

Paul Thomas y Kevin Raxworthy. *Nanoesencia*, 2009. Captura de vídeo, dimensiones variables.

DE LOS NANÓMETROS A LOS TERAVATIOS

APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA NANOCIENCIA

Pedro Gómez Romero

From Nanometers to Terawatts: Energy Applications of Nanoscience.

Energy production is rapidly becoming an area urgently needing the help of Nanosciences. The transition from the obsolete model based on fossil fuels to a sustainable one will need the input from science in each of the areas of this multifaceted challenge, from energy production, to storage and consumption. This article gives a brief overview of the many pending scientific revolutions that will make sustainable technologies possible, not only more efficient and environmentally-friendly than the old ones, but also cheaper. Fundamental science, new discoveries, processes and materials will also be required. Many pending scientific revolutions will make this urgent new re-evolution in technological energy possible.

«*Be a Scientist! Save the World!*» (Smalley, 2004). Con esa cándida frase, que solo un científico con el premio Nobel en su currículum podría permitirse ante un público de expertos, acababa la conferencia de Richard Smalley. La sala estaba todavía en penumbra, a punto de estallar en aplausos, y en la pantalla su frase de película de Hollywood con una hermosa imagen de la Tierra de fondo. Era la conferencia plenaria de la enésima reunión de la Materials Research Society en Boston, en 2004. Por entonces ni la nanotecnología ni la energía acaparaban tantos titulares. Pero tan cierto como era entonces que había llegado el momento de actuar para asegurarnos la energía del futuro lo sigue siendo ahora.

La energía lo impregna todo en nuestra sociedad. De la misma forma que una célula mantiene su orden y funciones internas (¡su vida!) gracias al uso de energía (energía somática o metabólica) nuestra sociedad mantiene sus estructuras y orden gracias al consumo de una «energía social» (energía exosomática) que se emplea no solo en funciones como el transporte sino en toda actividad social, desde la manufactura a los servicios (Gómez, 2007).

La figura 1 muestra la evolución del gasto de energía social a medida que una sociedad se vuelve más compleja. El gasto de energía somática de un humano es de unas 2.000 kcal por persona y día, el contenido energético de una dieta promedio. Ése es el valor que la gráfica asigna al consumo de energía de una

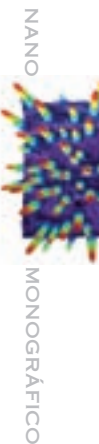
sociedad primitiva, sin funciones sociales. A medida que la sociedad se hace más y más compleja, el gasto de energía exosomática se multiplica (Miller, 2000).

Pero entre los aumentos de la figura 1 se aprecian dos saltos cualitativos muy significativos. El primero tuvo lugar con la Revolución Industrial. Cuando un tal James Watt mejoró una máquina de vapor de un tal Newcomen arrancó una espiral de desarrollo que culminó en el siglo XIX con el polinomio vapor, carbón, ferrocarril e Inglaterra. El segundo salto, ya en el siglo XX supuso un nuevo orden de magnitud de consumo y consumismo materializado por el polinomio combustión, petróleo, automóviles y Estados Unidos.

El 85% del consumo energético global procede de combustibles fósiles (Gómez, 2007). Era la cifra vigente cuando cambiamos de siglo, aquel lejano año del efecto 2000 ¿recuerdas? La velocidad de nuestros ordenadores se ha más que duplicado desde entonces, pero nuestra dependencia de los combustibles fósiles sigue esencialmente siendo la misma.

El primero de los fósiles combustibles que nos va a dar dolores de cabeza es el petróleo. Y no porque se vaya a agotar, que ya nos dicen los más demagogos de los expertos que no, y que seguiremos quemando petróleo muchos años. Verdades irrelevantes que esconden lo verdaderamente preocupante: que podamos llegar al punto de producción máxima de petróleo sin tener a punto alternativas capaces

**«NUESTRA SOCIEDAD
MANTIENE SUS
ESTRUCTURAS Y ORDEN
GRACIAS AL CONSUMO
DE UNA “ENERGÍA SOCIAL”
QUE SE EMPLEA EN TODA
ACTIVIDAD SOCIAL,
DESDE LA MANUFACTURA
A LOS SERVICIOS»**



