

Energia nanotecnològica

Xavier Obradors

Institut de Ciència de Materials de Barcelona
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Xarxa de Referència de Materials Avançats per a l'Energia (XaRMAE) Generalitat de Catalunya

1. L'energia, el repte del segle XXI

Actualment podem afirmar que la moneda que mou el món és l'energia, la indústria més important del món, i amb un valor estratègic extraordinari degut a la seva rellevància social i econòmica en les societats avançades. Tant la consecució dels bens bàsics del nostre estat del benestar (aigua, aliments, habitatge, salut, etc.), com el transport o les comunicacions, es troben completament sotmesos a la nostra disponibilitat energètica. La revolució industrial iniciada al segle XVIII va ser en realitat una revolució energètica que va transformar completament la Humanitat, accelerant d'una forma inusitada la seva evolució, tant tecnològica com cultural i cognitiva [1,2].

Aquesta revolució es va fonamentar en la disponibilitat de combustibles fòssils, primer el carbó, després el petroli i finalment el gas natural, que han permès establir un balanç completament diferent entre el temps i l'esforç que requereix generar i consumir l'energia. Mentre que els combustibles fòssils van requerir centenars de milions d'anys per a ser generats, el seu consum per part de la població humana requerirà només alguns centenars d'anys.

De fet, mentre el consum energètic promig d'un home havia estat pràcticament inamovible durant la història, aquest s'ha multiplicat per un factor ~ 20 respecte a l'era pre-industrial, a la vegada que la Humanitat s'ha multiplicat per 5 des de llavors fins assolir els 6.000 Milions actuals, o sigui que el consum energètic total s'ha multiplicat per un factor 100 aproximadament. El percentatge de consum mundial de combustibles fòssils ha augmentat de forma contínua durant l'era industrial fins el 85 % actual. Ja podem imaginar doncs còm de difícil li serà a la Humanitat prescindir d'ells, cosa que algun dia passarà ineludiblement. Recordem, a més a més, que la distribució del consum energètic mundial és extraordinàriament desigual, doncs un 12 % de la població consumeix el 55 % del total. Com a conseqüència, el consum per càpita d'energia dels diferents països es correlaciona quasi perfectament amb la seva renda per càpita la qual cosa indica l'estret lligam entre el desenvolupament tecnològic i el creixement econòmic (Figura 1).

La tendència cap a un augment del consum per càpita es va esmorteir a la primera crisi del petroli, a la dècada dels 70 del segle XX, a partir de la qual alguns països varen aconseguir augmentar el seu creixement econòmic a un ritme superior que el seu consum energètic. La eficiència energètica, per tant, pot permetre el creixement econòmic sense augmentar el consum energètic.

Ja fa més de 30 anys que la publicació del llibre "Els límits del creixement" va endegar un debat mundial encara no tancat sobre la sostenibilitat del model econòmic preponderant, però el que realment ha convertit la transformació del model energètic actual en una de les majors prioritats de la nostra civilització ha estat l'acumulació d'evidències indiscutibles sobre l'origen antropogènic del canvi climàtic, iniciat en paral·lel a la nostra revolució industrial. La correlació entre la concentració atmosfèrica de CO₂ i l'augment de la temperatura mitjana de la Terra mostra que el delicat equilibri d'aquesta màquina tèrmica que és el clima terrestre es pot pertorbar molt fàcilment [2-6]. Les evidències científiques acumulades durant força anys es van convertir definitivament en un fenomen mediàtic el 2007 quan el IPCC (International Panel of Climate Change) va aconseguir el Premi Nobel de la Pau [6]. Actualment sembla haver-hi ja una coincidència pràcticament mundial de que el canvi climàtic és el major problema

mediambiental i socioeconòmic a que mai ens hem enfrontat i que existeix una gran urgència per a actuar [3,4].

Els estudis portats a terme pels científics agrupats al IPCC han permès establir diferents escenaris sobre l'evolució del clima pel segle XXI, depenent de la concentració de gasos generadors d'efecte hivernacle en l'atmosfera (sobretot CO₂, però també CH₄ i òxids de nitrogen) [6]. Tot sembla indicar que representaria una aventura temerària per a la Humanitat no establir la concentració de CO₂ a l'atmosfera per sota d'uns 450 ppm, la qual cosa implica que la generació de CO₂ de la Humanitat hauria d'haver disminuït cap a meitat del segle XXI a valors un 20 % inferiors a l'actual, tot i tenint en compte que és probable que la població mundial hagi passat a ser d'uns 10 mil milions d'habitants i el consum per càpita dels països amb economies emergents haurà augmentat molt considerablement. Podem estimar que ens caldrà generar un 50 % d'energia neta cap el 2050 per assolir aquests reptes, és a dir haurem de disposar d'uns 10 TW d'origen renovable [5]. Això correspon aproximadament a 1kW/persona que és el doble del que consumim per alimentar-nos. Donat el temps tant curt de que disposem (tenint en compte la magnitud del problema, tant del punt de vista tecnològic com social i econòmic), cal implementar una aproximació multidireccional i interdisciplinària fortament basada en la cooperació internacional.

El cistell energètic futur probablement serà molt divers, i conceptes com l'eficiència energètica i les energies renovables hauran de jugar un rol predominant en el complex entramat del cicle de l'energia (Figura 2). D'una forma genèrica les energies renovables tenen com a repte predominant augmentar la seva eficiència mantenint uns costos acceptables, però el seu potencial per augmentar és molt gran. Cal també tenir en compte que mentre que algunes tecnologies ja tenen un grau de maduració molt elevat (eòlica per exemple), d'altres tenen encara un gran camí per recórrer (solar fotovoltaic per exemple). Algunes fonts d'energia renovable probablement patiran una certa saturació a curt o mig termini (hidràulica, eòlica) mentre que d'altres presenten un potencial pràcticament inesgotable (solar). A mig termini també s'examinarà la viabilitat de disminuir l'impacte ambiental de les fonts fòssils segregant de forma massiva el CO₂ generat. Finalment, les fonts d'origen nuclear (fissió i fusió) no és probable que modifiquin el seu estat actual a mig termini. El problema de la seguretat en els residus radioactius de la fissió no sembla poder-se resoldre de forma convincent i per tant no és plausible un desenvolupament massiu d'aquesta font d'energia (caldrà obrir 1 nou reactor cada dia d'aquí fins el 2050 per arribar als 10 TW mencionats anteriorment). Finalment els avenços en el desenvolupament de la fusió ens fan pensar que no és probable que arribi la producció d'energia abans del 2050, moment en el que ja podrem començar a imaginar en l'eliminació total de l'ús dels combustibles fòssils.

El cost de la implementació de les noves tecnologies que es precisen per a establir el clima ha estat recentment avaluat, tot comparant-lo amb el cost de no fer res [7]. Sens cap mena de dubte, aquests càlculs són d'una gran complexitat i es fonamenten en molt diverses hipòtesis, no gensmenys, les seves conclusions es poden considerar com a força il·lustratives. L'informe Stern estima que el cost de no fer res s'eleva fàcilment a un 5-20 % del PIB mundial mentre que transformar el nostre model energètic per a establir el CO₂ a l'atmosfera en 450-500 ppm caldrà invertir al voltant de 1 % del PIB mundial. Evidentment aquests costos es basen en utilitzar les tecnologies actualment conegudes però la consecució de descobriments científics trencadors dels paradigmes existents podria modificar profundament aquest panorama. Com es mostrarà més endavant, la nanociència i la nanotecnologia són la millor font de coneixement per a fer possible un canvi de paradigma de model energètic, del model de combustibles fòssils a un nou model en el que el pes de les energies renovables tinguin un pes com a mínim del 50 % en el cistell de la generació energètica i l'eficiència energètica hagi transformat profundament totes les activitats desenvolupades per la Humanitat. No cal dir que la consecució d'aquests reptes científics i tecnològics comportaran a la vegada canvis extraordinaris en moltes indústries existents, generant noves oportunitats d'innovació en les quals el component de coneixement científic serà molt elevat.

