectos de los cuerpos naturales son por lo general muy pequeños para llegar a ser percibidos por nuestros sentidos». Todo esto parecían ser metáforas, o como mucho hipótesis de una ciencia ingenua.

2.2. Descubrimiento del inframundo

Antoni van Leeuwenhoek, ciudadano de Delft, había abandonado el mundo textil por su pasión de pulir y esmerilar lentes, y durante veinte años pasó muchas horas observando con ellas todo lo que tenía a mano –fibras musculares de ballena, escamas de su propia piel, ojos y pelo de animales, la cabeza de una mosca, semillas, el aguijón de una pulga o las patas de un piojo– maravillándose de la perfección y elegancia de las estructuras que observaba (de Kruif, 2021). En su constante empeño, un día de agosto de 1674 está «mirando por un objeto alargado de unos siete centímetros de longitud. En el centro de ese objeto hay una pequeña cuenta de cristal hecha por él (...). Unida a la parte de atrás del extraño instrumento hay una delgada varilla metálica que sostiene un pequeño tubo de cristal que contiene una gota de agua.» Y mirándola a través de la cuenta de cristal (ver Figura 1) descubre un mundo en la gota de agua del Berckelse Mere, un lago a pocos kilómetros de Delft, y anota (Snyder, 2017, pp. 9–10): «El movimiento de [...] estos animálculos [*sic*] en el agua era tan rápido y tan variado, hacia abajo y en círculo, que he de confesar que no pude por menos que maravillarme de ello».

Unos ciento cincuenta años más tarde, en 1827, también en verano, un botánico escocés llamado Robert Brown observa en su microscopio otra gota de agua. Esta vez contiene polen de hada rosa (*Clarkia pulchella*, ver Figura 2) y Brown quiere saber cómo funciona la polinización, cómo esas pequeñas partículas diseminan el mensaje de la vida; y espera ver una «suspensión de partículas calma y sin movimiento». Pero observa, para su sorpresa, que esas partículas ‘bailan’, y lo hacen sin parar, como si estuvieran ‘vivas’. Su informe sobre las observaciones de ese verano tiene un largo título que termina con las palabras «... sobre la existencia general de moléculas activas en cuerpos orgánicos e inorgánicos», y fue el primer paso para el descubrimiento de que hay un mundo que comparten células, ADN y virus, con moléculas de sustancias inorgánicas

en razón de su tamaño, un *mundo intermedio* cuyos habitantes nunca están quietos (How, 2007).

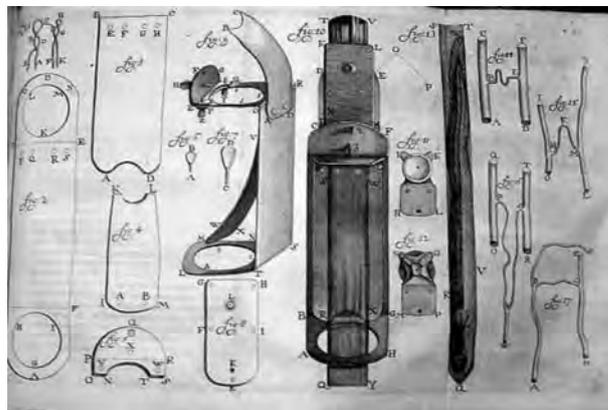


Figura 1: Dibujo de los microscopios de van Leeuwenhoek realizado por Henry Baker, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4805546>.



Figura 2: Contenido de polen de *Clarkia pulchella* antes de la dehiscencia, dos fotografías superpuestas tomadas con 1 minuto de diferencia. Fuente: (Pearle et al., 2010).

En 1907 el físico irlandés Edmund Edward Fournier d’Albe, que el año anterior había publicado una nueva teoría sobre la electricidad y el magnetismo, publicó *Dos nuevos mundos*. La hipótesis que plantea en la obra es que, «construidos sobre un patrón no muy diferente al nuestro», se hallaban el mundo que tiende a lo infinitesimal y el que tiende a lo infinito (d’Albe, 1907). Al primero lo denomina *inframundo* o mundo de abajo, podríamos decir, y empieza a hablar de él observando otra gota de agua. Escribe: «Hay algo inquietante en el pensamiento de que una gota de rocío pueda contener miles de pequeños animales que comen, y luchan, y aman, y mueren, y cuyo lapso de vida, a juzgar por su intensa actividad, está probablemente lleno de tantos eventos como el nuestro». En los capítulos dedicados a este mundo, D’Albe estudia las fuerzas que lo rigen, cómo son su mecánica, su física y su química, y cómo se relacionan en él materia y vida.