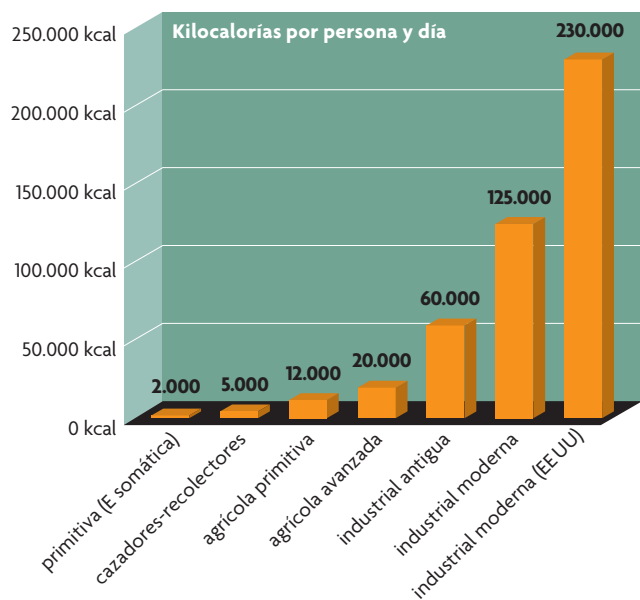


Figura 1. Gasto de energía exosomática en función del tipo de sociedad. (Datos extraídos de Miller y Tyler, 2000).

de asimilar la titánica magnitud de energía que necesitamos para mantener viva nuestra sociedad del Primer Mundo y tres cuartos.

El punto de producción máxima, o cenit del petróleo (*peak oil* en inglés), no es cuestión de opinión. Se alcanza antes o después, en forma de pico o de meseta, en un año o a lo largo de un lustro, pero la producción de recursos limitados, no renovables, no se puede mantener permanentemente creciente. Y decrecerá (figura 2). Ya lo dijo Hubbert.

Si se dan tres condiciones coincidentes, a saber, la producción de petróleo toca techo o se estanca (y eso lo veremos todos nosotros); la demanda de energía en general y de petróleo en particular sigue aumentando (y todo chino apunta en esa dirección); y hemos sido lo suficientemente estúpidos como para no desarrollar alternativas a tiempo, entonces, se podría dar una crisis de dimensiones desconocidas hasta ahora. La palabra *crisis* adquiriría un nuevo significado.

La ciencia tiene mucho que decir (y hacer) en este tema. Los ingenieros pueden construir y optimizar plantas de cogeneración más eficientes, pueden seguir defendiendo la energía nuclear, para sustituir los contaminantes de hoy por los de mañana, o mejor, pueden no parar de construir centrales de generación de electricidad termos-

lar. Pero lo cierto es que todas y cada una de las alternativas que existen hoy, lo que los posibilistas llaman «fuentes demostradas» de energía, son insuficientes y necesitan mejoras radicales para poder responder a nuestra pantagruélica sed de energía (Gómez, 2010). Y eso es así aun cuando limitemos nuestro absurdo derroche y aprendamos un modelo sostenible.

¿Qué puede hacer la ciencia por nuestra energía? Muchas cosas. La figura 3 resume de forma gráfica algunas de las revoluciones científicas pendientes para poder llevar a cabo la necesaria re-evolución tecnológica. En todos los ángulos de la energía, generación, almacenamiento y consumo, nuestra sociedad está esperando (aunque no lo sabe) esos descubrimientos o invenciones que hagan de las nuevas tecnologías no sólo alternativas más eficientes o más sostenibles sino incluso más baratas.

Vamos a darle una rápida vuelta a la figura 3 para mencionar algunas de estas revoluciones científicas pendientes y cómo las está abordando la nanociencia. Uniremos los puntos, del 1 al 19 a ver qué nos sale. Empecemos por las energías renovables. Todas ellas representarán sin duda un papel importante en un nuevo modelo de variedad tecnológica. Pero tecnologías como la eólica presentan un alto grado de madurez y admiten poca mejora derivada de descubrimientos científicos fundamentales. En cambio otras como la solar llegarán a su madurez solo cuando se beneficien de nueva ciencia, nuevos materiales, nuevos dispositivos o nuevos procesos.

