

## LA MATRACA DE FEYNMAN Y LOS MOTORES BIOLÓGICOS

### THE FEYNMAN'S RACHET AND THE BIOLOGICAL MOTORS

**Angela S. Camacho**

Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

(Recibido: Julio/2013. Aceptado: Noviembre/2013)

#### Resumen

Un módulo del diplomado sobre Proyectos de Investigación que ofrece la ACAC titulado Ciencias Básicas tiene por objeto ubicar y enfatizar la importancia de estas ciencias en cualquier proyecto de investigación. El objetivo del módulo es crear conciencia del papel que juegan las ciencias básicas en la vida diaria y su esperado rápido desarrollo en el siglo XXI en lo que llamamos Nanociencia. El tema fundamental es la entropía como una ley inexorable de la naturaleza y sobre la cual se han hecho múltiples intentos para tratar de obviarla. Maxwell inventó el famoso Demonio y Feynman propuso su conocida matraca que pudiera interpretarse como un demonio, pero no lo es. El concepto del desorden como explicación del aumento de entropía puede usarse para entender el funcionamiento de las máquinas biológicas y proponer nanomotores artificiales o nanorobots. Se finaliza este módulo con una evaluación que permita orientar y adaptar el módulo a una audiencia más amplia y extenderlo a las clases de la escuela secundaria.

**Palabras clave:** Movimiento Browniano, Nanomotores, Entropía, máquinas biológicas

#### Abstract

A graduate module on research projects offered by the ACAC entitled Basic Sciences aims to locate and emphasize the

importance of these sciences in any research project. The module aims to raise awareness of the role played by basic science in daily life and its expected rapid development in the XXI century in what we call Nanoscience. The fundamental issue is the entropy as an inexorable law of nature and on which have been made multiple attempts trying to overcome it. Maxwell invented a famous demon and Feynman proposed his well known ratchet that could be interpreted as a demon, but it is not. The concept of disorder as an explanation of the increase of entropy can be used to understand how biological machines and propose nanoengines artificial or nanorobots. This module ends with an evaluation with the purpose of guiding and adapting the module to a wider audience and extend it to high school classes.

**Keywords:** Brownian motion, entropy, biological nano-systems, hibrid nanotransistors.

### **Introducción**

Desde la antigüedad el problema de la disipación de energía ha obstaculizado el desarrollo de la tecnología por la dificultad de diseñar el motor con la máxima eficiencia posible. Se han propuesto modelos basados en experimentos imaginados que lograrían describir el motor ideal con 100% de eficiencia. Por otro lado el estudio reciente del ADN ha permitido grandes avances en el entendimiento de procesos biológicos que se comportan como nano-motores mostrando eficiencias inalcanzables con la tecnología del siglo XX. La nanotecnología ha permitido diseñar artificialmente nanosistemas y estudiar sus propiedades dentro de un esquema controlado en el laboratorio. Más aún, combinar sistemas biológicos con los desarrollados artificialmente y proponer posibles nanorobots es actualmente uno de los grandes desafíos en un área de investigación e innovación tan prometedora como la nanotecnología.

### **Ejemplos de Sistemas Híbridos de Biología y Física**

La introducción del módulo se hace presentando un sistema conocido desde la Biología y de gran interés actual como es el ADN, ya que es un muy buen ejemplo de un sistema desordenado con propiedades electrónicas, que permiten explotar las ventajas de millones de años de evolución. Para relacionar esta molécula con la nanotecnología se muestra cómo funciona como un conductor y qué ventajas traería al reemplazar en algunos circuitos los conductores por ADN, o en aplicaciones aún más interesantes como son los procesos de conversión fotoquímica y o de reconocimiento

molecular. El ejemplo del transistor de proteínas diseñado y construido en la National Chiao University en China Chen et al. [1] ilustra la tendencia actual de crear en el laboratorio sistemas híbridos con propiedades prediseñadas. La clave está en combinar proteínas con nanopartículas de oro, un híbrido nanotecnológico que introduce una funcionalidad adicional vía puntos cuánticos. Ellos fabricaron con litografía una juntura de 10 nm de ancho y colocaron en cada uno de sus extremos una nanopartícula de oro de 5 nm de diámetro usando un AFM. Luego, liberaron una solución de anticuerpos de inmunoglobulina G a través de un canal microfluídico. El anticuerpo tiene forma de Y de tal forma que se forman dímeros nanopartícula-anticuerpo-nanopartícula usando dos extremos de la Y. En el tercero, por medio de reconocimiento molecular antígeno-anticuerpo, ataron un punto cuántico de CdSe que hace el papel de compuerta para crear el primer fototransistor de proteína que puede ser manipulado con luz. El uso de nanopartículas puede ser útil para esquemas de lectura como biosensores o lectura de protocolos para información almacenada en moléculas magnéticas.

