

TRANSICIÓ ENERGÈTICA: ANÀLISI I SOLUCIONS

CARLES RIBA ROMEVA, enginyer industrial i professor de la
Universitat Politècnica de Catalunya

19 de gener de 2015

Introducció

L'associació que presideixo, CMES (Col·lectiu per a un Nou Model Energètic i Social Sostenible), es va constituir el juliol de 2012. Ara som uns setanta membres i mantenim contacte amb un centenar llarg més de persones. Som un conjunt de professionals de diverses àrees (tot i que dominen els enginyers) que, davant de la inquietud que ens genera veure'ns abocats a una crisi energètica i social sense precedents, volem reflexionar sobre les alternatives i incidir en la seva solució.

El desencadenant d'aquesta situació és, fonamentalment, la crisi dels recursos energètics no renovables (combustibles fòssils i l'urani), els seus límits i els seus impactes ambientals. Nosaltres apostem per un nou model energètic i social sostenible en el temps i respectuós amb el nostre entorn que, ahora, permeti mantenir uns bons nivells de benestar.

CMES ha recorregut dos passos: l'anàlisi i les solucions. L'anàlisi es basa fonamentalment en el meu llibre *Recursos energètics i crisi: La fi de 200 anys irrepitibles*.¹ A partir d'aquesta anàlisi, Ramon Sans Rovira, en col·laboració amb Elisa Pulla Escobar, demostra en el seu llibre *El col·lapse és evitable: La transició*

¹ Carles RIBA ROMEVA (2011), *Recursos energètics i crisi: La fi de 200 anys irrepitibles* (en línia), <<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/12972>> (en català); <<http://www.cdei.upc.edu/en/recursos-energetics-i-crisi/>> (en anglès); (2012), Barcelona, Octaedro (<<https://www.octaedro.com/es/producto:Cos/1/otras-colecciones/transicion-energetica/recursos-energetics-i-crisi/1296>>); (2012), *Recursos energéticos y crisis: El fin de 200 años irrepitibles*, Barcelona, Octaedro (<<https://www.octaedro.com/es/producto:Cos/1/otras-colecciones/horizontes/recursos-energeticos-y-crisis/200>>)

*energètica del segle XXI (TE21)*² que el problema energètic té solució tècnica i econòmica amb les energies renovables.

Ramon Sans respon a la pregunta: si els combustibles fòssils i l'urani entren en un declivi, què ens queda? Doncs, les renovables. A partir d'aquí explora si les renovables són suficients o no. Mostra que són suficients i, a més, econòmicament constitueixen una solució millor que no pas els fòssils. Aquesta és la sorpresa. Conclou que cal fer i és possible fer una transició energètica a renovables.

El llibre *Recursos energètics i crisi* es basa fonamentalment en dades sobre energia dels diferents països del món recopilades per l'agència del Govern americà EIA (Energy Information Administration), que depèn del DOE, Department of the Energy. En aquest llibre, les reserves de combustibles no renovables es mesuren en unitats d'energia respecte a la dispersió d'unitats emprada en molta documentació oficial, cosa que facilita estimar les dates d'exhauriment.

Usos de l'energia a escala mundial

Analitzem les dades: actualment la població de la humanitat és d'uns 7.200 milions; vers 1830 s'arribava per primer cop a 1.000 milions; el 1930 pujava a 2.000; el 1960, a 3.000, etcètera. Jo vaig néixer el 1947 acompanyat d'uns 2.500 milions d'habitants i, en el curs de la meua vida, els humans que compartim la Terra pràcticament ens hem triplicat. En aquest temps, la població de Catalunya representa prop de 1/1000 de la humanitat.

L'economia actual es basa fonamentalment en recursos no renovables, que suposen el 83,8% del consum energètic mundial: carbó, petroli, gas natural i urani, per ordre del seu desenvolupament històric. I, fins ara, l'economia i els usos energètics han tingut una forta correlació.

Malgrat l'esforç per desplegar les fonts renovables en els darrers anys, el percentatge de fonts no renovables des de 1980 fins ara (més de tres dècades) tan sols ha baixat algunes dècimes respecte del 83,8%, mentre que, globalment, els usos energètics han augmentat en més d'un 80%. Això fa reflexionar. D'aquests

² Ramon SANS ROVIRA i Elisa PULLA ESCOBAR (2014), *El col·lapse és evitable. La transició energètica del segle XXI (TE21)*, Barcelona, Octaedro (<<https://octaedro.com/es/producto:Cos/1/ensenar/recursos/el-col-lapse-es-evitable/1273>>); (2014), *El colapso es evitable. La transición energética del siglo XXI (TE21)*, Barcelona, Octaedro (<<https://octaedro.com/es/producto:Cos/1/otras-colecciones/con-vivencias/el-colapso-es-itable/109>>).

recursos el més important és el petroli: vers els anys setanta havia arribat a cobrir quasi el 50% del mix energètic i, ara, continua essent el recurs més usat, amb el 35%; després venen el carbó i el gas natural (en conjunt, els combustibles fòssils sumen el 79,5%); finalment, l'urani hi afegeix un moderat 4,3%.