Empecemos nuestra vuelta a la figura 3 por el silicio, como rey actual de la energía solar fotovoltaica. Los detractores de esta última esgrimen a menudo su baja eficiencia para desacreditarla. Pero ese no es el problema principal de la fotovoltaica. Hasta Bart Simpson lo sabe, cuando dice aquello de «multiplícame por cero», porque incluso el 10% de gratis es gratis, y tecnologías como la solar que usan una fuente primaria gratuita deberían tener mejor consideración. Aparte de la eficiencia, que siempre convendría mejorar, el problema principal de la fotovoltaica es el precio; derivado en gran medida del

alto coste del silicio. He aquí la primera revolución científica pendiente: el desarrollo de nuevos procesos de purificación que reduzcan drásticamente el coste del silicio solar (Si del 99,999% de pureza), incluso el policristalino.

Alternativamente, el problema se solucionaría con nuevos materiales más baratos con prestaciones iguales o mejores que el Si. Y en ello se trabaja en laboratorios de todo el mundo, perfeccionando las

«EL PRIMERO DE LOS FÓSILES COMBUSTIBLES QUE NOS VA A DAR DOLORES DE CABEZA ES EL PETRÓLEO. PODEMOS LLEGAR AL PUNTO DE PRODUCCIÓN MÁXIMA DE PETRÓLEO SIN TENER A PUNTO ALTERNATIVAS»

celdas solares con pigmentos (*dye-sensitized solar cells*) como las que Grätzel propuso en 1991 o inventando nuevas combinaciones como las celdas solares orgánicas o híbridas. También están los semiconductores compuestos y las celdas de concentración, que concentran la luz solar sobre una pequeña superficie de semiconductores caros pero eficientes. Recientemente se ha publicado un nuevo mecanismo de concentración a través de guías de vidrio dopadas con pigmentos que absorben la luz y la reemiten a longitudes de onda más largas haciéndolas llegar a los bordes donde esperan pequeñas celdas basadas en semiconductores compuestos como el GaAs. Otros compuestos prometedores son el CdSe (este con problemas de toxicidad del Cd), el CIGS (*copper indium gallium selenide*), que promete alta eficiencia con una centésima parte de material semiconductor en comparación con las celdas convencionales de silicio, o la serie $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, que, dependiendo de su composición, abarca prácticamente todo el espectro solar.

Pero además de la solar fotovoltaica está la más desconocida solar fotoelectroquímica, que en lugar de electricidad puede producir combustibles a partir del sol,

«TODAS Y CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS AL PETRÓLEO, LO QUE LOS POSIBILISTAS LLAMAN “FUENTES DEMOSTRADAS” DE ENERGÍA, SON INSUFICIENTES Y NECESITAN MEJORAS RADICALES PARA PODER RESPONDER A NUESTRA PANTAGRUÉLICA SED DE ENERGÍA»

por ejemplo hidrógeno, o mejor, hidrógeno en un electrodo y oxígeno en el otro. Encontrar un fotocatalizador efectivo, con una cinética rápida, está en el punto de mira de muchos investigadores, que a menudo se fijan en el dióxido de titanio TiO_2 nanométrico. Si fuésemos más y más creativos podríamos probar otros materiales e incluso diseñar nuevos métodos de escrutinio de la actividad fotocatalítica de muchas más combinaciones de la tabla periódica.

Recientemente se ha diseñado un sistema de óxido de cobalto (Co_3O_4)

nanométrico disperso en una matriz mesoporosa que, activado por la luz, es capaz de convertir eficientemente el agua en oxígeno. Eso ya es la mitad de la reacción de fotosíntesis. Combinada con un catalizador que activase y redujese el CO_2 ayudado por luz solar, tendríamos un proceso de fotosíntesis artificial completo. Sin embargo, la reducción del CO_2 sigue siendo una de las revoluciones científicas más atrasadas.

