

# Energia i societat

Jordi Solé<sup>1</sup>, Antonio García-Olivares<sup>1</sup>, Emili García-Ladona<sup>1</sup>, Joaquim Ballabrera-Poy<sup>2</sup>, and Antonio Turiel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Ciències del Mar (CSIC). Pg. Marítim de la Barceloneta, 37-49, 08003, Catalunya, Spain

<sup>2</sup>Unitat de Tecnologia Marina (CSIC). Pg. Marítim de la Barceloneta, 37-49, 08003, Catalunya, Spain  
jsole@icm.csic.es

*El present article inaugura una secció de la revista destinada a utilitzar eines i raonaments familiars als físics per analitzar problemes relacionats amb les interaccions entre energia i societat. Pretenem aportar algunes anàlisis de problemes d'actualitat en aquest camp, sense entrar excessivament en els detalls i les derivacions matemàtiques, però anant més enllà de la pura divulgació. Amb aquest article encetem, doncs, una sèrie que vol donar algunes idees sobre com la formació en física pot aportar una base sòlida per donar sortida laboral als estudiants actuals en un futur mercat que, amb les perspectives actuals i segons les previsions, es presenta canviant i amb uns escenaris notablement diferents del que havia estat fins ara.*

Començarem aquest article introductorí explicant tres punts que considerem clau pel que fa a l'impacte de les fonts d'energia en la societat. En primer lloc, parlarem de com l'extracció d'un recurs natural finit segueix una evolució temporal d'acord amb el que es coneix com la corba de Hubbert. En segon lloc, veurem com la producció de petroli global està fortament correlacionada amb el producte interior brut (PIB) mundial i, per tant, l'evolució del preu del petroli ens dóna pistes sobre en quin lloc de la corba de Hubbert ens trobem. Finalment, com a alternativa al paradigma energètic actual, us presentarem un estudi recent que mira de quantificar i veure si és possible una migració global a una societat totalment electrificada i amb energies renovables.

En primer lloc, introduïm l'anomenada *corba de Hubbert*. L'any 1956 Marion K. Hubbert va proposar un model de producció de petroli (és a dir de quantitat de recurs extret per unitat de temps) que és aplicable, de fet, a qualsevol recurs natural finit i no renovable. Aplicant el seu model va predir el pic de producció dels EUA a la primera dels anys setanta. És, doncs, quan la seva predicció es va mostrar encertada que el seu model finalment va tenir el reconeixement de la comunitat científica. En aquest model de producció (anomenat model de Hubbert) l'evolució temporal de la producció segueix una corba en forma de campana (o corba de Hubbert) amb el màxim de producció (o pic petroler, *peak oil* en anglès) aproximadament quan el recurs és a la meitat de la seva extracció en volum (Hubbert, 1956). Les estimacions actuals dels geòlegs (recollides en part per l'Agència Internacional de l'Energia al seu informe anual, *World Energy Outlook*, 2010) sobre la producció de cru mundial indiquen que el màxim de la corba de Hubbert (pic petroler mundial) es va donar l'any 2005. D'altra banda, en un article recentment publicat a la revista *Nature* (Murray, 2012) es mostra com des de l'any 2005 l'estancament de la producció de cru (arribada al pic de producció) ha provocat una resposta

inelàstica en el comportament del preu del petroli, que s'explica per l'efecte de falta de capacitat de creixement de la producció i, per tant, en un desajust recurrent entre oferta i demanda que només es resol amb una destrucció no lineal de la demanda (fins que torni a pujar al màxim nivell un altre cop).

El segon aspecte del qual volem parlar és la correlació lineal del creixement econòmic mundial (mesurat com a creixement del PIB) amb l'increment de la producció petrolera. L'Agència Internacional de l'Energia (AIE) ho mostra clarament en cadascun dels seus informes anuals en què es veu com perquè hi hagi un creixement del PIB ha d'haver-hi un creixement del consum total d'energia. A l'Informe Hirsch (Hirsch, 2005; Hirsch, 2008) encarregat per l'última administració Bush es veu que és la variabilitat del petroli la font dominant a les variacions del PIB mundial.