Les renovables sumen la resta del mix energètic mundial, el 16,2%. Quines són les fonts renovables? Doncs, la més important és la biomassa (fonamentalment, llenya del bosc), 8,5% del mix energètic, i constitueix l'única energia per cuinar i escalfar-se de molts pobles d'Àfrica, del sud-est asiàtic i algunes zones d'Amèrica del Sud (total, uns 2.500 milions de persones). Quines altres fonts energètiques resten? Doncs, un 7,7% repartit entre un 6% d'energia hidroelèctrica i 1,7% de les noves energies renovables: eòlica, fotovoltaica, mareomotriu, geotèrmica, etcètera. Aquestes darreres creixen molt ràpidament (eren tan sols el 0,15% el 1980), però estan encara a nivells molt poc significatius.

En el moment d'escriure el llibre *Recursos energètics i crisi* (dades de 2008), els usos mundials anuals d'energia eren de 17,8 TWa (terawatt any = 8,76 milions de milions de kWh) dels quals 15 TWa eren de recursos energètics no renovables; sis anys després, el 2014, ja eren de 19,3 TWa, o sigui que la crisi no ha aturat el creixement, sinó que el ritme ha crescut. En els països desenvolupats (entre ells, Espanya i Catalunya), els usos energètics han baixat moderadament després de la crisi de 2008, però el creixement dels usos energètics en els països emergents han compensat aquestes disminucions.

Reserves de recursos energètics no renovables

El concepte de *reserva* fa referència a la quantitat d'un recurs (no renovable) extraïble en les condicions tècniques i econòmiques de cada moment. La seva avaluació és dinàmica en funció de l'evolució de les tecnologies utilitzades o de les variacions en les relacions de preus; el factor de recuperació (*recovery factor*) indica la part del recurs que s'estima que es pot recuperar. Però, en definitiva, els recursos energètics no renovables del món són finits, la major part ja s'han descobert i avaluat i es troben en fase pròxima al seu declivi.

És convenient preguntar-nos: de quantes reserves de recursos energètics no renovables disposem? Diferents organitzacions internacionals les han avaluat

i, per al 2008, traduïdes a una mateixa unitat són 1.126 TWa repartits com segueix: carbó, 51 %; petroli, 23 %; gas natural, 19 %, i, urani, 6,8 %.

La primera constatació és que les reserves més importants són les de carbó, el recurs més contaminant i de més impacte en el canvi climàtic. No havia desaparegut? Ho ha fet a casa nostra (i a la major part d'Europa) perquè l'hem exhaurit, però continua en el conjunt del món: la Xina consumeix prop de la meitat del carbó mundial; l'Índia, els EUA (Estats Units d'Amèrica), Rússia, Indonèsia, Sud-àfrica, el Japó, Corea, etcètera són grans consumidors de carbó i, excepte els dos darrers, tenen importants reserves. És més, l'ús del carbó és el que creix més en els darrers anys i s'aproxima al del petroli.

Alhora es constata que l'energia nuclear de fissió, més enllà de la seva perillositat i del problema dels residus radioactius, no pot ser la gran solució energètica de futur. Si multipliquéssim l'ús de l'energia nuclear (actualment el 4,3 % del mix energètic mundial), les reserves d'urani s'exhauririen en molt pocs anys. Es pot pensar en l'urani del granit o de l'aigua de mar, però, com es veurà a continuació, no constitueixen nous jaciments.

El procés de transformació de l'urani entre la mena i la barra de combustible és laboriós i consumeix molta energia. Entre d'altres, cal triturar la mena, separar l'urani amb fluor, obtenir l'òxid d'urani (*yellowcake*) i enriquir-lo en l'isòtop fissible U-235 fins a valors de 3 % a 4 % (un 0,7 % en l'urani natural); això fa que, des del punt de vista energètic, el combustible d'urani no sigui tan eficient com es podria pensar ni tampoc lliure de CO₂.

Les matèries amb concentracions d'urani per sota el 0,015 % no es consideren una reserva, ja que l'energia que proporcionen no compensa la que s'utilitza en la seva obtenció (taxa de retorn energètic, o TRE, massa propera o inferior a 1). Per exemple, per alimentar una central nuclear durant un any amb urani extret de granit, caldria processar un bloc de roca de 100 metres d'amplada per 100 d'alçada i per 3 quilòmetres de llargada.

I això també ocorre amb altres fonts energètiques no renovables com ara els hidrocarburs que s'extreuen per *fracking*, formats en el si d'una roca mare no porosa, dispersos en proporcions baixes (generalment inferiors al 5 %) i enterrats a grans profunditats. Les roques mare més permeables han permès l'emigració dels hidrocarburs: si en el seu ascens troben una trampa, es concentren en bosses

de líquid i/o gas i formen els jaciments convencionals; si no la troben, arriben fins a la superfície on es degraden en forma de petrolis extrapesants (com a la faixa de l'Orinoco, a Veneçuela) o de sorres bituminoses (com les d'Athabasca, al Canadà).