La energía termoeléctrica suele ser la gran olvidada de las renovables. Probablemente por su «nanoeficiencia», que la limita a aplicaciones especializadas, como termopares. Pero bombear calor con electricidad o



Figura 2. Diagrama esquemático de la evolución histórica y prevista de la producción de petróleo global. Esta gráfica de «servilleta de bar» es tan buena como cualquier otra, en ausencia de estimaciones fiables de las reservas globales de petróleo. ¿Alguien sabe cuánto queda bajo los desiertos de Arabia Saudí?

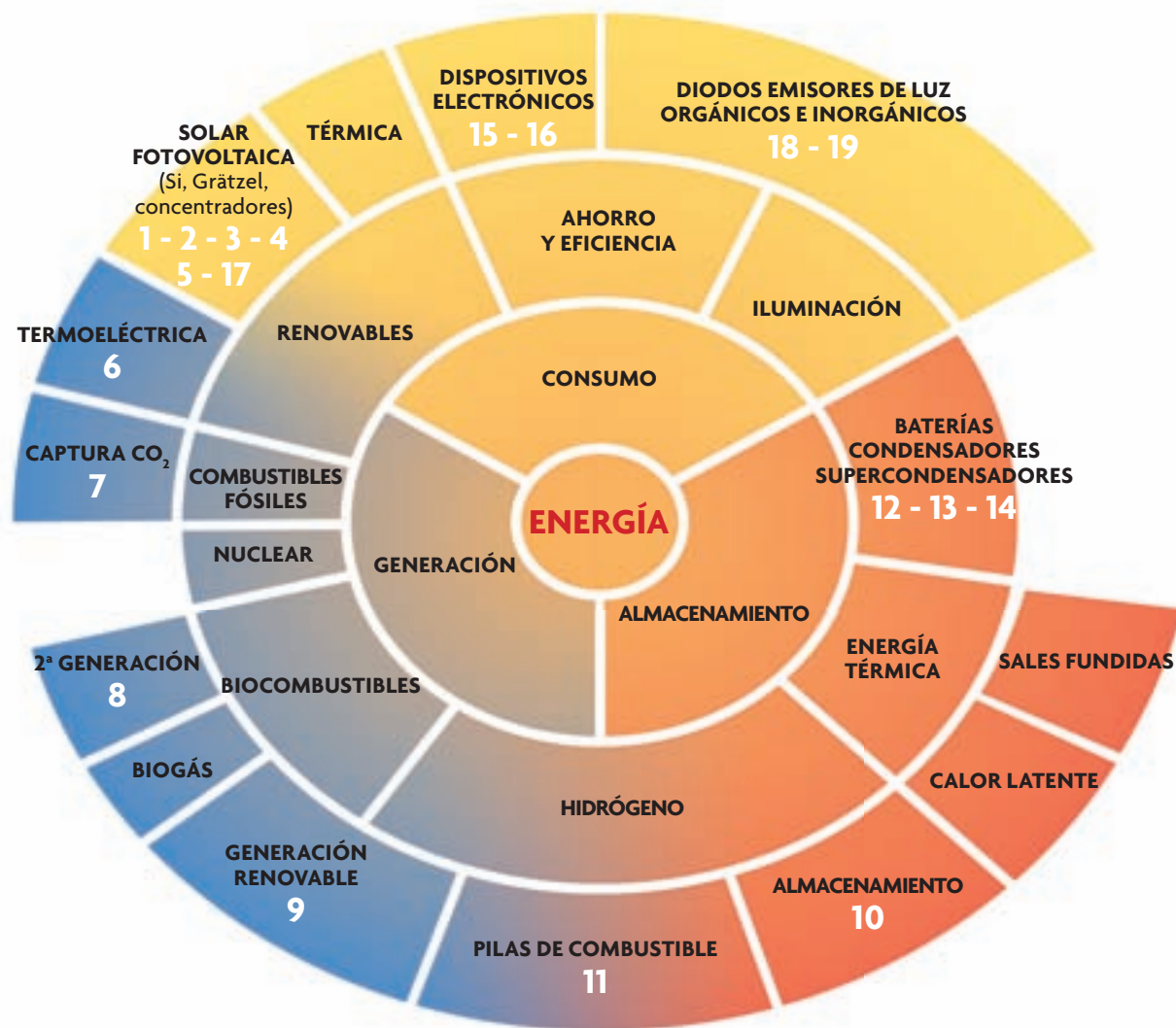


Figura 3. La vuelta al mundo de la nanotecnología al servicio de la energía. Este esquema resume las principales aplicaciones de la nanotecnología en el campo de la energía, tanto en la generación de esta como en el consumo y almacenamiento. Los números hacen referencia a materiales con aplicaciones energéticas que se explican en el artículo. 1) Silicio. 2) Células solares orgánicas o híbridas. 3) Guías de vidrio dopadas con pigmentos. 4) GaAs. 5) Dióxido de titanio (TiO₂) nanométrico. 6) Materiales semiconductores de tipo clatrato. 7) Sistema de captura de dióxido de carbono. 8) Nanopartículas mesoporosas. 9) Ensamblaje entre un nanotubo de C y la enzima hidrogenasa. 10) Estructuras metalo-orgánicas nanoporosas. 11) Hierro anclado en matrices de carbono dopadas con nitrógeno. 12) Carbonos nanoporosos nanoestructurados. 13) Óxidos nanodispersos. 14) Dispersion de clústeres nanométricos inorgánicos en polímeros conductores. 15) WO₃. 16) Clústeres de polioxometalatos. 17) Nitruro de indio y galio (InGaN). 18) Alq₃. 19) CdSe.

conseguir convertir de forma eficiente energía de baja calidad como la térmica en energía eléctrica es un reto tan atractivo que debería ser intelectualmente rentable. Aumentar la baja eficiencia de estos dispositivos es el objetivo. Para ello se han propuesto recientemente materiales semiconductores de tipo clatrato con cavidades nanogigantes en su estructura, ocupados por átomos cuya agitación permite mantener una baja conductividad térmica manteniendo alta la conductividad eléctrica, requisito necesario para que algún día estos dispositivos nos permitan refrigeradores y aires acondicionados de estado sólido y alta eficiencia.

