



Recursos energètics i crisi

La fi de 200 anys irrepetibles

Carles Riba Romeva



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Recursos energètics i crisi

La fi de 200 anys irrepetibles

Carles Riba Romeva



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Primera edició: juliol de 2011

© Carles Riba Romeva, 2011



© Iniciativa Digital Politècnica, 2011
Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC
Jordi Girona Salgado 31,
Edifici Torre Girona, D-203, 08034 Barcelona
Tel.: 934 015 885 Fax: 934 054 101
www.upc.edu/idp
E-mail: info.idp@upc.edu

Disseny de la coberta: Ernest Castelltort

ISBN: 978-84-7653-590-5

Agraïments

Aquest text és el resultat d'un meu interès creixent pel tema de l'energia i del medi ambient amb relació al qual he rebut l'estímul de moltes persones en molts àmbits.

Un d'ells és l'àmbit de col·laboració universitat/empresa a través del Centre de Disseny d'Equips Industrials de la Universitat Politècnica de Catalunya (CDEI-UPC) on he rebut l'acompanyament dels col·laboradors i, molt especialment, de Carles Domènech, Sònia Llorens, Huáscar Paz, Elena Blanco, Andreu Presas i Sònia Mestre, que agraeixo. Els projectes d'innovació realitzats en col·laboració amb empreses, com ara Girbau, Ros Roca, Lloveras, Industrias Puigjaner, Comexi, Matachana, Reverté o Automat, i el nou posicionament estratègic del Centre han aportat molts elements de reflexió en la redacció d'aquest text.

També m'ha impulsat l'interès de molts professors i alumnes de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la qual sóc professor, així com de doctorands i assistents al màster professional Enginyeria Mecànica i Equipament Industrial. Dintre de l'àmbit universitari, esmentar especialment a l'Institut de Sostenibilitat de la UPC i els seus responsables que han acollit la publicació i la difusió d'aquest treball.

Un altre àmbit que m'ha ajudat a la reflexió és el món dels estudis locals al qual estic vinculat a través del Centre d'Estudis Comarcals del Baix Llobregat i de la Coordinadora de Centres d'Estudi de Parla Catalana, dels quals sóc president i vicepresident. Són un entorn de percepció directa de les realitats on es treballa amb il·lusió, generositat i sensibilitat, i on es desenvolupen relacions humanes molt intenses.

També estic agraït a moltes persones que, coneixent el meu treball, m'hi han fet comentaris valuosos, m'han fet arribar informacions o m'han demanat intervencions i conferències. A risc d'oblidar-ne algunes, voldria citar: José Luís Atienza Ferrero, Rafael Boronat, Jaume Bosch Mestres, Marta Bosch, Roser Busquets, Miquel Cererols, Daniel Clos, Judit Coll, Joaquim Corominas, Felip Fenollosa, Rosendo Fernández, Dídac Ferrer, Narcís Figueras, Josep Fontana, Gabriel García Acosta, Pere Girbau Bover, Joan Ramon Gomà, Esther Hachuel, Eusebi Jarauta, Maria del Carme Jiménez, Joan Ramon Laporte, Jordi Martínez Miralles, Heriberto Maury, Josep Lluís Moner, Belén Pascual, Miquel Peiró, Agustí Pérez, Ramon Plandiura, Lourdes Plans, Reies Presas, Ricard Presas, Josep Puig Boix, Marta Pujadas, Carme Renom, Pau Riba, Valeriano Ruiz, Josep Santesmases, Jaume Seda, Jaume Serrasolses, Jordi Sicart, Toni Sudrià, Enric Tello, Carme Torras, Eva Torrents, Enric Velo, Francesc Viso i Joan Vivancos.

Vull mencionar de forma especial Ramon Sans Rovira, company enginyer i amic des de l'època d'estudiant, amb qui he col·laborat durant anys quan ell era director tècnic de Girbau, pel seu seguiment i suport constants en tot aquest procés i per la voluntat decidida d'obrir el debat a les empreses. I també Elisa Pulla que ha realitzat uns magnífics documents de presentació del contingut del llibre.