Per què no hem anat a buscar aquests hidrocarburs d'esquist fins ara? Perquè són l'última frontera. La tecnologia d'extracció és una meravella. Es fa un pou vertical (d'1 km a 4 km) que, quan arriba a la capa que conté l'hidrocarbur, gira i avança horitzontalment (d'1 km a 2 km) dintre d'ella. Després, s'injecta aigua a altíssima pressió (normalment amb additius contaminants) per fraccionar la roca (*fracking* o *fracturació hidràulica*) i alliberar l'hidrocarbur dels múltiples alvèols de la roca mare. Però els seus impactes ambientals són molt negatius: tot i que una part important surt per la mateixa perforació empesa pels gasos a pressió, el combustible i els líquids del *fracking* s'escapen per tot arreu i sovint contaminen els aqüífers.

La dinàmica d'un pou de *fracking* és com la d'un globus que es desinfla: en el primer moment, la producció és espectacular, però declina molt ràpidament en el temps. Després d'obrir els alvèols d'hidrocarbur de la roca mare, el rendiment del pou sol baixar a la tercera part en el primer any i per sota del 10% en el tercer any. A més, el recurs està tan disseminat en el territori que, per mantenir la producció, cal perforar contínuament nous pous (un efecte de terra cremada). Sovint, els jaciments acaben no essent rendibles.

Per altre costat, la incidència d'aquests recursos d'última frontera són poc significatius a escala global. Per exemple, l'aportació estimada de les reserves de Vaca Muerta (que fins i tot van ser objecte d'expropiació per part del Govern argentí a Repsol YPF) representen uns deu dies de consum mundial. O les estimacions més optimistes que s'han publicat sobre les reserves de l'Àrtic corresponen a uns dos anys i mig de consum mundial.

Seqüència d'exhauriment

Tornem als recursos convencionals, que són els que cobreixen el gruix dels usos energètics d'avui dia. Com s'ha dit, en relació amb els recursos energètics no renovables, les reserves eren el 2008 de 1.126 TWa, mentre que els consums eren d'uns 15 TWa. Dividint l'un per l'altre dona un temps d'exhauriment

d'uns setanta-cinc anys. Però, si no varien les tendències actuals, projectant el creixement de la població i l'augment dels usos d'energia *per capita*, s'arriba a la conclusió que les reserves de recursos energètics no renovables (petroli, gas natural, urani i carbó) s'exhaureixen totalment vers l'any 2060.

La seqüència d'exhauriment mostra que el primer recurs a exhaurir-se serà el petroli vers els anys 2040, el qual suporta el 95 % del transport mundial. Algunes veus al·leguen que es poden obtenir combustibles líquids del carbó sobre la base dels processos de Fischer-Tropsch o del gas natural; però això comportaria la reducció d'aquestes reserves per un factor de 2,5 i uns impactes ambientals i sobre el canvi climàtic descomunals.

Encara cal anotar un altre fet: una part significativa de les reserves mundials acceptades oficialment (i en les quals es basen les dades anteriors) són dubtoses. Per exemple, quan vers els anys 1990 l'Organització de Països Exportadors de Petroli (OPEP) decideix limitar la producció de petroli de cada país per mantenir els preus elevats, ho fa en funció de les reserves de cadascun d'ells. En un moment determinat, Kuwait anuncia que té prop del doble de les reserves fins aleshores acceptades i els restants països de l'OPEP, en lloc de posar en dubte aquest augment, opten per fer increments similars. Total, en pocs anys, les reserves oficials d'aquests països passen de 350 a 650 milers de milions de barrils de petroli, un augment de 300, que es coneix com a «reserves polítiques», sobre 1.300 en el conjunt del món. Més endavant s'inclouen 175 milers de milions de barrils de les sorres bituminoses d'Athabasca i, més recentment, s'hi afegeixen 195 milers de milions de barrils de petrolis extrapesants de la faixa de l'Orinoco, tots ells petrolis de molt difícil explotació i refinament.

Les emissions de CO₂

Si bé els combustibles fòssils han fet possible les societats avançades, també són el nucli de la seva insostenibilitat. Per un costat, l'exhauriment d'aquests recursos amenaça la seva continuïtat i, per altre costat, la seva combustió, a més de contaminació, genera emissions de gasos d'efecte hivernacle que causen un canvi climàtic de conseqüències encara desconegudes.

En el moment de plantejar el meu llibre *Recursos energètics i crisi* vaig pensar on calia posar l'èmfasi: en l'energia o en les emissions? A diferència de la major part

d'instàncies internacionals, vaig inclinar-me per l'energia. Tot i que, a la llarga, el canvi climàtic pot tenir conseqüències més irreversibles, vaig pensar que mentre les persones perceben que les pitjors conseqüències del canvi climàtic són a llarg termini, una fallada de l'energia té conseqüències immediates i, per tant, una reacció més decidida; a més, amb la transició energètica vers les renovables també es posa la solució al canvi climàtic. Actualment, però, del canvi climàtic s'està canviant la percepció com a problema molt present, degut a la constatació en l'àmbit mundial dels seus efectes, corroborats pels acords del COP21 de París.