3. Algoritmos y cibernética

La observación y el análisis muchas veces no son suficientes para alumbrar un nuevo campo, y es necesario un enfoque diferente, un cambio de paradigma. En 1859 Charles Darwin vino a sacarnos de la postura ingenua y cómoda que mantenía separados los mundos natural y artificial. Según Daniel Dennett, el esquema conceptual de la teoría de Darwin se podría definir hoy con la palabra *algoritmo*, pues cumple sus características esenciales (Dennett, 1999, pp. 72–73): a) *sustrato de neutralidad*: su poder se debe a su estructura lógica y no a los elementos utilizados para su realización; b) *estupidez subyacente*: por brillante que sea el diseño global, cada paso, así como las transiciones entre estos, es simple; c) *garantía de resultados*: haga lo que haga, siempre lo hace si es correctamente ejecutado. Así, escribe Dennett (Dennett, 1999, p. 301), «La gran visión de Darwin fue que todos los diseños de la biosfera podrían ser los productos de un proceso (...) tan paciente como insensato, una ‘automática’ y gradual ‘elevación’ en el espacio del diseño».

Esta terminología es moderna, y para llegar a ella hemos tenido que pasar, entre otras cumbres, por la *Cibernética* de Norbert Wiener y la *Teoría de la Información* de Claude Shannon. Y por Richard P. Feynman que, en su famosa conferencia de diciembre de 1959 en la American Physical Society en Pasadena (Feynman, 1960), estaba recogiendo una larga tradición — desde el título, *There’s Plenty of Room at the Bottom*, que tiene claras resonancias del *inframundo*, el mundo de ahí abajo (bottom), de Fournier D’Albe —. Sus propuestas estimularon profundamente la investigación de las posibilidades de lo muy pequeño, es cierto, y en su conferencia menciona la ‘idea loca’ de un amigo de sumo interés para nosotros: «Un amigo mío (Albert R. Hibbs) sugiere una posibilidad muy interesante para máquinas relativamente pequeñas. Dice que, aunque sea una idea muy loca, sería interesante en cirugía que te pudieras tragar al cirujano. Pones el cirujano mecánico en los vasos sanguíneos y va hasta el corazón, entra y mira alrededor. (Por supuesto, la información ha de ser transmitida al exterior.) Encuentra qué válvula es la que falla y coge un pequeño bisturí y corta. Otras máquinas pequeñas pueden incorporarse permanentemente al interior del cuerpo para asistir a cualquier órgano que no funcione adecuadamente».

Y así, un siglo después de Darwin, el biólogo y premio Nobel Jacques Monod expone en su obra más popular, titulada precisamente *El azar y la necesidad*, dos ideas muy pertinentes para nuestro asunto: la dificultad de distinguir entre objetos naturales y objetos artificiales, incluso a nivel macroscópico, basándonos en criterios simples con los que parece evidente identificar a los últimos, como son la regularidad en la estructura, la repetición de individualidades o su carácter proyectivo, de estar destinados a cumplir una función (Monod, 1971, I); y, al tratar de ese mundo intermedio al que nos referíamos más arriba, no duda en hablar de ‘cibernética microscópica’ al referirse a sus modos de funcionamiento (Monod, 1971, IV).