Al intentar combinar sistemas biológicos con sistemas físicos uno de los principales problemas es que las fuerzas que se miden en biología son de partes de pico Newton, esto es más de 12 órdenes de magnitud por debajo de las fuerzas que se miden en sistemas macro. Gracias a la tecnología actual se logra medir estas mínimas fuerzas y con ellas probar el alcance de las leyes físicas conocidas y su posible aplicación en escala nanométrica.

### **La Segunda Ley**

En tecnología es importante controlar dispositivos y lograr la máxima eficiencia de estos últimos. Este objetivo tiene su fundamento en la segunda ley de la termodinámica. La segunda ley de la termodinámica se refiere a la entropía. Pero qué es la ENTROPIA? Es la parte de energía que recibe un sistema pero que no puede utilizar para producir trabajo. La entropía crece en el transcurso de un proceso que se dé de forma natural. La entropía puede interpretarse como una medida de la distribución aleatoria de un sistema de partículas. Es una medida del desorden. Entre más aleatorio un sistema, más alta su entropía. La entropía es máxima en equilibrio. En la última década del siglo XIX Maxwell y Boltzmann establecieron la relación entre la entropía y el logaritmo del número de microestados posibles. Este último es la medida de la aleatoriedad. Así, el proceso natural de difusión se desarrolla en el tiempo, de tal manera que la concentración de partículas se iguala en todo el recipiente que las contenga. Maxwell imaginó un gas encerrado en un recipiente dividido en dos compartimentos iguales A y B

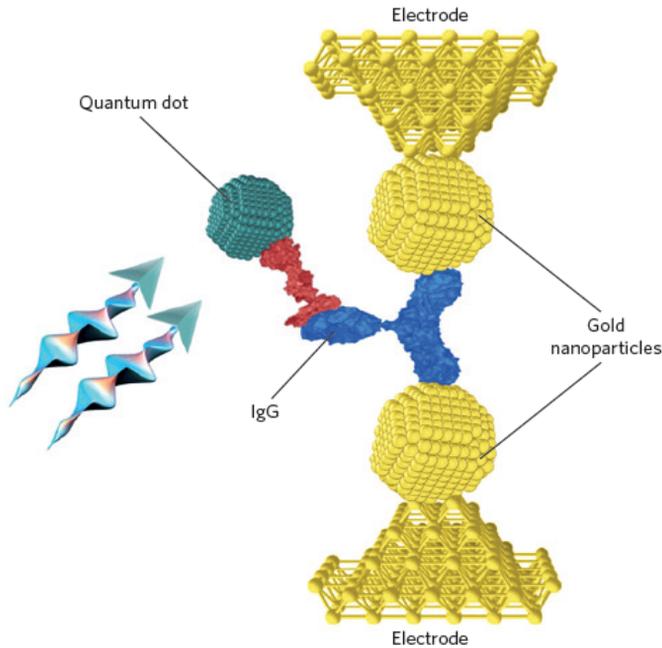


FIGURA 1. Bosquejo del transistor de proteínas tomado de Ref.[1]

separados por un diafragma y supuso que el gas A está más caliente que el gas B en equilibrio. Para explicar esto inventó un *ser* que, sin necesitar energía, se encargaba de abrir y cerrar una puerta en el diafragma de tal forma, que las partículas con mayor energía cinética siempre se mantuvieran en A y las de menor energía en B. Este *ser* se conoce como el *demonio de Maxwell*. El demonio de Maxwell viola claramente la segunda ley de la termodinámica porque predice equilibrio a diferentes temperaturas sin ningún mecanismo que le suministre energía. Siempre que exista una diferencia de temperaturas, fluye calor o energía de la parte más caliente a la más fría y por lo tanto el sistema NO está en equilibrio.