La nanociencia tiene aportaciones que hacer incluso en áreas como el uso de combustibles fósiles. Y es que, aunque la captura y confinamiento de CO₂ sea lo más parecido a barrer el polvo debajo de la alfombra, se trata de un tema de gran importancia, dado que no vamos a dejar de quemar carbón ni petróleo pasado mañana. De momento ya hay algunos sistemas novedosos e interesantes, como unos materiales híbridos (orgánico-inorgánicos) capaces de expandirse y absorber gases en sus nanocavidades. Y según su diseño molecular, lo mismo sirven para absorber selectivamente CO₂ que H₂, que también es un tema candente.

Quemar biocombustibles (etanol con, o en lugar de, gasolina; biodiésel en lugar de diesel) parecía la solución hasta que nos dimos cuenta de que si hemos esquilma- do nuestros suelos para engordar al Primer Mundo no podríamos esquilmarlos de nuevo para malgastarlo en nuestros coches. La crisis de la tortita de maíz (Gómez, 2010) nos mostró en 2007 que los biocombustibles, tal y como se han planteado, suponen, como tantas otras tecnologías, más un problema de codicia que de ciencia. La solución pasa por el desarrollo de biocombustibles de segunda generación: producir por ejemplo bioetanol a partir de biomasa celulósica residual o biodiésel a partir de algas contaminantes. Las nanopartículas mesoporo- sas de la figura 3 se usan para recolectar el biodiésel producido por algas sin destruirlas. La producción de biocombustibles de segunda generación no interferiría en el cultivo de alimentos y cerraría un círculo de sostenibilidad. Pero aún queda mucho por hacer y la fama y la fortuna esperan a quien dé con alguna de las muchas soluciones posibles.