Per acabar, vull manifestar que no hauria pogut dur a terme tot aquest treball sense el suport de la meua família: de la meua muller Mercè Renom Pulit, historiadora de gran sensibilitat pels fenòmens socials, que m'ha fet comprendre moltes coses sobre el comportament humà i dels meus fills, Martina, Nolasca i Joana, que, amb el seu company Miquel Ardèvol, són pares del meu primer nét: des de la seva joventut, han seguit en tot moment els meus pensaments i hi han aportat nous elements.

Índex

Part 1 – Recursos d'energia primària

1. Introducció

- 1.1 Motivació i punt de vista
- 1.2 Conceptes bàsics sobre energia
- 1.3 Fonts d'informació
- 1.4 Unitats de mesura
- 1.5 Nova comptabilitat energètica

2. Evolució del consum energètic mundial

- 2.1 Consum energètic de fonts primàries
- 2.2 Consum energètic per regions
- 2.3 Població i energia per càpita

3. Reserves d'energies no renovables

- 3.1 Avaluació de les reserves d'energia
- 3.2 Anàlisi de les reserves de petroli i gas natural
- 3.3 Anàlisi de les reserves de carbó

4. Creixements i projeccions

- 4.1 Divorci entre projeccions de creixement i reserves
- 4.2 Visió a partir de les reserves originàries
- 4.3 El zenit dels diferents combustibles

Part 2 – Energies secundàries (o intermèdies)

5. Els combustibles comercials

- 5.1 D'energies primàries a secundàries
- 5.2 Derivats dels combustibles fòssils i usos
- 5.3 El petroli, recurs estratègic

6. L'electricitat

- 6.1 El sistema elèctric
- 6.2 Producció i consum d'energia elèctrica
- 6.3 Característiques i limitacions de l'electricitat
- 6.4 Noves tecnologies elèctriques

Part 3 – Fonts alternatives d'energia

7. Els combustibles no convencionals

- 7.1 Origen dels combustibles fòssils
- 7.2 Obtenció cada cop més difícil
- 7.3 Petrolis no convencionals
- 7.4 Gas natural no convencional
- 7.5 Combustibles obtinguts per transformació

8. La incerta alternativa nuclear

- 8.1 Dels usos militars als usos civils
- 8.2 Evolució de la producció d'energia nuclear
- 8.3 Avaluació dels recursos d'urani
- 8.4 Consums i impactes de l'energia nuclear
- 8.5 Noves tecnologies nuclears

9. Noves fonts d'energia renovable

- 9.1 Els recursos naturals renovables
- 9.2 Energia solar
- 9.3 Energia hidroelèctrica
- 9.4 Energia eòlica
- 9.5 Energia geotèrmica
- 9.6 Energia dels oceans
- 9.7 Els biocarburants

Part 4 – Els recursos de la Terra

10. Els recursos de la biosfera

- 10.1 Agricultura, ramaderia, pesca i boscos
- 10.2 Petjada ecològica i energia

11. L'atmosfera i el canvi climàtic

- 11.1 Emissions de CO₂
- 11.2 Cicle del carboni
- 12.3 El carboni, l'oxigen i la vida

12. Reflexions finals

- 12.1 Resum de les tendències principals
- 12.2 Canviar el paradigma de desenvolupament
- 12.3 El futur d'Europa: liderar el decreixement

Bibliografia

Principals fonts d'informació utilitzades

Diuen que les civilitzacions humanes fan el millor que poden amb la informació de què disposen. Jo ho matisaria dient que fan el millor que saben amb el coneixement que tenen.

Per a Lluç, el meu primer nét, que acaba de néixer

Part 1

Recursos d'energia primària

Després d'una introducció sobre la motivació per escriure el llibre i algunes puntualitzacions conceptuals, aquesta primera part analitza l'evolució recent i galopant del consum d'energia primària en el món, és a dir, d'aquells recursos de la naturalesa que podem transformar en energia útil per als humans.

Cada un d'aquests recursos té la seva pròpia naturalesa. En primer lloc, hi ha els combustibles fòssils (carbó, petroli i gas natural), en estats naturals diferents (sòlid, líquid, gasós, respectivament) i amb distintes densitats, continguts energètics i formes de transformació, manipulació i transport. També hi ha l'urani, de naturalesa no renovable i que té una explotació completament diferenciada dels anteriors. Finalment, hi ha les nombroses (però no tan disponibles) fonts d'energia renovable (la hidràulica, l'eòlica, la marítima, la biomassa i, la darrere de totes elles, la solar). D'importància molt menor són l'energia geotèrmica, procedent de l'interior de la Terra, i l'energia de les marees, derivada del sistema gravitatori Terra-Lluna.