Probablement però, el primer repte és convèncer tant els organismes públics com la iniciativa privada de que cal multiplicar la inversió en R+D en energia com a mínim per un factor 5-10. Als EEUU, per exemple, la inversió en R+D per a l'energia es troba encara molt per sota de la

que s'efectuava l'any 1980 i és unes 15 vegades inferior a la que es dedica, per exemple, a Biomedicina. En realitat els desenvolupaments que han tingut influència en les tecnologies energètiques no fòssils són totes elles d'origen col·lateral, o sigui que no varen aparèixer pensant en les necessitats energètiques. Per exemple l'energia nuclear de fissió és filla del projecte Manhattan que va crear la bomba atòmica, les cel·les fotovoltaïques es varen poder desenvolupar com a subproducte de la microelectrònica i les tecnologies de la informació basades en els xips de silici i els enormes generadors eòlics actuals es basen en pales fetes de materials compostos desenvolupats per la indústria aeronàutica. En definitiva no ha existit un "leit-motiv" per a descobriments trencadors en el camp de l'energia i en conseqüència no ha existit una prioritat inversora. Tot indica que les limitacions mediambientals del model energètic actual impulsarà una nova revolució industrial basada en tecnologies energètiques renovables que només podran aconseguir l'eficiència requerida amb el suport de la nanotecnologia, el nou paradigma per arribar al més fons de les propietats físico-químiques de la matèria. No cal dir, d'altra banda, que això generarà innombrables oportunitats per a la innovació i pel desenvolupament econòmic.

Tal com va expressar amb claredat un dels descobridors dels fullerenes de carboni i premi Nobel de química Richard E. Stanley [8], probablement ens cal un nou programa Apollo, basat sobretot en la nanociència, per a enfrontar-nos a la urgència del repte energètic de la Humanitat.

2. La nanociència

La natura ha tardat molts anys en construir objectes cada vegada més complexos fins arribar als sers vius. Ha calgut assajar moltes combinacions d'àtoms i molècules, seguint les lleis precises de l'assemblatge molecular, per a trobar aquelles estructures que millor funcionen i així vestir la diversitat natural. La nanociència és la disciplina que vol comprendre la complexitat d'estructures i la diversitat de comportaments que trobem al microcosmos, basant-se en les lleis precises de la física i la química.

Els coneixements científics que la humanitat va desenvolupar durant la primera meitat del segle XX, sobretot la mecànica quàntica, van fer possible que a la segona meitat del segle la ciència dels materials induís les noves tecnologies que van transformar aquest segle, la microelectrònica, la informàtica, les telecomunicacions, els transports aeris, etc. El segle XXI s'ha iniciat amb una nova convergència d'idees i eines, la nanociència, que promet conduir-nos a una segona revolució científica encara més global. La nanociència s'ha convertit en transdisciplinària, fent convergir els objectes d'estudi de la física, la química i la biologia a l'escala del nanòmetre, o sigui de la mil·lionèsima part d'un metre (Figura 3). El prefix "nano" prové del grec i significava "nan", res més ben trobat doncs per a caracteritzar aquesta nova escala de llargària en la que la ciència s'ha de desenvolupar.

El progrés realitzat per a poder observar els objectes d'aquestes dimensions (microscopis electrònics i de forces atòmiques, per exemple) és el que ha donat un impuls extraordinari als nostres coneixements i ha fet aflorar la nanociència. D'altra banda, el desenvolupament de noves tècniques per a manipular àtoms i molècules, creant agregats, nanoobjectes amb formes diverses (nanopartícules, nanofils, nanotubs, etc.) i materials nanoestructurats, ha posat els ciments per a la nanofabricació (Figura 3). Es poden seguir dues estratègies diferents pel desenvolupament d'eines de nanofabricació. Per un cantó les metodologies "top-down", o sigui descendents, a on les estructures nanoscòpiques s'obtenen trossejant o dividint materials de dimensions superiors, prèviament fabricats, utilitzant tècniques d'artilleria pesada com la litografia. Per un altre cantó, les metodologies "bottom-up", o sigui ascendents, en les que l'assemblatge de les nanoestructures s'aconsegueix directament a partir dels elements menors que les componen, àtoms o molècules, fent-les combinar espontàniament tal com ho fa la natura, però aconseguint-ho a una major velocitat.

Així doncs els nostres coneixements ja ens permeten acostar-nos a la natura per a dissenyar objectes amb funcionalitats ben definides, la complexitat dels sers vius, però, encara ens queda molt lluny. Com és d'esperar, els dominis d'aplicació de la nanotecnologia són extraordinàriament diversos, cobrint les tecnologies de la informació, la salut i la biomedicina, els transports, l'habitatge, els productes de consum com els tèxtils, l'alimentació i el medi

ambient, i també, evidentment, l'energia. Com hem mencionat anteriorment, el cistell energètic és molt divers, i per tant les àrees d'incidència de la nanotecnologia també ho seran.

Als anys 60 del darrer segle, el Premi Nobel de Física Richard Feynman va ser el primer en fer-nos adonar que la nanociència ens permetria anar molt més enllà en el nostre domini de la matèria, però no va ser fins a finals del segle XX que en Richard Smalley es va convertir en el primer advocat de la nanotecnologia com a arma per a bastir un nou paradigma energètic respectuós amb les regles del clima planetari [8].

Ell ens va recordar que la Terra rep del sol en una hora tota l'energia que gastem en un any i que per tant per a fer córrer el món en tindriem prou aprofitant amb un 10 % d'eficiència l'energia que arriba a un 1 per mil de la superfície del planeta. En definitiva disposem de combustibles fòssils perquè el sol, mitjançant la fotosíntesi (amb una eficiència molt inferior), va fabricar durant mils de milions d'anys molècules complexes que després varem emmagatzemar. El coneixement de les lleis que regeixen aquest fenomen ens hauria de permetre fer-ho ara amb molta més rapidesa, acordant el tempo de la generació i del consum. De fet, com veurem més endavant, actualment ja produïm cel·les solars amb eficiències superiors al 30 %.

3. Els nous paradigmes energètics

El mite de Prometeu, el de l'energia immensa del sol, ha captivat la civilització humana des dels seus inicis. De fet, pràcticament totes les fonts energètiques de que gaudim (excepte l'energia nuclear) tenen el seu origen en el sol, tant les renovables com les fòssils. La llum del sol al incidir a la superfície de la Terra, sigui activa reaccions químiques que involucren protons que acaben acumulant energia en forma d'enllaços químics, sigui generen directament els electrons que utilitzarem en circuits elèctrics. Exemples del primer cas són la fotosíntesi mitjançant la qual les plantes fixen el CO_2 i acumulen energia química que després consumim com a aliments, generem biocombustibles o que el temps converteix pacientment en combustibles fòssils. Un altre exemple és la cel·la de Gratzel, recentment inventada, en la que una reacció fotoquímica a la interfase d'un semiconductor pot generar electrons o trencar molècules d'aigua generant per tant hidrogen i oxigen. La conversió directa d'energia lluminosa en electricitat succeeix pel contrari a les cel·les fotovoltaïques.

Abstraient molt, podem dir que disposarem de dos vectors energètics, l'electricitat i l'hidrogen, que estaran lligats a diverses formes de generació i ús final. Per aquesta raó presentaré les perspectives futures i els reptes que plantegen aquests dos vectors energètics. Veurem com la nanotecnologia és el detonant per convertir aquestes promeses en realitats i per tant les anomenarem "energies nanotecnològiques" [1,5,9-11].

(a) – Energia química: L'hidrogen

L'economia de l'hidrogen precisa generar, emmagatzemar i utilitzar aquest element preciós que, recordem-ho, no es troba disponible com a element aïllat, si no que l'hem de separar de compostos químics en el que està lligat [1,9-12]. Actualment tota la producció mundial prové dels combustibles fòssils i per tant cal desenvolupar noves maneres de generar-lo que no tingui com a subproducte el CO_2 , en particular de l'aigua. Una manera completament renovable de generar hidrogen són les cel·les de Gratzel mencionades anteriorment, un dispositiu que no existia fa 8 anys i que ja ha assolit una eficiència del 10 %. Aquestes cel·les fotoelectroquímiques precisen que el semiconductor tingui una superfície de contacte el més elevada possible amb l'aigua, a la vegada que es cobreix amb un tint molecular que absorbeix una part significant de l'espectre solar. Per maximitzar l'eficiència cal que el semiconductor tingui una elevada superfície específica, o sigui que tingui dimensions nanomètriques, a més a més d'una bona conducció elèctrica i una elevada resistència a la corrosió per l'aigua. Fins fa ben poc s'han utilitzat capes primes nanoporoses de TiO_2 com a elèctrodes, però més recentment s'ha recorregut amb èxit a nanotubs d'òxids semiconductors que assegurin una millor conducció electrònica. Les cel·les de Gratzel es comencen ja a comercialitzar i la seva millora constitueix un repte de la nanotecnologia, al ser necessari preparar nanomaterials amb característiques molt avançades, però a la vegada contraposades.