Quines són les emissions de CO₂ a l'atmosfera a causa dels combustibles fòssils? Doncs, uns 32.000 milions de tones anuals. D'aquestes, unes 6.000 tones (amb valors relativament estables des de 1980) les emet Amèrica del Nord per a una població (amb Mèxic) d'uns 450 milions d'habitants; unes 4.000 més (també amb valors relativament estables) les emet Europa amb uns 600 milions d'habitants. Però, el que avui dia ho trastoca tot és Àsia, que, amb uns 4.800 milions d'habitants, ha passat d'unes emissions de menys de 4.000 milions de tones el 1980 fins a unes de 16.000 milions de tones l'any 2012 (i pujant); Euràsia, Orient Mitjà, Amèrica del Sud i Àfrica, amb valors molt més moderats, sumen la resta de les emissions.

És lògic que ens preguntem sobre el disbarat que estem fent. Com es controla tot això? Amb el seu capteniment en relació amb les emissions, veig les grans agències mundials com aquell metge que procura pal·liar el dolor, però que no indaga (o no vol veure) quina és la causa de la malaltia. Tot i que poso l'èmfasi en les fonts d'energia, penso que, a la llarga, les emissions de CO₂ tindran un impacte molt gran a escala mundial. I, a més, l'efecte inèrcia del sistema climàtic farà molt difícil i llarga (segles) la reversió.

Factures exteriors de fòssils: guanyadors i perdedors

En el context actual de crisi de recursos energètics no renovables, el text *Factures energètiques dels combustibles fòssils*³ proposa el concepte de *factura*

³ Carles RIBA ROMEVA (2015), *Factures energètiques dels combustibles fòssils. Dependències i desigualtats*, Barcelona, Octaedro (<<https://octaedro.cat/ca/producto:Cos/1/miscel-lania/horitzons/factures-energetiques-dels-combustibles-fossils/1297>>); (2015), *Facturas energéticas de los combustibles fósiles. Dependencias y desigualdades*, Barcelona, Octaedro (<<https://www.casadellibro.com/ebook-factura-energeticas-de-los-combustibles-fosiles-ebook/9788499216928/2528299>>)

exterior de fòssils, que és la base argumental del llibre *El col·lapse és evitable*⁴ en el plantejament de les solucions i de l'avantatge de les energies renovables (sense factures exteriors de fòssils) davant del vell sistema fòssil i nuclear.

Què són les factures exteriors de fòssils? Partint de la producció i consum de fòssils d'un territori (país o regió), la diferència és el balanç de fòssils. Si aquest balanç és positiu, vol dir que produeix més fòssils que no en consumeix, i, si és negatiu, vol dir que consumeix més que no en produeix. Si aquest balanç es multiplica pels preus internacionals de cada fòssil, s'obté la factura exterior de fòssils.

Degut a acords bilaterals o altres causes, pot ser que la factura exterior de fòssils no quedi reflectida directament en el producte interior brut del país o regió, però és un valor monetari obtingut sota un criteri uniforme per a tots els territoris que reflecteix els superàvits o dèficits econòmics a causa de l'exportació i/o importació de fòssils.

Hi ha quatre regions excedentàries en fòssils i que ingressen factures exteriors: Orient Mitjà, amb uns 650.000 milions d'euros el 2012; Euràsia (330.000), Àfrica (220.000) i Amèrica del Sud (40.000). Les restants regions són deficitàries en fòssils i paguen factures exteriors: Àsia i Oceania amb 675.000 milions d'euros, Europa (415.000) i Amèrica del Nord (150.000). L'Europa dels vint-i-vuit paga 350.000 milions d'euros per comprar petroli cru i gas natural (equivalent al 40 % del PIB espanyol). Després encara cal refinar, distribuir, comercialitzar i carregar els impostos a aquests productes energètics. Però la factura exterior és diner que entra o se'n va dels països.

Entre els països que paguen hi ha: els Estats Units d'Amèrica, 230.000 milions d'euros anuals; la Xina, 200.000, Catalunya, 8.000; Espanya, 50.000; França, 67.000; Alemanya, 90.000; etcètera. I, entre els països que cobren: Rússia, 280.000 milions d'euros anuals; l'Aràbia Saudita, 270.000; Qatar, 87.000; Noruega, 80.000; Nigèria, 79.000; els Emirats Àrabs Units, 75.000, etcètera.

Fins aproximadament l'any 1990, les factures exteriors de fòssils eren relativament petites, però, a partir d'aleshores, es disparen i tot fa pensar que, si no canvien les tendències actuals, els seus valors aniran augmentant en el futur.

⁴ R. SANS ROVIRA, E. PULLA ESCOBAR (2014).

Per altre costat, des de la crisi de 2008, a causa de la inestabilitat dels preus, les factures energètiques han iniciat unes grans oscil·lacions que són el preludi d'un final de cicle.

També és interessant analitzar el grau d'autoabastiment (o percentatge de la producció de fòssils respecte del consum) dels diferents països i regions. Si és el 100 %, el territori s'autoabasteix al 100 %; si està per sobre, és globalment exportador, i si està per sota, és globalment importador. En les regions exportadores aquest índex és: l'Orient Mitjà, 244 % (produceix 244, exporta 144 i gasta 100); Àfrica, 220 % (consum molt baix); Euràsia, 169 %; i l'Amèrica del Sud, 119 %. I, en les regions importadores, és: Amèrica del Nord, 93 % (produceix 93, importa 7 i consumeix 100); i Àsia i Oceania, 75 %.