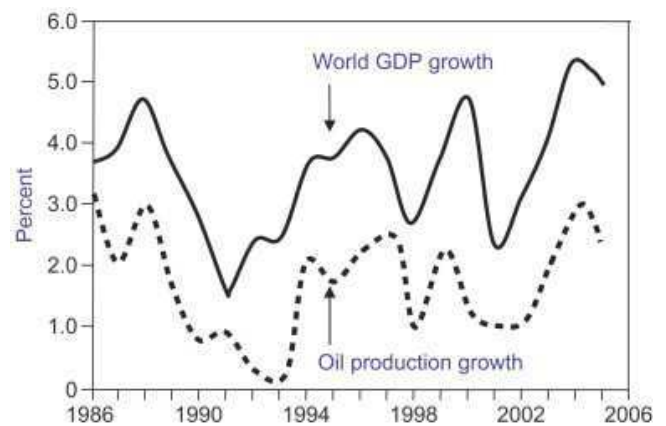


Figura 1: *Evolució temporal del percentatge de creixement del PIB i del creixement de la producció petrolera (extret de Hirsch, 2008)*

Finalment, les alternatives al sistema energètic actu-

al i, per tant, la transició a un model energètic menys dependent de recursos no renovables que a més sigui respectuós amb el medi ambient passen per una combinació de fonts d'energies renovables. Autors com Sovacool i Watts (2009) i Jacobson i Delucchi (2011) han proposat combinacions de fonts renovables com a solució definitiva a l'esgotament dels combustibles fòssils. No obstant això, aquests, igual que altres estudis que s'han fet fins ara, no han tingut en compte com afecta la disponibilitat de materials a una possible solució renovable del problema energètic. García-Olivares i coautors (García-Olivares et al. 2012) proposen una combinació de fonts energètiques renovables, basada en tecnologies provades que podrien ser implementades ja amb la tecnologia actual i que, a més, no utilitzen materials escassos en la seva construcció. La solució consisteix en una combinació de turbines eòliques terrestres i marines, concentradors solars en tots els deserts subtropicals del planeta, centrals hidroelèctriques i atenuadors d'onades annexos a les turbines eòliques marines. L'energia solar fotovoltaica no es pot considerar encara part de la solució a causa de la seva dependència de materials que són molt escassos, però podria contribuir a la solució en el futur, amb tecnologies actualment en desenvolupament basades en pirita, Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> o silici amorf sense utilització de plata. Això permetria obtenir alguns terawatts (TW) addicionals de potència, que podrien afegir-se als 11,5 TW necessaris per a la solució proposada. Algun TW addicional es podria obtenir també en el futur amb avenços tecnològics plausibles, a partir de la conversió d'energia tèrmica oceànica. D'altra banda, l'escalfament i la refrigeració solar passiva, l'ús d'heliòstats i de panells fotovoltaics domèstics i l'extracció sostenible de biomassa dels boscos són fonts potencialment importants de suport energètic a una futura energia primària.

L'article estudia les regions més adequades per a la construcció dels parcs eòlics i les plantes solars, així com l'espai es requereix. Prenent la Unió Europea com a referència, la instal·lació dels molins eòlics requeriria l'ús d'un 3,5 % de la plataforma continental, i un estat com Espanya tindria un 7,5 % del territori ocupat per parcs eòlics. Una fracció visible dels deserts subtropicals seria ocupada per les centrals de concentradors solars.

Una iniciativa en línia amb aquesta proposta està sent promoguda per la fundació Desertec, que ha posat d'acord dotze firmes industrials i diversos països del Magrib per subministrar energia a Europa cobrint uns 6000 km<sup>2</sup> de desert amb plantes concentradores. Aquesta mena d'iniciatives possibilitarien una nova forma de cooperació econòmica real entre països desenvolupats i països en desenvolupament que són rics en sol i vent, amb beneficis tangibles per a ambdues parts.

D'altra banda, l'Estat espanyol és líder en les dues tecnologies principals de la solució proposada, molins eòlics i

concentradors solars, i podria aprofitar aquesta experiència industrial per exportar-la a tercers països.

L'article estudia també els requeriments materials per a la generació, per al transport a llarga distància de l'energia elèctrica i per a un futur sistema de transport basat en electricitat. S'ha obtingut l'ordre de magnitud dels principals materials que requeriria la solució proposada. Aquestes quantitats s'han comparat amb les reserves geològiques actuals dels respectius materials. En línies generals, la solució proposada sembla tècnicament viable, però implementar-la comporta una sèrie de conseqüències importants per al futur del nostre sistema econòmic. Primer, la necessitat d'una gairebé completa electrificació de la nostra societat. Aquesta electrificació està fortament limitada per la disponibilitat de materials. Per a la solució proposada, els materials bàsics són acer, ciment, nitrats, neodimi, coure, alumini, liti, níquel, zinc i platí. Acer, ciment, alumini i zinc no són factors limitants, però la resta imposen pressions serioses sobre l'ús de les reserves existents.

En particular, el liti, el níquel i el platí es podrien convertir en materials limitants per al futur parc de vehicles si no s'aconsegueixen desenvolupar bateries recarregables eficients basades en zinc i aire. Bateries basades en liti o en níquel exigirien un sistema de reciclatge industrial d'aquests metalls molt més efectiu que l'actual i, tanmateix, el parc de vehicles s'hauria de reduir pel que fa al nombre actual en uns 1000 milions de vehicles a escala mundial. Tal reducció seria del 50 % si les bateries haguessin de ser només de liti.