Con esta mirada, una enzima que se mueve a lo largo de un par de hebras de ADN, revisando, reparando y copiando para después trasladarse a otro nivel y repetir el proceso, es una imagen perfecta de un autómata microscópico y una realización de la máquina de Turing. De igual manera, una secuencia unidimensional de aminoácidos que determina la identidad de una

proteína pero se pliega solo en una de muchas formas posibles, y es esa forma tridimensional la que la hace construir estructuras, combatir antígenos o regular el desarrollo, es una máquina que cumple una función, es un robot origami cuya estructura final, y por tanto su función, depende de las condiciones iniciales y del medio ambiente. Estas maquinatas y algoritmos serían las piezas fundamentales para entender la evolución, la reproducción, la morfogénesis y el metabolismo, focos de atención de la *Vida Artificial*; pero también la percepción, la cognición y la acción, asuntos de los que se ocupa la *Inteligencia Artificial* (Brooks, 2001). Tal vez «Un pequeño fragmento de máquina molecular, impersonal, irreflexiva, robótica, insensata es, en último término, la base de toda la *acción* y, en consecuencia, del significado y, en consecuencia, de la conciencia en el universo» (Dennett, 1999, pp. 326–327).

4. Dinámica en los mundos nano y micro

Para analizar y diseñar la dinámica de los robots a escala macro, incluso si están inmersos en un fluido, suelen ser suficientes las herramientas que nos proporcionó Newton. No es el caso de los robots muy pequeños, y ello es debido a que el balance de fuerzas que determinan su movimiento es diferente: las fuerzas inerciales dejan de ser las más importantes y entran en juego otras como las viscosas, las intermoleculares o las debidas al ruido térmico.

4.1. Nano

Cuando Robert Brown estudiaba el polen de la *Clarkia Pulchella* observó que los granos eyectaban diminutas partículas que se movían de forma agitada. En su honor, el movimiento posteriormente estudiado, que no observado por Brown, se ha llamado *browniano* y su importancia va mucho más allá de la anécdota de su descubrimiento. Aunque la primera teoría dinámica del movimiento browniano era que las partículas estaban vivas, una observación más atenta y sin prejuicios ha dado lugar a teorías y modelos puramente físicos que relacionan el movimiento con el bombardeo molecular o el ruido térmico, eliminando la confusión con los movimientos voluntarios de los organismos. Se puede considerar que los dos fundadores de la teoría del movimiento browniano fueron Albert Einstein y Marian Smoluchowski (ver, e.g., (Nelson, 2011)).

Consideremos el caso simple de una partícula de masa m suspendida en un fluido y estudiemos el movimiento de la misma paralelo al eje x (ver, e.g., (Fitzpatrick, 2021; Nelson, 2011)). La partícula está sometida a dos tipos de fuerzas, unas de carácter impulsivo debidas al bombardeo molecular, y una que se opone al movimiento y que es proporcional a la velocidad de la partícula. Así, la ecuación de movimiento es de tipo estocástico, y la podemos formular como sigue:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \xi(t) - a \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

donde $\xi(t)$ es la resultante de las fuerzas impulsivas antes mencionadas. Tomando promedios, se puede obtener la expresión

$$m \frac{d}{dt} \left\langle \left(x \frac{dx}{dt} \right) \right\rangle - m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = \langle x \xi \rangle - \frac{a}{2} \frac{d \langle x^2 \rangle}{dt}. \quad (2)$$

Teniendo en cuenta x y ξ , y y dx/dt son variables aleatorias incorreladas de media 0, resulta

$$m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = \frac{a}{2} \frac{d \langle x^2 \rangle}{dt}, \quad (3)$$

y, por el *teorema de equipartición*, que relaciona la temperatura de un sistema con su energía media, se sabe que

$$m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = k_B T, \quad (4)$$

donde T es la temperatura del fluido y k_B la constante de Boltzmann. Sustituyendo e integrando podemos obtener la expresión

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2k_B T}{a} t, \quad (5)$$

que nos dice que el bombardeo molecular hace que la partícula ejecute un movimiento de *paseo aleatorio (random walk)* con coeficiente de difusión $D = k_B T/a$. En el caso de una partícula de radio r y de una oposición al movimiento debida a la viscosidad, de acuerdo con la *ley de Stokes*, $a = 6\pi\eta r$, donde η es la viscosidad dinámica del fluido.