I Europa?: 40 % i disminuïnt. I, dintre d'Europa? Europa del Nord, 60,7%; Europa de l'Est, 55,8%; i Europa del Sud (Portugal, Espanya, França, Itàlia, Grècia, Turquia i diverses illes), 7,9 % (produceix 7,9, importa 92,1 i consumeix 100). La situació d'Europa del Sud es tradueix en una enorme factura exterior de fòssils, 230 mil milions d'euros (més de la meitat d'Europa). I Espanya?: el grau d'autoabastiment de fòssils és de 2,9 % i la factura exterior de fòssils és de 50,5 mil milions d'euros anuals (quasi el 5 % del PIB). I Catalunya? 0,5 % i 8 milers de milions d'euros (el 4 % del PIB).

En què estem basant el nostre desenvolupament?

Solució: les energies renovables

Les energies renovables, poden proporcionar la solució? Aquesta és la gran pregunta.

La resposta de Ramon Sans i Elisa Pulla en el seu llibre *Transmissió energètica al segle XXI (TE21)*⁵ és que una transició total a renovables en l'horitzó de 2050 (trenta-cinc anys) és possible tècnicament i econòmicament. El text analitza els casos d'Europa i dels seus principals països (Alemanya, Espanya, França, Itàlia i el Regne Unit) i, la versió catalana, també analitza el cas de Catalunya.

S'hi estableix una projecció dels usos energètics el 2015 (18 TWh en el món; terawatt any = 8,76 bilions de kWh) fins a l'any 2050 (28 TWh en el món);

⁵ R. SANS ROVIRA, E. PULLA ESCOBAR (2014).

l'acumulat és d'uns 900 TWa (valor proper a les reserves sumades de carbó, petroli, gas natural i urani el 2008, 1.226 TWa).

A fi d'analitzar si les fonts d'energia renovable poden constituir una alternativa, presenta estimacions dels principals fluxos d'energia renovable aprofitables en el món: eòlica, 90 TWa; marina, 20 TWa; hidràulica, 13 TWa; geotèrmica, 10 TWa, i biomassa, 8 TWa. Però, sobretot, encara hi ha la radiació solar: la Terra rep del Sol 175.000 TWa dels quals, filtrats per l'atmosfera i els núvols, n'arriben 23.000 TWa sobre terra ferma (els 28 TWa necessaris el 2050 són tan sols el 0,12%). Això mostra que les fonts d'energia renovable són generoses. Cal, però, un sistema energètic totalment diferent de l'actual.

Comptabilització inadequada i fal·làcies

L'actual comptabilitat energètica i econòmica és inadequada per descriure els canvis que comporta la transició energètica. Alhora, sovint s'acompanya d'un conjunt de fal·làcies per perllongar el sistema fòssil i nuclear.

Comptabilitat energètica

En el sistema energètic actual, una gran majoria de recursos primaris (fòssils, l'urani, també biomassa) són finits i d'estoc i, quan es transformen en electricitat o motricitat, recorren itineraris que inclouen processos termodinàmics. El rendiment mitjà a escala mundial en la generació d'electricitat és del 33% (es perden dues terceres parts) i, en la motricitat, és d'un 20% (es perden quatre cinquenes parts); en els usos tèrmics els rendiments són més elevats. Les pèrdues en els processos termodinàmics són una part molt important del sistema energètic mundial.

El problema és que alguns estudis sobre les energies renovables parteixen d'una dada no real: suposen que l'energia que caldria obtenir a partir de fonts d'energia renovables és la mateixa que la que actualment prové de l'energia primària dels combustibles fòssils. No és així, ja que, del total de l'energia dels recursos fòssils consumits, se n'aprofita una part molt petita mentre que, de l'electricitat renovable, sense processos termodinàmics se n'aprofita una part molt més important. Aquest és un dels punts essencials que cal tenir en compte.

Les energies renovables provenen de fluxos naturals. No es basen en recursos primaris finits que es consumeixen, com és el cas del petroli o del gas. La radiació solar o el vent existeixen tant si hi és present o no una placa fotovoltaica o una turbina eòlica. En tot cas, l'eficiència del captador redundarà en la seves dimensions i el seu cost. És per això que en les energies renovables es parla de calor o electricitat generada, però no es fa referència al recurs primari.

Comptabilitat econòmica

En el sistema energètic actual, basat fonamentalment en recursos no renovables, a més de cobrir el cost dels equipaments i instal·lacions per a l'obtenció, transformació i transport, també cal pagar els recursos primaris que es consumeixen (petroli, carbó, gas natural, urani) dels quals, tal com s'acaba d'explicar, tan sols se n'aprofita una part.

En canvi, en la transició vers les energies renovables, tan sols cal pagar els equipaments i instal·lacions, ja que les fonts primàries (els fluxos naturals) són gratuïts i permanents. Com es veurà més endavant, l'estalvi de no haver de pagar uns recursos primaris finits és un dels elements cabdals que justifiquen la transició vers les fonts renovables.

De forma incorrecta, en la comparació econòmica entre un sistema energètic fòssil i nuclear i un sistema energètic renovable, se sol comparar tan sols els costos d'inversió i s'obvien els costos dels combustibles en el primer sistema.