A más largo plazo que los bio- combustibles, el hidrógeno se postu- la como el vector energético y combustible del futuro. Y lamentablemente lo seguirá siendo hasta que no se resuelvan al menos tres retos clave. El primero es generar- lo a partir de fuentes renovables (el sol sería genial). En la figura 3 se hace referencia a un ensamblaje entre un nanotubo de C y la enzima hidrogenasa que simboliza una vía bioinspirada para este fin. Otro de los retos hace referencia al almacenamiento seguro y fá- cilmente reversible del hidrógeno, para lo que se propuso el uso de nanotubos de carbono y se ensayan desde 2003 estructuras metalo-orgánicas nanoporosas (*metal orga- nic frameworks*, MOF). Por último, nos encontramos con el abaratamiento de las pilas de combustible encargadas de convertir el hidrógeno en electricidad. Son eficientes pero caras. Sustituir el carísimo platino por otros cata- lizadores en las pilas poliméricas (*polymer electrolyte membrane*, PEM) sería un buen principio. Un trabajo muy reciente reclama haberlo conseguido con el humil- de hierro, adecuadamente anclado en matrices de carbo- no dopadas con nitrógeno.

La punta de lanza del almacenamiento de energía son desde hace tiempo baterías y condensadores. La- mentablemente las baterías tienen una baja densidad de potencia, a pesar de su alta densidad de energía. Y los condensadores, una baja densidad de energía a pesar de su alta densidad de potencia. Los supercondensadores

**«LA NANOCIENCIA TIENE
APORTACIONES QUE HACER
INCLUSO EN ÁREAS COMO
EL USO DE COMBUSTIBLES
FÓSILES. YA HAY ALGUNOS
SISTEMAS NOVEDOSOS E
INTERESANTES»**

borran las fronteras entre ambos dispositivos y aspiran a permitir altas energías y potencias. Se ha trabajado en carbones nanoporosos o nanoestructurados óxidos nano- dispersos (típicamente el costoso RuO_2) pero seguimos pensando en nuevos conceptos, como la dispersión de clústeres nanométricos inorgánicos (polioxometalatos) en polímeros conductores.

Finalmente, en el rincón del consumo también que- dan revoluciones científicas pendientes. Los materia- les electrocrómicos o fotocrómicos podrían oscurecer nuestras ventanas a voluntad. El WO_3 fue el material por excelencia para esta aplicación, aunque los clústeres de polioxometalatos que representan el límite cuántico de óxidos como el WO_3 o el MoO_3 podrían cumplir la mis- ma función más rápidamente. Sin embargo, la gran revo- lución pendiente en consumo afecta a la iluminación. La bombilla de Edison, que seguimos usando, es una estufa que da luz (únicamente el 10% de la energía que gasta se convierte en luz). Las bombillas de bajo consumo son un primer paso para parar ese derroche. Pero nuestras casas se iluminarán pronto con diodos emisores de luz (LED) blancos.

Muchos investigadores andan buscando el material que reúna tres bes cruciales: blanco, brillan- te y barato. El nitruro de indio y galio InGaN (LED azul) promete porque, dependiendo de su compo- sición en la serie $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, abarca todo el espectro visible. Los LED orgánicos (OLED), de los que la molécula en forma de hélice Alq_3 suele ser un componente habitual, son más ligeros y flexibles. Recientemente se publicó un artículo que usaba un material fosforescente acoplado a un LED azul que producía luz blanca, pero empleaba SeCd , y el cadmio, como ya hemos dicho, es demasiado tóxico.

Quizá los científicos deberíamos añadir a nuestra búsqueda de nuevos LED, y a la de nuevos materiales en general, una cuarta be. La be de benignidad medio- ambiental. ☺

BIBLIOGRAFÍA
GÓMEZ ROMERO, P., 2007. *Un planeta en busca de energía*. Síntesis. Madrid.
GÓMEZ ROMERO, P., 2010. «La Re-(evolución) de la energía». In: *Los retos regu- latorios de la energía*. Comisión Nacional de la Energía. Thomson. Civitas.
MILLER, G. y JR. TYLER, 2000. *Living in the Environment*. Brooks/Cole. Bel- mont.
SMALLEY, R. E., 2004. «Nanotechnology for Energy Prosperity». *MRS Fall Meeting (Symposium X. Frontiers of Materials Research) Boston, 2 de di- ciembre de 2004*. Materials Research Society. Warrendale.

Pedro Gómez Romero. Investigador del Centre d'Investigació en Nanociència i Nanotecnologia, CIN2 (CSIC-ICN), Bellaterra (Barcelona).

