

Paul Thomas i Kevin Raxworthy. *Nanoessència*, 2009. Captura de vídeo, dimensions variables.

# DELS NANÒMETRES ALS TERAWATTS

## APLICACIONS ENERGÈTIQUES DE LA NANOCIÈNCIA

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). Amb aquesta frase tan càndida, que només un científic amb el premi Nobel en el seu currículum podria permetre's davant d'un públic d'experts, acabava la conferència de Richard Smalley. La sala era encara en penombra, a punt d'esclatar en aplaudiments, i a la pantalla, la seua frase de pel·lícula de Hollywood amb una bella imatge de la Terra de fons. Era la conferència plenària de l'enèsima reunió de la Materials Research Society a Boston, el 2004. Llavors ni la nanotecnologia ni l'energia aca-paraven tants titulars. Però tan cert com era llavors que havia arribat el moment d'actuar per a assegurar-nos l'energia del futur ho continua essent ara.

L'energia ho impregna tot en la nostra societat. De la mateixa manera que una cèl·lula manté el seu ordre i funcions internes (la seua vida!) gràcies a l'ús d'energia (energia somàtica o metabòlica) la nostra societat manté les seues estructures i ordre gràcies al consum d'una «energia social» (energia exosomàtica) que s'empra no sols en funcions com el transport sinó en tota activitat social, des de la manufactura als serveis (Gómez, 2007).

La figura 1 mostra l'evolució de la despesa d'energia social a mesura que una societat es torna més complexa. La despesa d'energia somàtica d'un humà és d'unes 2.000 kcal per persona i dia, el

contingut energètic d'una dieta mitjana. Aquest és el valor que la gràfica assigna al consum d'energia d'una societat primitiva, sense funcions socials. A mesura que la societat es fa més i més complexa, la despesa d'energia exosomàtica es multiplica (Miller, 2000).

Però entre els augments de la figura 1 s'aprecien dos salts qualitius molt significatius. El primer va tenir lloc amb la Revolució Industrial. Quan un cert James Watt va millorar una màquina de vapor d'un cert Newcomen va arrancar una espiral de desenvolupament que va culminar en el segle XIX amb el polinomi vapor, carbó, ferrocarril i Anglaterra. El segon salt, ja en el segle XX, va significar un nou ordre de magnitud de consum i consumisme materialitzat pel polinomi combustió, petroli, automòbils i Estats Units.

El 85% del consum energètic global procedeix de combustibles fòssils (Gómez, 2007). Era la xifra vigent quan vam canviar de segle, aquell llunyà any de l'efecte 2000, recordeu? La velocitat dels nostres ordinadors s'ha més que duplicat des de llavors, però la nostra dependència dels combustibles fòssils continua essent essencialment la mateixa.

El primer dels fòssils combustibles que ens donarà maldecaps és el petroli. I no perquè s'haja d'exhaurir, que ja ens diuen els més demagogs dels experts que

**«LA NOSTRA SOCIETAT  
MANTÉ LES SEUES  
ESTRUCTURES I ORDRE  
GRÀCIES AL CONSUM  
D'UNA «ENERGIA SOCIAL»  
QUE S'EMPRA EN TOTA  
ACTIVITAT SOCIAL, DES DE  
LA MANUFACTURA  
ALS SERVEIS»**



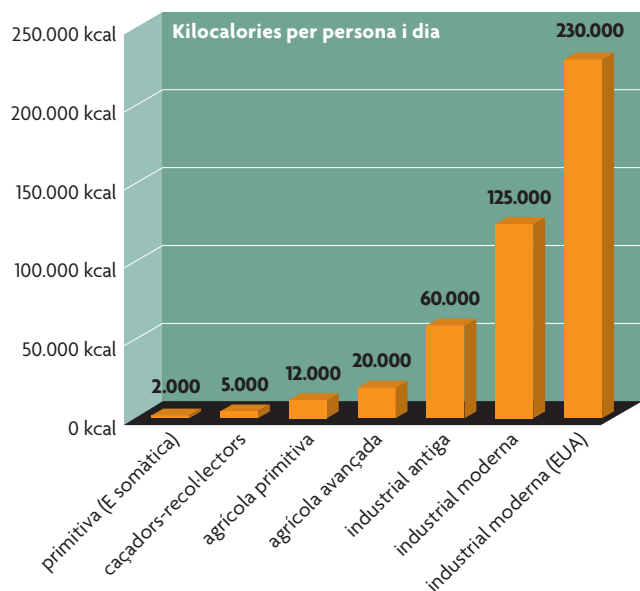


Figura 1. Despesa d'energia exosomàtica en funció del tipus de societat. (Dades extretes de Miller i Tyler, 2000.)

no, i que continuarem cremant petroli molts anys. Veritats irrellevants que amaguen la qüestió vertaderament preocupant: que podem arribar al punt de producció màxima de petroli sense tenir a punt alternatives capaces d'assimilar la titànica magnitud d'energia que necessitem per a mantenir viva la nostra societat del Primer Món i Tres Quarts.