La falsa solució de la fusió nuclear

En diverses instàncies mundials hi ha una gran expectativa en la fusió nuclear (reacció de dos nuclis atòmics —normalment deuteri i triti— per formar un nucli més pesant —en aquest cas d'heli—) amb l'alliberament d'una gran quantitat d'energia. El projecte internacional ITER (Reactor Experimental Termonuclear Internacional), que s'està desenvolupant a França, n'és la iniciativa més destacada.

Encara és incert si aquesta tecnologia esdevindrà operativa, si bé la investigació continua el seu curs, tot i els retards. En tot cas, el declivi dels recursos fòssils i la crisi climàtica seran crítiques molt abans que, eventualment, aquesta tecnologia esdevingui operativa i pugui ser implantada a gran escala; per tant, caldrà passar necessàriament per l'alternativa de les energies renovables.

Tecnologies de baix carbó (o low carbon)

S'engloben sota aquesta epígraf l'energia nuclear i, també, l'ús de combustibles fòssils combinat amb l'enterrament del CO₂ (amagar-lo sota l'estora). Cal fer dues precisions.

En primer lloc, el cicle de vida de l'energia nuclear no està lliure de carboni. Sí bé ho és en la seva operació, quan es «cremen» les barres de combustible d'urani i es produeix calor, no ho és en la construcció i desmantellament de la central (de costos energètics molt elevats) o en l'obtenció i fabricació del combustible d'urani.

I, en segon lloc, l'argücia d'enterrar el carboni presenta a la pràctica unes dificultats que, fins ara, cap projecte ha superat. En cas d'èxit, la solució és d'alt risc ja que, moviments sísmics o volcànics, podrien alliberar el CO₂ i produir un xoc climàtic com el d'alguna de les grans extincions. De fet, la natura ja s'ha encarregat d'acumular el CO₂ a sota terra de manera molt més segura en forma de carbó, petroli i gas natural.

Els itineraris energètics

La formulació dels itineraris energètics (o *energy path*) que realitza Ramon Sans en el seu llibre és una ajuda per avaluar les diferents tecnologies i els canvis que comporta la transició energètica: reflecteix el camí que recorre una energia des del recurs primari fins a la seva utilització per mitjà d'una seqüència d'estats i transformacions; en cada una de les transformacions s'indica el seu rendiment i les emissions de CO₂.

Per exemple: 100 MJ (milions de joule) de petroli cru, un cop refinat, dona lloc a 87 MJ de gasolina que, en alimentar un motor Otto, proporciona 19 MJ d'energia a l'eix de les rodes (rendiment 19%), amb unes emissions globals de 7,08 kg de CO₂; o 100 MJ de mineral de carbó dona lloc a 80 MJ de combustible de carbó que, cremat en una caldera, proporciona 64 MJ de vapor d'aigua que, aplicats a una turbina, dona lloc a 31 MJ d'energia mecànica al seu eix que, finalment, per mitjà d'un generador elèctric, es transforma en 28 MJ d'energia elèctrica (rendiment 28%) que envia a la xarxa, amb unes emissions globals d'11,9 kg de CO₂.

Les xifres d'aquests itineraris mostren aquells que són convenients i els que no ho són. Per exemple, mentre l'aplicació de la biomassa per a usos tèrmics pot tenir un rendiment global del 79 %, l'ús de la biomassa per obtenir biocombustible per aplicar a un motor d'explosió pot tenir un rendiment global de l'11 %. És un camí equivocat.

Els usos energètics globals en les societats desenvolupades estan disminuint, fet que es deu a diversos factors. Un d'ells és la percepció creixent dels límits del sistema energètic no renovable (fòssils i urani) i l'elevació dels preus que fomenten polítiques d'estalvi; un altre, no menys important, és l'augment de fonts energètiques que generen directament electricitat (hidroelèctrica, eòlica, fotovoltaica) davant de les que proporcionen calor (combustibles fòssils i urani), les quals milloren el rendiment global del sistema. En efecte, s'eviten els processos termodinàmics de baix rendiment que transformen l'energia tèrmica en electricitat (de tres a un) o en mobilitat (de quatre o cinc a un).

Per exemple: els vehicles amb motors tèrmics, alimentats avui dia en el 95 % dels casos amb derivats del petroli, en el futur seran substituïts per vehicles elèctrics alimentats per bateries, piles de combustible o sistemes de tròlei; o moltes aplicacions tèrmiques de baixa temperatura (calefaccions, aigua calenta sanitària, certs processos industrials) en el futur es resoldran amb bombes de calor impulsades per electricitat.

En no implicar ni combustió ni transformacions termodinàmiques, les principals energies renovables donen lloc a una sensible millora del rendiment global del sistema energètic i eviten les emissions de gasos d'efecte hivernacle. La transició vers les fonts d'energia renovable representa un enorme pas vers el sistema energètic sostenible del futur.

L'enginyer Pep Puig i Boix parla de la fi de l'era del foc.⁶

⁶ Pep PUIG I BOIX (21 juliol 2014), «El fin de la era del fuego (fósil-nuclear)», *Energías Renovables* (en línea), <<https://www.energias-renovables.com/pep-puig/el-fin-de-la-era-del-fuego-20140721>>.