Alguns generadors eòlics usen neodimi, de símbol Nd, una terra rara que no és escassa però que és produïda a ritmes molt lents, i gairebé enterament per un sol país, Xina. Per aquest motiu, caldria que, prudentment, es plantegés el desplegament a gran escala de turbines eòliques usant turbines amb imants no permanents, que no n'utilitzen. Hi ha alternatives tecnològiques que eviten l'ús de neodimi i d'altres terres rares tant en generadors com en motors elèctrics.

Una altra conclusió important és que el 60 % de les reserves actuals de coure s'haurien d'emprar en la implementació de la solució. Això deixa poc marge per a creixements addicionals de la producció energètica renovable, a causa de la limitació d'aquest metall fonamental. Aquest metall limitant, juntament amb els esmentats abans per al parc mòbil, podrien constituir una barrera física que impossibilitaria la continuació de l'habitual creixement exponencial del consum d'energia.

Confrontats amb les esmentades limitacions materials i amb sistemes de reciclatge que no poden ser 100 % eficients, el creixement econòmic seria possible en el futur només si: a) gradualment reduïm la demanda agregada (si és possible mantenint els estàndards vitals), mitjançant la millora de l'eficiència de l'ús de materials i canvis

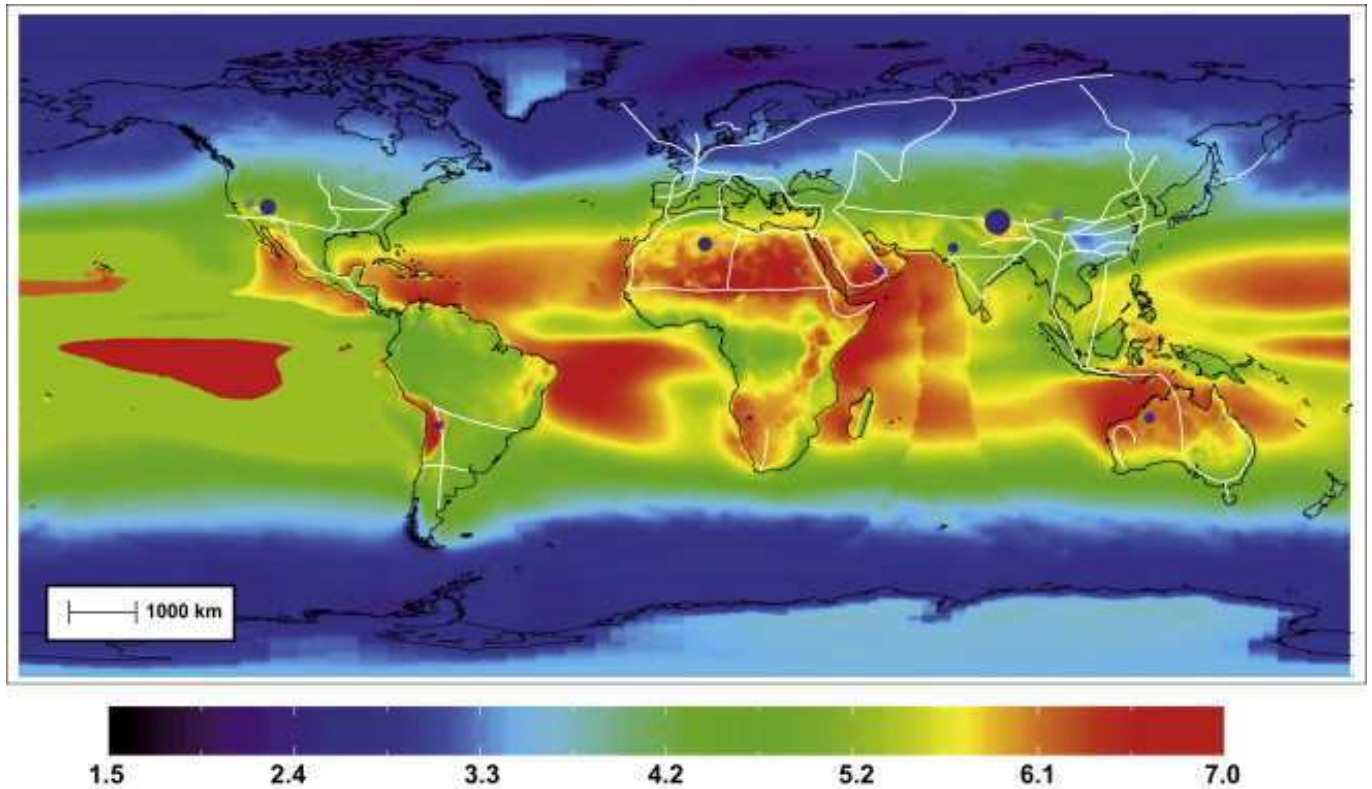


Figura 2: Mitjana anual (juliol de 1983-juny de 2005) de la insolació incident sobre una superfície horitzontal en kWh/m<sup>2</sup>/dia. Les dades han estat descarregades de la meteorologia de superfície de la NASA (SSE, <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>, versió 6.0). Gris i punts blaus tenen el doble d'espai que les àrees ocupades pels punts reals de les estacions de CSP (centrals tèrmiques de concentració, de les sigles en anglès) per millorar la llegibilitat de la figura. Les línies blanques representen les principals línies de la xarxa de distribució. L'escala de longitud correspon a la latitud 45°N. (Extret de García-Olivares et al., 2012)

en les pautes d'activitat i el disseny dels sistemes; b) trobem noves fonts dels materials limitants (per exemple, fonts extraterrestres); o c) fem servir materials que puguin ser regenerats mitjançant recursos primaris indefinidament renovables (per exemple, basats en energia solar) a, almenys, la taxa a la qual els materials són consumits amb reciclat. No obstant això, no és clar que aquestes alternatives siguin assolibles en algun moment.

Finalment, les taxes de creixement de població s'haurien d'adaptar ràpidament a un escenari de producció estacionària de potència energètica. Aquest escenari, que ja va anticipar Kenneth Boulding amb el nom d'economia de nau espacial, és incompatible amb l'escenari, dominant fins fa pocs anys, de creixement exponencial continuat. És probable que la coneguda metàfora de «recuperar el camí del creixement» tingui els dies comptats.