### La Matraca Browniana

La matraca Browniana es un experimento propuesto por Feynman que aparentemente viola la segunda ley. La pregunta es, Diseñó Feynman un demonio de Maxwell? Una formulación de la segunda ley que permite aclarar esta pregunta es la siguiente: *es imposible convertir fluctuaciones térmicas aleatorias en trabajo mecánico*. Sin embargo, Feynman dice: *Si un trinquete pudiera impedir a una rueda ir hacia atrás en medio de*

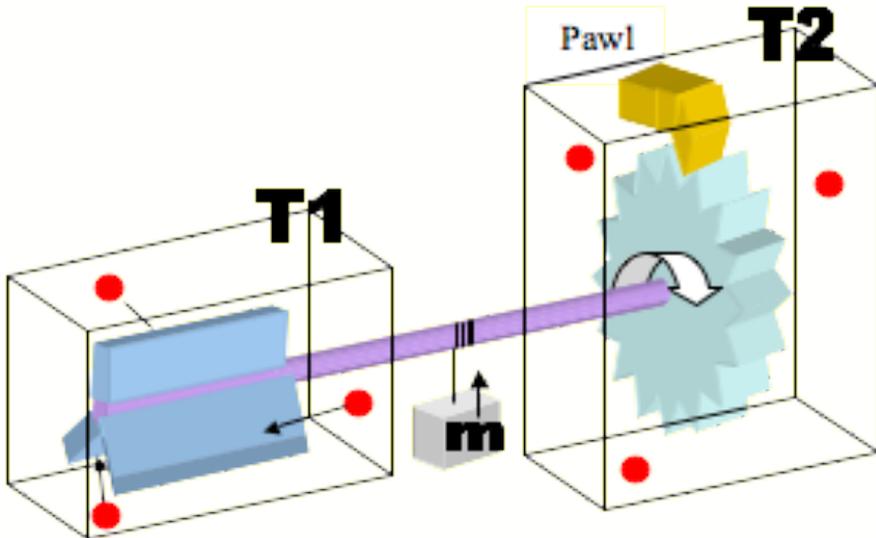


FIGURA 2. Modelo teórico de la matraca de Feynman tomado de la ref. [2]

*colisiones moleculares, estas causarían una rotación irregular pero inexorable de la rueda.* Se tendría una máquina de movimiento perpetuo y esto desafía la segunda ley y no viola la primera ley porque no promete proveer energía de la nada.

Esta máquina fue ideada por Richard Feynman el 11 de mayo de 1962 y consiste de una paleta inmersa en un gas a temperatura  $T_1$  unida por un eje a una matraca compuesta de un engranaje asimétrico y un gatillo inmerso en otro gas a temperatura  $T_2$ , cuyo único fin es levantar una masa,  $m$ , en contra de la gravedad. El dispositivo solo puede girar en un sentido gracias a la acción del gatillo y el engranaje asimétrico. Si se asume que no existe rozamiento, las moléculas del gas a  $T_1$  golpean en un choque plástico en el sentido de giro permitido, en cambio el choque es el elástico en el sentido prohibido de giro.

Así la energía cinética media del gas disminuye bajando gradualmente su temperatura y elevando la masa en contra de la gravedad. En este caso no se violaría la segunda ley porque el sistema colocado en un gas a diferentes temperaturas está diseñado con una asimetría, tal que las colisiones aleatorias con la hélice asimétrica (a  $T$  mayor) sean plásticas de un lado y elásticas del otro, perdiendo energía y bajando su temperatura. Mientras tanto, en la parte sometida a  $T$  más baja el movimiento de eje hace que el piñón, también asimétrico, pueda desengancharse del resorte por movimientos únicamente aleatorias de las moléculas del gas y permitir el

movimiento en la dirección prediseñada con dientes más cortos, de tal manera que cuando el resorte vuelva a su posición impulsado por el movimiento aleatorio, la rueda se frene pero en una posición adelantada. Estas ideas dieron origen a los motores Brownianos como posible explicación a algunos movimientos en sistemas biológicos. Feynman mostró que el aparato no puede funcionar sin una fuente de energía externa. El gatillo tiene que estar atado a la matraca por un resorte que es vulnerable al ruido térmico. Ocasionalmente el ruido hace que se contraiga el resorte levantando el gatillo y desenganchando el mecanismo. Debido a la asimetría de los dientes del piñón, la matraca más probablemente se desliza hasta la muesca. Si el piñón y el gatillo están a la misma temperatura, la tendencia a moverse hacia adelante, debido a colisiones moleculares y la tendencia a moverse hacia atrás debido al poco fiable resorte, se cancelan exactamente. Así pues, una matraca en equilibrio térmico, no rota. Cualquier cosa que cree desequilibrio da energía al sistema.