Una vegada generat l'hidrogen molecular cal emmagatzemar-lo i els processos existents són encara molt deficients. Es pot guardar de forma gasosa sota pressió en ampolles d'acer, o en forma líquida, a molt baixes temperatures (-250 °C) en criòstats. Cap d'aquests dos processos són gaire satisfactoris, sigui perquè bàsicament transporten acer (el pes específic de l'hidrogen és molt baix), sigui per l'elevat cost de la refrigeració. Una alternativa és inserir-lo de forma reversible en forma atòmica en al·liatges metàl·lics, o creant hidrurs complexes. La densitat relativa que cal aconseguir és com a mínim de ~ 10 MJ/kg, o sigui $\sim 1/3$ de la que té la benzina. Els al·liatges actualment en desenvolupament són de base Mg i poden acumular fins un 7 % del seu pes en H, que és una densitat raonable pels sistemes de transport.

Altres materials que s'investiguen són els nanotubs de carboni o compostos metal·lorgànics nanoporosos en els que les molècules d'hidrogen queden adsorbides. En tots els processos descrits cal assolir un bon control de les interaccions entre gasos i sòlids a l'escala atòmica o molecular i per tant, una vegada més, cal produir materials nanoestructurats en els que la cinètica de difusió serà més ràpida. Aquests materials han de tolerar, a més a més, un gran nombre de cicles de càrrega i descàrrega, que cal fer de forma ràpida, i tot a preus assequibles per aconseguir una penetració massiva de l'hidrogen com a un nou combustible renovable.

Un vegada generat el preuat nou combustible podem fer una combustió o utilitzar piles de combustible per a generar electricitat. En ambdós casos el subproducte final és aigua un altre cop i per tant hauríem tancat el cicle de l'hidrogen. L'eficiència, però, és més gran si s'utilitzen piles de combustible. Les cel·les de combustible són en certa manera similars a una bateria elèctrica: una reacció química genera electrons que utilitzem per algun fi específic com per exemple per accionar un motor elèctric. En aquest cas però, cal alimentar la reacció amb l'hidrogen i disposar d'un catalitzador suportat sobre els elèctrodes que haurà de separar eficientment la molècula. També precisarem d'electròlits que condueixin els protons (o els ions oxigen) de la forma el més eficient possible. En aquest cas també s'ha proposat utilitzar nanotubs de carboni per a suportar nanopartícules de Pt (el catalitzador) els quals tindran una gran superfície específica i una excel·lent conducció elèctrica. La preparació d'aquests nanomaterials mitjançant aproximacions "bottom-up" i processos d'autoassamblatge sembla ser la millor alternativa.

Existeixen diversos tipus de cel·les de combustible en procés d'estudi i desenvolupament, unes utilitzen membranes polimèriques que condueixen protons, altres es basen en conductors ràpids d'ions oxigen. En aquest segon cas cal encara mantenir temperatures altes perquè la conducció iònica sigui suficientment elevada, però descobriments recents de "superconducció iònica" en interfases desordenades semblen ser molt prometedors per a reduir la seva temperatura de treball. En ambdós casos constitueix un repte molt engrescador aconseguir un elevat nombre de cicles sense degradar ni malmetre el catalitzador, tot mantenint un baix cost i una elevada potència. A mig termini, l'ús de combustibles com el metà podria donar un impuls addicional a la implementació d'aquestes cel·les.

A llarg termini les piles de combustible haurien de jugar un rol important per a facilitar l'ús de combustibles no fòssils en el sector del transport, no obstant com comentarem més endavant, aquesta tecnologia trobarà una forta competència en els cotxes elèctrics i híbrids a mesura que augmentin les prestacions de les bateries elèctriques.

(b) – Energia electrònica

Des del descobriment de la deessa electricitat que va transformar tan profundament el segle XX, no ha deixat d'augmentar el percentatge d'ús d'aquest vector energètic respecte el total de l'energia primària, atenyent actualment al voltant d'un 40 %. És molt probable que aquest percentatge segueixi augmentant, promogut pel desenvolupament de noves tecnologies de generació, emmagatzematge i ús més eficient de l'electricitat. Els materials electrònics (en general semiconductors) poden convertir la llum o la calor en electrons i per tant poden jugar un rol essencial en el camp de l'energia. Aquí en descrivim alguns exemples.

Els materials electrònics són essencials per aprofitar l'energia del sol que ens arriba a la Terra. Per veure com fer-ho ens cal analitzar l'espectre electromagnètic de la radiació solar. Com es pot veure a la Figura 4, el 58 % d'aquest cobreix el UV i el visible, susceptible de ser

transformat en electricitat mitjançant l'efecte fotoelèctric, mentre que el 42 % restant cobreix l'infraroig que només es pot transformar en electricitat basant-se en materials termoelèctrics. Veiem doncs que un bon aprofitament de l'espectre solar precisa desenvolupar materials amb funcionalitats diferenciades que descrivim a continuació.

En primer lloc, cal ressaltar que la potència instal·lada en solar fotovoltaica a tot el món segueix un creixement pràcticament exponencial que s'acompanya d'una progressiva reducció, més lenta, del cost unitari de la potència elèctrica [1,10]. Aquest creixement ha estat fonamental en el que s'anomenen les cel·les de primera generació, sobretot el Si cristal·lí o amorf en forma de capa prima. Les eficiències aconseguides en aquests sistemes van del 10 % al 25 %, per sota del límit termodinàmic (31 %) per un sistema d'una unió, mentre que els sistemes de multiunions poden superar ja el 30 % (Figura 4). El cost de producció d'aquestes cel·les de 1^a generació roman al voltant dels 3 €/W, mentre que seria desitjable reduir-lo per un factor 5-10. En paral·lel a la implementació comercial dels panells basats en aquests materials i a un continu progrés en la reducció de costos de manufactura, als laboratoris s'estan desenvolupant les cel·les anomenades de 2^a i 3^a generació, en les quals la nanotecnologia permet anar més enllà dels límits actuals en eficiència i cost. Per un cantó, les cel·les de 2^a generació són aquelles que es basen en materials en forma de capa fina de calcogenurs (CIGS), les quals ja han demostrat una eficiència del 20 %, o capes fines de materials moleculars orgànics, fàcilment processables com a solucions químiques i amb una eficiència demostrada del 5 %. En ambdós casos es poden generar grans superfícies. L'interès d'aquests materials és en principi el baix cost de procés, encara que cal progressar en el seu control de les propietats fotoelèctriques i electròniques a la nanoescala, i en el cas dels materials orgànics, en la seva estabilitat química a llarg termini. Si aquests materials arribessin a una eficiència de 15 % es podria aconseguir el llindar desitjat de 0,3 €/W. Una possible extensió d'aquestes cel·les són les que s'anomenen híbrides, en les quals es combinen materials orgànics i inorgànics. Per evitar els processos de recombinació de la parella electró-forat una vegada fotogenerada i separada, es proposa utilitzar nanofilms semiconductors inorgànics que siguin conductors d'electrons mentre que els forats es transporten cap al segon elèctrode pel conductor orgànic. Aquesta separació a la nanoescala dels canals de conducció electrònica permet augmentar la difusió de càrrega i per tant l'eficiència de la cel·la solar. El límit teòric d'aquesta cel·la segueix sent però el mateix que el de les de 1^a generació. Per augmentar l'eficiència es pot recórrer a sistemes de concentració solar en els que cel·les d'alt cost i alt rendiment (50-60 %) es tornen rendibles amb concentracions solars d'un factor 500.