No obstant tot això, l'única alternativa visible és una solució renovable. Per això, una solució com la proposada s'hauria d'implementar immediatament. El moment de començar l'enorme repte tecnològic que exigeix el desplegament d'una solució renovable és ara, quan la TRE social (taxa de retorn energètica, és a dir, energia produïda per

la societat dividida per energia consumida per produir-la) és encara alta, i les necessitats socials bàsiques no estan competint amb la indústria per les inversions de capital.

Energia nuclear, gas i gasificació de carbó podrien ajudar durant algunes dècades a mitigar el decreixement general dels combustibles fòssils, però aquestes dècades haurien de ser emprades a construir la solució definitiva. Si ho haguéssim de fer en trenta anys, això exigiria una producció d'acer lleugerament més gran que el consum actual d'acer de tota la indústria automobilística mundial. Atès que una part important de la indústria s'hauria de posar al servei de la construcció de la solució, en detriment d'altres possibilitats, seria necessària la intervenció governamental i legislativa, la qual cosa ens portaria a un escenari més similar a una economia de guerra que a la nostra coneguda economia de mercat.

Els reptes que suposen una iniciativa com la proposada són monumentals, però després del pic petroler el temps no corre a favor nostre. En aquest sentit, doncs, la societat necessitarà, cada cop més urgentment, noves generacions de tècnics i científics que siguin capaços de gestionar, des del punt de vista que ens dóna la física, els

diversos problemes específics que vagin sorgint en aquesta transició des de l'era dels combustibles fòssils cap a uns temps en què es prioritzarà la limitació imposada per la natura i, per tant, on es tinguin en compte les limitacions de recursos del sistema socioeconòmic. Per això, autoritats i societat civil hauran de prendre mesures per iniciar ja la transició al nou sistema, i fer-ho sense confiar en pegats temporals o en futurs miracles tecnològics.

## Bibliografia

[1] M. KING HUBBERT, *Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Presented before the Spring Meeting of the Southern District Division of Production*, American Petroleum Institute, San Antonio, Texas, March 8, 1956. Publication No. 95. Houston: Shell Development Company, Exploration and Production Research Division, (1956).

[2] GARCÍA-OLIVARES, A. J. BALLABRERA-POY, E. GARCÍA-LADONA, A. TURIEL, A global renewable mix with proven technologies and common materials, *Energy*

*Policy*, **41**, 561-574 (2012).

[3] HIRSCH, R., R. BEZDEK and R. WENDLING, *Peaking of World Oil Production: Impacts, mitigation and risk management*, US Government Report, (2005).

[4] HIRSCH, R., Mitigation of maximum world oil production: Shortage scenarios, *Energy Policy*, **36**, (2) 881-889. (2008).

[5] JACOBSON, M.Z., DELUCCHI, M.A., A path to sustainable energy by 2030, *Scientific American*, **301**, (5) 58-65, (2009).

[6] MURRAY, J., D. KING, Oil's tipping point has passed, *Nature.*, **481**, 433-435 (2012).

[7] SOVACOOOL, B.K., WATTS, C., Going completely renewable: is it possible (let alone desirable), *The Electricity Journal*, **22**, (4), 95-111, (2009).