Cuando se considera que la partícula se mueve en campo de fuerzas externo, a la dinámica arriba descrita hay que añadirle la acción de éste, generalmente como un término $-V'(x)$ siendo $V(x)$ un potencial periódico con asimetría espacial también llamado *potencial de trinquete*. En la Figura 3 se muestra una ilustración de esta dinámica conocida como *trinquete Feynman-Smoluchowski*. El dispositivo consta de un trinquete (una rueda dentada que gira libremente en un sentido pero no en el contrario debido al gatillo) sumergido en un fluido a temperatura T_2 , conectado por un eje a una rueda de paletas sumergida en un fluido a temperatura T_1 . Las moléculas del fluido constituyen un baño térmico y están sometidas a un movimiento browniano con una energía cinética media que depende de la temperatura. Se supone que el dispositivo es lo suficientemente pequeño como para que el impulso de una única colisión molecular pueda hacer girar las aspas. Aunque tales colisiones tenderían a hacer girar el eje en ambas direcciones con la misma probabilidad, el trinquete sólo le permite girar en una. El movimiento unidireccional del dispositivo se puede utilizar para realizar algún trabajo, como levantar un peso contra la gravedad. Esta es la dinámica considerada en los llamados *motores brownianos* (Hänggi et al., 2005). En muchos casos, dado el tamaño del sistema considerado y las condiciones del entorno, el término inercial desaparece de la ecuación (1) dando lugar a un modelo sobreamortiguado conocido como ecuación de Langevin:

$$a\dot{x}(t) = -V'(x(t)) + \xi(t). \quad (6)$$

Relacionados con estos motores brownianos están las llamadas *máquinas moleculares*, utilizadas por la naturaleza en procesos de transporte intracelular. En particular, el adenosín trifosfato (ATP) funciona en muchos casos como combustible de los *motores moleculares*, capaces de viajar a lo largo de filamentos poliméricos intracelulares. Otros tipos de máquinas son las bombas moleculares, enzimas que utilizan la energía de la catálisis de la ATP para crear o mantener gradientes de concentración a través de las membranas. Para estudiar estas máquinas, y para sintetizar máquinas artificiales que funcionen como

ellas (*nanorobots*), se emplean, en un marco bioquímico, modelos de estado continuos, discretos y estocásticos, como el de la ecuación (6) (Reimann, 2002).

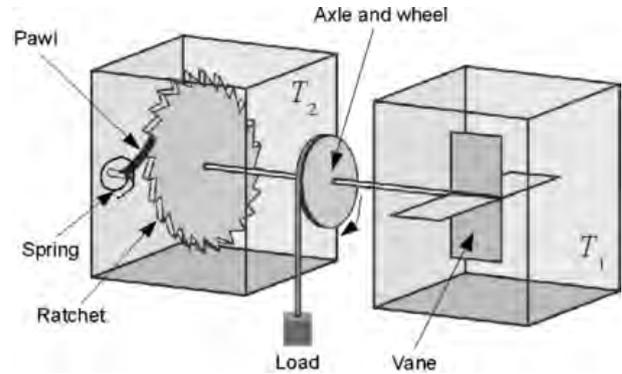


Figura 3: Trinquete de Feynman-Smoluchowski (Fuente: (Reimann, 2002)).

4.2. Micro

Para que un robot sea considerado *micro* su dimensión debe ser inferior al milímetro. Si no es así, simplemente es 'muy pequeño'. La diferenciación no es caprichosa pues, como sus parientes nano, están sometidos a un balance de fuerzas diferente que hace que, podríamos decir, siempre estén en un entorno fluido, sea el fluido líquido o gaseoso. En este entorno y con este tamaño, las fuerzas viscosas dominan sobre las inerciales, y por tanto el número de Reynolds es bajo, típicamente menor que 1: para volar los robots pueden utilizar la viscosidad del aire en lugar del principio de Bernoulli para elevarse; para nadar necesitan ejecutar un movimiento no recíproco, como el de un remo flexible o el de un sacacorchos. Como hemos dicho, los robots, por su tamaño, tienen la necesidad de navegar en un flujo de Stokes o laminar con bajos valores del número de Reynolds, lo que da lugar a una perfecta reversibilidad en el tiempo: no existe la flecha del tiempo. Como afirmó E. M. Purcell «El tiempo, de hecho, no hace ninguna diferencia – sólo la configuración» (Purcell, 1977). Esto hace que los mecanismos de propulsión macroscópicos, que utilizan el movimiento recíproco (como el de un remo rígido) sean ineficaces: debido a la importancia de las fuerzas viscosas, no existe ningún deslizamiento que aproveche las fuerzas de inercia para desplazarse. Luego tenemos que emular algún tipo de potencial de trinquete a lo largo de la marcha e imitar, nuevamente, a la naturaleza y movernos como se mueven las bacterias (ver Figura 4).