Les cel·les de 3^a generació es basen en nous desenvolupaments que poden aconseguir eficiències superiors al 60 % . Aquestes cel·les constitueixen una obra d'enginyeria nanoscòpica en les que s'aconsegueix que un fotó generi més d'un parell electró – forat, utilitzant punts quàntics, o que fotons d'energies diferents actuïn simultàniament (estructures multicapa). En definitiva, s'aconsegueix aprofitar millor tot l'espectre solar. Evidentment la comprensió detallada dels processos quàntics involucrats i la capacitat de generar nanoestructures de forma controlable, són els factors clau per a l'èxit d'aquesta nova generació de cel·les que podrien canviar de forma radical la nostra capacitat d'aprofitament de l'espectre solar.

Una segona via d'aprofitament no tèrmica de l'espectre solar que té una història molt més recent és la dels materials termoelèctrics que poden transformar el calor provinent de l'infraroig en energia elèctrica (Figura 5). Aquest tipus de convertidors no servirien només per a la generació elèctrica solar, si no que també podrien funcionar com a recuperadors de calor residual en innombrables processos industrials o en automòbils. Pensem que aproximadament un 50 % de l'energia primària es perd en calor i pel cas dels automòbils es calcula que el consum podria reduir-se fàcilment en un 20 % amb aquests dispositius termoelèctrics.

Essencialment l'arrel física d'aquesta tecnologia és l'efecte Seebeck o poder termoelèctric, descobert a principis del Segle XIX, que diu que un gradient de temperatura provoca en els metalls i els semiconductors una difusió de portadors elèctrics, i per tant un voltatge elèctric. La figura de mèrit d'aquests convertidors combina una conductivitat elèctrica i un coeficient termoelèctric elevats amb una conductivitat tèrmica reduïda. Per aquesta raó cal manipular a la nanoescala els factors que controlen el recorregut lliure mig dels electrons i la difusió dels fonons (conductivitat tèrmica). La millora dels materials termoelèctrics prové tant de la recerca

de nous materials semiconductors amb funcionalitat òptima, com del desenvolupament de nanoestructures (nanofil·ls, multicapes) en les quals alguna de les llargàries característiques mencionades anteriorment són modificades pel confinament a la nanoescala. Un bon exemple de com la nanociència condueix a nous paradigmes tecnològics.

Dins del mateix conjunt de materials electrònics per a l'energia que hem mencionat s'hi podrien encabir els nous desenvolupaments per a la millora de l'eficiència en il·luminació. Actualment aproximadament un 20% de l'energia elèctrica mundial és consumida per aquesta finalitat mentre que l'eficiència dels sistemes utilitzats roman només del 5-20 %. Un trencament de paradigma el constitueixen els nous semiconductors anomenats LED (Light Emission Diodes) que poden augmentar l'eficiència fins al 70 % i mantenir una duració molt més gran que els sistemes clàssics (làmpades incandescentes o fluorescents). La reducció de cost del lumen produït promet, en un curt termini, una veritable revolució en aquest camp, amb molt potencial doncs per a l'estalvi energètic. Una vegada més la nanofabricació de les estructures semiconductores dels LEDs, així com el control dels defectes generats que controlen la seva eficiència quàntica, és el desllorigador per aconseguir que aquesta tecnologia penetri àmpliament en el mercat. Recordem que en els països avançats un 50 % del consum en il·luminació és del sector comercial, per tant l'avenç en nous dissenys i en el desenvolupament de panells plans (materials orgànics, OLEDs, similars a les cel·les fotovoltaïques mencionades anteriorment) promet imaginar nous escenaris d'il·luminació distribuïda. El mercat potencial d'aquestes noves tecnologies pels propers 10-20 anys es xifra en milers de milions de €

Com a complement a una il·luminació eficient basada en LEDs, podem mencionar els materials electrocròmics que permetran aconseguir optimitzar la il·luminació d'interiors d'edificis i el seu intercanvi tèrmic amb l'exterior. Es tracta de materials que modifiquen la seva transmissió òptica al aplicar un voltatge i per tant han pogut generar el que s'anomenen finestres intel·ligents. Aquests sistemes haurien de permetre minimitzar el consum en calefacció i aire condicionat dels edificis i per tant impulsar el concepte d'edifici amb balanç energètic nul, recentment proposat als EEUU.

(c) – Energia elèctrica

L'energia elèctrica s'ha convertit ja en un element tan fonamental per a la vida quotidiana que sovint es pensa que està garantida per naturalesa. De fet, l'Acadèmia de Ciències dels EEUU va qualificar el sistema elèctric modern com l'obra d'enginyeria més important que mai s'ha construït. Això no obstant, les grans apagades que succeeixen sovint arreu són una mostra de les dificultats que té el sistema elèctric actual per a satisfer la demanda amb la seguretat i fiabilitat que desitgem, a la vegada que les fonts de generació són cada vegada més distribuïdes i intermitents (energies renovables) i que cal satisfer els cicles d'horari variable, incloent els pics de demanda. De fet l'energia elèctrica consumida actualment (40 % del total, mentre a meitat del segle XX representava el 10 %) es basa pràcticament en la mateixa tecnologia amb la que es va iniciar l'electricitat. Les exigències actuals posades sobre el sistema elèctric fan pensar que cal doncs evolucionar cap a un sistema amb més intel·ligència, més eficiència i més respectuós amb les exigències mediambientals. La Unió Europea, per exemple, ha fixat com a objectiu per l'any 2020 aconseguir un augment de l'eficiència del 20 %, una reducció de la generació de CO₂ en un 20 % i una penetració de fonts renovables del 20 %. Sens dubte un repte molt exigent pel qual és indispensable desenvolupar noves tecnologies.

Un aspecte essencial que històricament ha limitat les possibilitats d'estendre l'ús de l'energia elèctrica és la seva dificultat per emmagatzemar-la de forma massiva. Existeixen un ampli ventall de noves tecnologies que poden fer evolucionar el sistema elèctric, però entre elles mencionarem especialment els sistemes electroquímics per l'acumulació i la superconductivitat com a un nou paradigma pels sistemes elèctrics [1,9,10,11, 13-15].

Acumuladors electroquímics

És molt probable que el percentatge d'ús de l'energia elèctrica segueixi augmentant en el futur però un possible detonant per accentuar el procés podria emergir del desenvolupament massiu

del cotxe elèctric i del cotxe híbrid recarregable (Plug-in hybrid) primer. Cal recordar a aquest respecte que l'eficiència d'un motor elèctric no es troba limitat pel límit de Carnot de la màquina tèrmica en les que la degradació tèrmica entròpica inel·ludiblement manté reduïda l'eficiència. L'eficiència d'un cotxe elèctric pot ser fàcilment el doble que la dels motors tèrmics i per tant una millora suficient dels acumuladors elèctrics podria arrabassar una part important del $\sim 30\%$ total de consum d'energies fòssils del sector del transport.

Si ens preguntem quin és el coll d'ampolla tecnològic que limita la consecució de bateries acceptables veiem que hem de recórrer a la nanotecnologia per a resoldre els problemes bàsics. La capacitat dels acumuladors d'energia es descriu amb el anomenat diagrama de Ragone en el que es representa la densitat d'energia respecte la densitat de potència (Figura 6). En aquest digrama s'hi localitzen les bateries, els supercapacitors, les cel·les de combustible i la benzina. Segons el seu posicionament al diagrama sabem quin és el temps d'autonomia del sistema corresponent. Veiem per exemple que actualment les piles de combustible poden proporcionar energia durant unes 10 hores, les bateries durant 1 hora i els supercapacitors durant segons, tots ells molt lluny de l'energia i la potència que es pot aconseguir amb els motors tèrmics basats en la benzina.