El punt de producció màxima, o zenit del petroli (*peak oil* en anglès) no és qüestió d'opinió. S'assoleix tard o d'hora, en forma de pic o de replà, en un any o al llarg d'un lustre, però la producció de recursos limitats, no renovables, no es pot mantenir permanentment creixent. I decreixerà (figura 2). Ja ho va dir Hubbert.

Si es donen tres condicions coincidents, a saber, la producció de petroli toca sostre o s'estanca (i això ho veurem tots nosaltres); la demanda d'energia en general i de petroli en particular continua augmentant (i tot xinès apunta en aquesta direcció); i hem estat prou estúpids per no haver desenvolupat alternatives a temps, llavors, es podria donar una crisi de dimensions desconegudes fins ara. La paraula *crisi* adquiriria un nou significat.

La ciència té molt a dir (i fer) en aquest tema. Els enginyers poden construir i optimitzar plantes de cogeneració més eficients, poden continuar defensant l'energia nuclear, per substituir els contami-

nants d'avui pels de demà, o millor, poden no parar de construir centrals de generació d'electricitat termosolar. Però la veritat és que totes i cada una de les alternatives que hi ha avui, allò que els possibilistes anomenen «fonts demostrades» d'energia, són insuficients i necessiten millores radicals per a poder respondre a la nostra pantagruèlica set d'energia (Gómez, 2010). I això és així encara que limitem el nostre malbaratament absurd i aprenguem un model sostenible.

Què pot fer la ciència per la nostra energia? Moltes coses. La figura 3 resumeix de manera gràfica algunes de les revolucions científiques pendents per a poder dur a terme la necessària re-evolució tecnològica. En tots els angles de l'energia, generació, emmagatzemament i consum, la nostra societat està esperant (encara que no ho sap) aquests descobriments o invencions que facen de les noves tecnologies no sols alternatives més eficients o més sostenibles sinó fins i tot més barates.

Fem una ràpida volta a la figura 3 per mencionar algunes d'aquestes revolucions científiques pendents i com les aborda la nanociència. Unirem els punts, de l'1 al 19 a veure què ens en surt. Comencem per les energies renovables. Totes elles representaran sens dubte un paper important en un nou model de varietat tecnològica. Però tecnologies com l'èolica presenten un alt grau de maduresa i admeten poca millora derivada de descobriments científics fonamentals. En canvi d'altres com la solar arribaran a la maduresa només quan es beneficien de nova ciència, nous materials, nous dispositius o nous processos.

Comencem la nostra volta a la figura 3 pel silici, com a rei actual de l'energia solar fotovoltaica. Els detractors d'aquesta última esgrimeixen sovint la baixa eficiència que ofereix per tal de desacreditar-la. Però aquest no és el problema principal de la fotovoltaica. Fins i tot Bart Simpson ho sap, quan diu allò de «multiplica't per zero», perquè fins i tot el 10% de gratis és gratis, i tecnologies com la solar que usen una font primària gratuïta haurien de tenir millor consideració. A banda de l'eficiència, que sempre convindria millorar, el problema principal de la fotovoltaica és el preu; derivat en gran manera de l'alt cost del silici. Heus ací la primera revolució científica pendent: el desenvolupament de nous processos de purificació que redueixen dràsticament el cost del silici solar (Si del 99,999% de puresa), fins i tot el policristal·lí.