Las células son capaces de producir orden a partir del desorden, ellas crecen, bombean iones, construyen proteínas y se mueven de aquí para allá. El mecanismo de la matraca propuesto por Feynman muestra cómo un bombardeo aleatorio puede convertirse en un movimiento no aleatorio, la idea básica es dar buen uso al azar, rectificar el ruido, filtrar la aleatoriedad. La energía se usa para terminar el movimiento, no para crear movimiento.

### **Ejemplos de Matracas**

Una matraca cuántica puede controlar de manera precisa electrones individuales. En la universidad de Chicago se sugirió como prototipo de matraca un sistema cuántico de tres estados: positivo, negativo y apagado, de tal manera que al cambiar entre estos estados, un tamiz Browniano podría hacer mover continuamente las partículas pesadas en una dirección y las ligeras en la dirección contraria y así lograr una separación y un ordenamiento. Este dispositivo podría usarse para separar masas, cargas o tamaños (ver [2] para más detalles).

Otros dispositivos tipo matraca que difieren en detalle pero que funcionan básicamente del mismo modo son: un punto cuántico y una molécula de proteína. Un punto cuántico triangular del tamaño de micras grabado en una oblea de Silicio es un diodo que convierte corriente alterna en corriente continua. Un canal de iones o una molécula de proteína en forma de embudo, es una versión biológica del diodo pero con un tamaño de una centésima del tamaño del punto cuántico. El perfil de potencial de dientes de sierra asimétricos es el mismo en ambos dispositivos.

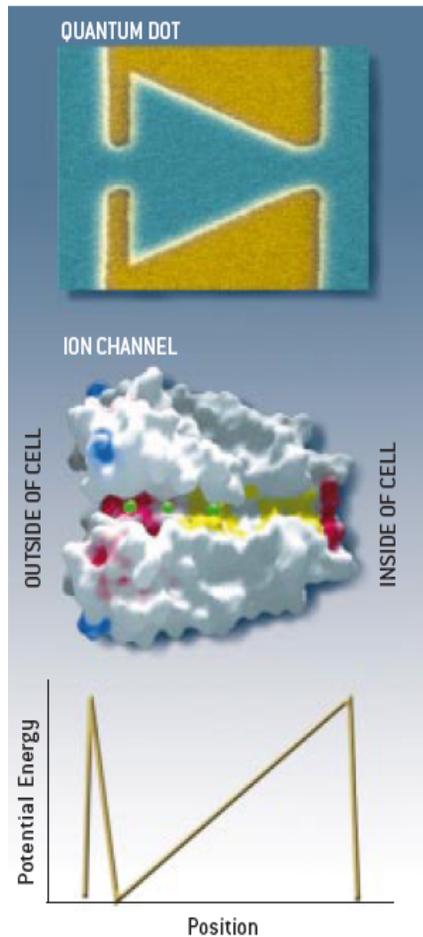


FIGURA 3. Punto cuántico y canal de iones funcionan con el mismo potencial aleatorio.  
Tomado de ref.[1]

Los puntos cuánticos triangulares actúan como matraca por la dificultad que tienen los electrones de deslizarse a través del vértice. Cuando un voltaje oscilante modula este dispositivo, fluye una corriente neta aunque la corriente promedio sea cero. Al variar la temperatura se regula la dirección de la corriente. A altas temperaturas el dispositivo funciona como una matraca clásica: los electrones tienden a fluir hacia afuera del vértice y les es muy difícil hacerlo en dirección contraria. A bajas temperaturas la matraca se torna cuántica y los electrones fluyen hacia afuera porque el ancho de la barrera es menor en esa dirección y favorece el tunelamiento. En el caso de la proteína el canal de iones es un rectificador biológico que permite flujo

de corriente en una sola dirección. Un canal típico es una proteína en forma de embudo de unos 10 nm de largo. Los iones pueden ir desde la boca hasta la punta pero no a la inversa. Los iones fluyen normalmente de un potencial electroquímico más alto a uno más bajo pero estas bombas pueden empujar electrones en la dirección opuesta manteniendo los gradientes de potenciales electroquímicos esenciales para la vida.