Les bateries electroquímiques es fonamenten en que el transport iònic a través d'un electròlit permet que es produeixi una reacció química que genera un potencial elèctric i així podem completar un circuit elèctric extern. En el procés de càrrega caldrà invertir la direcció del transport iònic mitjançant una font externa d'energia elèctrica. Les bateries elèctriques actuals del tipus Pb-àcid es troben al límit baix en el diagrama de Ragone i les bateries de Li (l'element que es transporta per l'electròlit, utilitzades actualment en equipament electrònic de tot tipus) tenen una densitat d'energia $\sim 400\%$ superior (Figura 6). Les bateries utilitzades actualment als cotxes híbrids són del tipus hidrur de Ni i tenen una potència intermèdia. El desenvolupament massiu del cotxe elèctric i híbrid recarregable depèn doncs del progrés en les bateries de Li [1,10,13]. El major potencial pel desenvolupament d'aquestes bateries prové d'aconseguir càtodes amb un temps de vida augmentat. El càtode ha d'ésser capaç d'inserir de forma reversible ions Li sense canviar de forma important l'estructura cristal·logràfica, l'energia lliure de reacció ha d'ésser elevada per què el voltatge generat sigui gran i el material ha d'ésser un bon conductor electrònic per poder tancar el circuit elèctric i intercanviar fàcilment la càrrega amb els ions Li inserits. Els materials actualment utilitzats són òxids de Li i Co, de Li i Mn o fosfats de Li i Fe. En tots aquests materials els cicles d'inserció i extracció d'ions produeix un cert envelliment degut a la forta expansió de la xarxa i també la difusió iònica és relativament lenta, la qual cosa limita la capacitat de fer cicles de càrrega – descàrrega ràpids.

Una possible solució a aquestes limitacions ha estat proposada recentment en la que els òxids del càtode tenen forma de nanofil la qual cosa permet que s'expansionin més fàcilment i que el temps de difusió iònica sigui més curt. Una vegada més doncs els materials nanoestructurats són els que poden generar canvis paradigmàtics en les prestacions d'aquests nous dispositius. Això no obstant, queden encara moltes qüestions bàsiques que cal investigar per a comprendre a la nanoescala el lligam existent entre els processos electroquímics, estructurals i de transport iònic (nanoiònica).

La segona oportunitat per acumular energia elèctrica es basa en els supercapacitors. Aquests dispositius s'assemblen a les bateries però els dos elèctrodes són iguals i es podem assimilar a dos condensadors en sèrie doncs s'acumula càrrega a la interfase de cadascun dels elèctrodes però sense que es produeixi una reacció química. La nanoestructuració dels elèctrodes permetrà maximitzar la interfase i per tant la càrrega acumulada. A més a més, l'absència de reacció química fa que el temps de càrrega i descàrrega és molt més curt que les bateries, i encara que l'energia que poden acumular és molt més baixa, la potència és més elevada (Figura 6). Així doncs, la seva utilitat rau en processos ràpids, com per exemple l'acumulació de l'energia de frenada dels automòbils. Aquests acumuladors electroquímics cobreixen al diagrama de Ragone unes expectatives complementàries a les bateries. És molt probable doncs que als propers anys l'ús sinèrgic d'aquests nous acumuladors, amb una forta component de nanotecnologia al seu interior, ens permetin introduir canvis paradigmàtics en el món del transport rodat.

Superconductivitat

La xarxa elèctrica actual, concebuda al segle XIX, es basa en bona mesura en materials convencionals com el coure, l'alumini i el ferro, però actualment, com ja hem mencionat anteriorment, les tecnologies convencionals tenen gran dificultat per a complir amb les expectatives que es tenen pel sistema elèctric. A més a més, el fenomen que els anglosaxons anomenen NIMBY (not in my back yard, o sigui no al meu pati de darrera) posa en greus dificultats el desplegament de noves infraestructures basades en tecnologies convencionals.

La superconductivitat d'alta temperatura, descoberta ara fa uns 20 anys, s'ha convertit en una tecnologia trencadora (enabling technology) que permet desenvolupar un model alternatiu de xarxa elèctrica, més eficient, amb més capacitat i més intel·ligent, que permet als operadors elèctrics plantejar-se una nova estratègia en la utilització de l'espai disponible, a la vegada que poden respondre a les expectatives contraposades plantejades (Figura 7). Aquest nou paradigma elèctric, que anirà complementant els sistemes antics al llarg del segle XXI, serà una realitat degut al desenvolupament de nous sistemes elèctrics superconductors de tota mena (cables, transformadors, generadors, motors, limitadors de corrent, acumuladors d'energia, etc.). Aquests sistemes estan basats en uns nous materials que ha calgut comprendre'n les seves propietats, aprendre a processar-los i a desenvolupar sistemes que els integrin amb les màximes prestacions. La superconductivitat és un fenomen d'origen quàntic que es manifesta, entre d'altres, amb dues propietats físiques que converteixen aquests materials en extraordinaris: presenten una resistència elèctrica nul·la i són diamagnets perfectes, o sigui expulsen el flux d'un camp magnètic. Aquestes dues propietats fan possible que puguin transportar grans corrents elèctrics sense pèrdues (100 vegades més que el fil de coure per exemple), que amb ells es puguin crear els camps magnètics més grans que l'home mai ha generat i que un iman pugui levitar de forma estable.

Els materials superconductors d'alta temperatura són, però, òxids ceràmics complexos amb els que ha calgut aprendre a fabricar cintes o fils de gran llargàries, un procés certament complex. Actualment els materials més prometedors són els que s'anomenen de 2^a generació i tenen una composició $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO), mentre que les cintes de 1^a generació amb les quals s'han fet la majoria dels grans sistemes de potència actuals tenen una composició $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{11}$ (BSCCO). Les cintes de 2^a generació de YBCO consisteixen en un substrat metàl·lic (acer o al·liatges de níquel) sobre les quals s'hi han dipositat multicapes d'òxids per a fer possible que la capa de YBCO sigui epitaxial, o sigui que té una orientació cristal·lina perfecte que només es pot aconseguir amb interfases abruptes a l'escala del nanòmetre (Figures 8 i 9). Aquest tipus de conductors no s'havien produït mai en Ciència de Materials i per tant ha calgut desenvolupar noves tecnologies per a obtenir-los, a la vegada que es minimitzava el seu cost de producció. De fet, per aconseguir optimitzar les prestacions d'aquests conductors cal fabricar materials nanocomposites, en els quals nanopartícules no superconductores quedin distribuïdes a la matriu de YBCO. Això és així perquè a altes temperatures i alts camps magnètics existeixen uns tubs de corrent anomenats vòrtex, amb dimensions nanomètriques, que són els que controlen quina és la densitat de corrent elèctric que es pot aconseguir sense generar pèrdues. Aquests vòrtex s'han d'immobilitzar i això només es pot fer introduint defectes amb dimensions similars, o sigui que els superconductors més útils són aquells que tenen una nanoestructura artificialment modificada, una vegada més doncs la nanotecnologia és la que ens obre les portes a noves tecnologies. En aquest aspecte els materials superconductors es distingeixen totalment dels seus parents semiconductors en els quals cal aconseguir la màxima puresa. El grup de l'ICMAB s'ha convertit en un dels millors especialistes mundials en l'obtenció de cintes de YBCO nanoestructurades obtingudes mitjançant solucions químiques, un procés que promet ser de gran interès industrial degut al seu baix cost (Figura 9). Recentment unes capes superconductores obtingudes a l'ICMAB han aconseguit les millors prestacions mai obtingudes amb un superconductor, superant àmpliament a la temperatura del nitrogen líquid inclús als materials clàssics de baixa temperatura, i per tant obren la porta a una substitució massiva de les tecnologies actualment utilitzades en ressonància magnètica o grans acceleradors [14].

La implementació dels sistemes superconductors en aplicacions concretes sempre ve determinada pels incentius innovadors que aporta. Per la biomedicina (ressonància magnètica) i

els sistemes científics (acceleradors, camps magnètics ultra-alts o ultra-febles) les avantatges en prestacions o l'interès social justifica perfectament l'elevat cost que cal assumir. Per a l'energia o els sistemes de transport, a més a més de les prestacions, cal considerar el cost i la fiabilitat, per això la penetració en el mercat és més lenta. Actualment existeixen però dispositius a escala real de pràcticament tots els sistemes d'interès que permeten assajar la tecnologia i demostrar-ne les avantatges [15].