Les factures exteriors de fòssils

En la citada obra *El col·lapse és evitable*⁷ s'argumenta a favor de la transició energètica vers les renovables (especialment en els països sense recursos fòssils), partint de les factures exteriors de fòssils, que els preus puguen i les transferències creixen.

Als països sense recursos fòssils que no facin la transició energètica, la factura exterior de fòssils anirà creixent i el valor acumulat es farà enorme sense construir l'alternativa; en canvi, als països que facin la transició energètica, tot i que hauran de pagar la inversió per crear el nou sistema renovable, la factura exterior de fòssils anirà decreixent i el valor acumulat serà molt menor.

Per avaluar les alternatives, Ramon Sans construeix un model que denomina *transició energètica del segle XXI* (TE21) i el compara amb seguir amb les tendències actuals. Pressuposa que els sistemes (amb TE21 i sense TE21) evolucionen progressivament entre 2015 i 2050, que els preus internacionals dels recursos energètics no renovables (fòssils i urani) augmenten un 5 % anual, amb les hipòtesis complementàries següents:

- *Amb TE21* (impulsada per una acció política): el consum de fòssils i urani disminueix progressivament fins a zero l'any 2050 i els usos de les energies renovables creixen progressivament fins a cobrir el 100 % de les necessitats el 2050 (a efectes comparatius, els mateixos usos energètics globals avaluats en el cas *sense TE21*).
- *Sense TE21* (en absència d'una política transformadora): el consum de fòssils i nuclear (empès per certes polítiques d'estalvi) disminueix l'1 % anual; els usos de les energies renovables (seguint l'actual tendència) creix l'1,5 % anual.

Es pot objectar que algunes d'aquestes hipòtesis (com ara, els augments dels preus dels fòssils) no es compliran. Tanmateix, encara que els valors de les hipòtesis variïn, els balanços econòmics resultants són sempre clars a favor de la transició energètica.

En el cas de Catalunya, amb hipòtesis anteriors de creixement de les energies renovables (1,5 %) i de reducció global (-1 %), els usos energètics globals

⁷ R. SANS ROVIRA, E. PULLA ESCOBAR (2014).

evolucionen de 28,3 GWa (gigawatts any, giga = 10⁹) el 2015 a 22,8 GWa l'any 2050.

Sense TE21: en aquesta hipòtesi, la factura exterior de fòssils acumulada que hauria de pagar Catalunya fins al 2050 seria de 630 G€ (G€ = milers de milions d'euros; unes tres vegades el PIB català). La mitjana d'aquests trenta-cinc anys seria del 10 % del PIB, quan la factura exterior de fòssils actual és del 4 %.

Amb TE21: en aquesta nova hipòtesi, la factura exterior de fòssils fins al 2050 disminueix fins a 280 G€. Alhora, sobre la base de l'anàlisi d'instal·lacions d'energies renovables operatives, es constata que la inversió per aixecar el nou sistema renovable és de 70 G€ (G€ = milers de milions d'euros; uns 2 G€ anuals).

En resum: mentre que *sense TE21*, la factura exterior de fòssils acumulada el 2050 seria de 630 G€ i Catalunya continuaria dependent dels combustibles fòssils de l'exterior (si el mercat internacional encara els proporciona); *amb TE21*, la factura exterior de fòssils acumulada, més la inversió en el nou sistema energètic renovable seria de 350 G€ (280 G€ menys) i s'hauria creat un sistema energètic renovable basat en recursos propis. A l'inici de la transició energètica caldria fer un esforç econòmic una mica superior que l'actual, però, després de quatre o cinc anys, l'estalvi en la factura exterior de fòssils compensaria les inversions en el nou sistema renovable.

Per altre costat, amb la transició energètica creix l'energia i les solars termoelectriques podrien intercalar-se entre elles captada directament com a elèctrica, disminueix l'energia tèrmica dels combustibles i el sistema energètic esdevé globalment més eficient. Ramon Sans avalua les necessitats energètiques de Catalunya el 2050 en 5,5 GWa d'usos elèctrics, més 1,84 GWa d'usos tèrmics i 2,84 GWa de transport marítim i aeri, als quals caldria trobar alternativa en el futur. Atès que l'electricitat renovable s'obté de fluxos de la naturalesa intermitents i/o aleatoris, són necessaris sistemes de gestió i d'emmagatzematge que, en general, disminueixen el rendiment global del sistema. Atenent a aquestes consideracions, l'autor proposa duplicar la potència instal·lada respecte a l'estrictament necessària per atendre les necessitats d'electricitat. Aplicat a Catalunya són 11 GWa de potència a instal·lar.⁸

⁸ R. SANS ROVIRA, E. PULLA ESCOBAR (2014).

L'aplicació de la TE21 a l'Europa dels vint-i-vuit dona que la factura exterior de fòssils acumulada entre 2015 i 2050 seria de 32.500 G€ i l'estalvi amb la transició energètica TE21 seria de 16.500 G€. L'aplicació a Alemanya donaria 6.860 i 2.350 G€, respectivament, i l'aplicació a Espanya, 4.020 i 1.760 G€, respectivament.

Superfície de captació i costos d'inversió

Igualment, sobre la base dels requeriments d'usos elèctrics, s'estableix un mètode per avaluar les superfícies de captació necessàries i els costos de les inversions.