Alternativament, el problema se solucionaria amb nous materials més barats amb presta-

**«EL PRIMER DELS FÒSSILS  
COMBUSTIBLES QUE ENS  
DONARÀ MALDECAPS ÉS EL  
PETROLI. PODEM ARRIBAR  
AL PUNT DE PRODUCCIÓ  
MÀXIMA DE PETROLI  
SENSE TENIR A PUNT  
ALTERNATIVES»**

cions iguals o millors que el Si. I ja s'hi treballa en laboratoris de tot el món, perfeccionant les cel·les solars amb pigments (*dye-sensitized solar cells*) com les que Grätzel va proposar el 1991 o inventant noves combinacions com les cel·les solars orgàniques o híbrides. També hi ha els semiconductors compostos i les cel·les de concentració, que concentren la llum solar sobre una petita superfície de semiconductors cars però eficients. Recentment s'ha publicat un nou mecanisme de concentració mitjançant guies de vidre dopades amb pigments que absorbeixen la llum i la reemetten a longituds d'ona més llargues fent-les arribar a les vores, on esperen petites cel·les basades en semiconductors compostos com el GaAs. Altres compostos prometedors són el CdSe (aquest amb problemes de toxicitat del Cd), el CIGS (*copper indium gallium selenide*), que promet alta eficiència amb una centèsima part de material semiconductor en comparació amb les cel·les convencionals de silici, o la sèrie  $In_{1-x}Ga_xN$ , que, depenent de la seua composició, comprèn pràcticament tot l'espectre solar.

**«TOTES I CADA UNA DE LES ALTERNATIVES AL PETROLI, EL QUE ELS POSSIBILISTES ANOMENEN "FONTS DEMOSTRADES" D'ENERGIA, SÓN INSUFICIENTS I NECESSITEN MILLORES RADICALS PER A PODER RESPONDRE A LA NOSTRA PANTAGRUÈLICA SET D'ENERGIA»**

Però, a més de la solar fotovoltaica, hi ha la més desconeguda solar fotoelectroquímica, que en compte d'electricitat pot produir combustibles a partir del sol, per exemple hidrogen, o millor, hidrogen en un elèctrode i oxigen en l'altre. Trobar un fotocatalitzador efectiu, amb una cinètica ràpida, és en el punt de mira de molts investigadors, que sovint es fixen en el diòxid de titani ( $TiO_2$ ) nanomètric. Si fórem més i més creatius podríem provar altres materials i fins i tot dissenyar nous mètodes d'escrutini de l'activitat

fotocatalítica de moltes més combinacions de la taula periòdica.

Recentment s'ha dissenyat un sistema d'òxid de cobalt ( $Co_3O_4$ ) nanomètric dispers en una matriu mesoporosa que, activat per la llum, és capaç de convertir eficientment l'aigua en oxigen. Això ja és la meitat de la reacció de fotosíntesi. Combinada amb un catalitzador que activara i reduïra el  $CO_2$  ajudat per llum solar, tindríem un procés de fotosíntesi artificial complet. No obstant això, la reducció del  $CO_2$  continua essent una de les revolucions científiques més endarrerides.