Els cables superconductors han demostrat que poden transportar 3-5 vegades més d'energia que els cables convencionals i ja n'hi han uns quants d'ells instal·lats i connectats a la xarxa, sobretot en entorns de grans ciutats en les quals és pràcticament impossible aconseguir nous drets de pas i per tant cal posar al dia els sistemes existents amb d'altres de més potència. Als EEUU un cable transporta 570 MW, una potència suficient per alimentar 300.000 cases, i d'altres models estan en desenvolupament, un d'ells a Barcelona fet en col·laboració entre l'ICMAB, Endesa i una empresa multinacional. Els limitadors de corrent són uns nous dispositius superconductors que permeten limitar la propagació dels curtcircuits i per tant fan possible que la xarxa sigui més connexa. Això és de gran interès per a fer possible una eficient introducció de les energies renovables de tipus distribuït. També per a facilitar la redundància en les xarxes elèctriques de les grans ciutats a on cal eliminar a tot preu les apagades generalitzades. Els transformadors superconductors també presenten avantatges respecte els sistemes convencionals: no utilitzen líquids inflamables i per tant es poden disposar en subestacions amb espais més reduïts de les àrees urbanes. També, juntament amb els nous generadors superconductors, tres vegades més lleugers i compactes, poden impulsar el desenvolupament de l'energia eòlica. S'estima que es podria duplicar la capacitat dels generadors existents si es basessin en sistemes superconductors. També existeixen tecnologies superconductores per acumular energia elèctrica, sigui amb grans bobines magnètiques (SMES) o amb volants d'inèrcia que acumulen energia cinètica sense pèrdues de fricció.

Pel que respecte als sistemes de transport, la superconductivitat ha començat a introduir canvis paradigmàtics, el primer d'ells en els vaixells, però probablement no serà el darrer. La introducció de generadors i motors superconductors als vaixells ha mostrat que té l'avantatge d'una molt important disminució de pes i volum, 1/3 dels sistemes convencionals. Com a conseqüència el disseny dels vaixells es pot modificar profundament, fent-los més maniobrables i més eficients, la qual cosa augmenta també el recorregut de creuer sense reposar. Algunes d'aquestes avantatges probablement es traslladaran de forma inclús més espectacular als avions, a on la disminució del consum i les dificultats per a operar prop de les ciutats comencen a ser limitacions molt rellevants. Finalment, els famosos trens de levitació magnètica, operatius a més de 550 km/h, podrien en el futur trobar el seu mercat entre l'aviació i els trens d'alta velocitat convencionals.

Per acabar, no podem oblidar que els camps magnètics que generen els materials superconductors són els que fan possible que l'energia de fusió estigui en fase d'experimentació com a possible font inesgotable d'energia. El reactor de demostració "International thermonuclear experimental reactor" (ITER), actualment en construcció al sud de França, té un cost estimat de 5.000 M€ i aproximadament un 40 % està relacionat amb els superconductors i la refrigeració [16]. Ben cert doncs la viabilitat futura de la fusió dependrà del desenvolupament dels nous materials superconductors d'alta temperatura que podrien reduir considerablement aquest cost.

En conclusió doncs, els sistemes superconductors tenen un gran potencial per a generar un nou paradigma elèctric. Per a fer possible que aquesta nova tecnologia sigui una realitat ha calgut que la nanotecnologia ens proporcionés noves eines per a fabricar materials nanoestructurats amb prestacions prou competitives. Els reptes de futur són però importants, doncs encara estem lluny d'obtenir les prestacions límit dels materials de que disposem, i per tant cal implementar els nous desenvolupaments de la nanotecnologia amb la màxima celeritat.

4. Conclusió

La Humanitat ha estat intensament modificada pels combustibles fòssils. Mentre que el consum energètic per càpita s'havia mantingut pràcticament constant a l'era pre-industrial, en els darrers

dos-cents anys aquest consum s'ha multiplicat pràcticament per quatre. L'acceleració de benestar i coneixement que aquest fet ha comportat ha estat extraordinari, però la certesa de que el model energètic que hem seguit està modificant el clima del planeta posa una evident limitació mediambiental al paradigma energètic actual.

És simplement insostenible mantenir la ineficiència energètica actual basada en l'ús massiu de combustibles fòssils. És ineludible, pel contrari, desenvolupar un ampli ventall de noves tecnologies que, al millorar-ne l'eficiència poden canviar de forma definitiva l'actual paradigma energètic. S'estima que la consecució de ~ 10 TW d'energia neta (el 50 % de les necessitats de la Humanitat) a meitat del segle XXI podria estabilitzar la concentració de CO_2 a l'atmosfera a valors que aturarien l'augment de temperatura de la Terra a uns 2-3 °C per sobre de l'era pre-industrial, un llindar més enllà del qual és probablement temerari endinsar-se.

A curt termini existeixen oportunitats per augmentar l'ús d'energies renovables i de millorar l'eficiència energètica, això no obstant, a mig i llarg termini calen revolucions per a fer més eficients i accessibles diverses tecnologies. Aquest treball ha exposat com els nous coneixements en nanociència i nanotecnologia són la millor oportunitat que tenim per a incidir profundament en fer viables els nous paradigmes energètics. En definitiva, els coneixements que la humanitat ha pogut desenvolupar durant els dos segles de preponderància dels combustibles fòssils són els que ara ens haurien de permetre desenvolupar noves tecnologies que ens permetin fer viable un nou model energètic sostenible per al futur del planeta, mantenint a la vegada una elevada qualitat de vida pels ~ 10.000 milions de persones que probablement poblaran la Terra cap a meitats del segle XXI.

Referències

1. US Department of Energy reports (www.sc.doe.gov/bes/reports)
 - “Basic research needs to assure a secure energy future”
 - “Workshop on solar energy utilization”
 - “Basic research needs for the Hydrogen economy”
 - “Basic research needs for superconductivity”
 - “Basic research needs for Solid state lighting”
 - “Basic research needs for electrical energy storage”
 - “Grid 2030: a national vision for electricity’s second 100 years”
 - “Transforming electricity delivery – Strategic plan” (2007)
2. P. Papon, “L’energie à l’heure des choix”, Ed. Belin (2007); P. Gómez-Romero, “Un planeta en busca de energía”, Ed. Síntesis (2007)
3. “Climate change“, Science 302, 1719 - 1926 (2003)
4. “Climate change“, Nature 445, 578 - 582 (2007)
5. N.S.Lewis, “Powering the planet“, MRS Bulletin 32, 808 (2007)
6. “Climate change 2007“, Intergovernmental Panel on Climate Change report, Cambridge Univ. Press (2007) (<http://www.ipcc.ch>.)
7. Stern review: “The economics of climate change“, (<http://www.occ.gov.uk/activities/stern.htm>)
8. R. E. Smalley, MRS Bulletin 30, 412 (2005); D. J. Nelson, M. Strano, Nature Nanotechnology 1, 96 (2006)
9. “Alternative energy technologies” , Nature 441, 332 - 377 (2001)
10. “Harnessing Materials for energy“, MRS Bulletin 38, 261 - 477 (2008)
11. “Novel materials for energy applications“, European Commission, I. Vouldis, P. Millet and J.L. Vallés eds. (2008) (http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/)
12. “Toward a Hydrogen economy“, Science 305, 957 – 1126 (2004)
13. Y. Wang, G. Cao, Adv. Mater. 20, 2251 (2008)
14. J.Gutiérrez, A. Llordés, J. Gázquez, M. Gibert, N.Romà, S. Ricart, A. Pomar, F.Sandiumenge, N.Mestres, T. Puig, X. Obradors, Nature Materials 6, 367 (2007)
15. A. P. Malozemoff, Nature Materials 6, 617 (2007)
16. International thermonuclear experimental reactor” (ITER), (<http://www.iter.org/>)

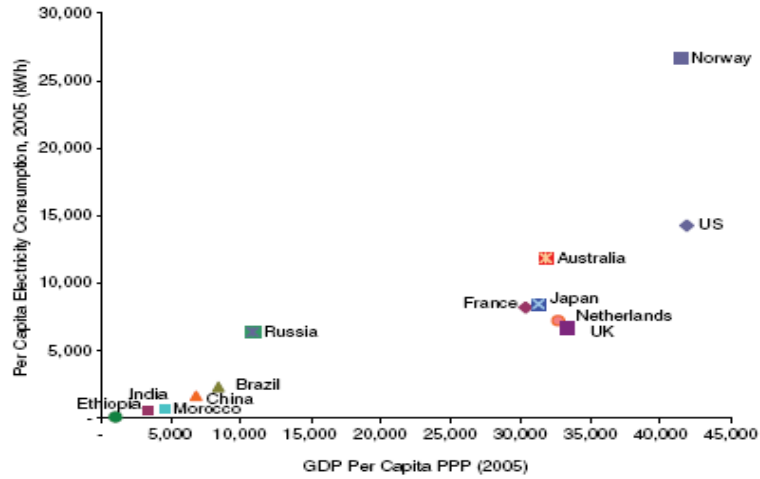


Figura 1 - Relació entre el consum energètic per càpita i el producte interior brut per càpita a diferents països del món .