Així, doncs, per avaluar-ne els consums i les reserves, i fer projeccions (objecte de tres dels capítols d'aquesta part), cal adoptar un patró de mesurament comú. En aquest sentit, és costum de prendre com a magnitud l'energia primària tèrmica potencial. Quan una font d'energia no passa per una transformació tèrmica (per exemple, la hidroelèctrica, l'eòlica o la fotovoltaica), aleshores es mesura per l'energia tèrmica primària que s'hauria necessitat per produir el mateix efecte, en termes de mitjana mundial.

Aquesta primera part, basada en dades de les grans agències d'energia, posa de manifest el creixement enorme dels consums energètics mundials i evidencia que qualsevol de les projeccions de futur que es facin entra en contradicció amb la naturalesa finita de la Terra.

Al primer capítol s'introdueixen les motivacions del llibre i els punts de vista adoptats, es fa un breu desplegament de conceptes sobre energia i algunes precisions sobre les unitats utilitzades i els factors de conversió.

El capítol 2 estudia l'evolució del consum d'energia primària mundial (o el seu equivalent tèrmic) als darrers decennis. Constitueix un primer toc d'alerta sobre el volum i la tendència d'aquesta demanda.

El capítol 3 analitza les reserves (recursos coneguts i que es consideren obtenibles) de les fonts no renovables d'energia primàries (petroli, gas natural, carbó i urani).

I, al darrer capítol d'aquesta part s'analitzen diverses hipòtesis d'evolució del consum i de dinàmiques d'exhauriment dels combustibles fòssils.

1. Introducció

1.1. Motivació i punt de vista

Motivació

En aquest capítol introductori, faig explícita la meva motivació per escriure aquest llibre sobre els recursos energètics i la crisi que vivim.

L'any 2006 vaig rebre una invitació de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colòmbia) per fer una conferència sobre ecodisseny. Era la primera vegada que preparava una dissertació pública sobre temes relacionats amb el medi ambient i això em va obligar a endreçar les meves idees i reflexions en un text intitulat "Principios de ecodiseño. Como proteger nuestro entorno" <<http://www.uninorte.edu.co/divisiones/Ingenierias/IDS/secciones.asp?ID=15>>.

En avançar en la meva reflexió, vaig adonar-me que era difícil anar més enllà d'una visió trivial i estàndard si no comprenia més a fons el nostre sistema energètic. Des d'un punt de vista científic, la física estableix que l'energia no es perd, sinó que tan sols es transforma, però també que en tota transformació es degrada. Des d'un punt de vista humà, hi ha l'avaluació dels nivells de satisfacció personal i social que obtenim amb l'ús de l'energia. I, finalment, des del punt de vista de la naturalesa i els seus recursos, es planteja la capacitat de la Terra per sostenir el desenvolupament en què ens hem embarcat. Com integrar tots aquests aspectes?

Ja més avançada la reflexió, el gener de 2010 vaig escriure un article d'urgència amb el títol "Recursos energètics i crisi. Canvi de paradigma de desenvolupament", que finalment no va ser publicat però que es troba a internet <<http://www.pelcanvi.org/?q=agoradecreixdoc>>. Des d'aleshores, he fet algunes conferències en àmbits polítics, acadèmics i d'organitzacions socials que m'han fet percebre la sensibilitat de molta gent sobre el tema.

A poc a poc, les meves indagacions i reflexions es van anar estructurant fins que vaig decidir convertir-les en el llibre que teniu a les mans. A més, tinc l'enorme satisfacció que l'ha acollit l'Institut de Sostenibilitat de la UPC.

Punt de vista

La meva activitat professional (professor d'enginyeria a la UPC i director del Centre de Disseny d'Equips Industrials d'aquesta universitat, a través del qual he col·laborat amb nombroses empreses en el desenvolupament de béns d'equip) m'ha portat a reflexionar progressivament sobre aspectes com ara el consum d'energia i els impactes ambientals que generen la producció de béns i la prestació de serveis, així com les seves conseqüències en el canvi climàtic.