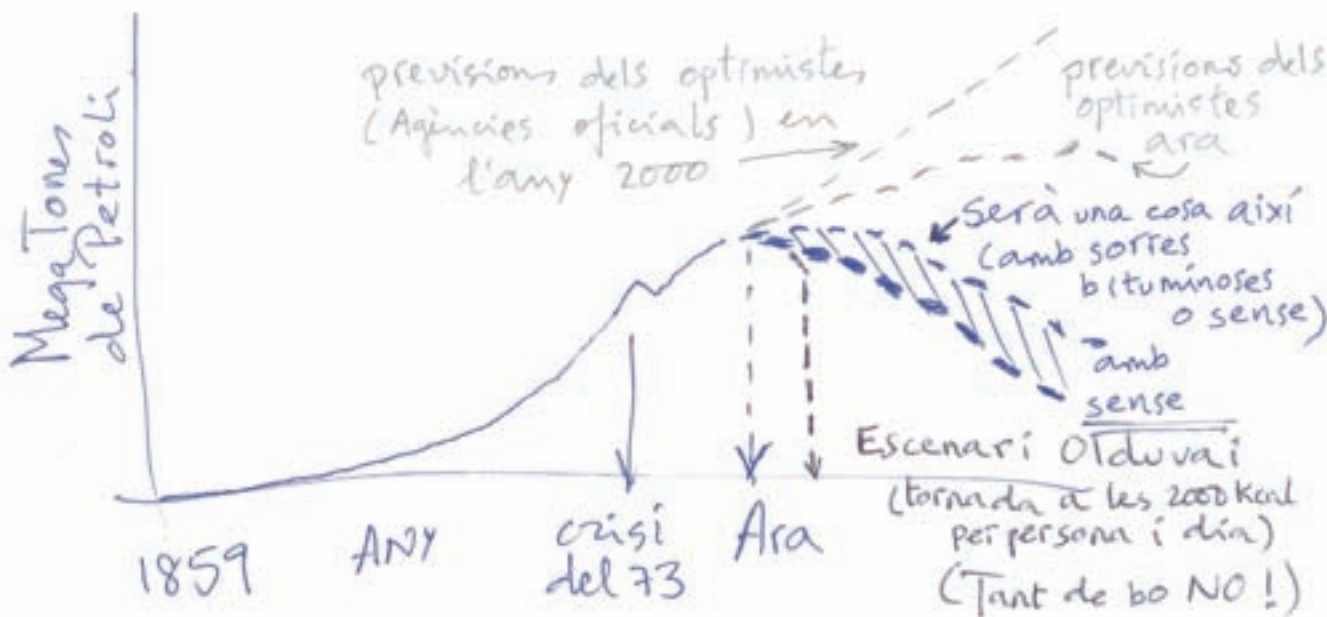


Figura 2. Diagrama esquemàtic de l'evolució històrica i prevista de la producció de petroli global. Aquesta gràfica de «tovall de bar» és tan bona com qualsevol altra, en absència d'estimacions fiables de les reserves globals de petroli. Algú sap quant en queda davall els deserts d'Àrabia Saudita?