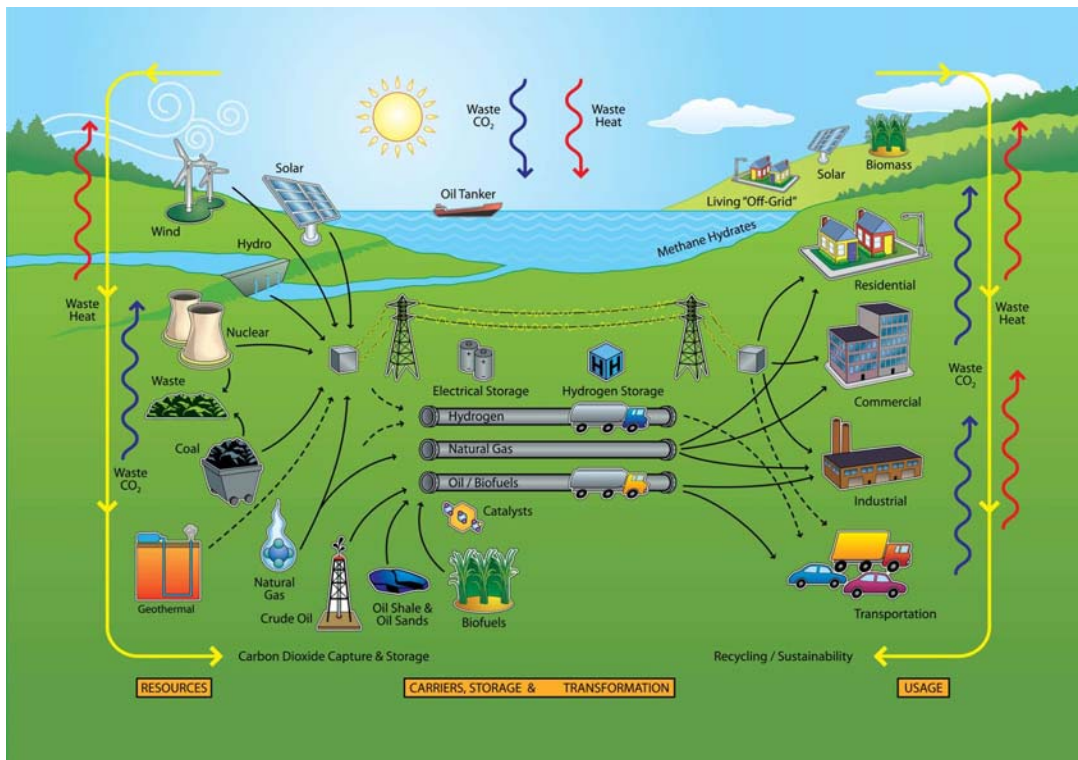


Figura 2 - Esquema generalitzat dels constituents globals del cicle de l'energia

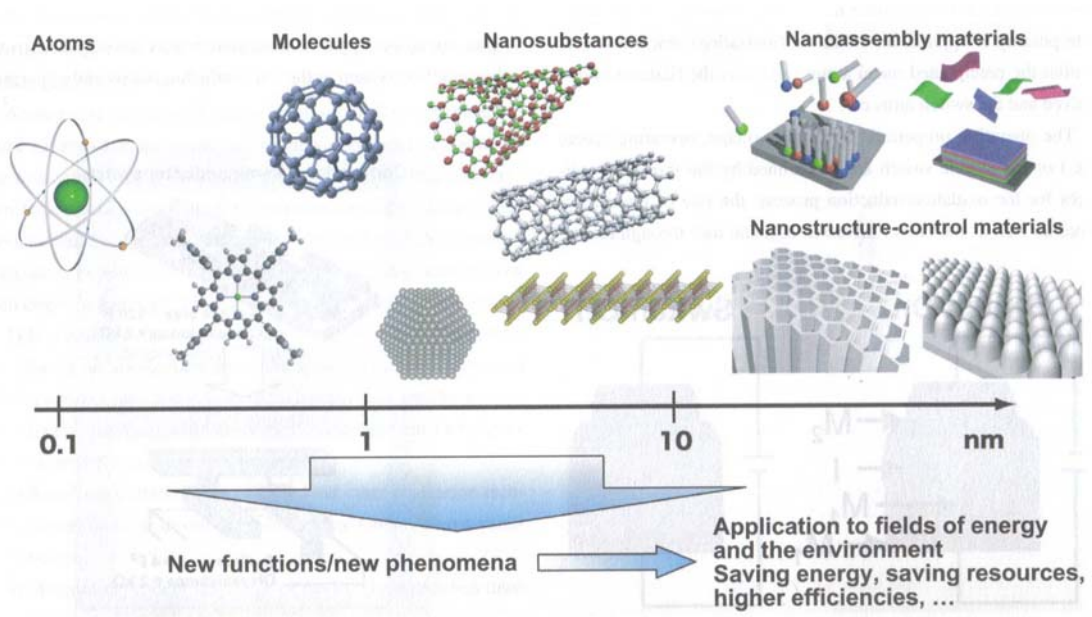


Figura 3 – Escala i morfologia dels nanomaterials per aplicacions en energia

	Wavelength	Spectrum	%
Photovoltaic	~200–800nm	UV & visible light	58
Thermoelectric	~800–3000nm	IR	42

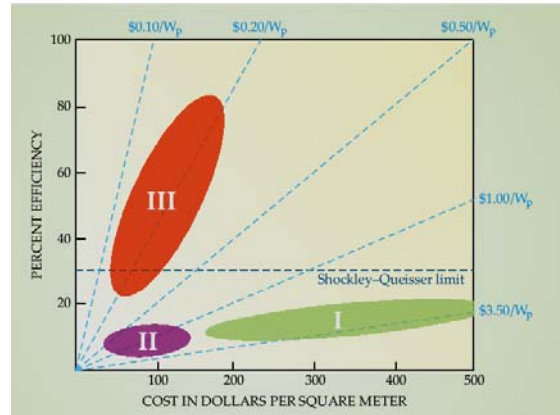
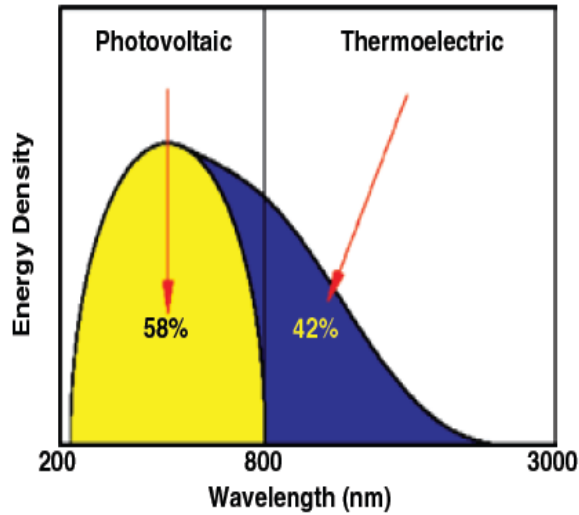


Figura 4 - Distribució de l'energia de l'espectre electromagnètic de la llum solar i esquema de la relació cost – eficiència de les tres generacions de cel·les solars fotovoltaïques.