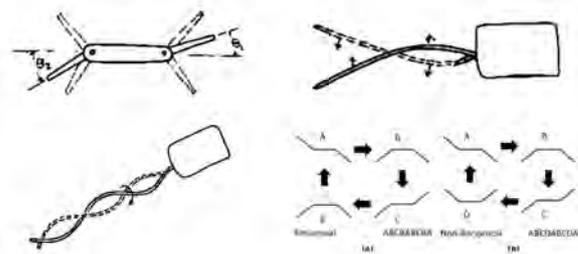


Figura 4: El nadador de Purcell, formas de movimiento (remo flexible y sacacorchos) y esquema de movimiento recíproco/no recíproco. (Fuente: (Purcell, 1977)).

5. Conclusiones

En este trabajo se ha querido repasar brevemente el advenimiento de la robótica a escala nano y micro, desde sus orígenes filosóficos y científicos con la formulación de ideas o el descubrimiento de la existencia de lo muy pequeño hasta las teorías matemáticas para su tratamiento, pasando por el cambio de paradigma que supone pasar de lo orgánico a lo cibernético. Desde luego, otros muchos agentes han contribuido al nacimiento de la robótica diminuta: la llegada de los semiconductores, los circuitos integrados y las técnicas de miniaturización en las últimas décadas del siglo XX. Ahora, recordando a Descartes, ya tenemos artesanos con las manos muy pequeñas y sabemos ponerlos a trabajar con método; ahora ya los ingenieros pueden diseñar robots con una estructura similar a la de los organismos vivos, como anunciaban Rosenbleuth, Wiener y Bigelow. Y así, la disciplina que trata de las máquinas muy pequeñas, artificiales, autónomas, y autorreguladas, de los robots diminutos, desde finales del siglo pasado ha empezado a escribir su historia.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto de referencia PID2022-141409OB-C22, financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, EU.

Referencias

- Brooks, R., 2001. The relationship between matter and life. *Nature* 409 (18), 409–411.
- d'Albe, E. E. F., 1907. *Two New Worlds*. Longsman, Green and Co.
- de Kruif, P., 2021. *Cazadores de microbios*. Capitán Swing.
- Dennett, D. C., 1999. *La peligrosa idea de Darwin*. Galaxia Gutenberg - Círculo de Lectores.
- Descartes, R., 2002. *Los principios de la filosofía*. RBA.
- Feynman, R. P., 1960. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science Caltech Magazine*, 22–36.
- Fitzpatrick, R., 2021. Intermediate College Physics–Kinetic Theory (Brownian Motion). <https://farside.ph.utexas.edu/teaching/355/Surveyhtml/Surveyhtml.html>, [Online; acceso 1-abril-2024].
- Guthrie, W. C. K., 1985. *Los filósofos griegos*. Fondo de Cultura Económica.
- Hänggi, P., Maschesoni, F., Nori, F., 2005. Brownian motors. *Ann. Phys.* 14 (1–3), 51–70.
- How, M., 2007. *Middle World. The restless heart of matter and life*. Macmillan.
- Monod, J., 1971. *El azar y la necesidad*. Barral.
- Nelson, E., 2011. *Dynamic Theories of Brownian Motion*. Princeton University Press.
URL: www.math.princeton.edu/~nelson/books.html
- Pearle, P., Collett, B., Bart, K., Bilderback, D., Newman, D., Samuels, S., 2010. What Brown saw and you can too. *American Journal of Physics* 78 (12), 1278–1289.
- Purcell, E. M., 1977. Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics*.
- Reimann, P., 2002. Brownian motors: noisy transport far from equilibrium. *Physics Reports* 361, 57–265.
- Rosenbleuth, A., Wiener, N., Bigelow, J., 1943. Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science* 10 (1), 18–24.
- Snyder, L., 2017. *El ojo del observador*. Acatilado.