La superfície bruta de captació

Partint d'instal·lacions operatives, s'obté per a cada tecnologia la superfície necessària per megawatt elèctric a instal·lar (ha/GW). Multiplicant per la corresponent potència a instal·lar en cada un dels components del mix energètic, s'obté la superfície de captació necessària. A Catalunya, els 11 GW de potència a instal·lar requereixen una superfície de captació de 60.000 hectàrees; si bé les turbines eòliques han d'estar distanciades per no fer-se mútuament ombra de vent, les solars termoelectriques i fotovoltaïques es podrien intercalar entre elles sense pràcticament ocupar més sòl; amb això, Ramon Sans argumenta que la superfície necessària es redueix a 40.000 hectàrees (l'1,22 % del territori català); com a referència, el municipi de Barcelona ocupa unes 10.000 hectàrees i la superfície artificialitzada de Catalunya (ciutats, infraestructures, mines a cel obert) és d'un 210.000 hectàrees.

El cost d'inversió del sistema renovable

Anàlogament, partint d'instal·lacions operatives, s'obté per a cada tecnologia els costos d'inversió per gigawatt elèctric a instal·lar (G€/GW). Multiplicant per la corresponent potència a instal·lar en cada un dels components del mix energètic, s'obté el cost d'inversió global. A Catalunya, els 11 GW de potència a instal·lar tenen un cost de 55.000 milions d'euros. Si s'hi afegeix el preu del sòl, modificacions de la xarxa i altres, totalitza un cost global a Catalunya de 70.000 milions d'euros durant els trenta-cinc anys (2015-2050) de la transició energètica (una inversió de 2.000 milions d'euros anuals; prop de l'1 % del PIB,

o 267 euros *per capita* i any); com a terme de referència, recordem que la factura exterior de fòssils és d'uns 8.000 milions d'euros anuals (4% del PIB).

Aquestes són les dades de Catalunya. Quines són les superfícies i les inversions per efectuar la transició energètica TE21 a Europa? L'Europa dels vint-i-vuit requereix una superfície de 6.060 milers hectàrees (1,38% de la seva superfície) i el cost de la inversió puja a 7,4 bilions (10¹²) euros (14.700 euros per habitant en trenta-cinc anys). Entre els països europeus més grans, el més crític és Alemanya: requereix una superfície de 1.290 milers d'hectàrees (3,62% de la superfície del país) i el cost de les inversions s'eleva a 1,76 bilions d'euros (21.400 euros per habitant en trenta-cinc anys); i el més favorable és Espanya: requereix una superfície de 310 milers d'hectàrees (0,62% de la superfície del país; per la seva baixa densitat de població) i el cost de les inversions s'eleva a 0,47 bilions d'euros (10.100 euros per habitant en trenta-cinc anys), afavorit per l'elevada insolació.

Reflexions finals

Avui dia, el sistema energètic mundial encara se sustenta un 84% en combustibles fòssils i l'urani, recursos no renovables, contaminants i perillosos. Davant de l'actual crisi energètica i ambiental a escala planetària (dificultats creixents en el subministrament i causa del canvi climàtic), es fa absolutament necessari abordar la transició vers les fonts energètiques renovables.

Les anomenades *tecnologies de baix carboni* (contemplades en molts dels àmbits internacionals, entre els quals la Unió Europea) ens semblen una gran equivocació. L'energia nuclear convencional, a més dels enormes riscos que comporta i el problema irresoluble dels residus radioactius, no disposa de suficients reserves d'urani per ser una alternativa; i l'enterrament del CO₂ és tan sols un engany per allargar artificialment l'era del carbó.

Per als països sense recursos fòssils, la transició vers fonts energètiques renovables és encara més determinant, ja que la compra d'aquests recursos energètics comporta un drenatge monetari continu vers els països productors amb un empobriment i una dependència creixent de la pròpia economia.

El model de transició energètica del segle XXI (TE21), plantejat en un horitzó màxim de 2050, justifica aquesta opció sobre la base de l'avaluació de dos

paràmetres fonamentals: la superfície de captació necessària (es demostra que és possible en pràcticament tots els països) i l'avaluació econòmica dels costos d'inversió i operació (es demostra que és molt més favorable que no fer-la).

Aquesta darrera justificació econòmica a favor de la transició energètica comença a ser reconeguda en altes instàncies internacionals. En aquest sentit, el document *Energy technology perspectives 2014* d'IEA (Agència Internacional de l'Energia)⁹ manifesta que és més que compensat per més de 135 trilions de dòlars en estalvi de combustible, cosa que suposa un estalvi net de 71 bilions de dòlars. Fins i tot amb una taxa de descompte del 10%, l'estalvi net arriba als 5 bilions de dòlars americans: «Els 44 bilions de dòlars de cost addicional per descarbonitzar el sistema energètic en l'escenari de 2 graus (2DS) a 2050 queda més que compensat pels 115 bilions de dòlars d'estalvi en combustible, cosa que suposa un estalvi net de 71 bilions de dòlars.»

⁹ IEA (2014), *Energy technology perspectives 2014* (en línia), <https://www.iea.org/media/news/2014/ETP14_factsheets.pdf>.