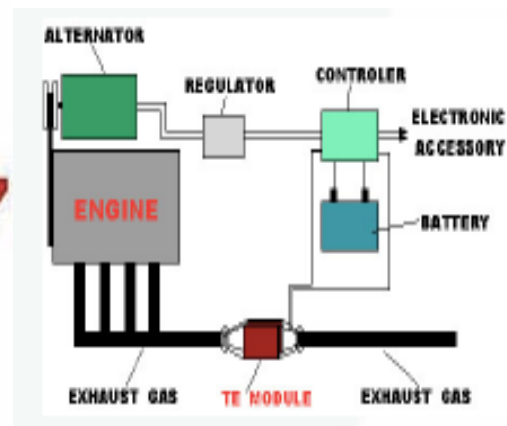
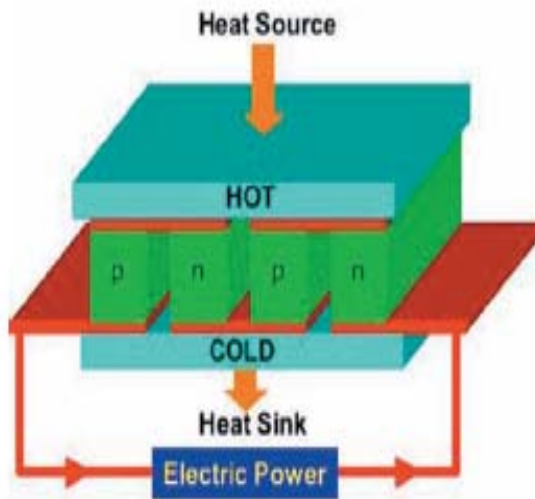


Figura 5 – Esquema del principi de funcionament d'un generador termoelèctric i del mode de funcionament com a recuperador de calor en un automòbil.

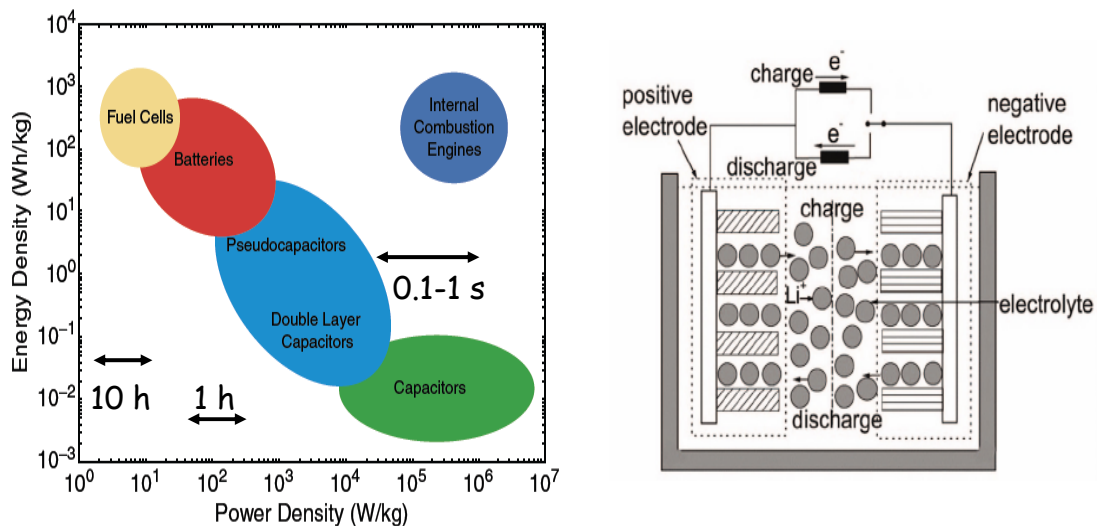


Figura 6 – Diagrama de Ragone en el que es mostra la relació entre densitat de potència i densitat d’energia així com el temps d’utilització dels diferents sistemes d’acumulació d’energia. Esquema de funcionament (càrrega i descàrrega) d’una bateria de Li.

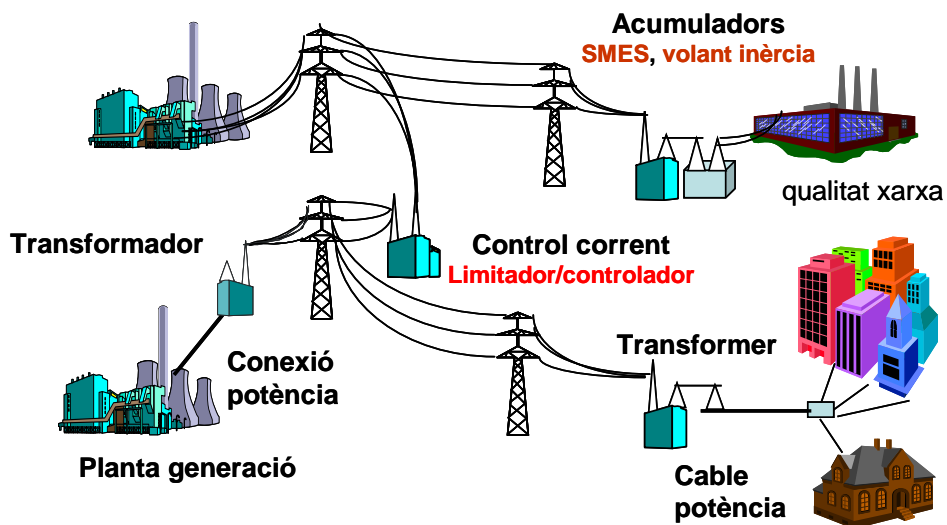


Figura 7 - Esquema generalitzat de la xarxa elèctrica indicant els sistemes superconductors que es poden introduir.

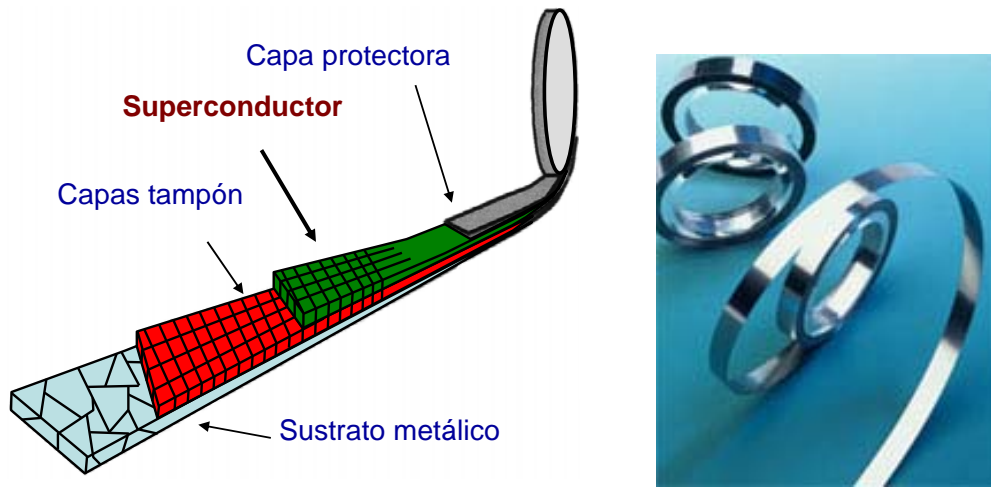


Figura 8 - Esquema de l'estructura en multicapa dels conductors epitaxials i imatge d'una cinta superconductora

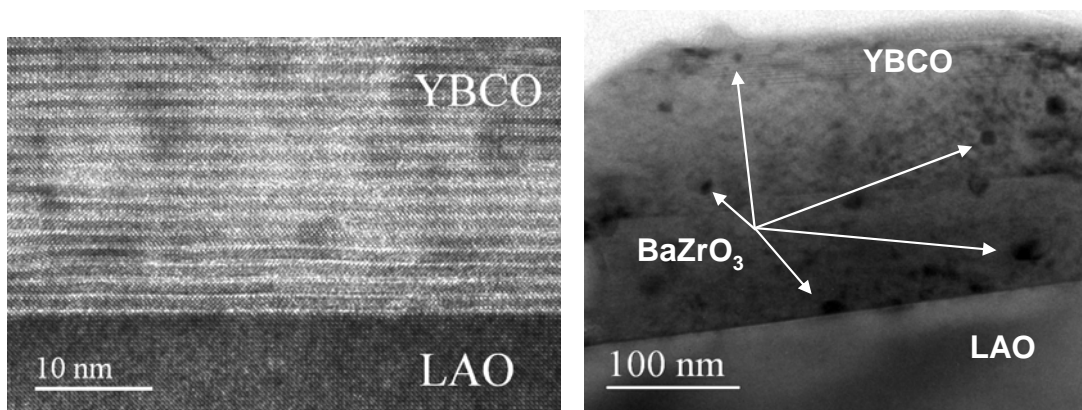


Figura 9 - Imatges de Microscòpia electrònica de transmissió que mostren capes superconductores epitaxials de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ amb una interfase abrupta i un nanocomposite amb nanopartícules de BaZrO_3 .