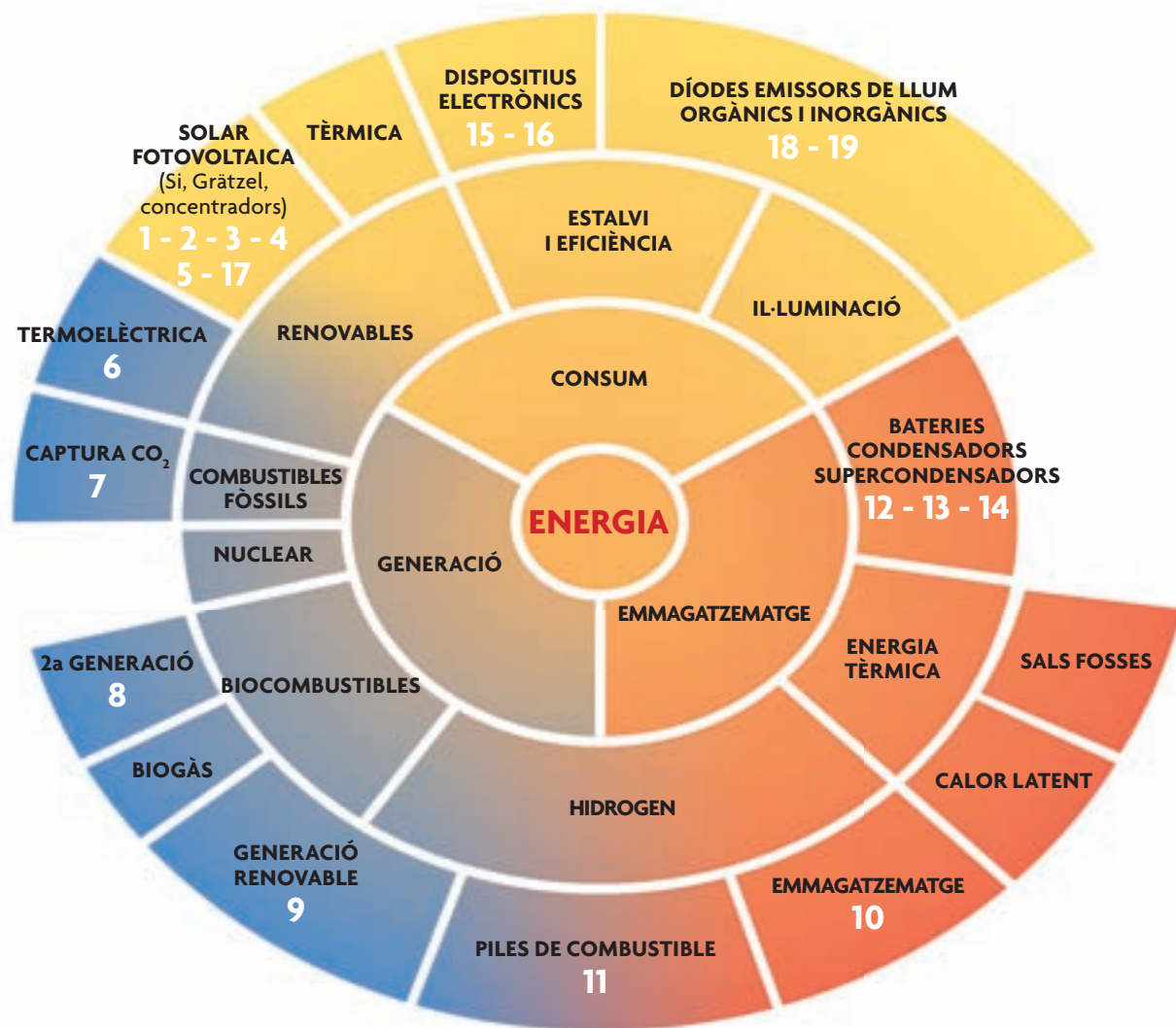


Figura 3. La volta al món de la nanotecnologia al servei de l'energia. Aquest esquema resumeix les principals aplicacions de la nanotecnologia en el camp de l'energia, tant en la generació d'aquesta com en el consum i l'emmagatzematge. Els nombres fan referència a materials amb aplicacions energètiques que s'expliquen en l'article. 1) Silici. 2) Cel·les solars orgàniques o híbrides. 3) Guies de vidres dopades amb pigments. 4) GaAs. 5) Diòxid de titani (TiO<sub>2</sub>) nanomètric. 6) Materials semiconductors de tipus clatrat. 7) Sistema de captura de diòxid de carboni. 8) Nanopartícules mesoporoses. 9) Acoblament entre un nanotub de C i l'enzim hidrogenasa. 10) Estructures metal·lo-orgàniques nanoporoses. 11) Ferro ancorat en matrius de carboni dopades amb nitrogen. 12) Carbons nanoporosos o nanoestructurats. 13) Òxids nanodispersos. 14) Dispersió de clústers nanomètrics inorgànics en polímers conductors. 15) WO<sub>3</sub>. 16) Clústers de polioxometàl·lats. 17) Nitru d'indi i gal·li (InGaN). 18) Alq<sub>3</sub>. 19) CdSe.

L'energia termoelèctrica sol ser la gran oblidada de les renovables. Probablement per la seua «nanoefficiència», que la limita a aplicacions especialitzades, com ara termoparells. Però bombar calor amb electricitat o aconseguir convertir de manera eficient energia de baixa qualitat com la tèrmica en energia elèctrica és un repte tan atractiu que hauria de ser intel·lectualment rendible. Augmentar la baixa eficiència d'aquests dispositius és l'objectiu. Per tal d'assolir-lo s'han proposat recentment materials semiconductors de tipus clatrat amb cavitats nanogegantines en la seua estructura, ocupats per àtoms l'agitació dels quals permet mante-

nir una baixa conductivitat tèrmica mantenint alta la conductivitat elèctrica, requisit necessari perquè algun dia aquests dispositius ens permeten refrigeradors i aires condicionats d'estat sòlid i alta eficiència.

La nanociència té aportacions a fer fins i tot en àrees com l'ús de combustibles fòssils. I és que, encara que la captura i confinament de CO<sub>2</sub> siga el més semblant a agranar la pols davall de l'estora, es tracta d'un tema de gran importància, atès que no deixarem de cremar carbó ni petroli despús-demà. De moment ja hi ha alguns sistemes nous i interessants, com uns materials híbrids (orgànico-inorgànics) capaços d'expandir-se i absorbir

gasos en les seues nanocavitats. I segons el seu disseny molecular, tant serveixen per a absorbir selectivament  $\text{CO}_2$  com  $\text{H}_2$ , que també és un tema candent.

Creumar biocombustibles (etanol amb, o en compte de, gasolina; biodièsel en compte de dièsel) semblava la solució fins que ens vam adonar que si hem sobreexplotat els nostres sòls per engreixar al Primer Món no podríem sobreexplotar-los novament per malbaratar-los en els nostres cotxes. La crisi de la coqueta de dacs (Gómez, 2010) ens va mostrar el 2007 que els biocombustibles, tal com s'han plantejat, representen, com tantes altres tecnologies, més un problema de cobdícia que de ciència. La solució passa pel desenvolupament de biocombustibles de segona generació: produir, per exemple, bioetanol a partir de biomassa cel·lulòsica residual o biodièsel a partir d'algues contaminants. Les nanopartícules mesoporoses s'usen per recol·lectar el biodièsel produït per algues sense destruir-les. La producció de biocombustibles de segona generació no interferiria amb el cultiu d'aliments i tancaria un cercle de sostenibilitat. Però encara falta molt a fer i la fama i la fortuna esperen a qui ensopague amb alguna de les moltes solucions possibles.