Se proponen pues, pequeñas máquinas que imiten lo que hacen los motores de proteínas y las bombas de iones en las células vivas: CONVERTIR ENERGIA QUIMICA EN TRABAJO MECANICO con casi 100% de eficiencia para realizar tareas tales como montaje molecular, bajo consumo energético de cálculo y control de calidad de semiconductores.

La kinesina es otro nano-motor que consiste de una carretilla molecular elevadora que transporta las proteínas dentro de la célula. Consta de dos fibras trenzadas de unos 10 nm de largo débilmente ligadas y acabadas en dos cabezas, las cuales caminan sobre los microtúbulos dentro de la célula. El potencial eléctrico entre la kinesina y el microtúbulo es de forma de dientes de sierra con barreras de energía que previenen el movimiento de la kinesina de una molécula a la siguiente. El movimiento es aleatorio y puede moverse hacia adelante o hacia atrás consumiendo un ATP por paso. El movimiento browniano juega un papel en los motores biomoleculares de nuestros músculos para: ensamblar proteínas, sintetizar ATP, comprimir y descomprimir ADN, transportar a través de membranas celulares y destruir proteínas cuando ellas ya no son necesarias.

Una teoría muy usada dice que los músculos se contraen, cuando una molécula de miosina se une a un ATP, la energía y las ganancias cambian de forma. En el proceso se empuja un filamento de actina en un solo paso, como subiendo una escalera. Este modelo es muy popular porque postula la contracción muscular como el funcionamiento de motores de corriente, fácil de entender ya que es un proceso determinista. Sin embargo, el motor de corriente ordinario es menos eficiente cuando se encoge y no más eficiente, como debería ser. Para resolver esta contradicción se han desarrollado nuevas tecnologías que pretenden manipular moléculas e identificar pequeños movimientos y fuerzas: marcación fluorescente, iluminación esencial de corto alcance de iluminación, campo evanescente, trampas láser y sondas de exploración. (ver [3] para más detalles)

## **Conclusiones**

Estas ideas nos devuelven un siglo. El movimiento browniano ayudó a demostrar la existencia de átomos, también explicó cómo los ritmos de una

reacción química balancean el ruido térmico mantienen las molécula juntas a pesar de la repulsión eléctrica que las aparta. Los conceptos filtrados en la Biología como una posible explicación del transporte biológico impulsado por reacciones químicas de no equilibrio son la guía para el desarrollo e inspiran el diseño de motores moleculares sintetizados químicamente, coladeras sofisticadas y rectificadores cuánticos.

Uno de los éxitos inesperados de la teoría de la matraca browniana es la nueva explicación de la contracción muscular. Los investigadores biomédicos han sabido por mucho tiempo que la flexión de un músculo hace que dos tipos de filamentos hechos de proteínas llamadas miosina y actina, se deslicen a lo largo unos de otros. Las moléculas convierten energía química (ATP) en energía cinética con una eficiencia del 50%. El movimiento de la miosina es crucial y puede ser hacia adelante o hacia atrás. Este proceso funciona, incluso, si la energía química es solo un poco más alta que el ruido representado por el calor ambiental. Como es de esperar el bombardeo molecular aleatorio juega el papel importante de suministrar energía. Por el contrario las máquinas artificiales como los motores eléctricos y mecánicos funcionan con energías mucho más altas que el ruido térmico y en estas el ruido y el movimiento aleatorio son fuente de pérdidas de energía.

## Referencias

- [1] Y.-S., M.-Y. Hong, and G. Huang. A protein transistor made of an antibody molecule and two gold nanoparticles. *Nature Nanotechnology* 7, 197, (2012)
- [2] Astumian, R. D. Making molecules into motors. *Scientific American* July, 57, (2001)
- [3] Gross, P., N. Laurens, U. Oddershede, E. J. Peterman, and G. J. Wuite (2011). Quantifying how DNA stretches, melts and changes twist under tension. *Nature Physics* 7, 731,(2011)