A més llarg termini que els biocombustibles, l'hidrogen es postula com el vector energètic i combustible del futur. I lamentablement ho continuarà sent fins que no es resolguen almenys tres reptes clau. El primer és generar-ne a partir de fonts renovables (el sol seria genial). En la figura 3 es fa referència a un acoblament entre un nanotub de C i l'enzim hidrogenasa, que simbolitza una via bioinspirada per a aquest fi. Un altre dels reptes fa referència a l'emmagatzemament segur i fàcilment reversible de l'hidrogen, per al qual es va proposar l'ús de nanotubs de carboni i s'assagen des de 2003 estructures metal·lo-orgàniques nanoporoses (*metall organic frameworks*, MOF). Finalment, ens trobem amb l'abaratiment de les piles de combustible encarregades de convertir l'hidrogen en electricitat. Són eficients però cares. Substituir el caríssim platí per altres catalitzadors en les piles polimèriques (*polymer electrolyte membrane*, PEM) seria un bon principi. Un treball molt recent reclama haver-ho aconseguit amb l'humil ferro, adequadament ancorat en matrius de carboni dopades amb nitrogen.

La punta de llança de l'emmagatzemament d'energia són des de fa temps bateries i condensadors. Lamentablement les bateries tenen una densitat de potència baixa tot i l'alta densitat d'energia que ofereixen. I els con-

densadors una baixa densitat d'energia a pesar de l'alta densitat de potència. Els supercondensadors esborren les fronteres entre ambdós dispositius i aspiren a permetre altes energies i potències. S'ha treballat en carbons nanoporosos o nanoestructurats, òxids nanodispersos (típicament el costós  $\text{RuO}_2$ ), però continuem pensant en nous conceptes, com la dispersió de clústers nanomètrics inorgànics (polioxometal·lats) en polímers conductors.

Finalment, al racó del consum també hi ha revolucions científiques pendents. Els materials electrocròmics, o fotocròmics podrien enfosquir les nostres finestres a voluntat. El  $\text{WO}_3$  va ser el material per excel·lència per a aquesta aplicació, encara que els clústers de polioxometal·lats que representen el límit quàntic d'òxids com el  $\text{WO}_3$  o el  $\text{MoO}_3$  podrien acomplir la mateixa funció més ràpidament. No obstant això, la gran revolució pendent en consum afecta la il·luminació. La bombeta d'Edison, que continuem usant, és una estufa que fa llum (només el 10% de l'energia que gasta es converteix en llum). Les bombetes de baix consum són un

primer pas per parar aquest malbaratament. Però les nostres cases s'il·luminaran aviat amb díodes emissors de llum (LED) blancs.

Molts investigadors caminen buscant el material que reunisca tres bes crucials: blanc, brillant i barat. El nitru d'indi i gal·li In-GaN (LED blau) hi promet perquè, depenent de la seua composició en la sèrie  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ , comprèn tot l'espectre visible. Els LED orgà-

nics (OLED), dels quals la molècula en forma d'hèlice Alq3 sol ser un component habitual, són més lleugers i flexibles. Recentment es va publicar un article que usava un material fosforescent adaptat a un LED blau que produïa llum blanca, però emprava SeCd, i el cadmi, com ja hem dit, és massa tòxic.

Potser els científics hauríem d'afegir a la nostra cerca de nous LED, i a la de nous materials en general, una quarta be. La be de benignitat mediambiental. ☺

#### BIBLIOGRAFIA

- GÓMEZ ROMERO, P., 2007. *Un planeta en busca de energia*. Síntesis. Madrid.  
GÓMEZ ROMERO, P., 2010. «La Re-(evolució) de la energia». In *Los retos regulatorios de la energia*. Comisión Nacional de la Energía. Thomson. Civitas.  
MILLER, G. i JR. TYLER, 2000. *Living in the Environment*. Brooks/Cole. Belmont.  
SMALLEY, R. E., 2004. «Nanotechnology for Energy Prosperity». *MRS Fall Meeting (Symposium X. Frontiers of Materials Research) Boston, 2 de desembre de 2004*. Materials Research Society. Warrendale.

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

«LA NANOCIÈNCIA TÉ  
APORTACIONS A FER FINS  
I TOT EN ÀREES COM L'ÚS  
DE COMBUSTIBLES FÒSSILS.  
JA HI HA ALGUNS SISTEMES  
NOUS I INTERESSANTS»