Avui dia, els grans problemes (escassetat d'energia, sobrepoblació, canvi climàtic) han esdevingut cada cop més globals i s'han d'analitzar en conjunt, però el pensament dominant, sempre apressat i immediatista, ho fa de forma parcial i aïllada. Així, doncs, m'ha anat envaint la sensació que moltes de les veritats oficials són poc consistents.

La constatació anterior m'ha empès a establir la meva pròpia anàlisi de la situació. He partit d'informació de fonts reconegudes (EIA-govEUA, IEA-OCDE, FAO-NU, IAEA-NU, WEC, entre d'altres), però hi he introduït dues premisses no usuals:

- a) D'una banda, plantejo la reflexió per al conjunt del món, establint interrelacions entre diferents aspectes i prenent períodes de temps suficientment significatius. Les reflexions sobre qüestions parcials en àmbits territorials restringits i en temps molt limitats (per exemple, els darrers trimestres, com solen fer moltes anàlisis econòmiques) sovint

conduïxen a conclusions equivocades i usualment no proporcionen orientacions sobre les actituds i les decisions que cal prendre.

- b) I, d'altra banda, baso la meua anàlisi en avaluacions numèriques dels diferents paràmetres i tendències, i dono prioritat a les mesures físiques per damunt de les monetàries, ja que aquestes darreres estan subjectes a especulacions, condicionaments de mercat i interessos polítics dels estats i de les corporacions que distorsionen, en gran manera, la percepció de la realitat.

El primer resultat del treball ha estat constatar que les tendències del nostre món globalitzat es contradiuen amb el discurs mediàtic dominant. En efecte, estem avançant molt ràpidament vers l'exhauriment dels recursos energètics no renovables (la gran responsabilitat continua essent dels països desenvolupats, als quals ara s'afegeixen de forma destacada la Xina i també altres potències emergents, com l'Índia, el Brasil o Rússia) sense disposar d'alternatives viables en les coordenades de desenvolupament actuals. Alhora, estem contribuint a un canvi climàtic de conseqüències imprevisibles i desconegudes sense camí de retorn en una escala de temps humana.

Simultàniament, la població mundial creix de forma molt ràpida (especialment als països més pobres), fet que, junt amb la voracitat de les societats del primer món, estableix una empremta ecològica que ja no és sostenible. Així, doncs, l'emmirallament de les societats pobres seguint les pautes de desenvolupament de les societats més riques ja mai no podrà esdevenir una realitat per a tothom.

El canvi climàtic és de percepció més incerta i llunyana, encara que, probablement, esdevindrà el problema principal en el futur. Per contra, el declivi dels recursos energètics no renovables és molt més imminent i es començarà a percebre amb nitidesa en aquesta mateixa dècada (si no és ja la causa subjacent de la crisi en què estem instal·lats). Aquest declivi tindrà un impacte fortíssim en les societats més desenvolupades (les més golafres): sense energia abundant i barata, el model actual de desenvolupament, basat en el "creixement" continu, ja no és possible, de manera que també es produirà un progressiu empobriment "econòmic" de les societats més riques.

Per tant, el primer repte que cal afrontar en molts dels països desenvolupats és el declivi energètic (conclusió a què arriba també Aleklett el 2007 [Ale-2007]) i, en els països més pobres, la sobrepoblació (factors encara en creixement continu), problemes que no tindran solució sense un canvi de paradigma de desenvolupament que tingui en compte que la Terra és limitada. Si es dona una resposta adequada al repte energètic, el canvi climàtic (que, des de la "mala consciència" i l'egoisme de les societats benestants, avui dia constitueix poc més que una preocupació mediàtica) començarà a trobar vies reals de solució en les noves coordenades de desenvolupament que caldrà adoptar necessàriament.

Tanmateix, serà difícil articular polítiques alternatives serioses i eficaces (i avançar-se en positiu als reptes que vindran) si no és des del coneixement i la comprensió de les grans tendències i conseqüències de l'ús de l'energia, dels recursos naturals i de l'evolució de la població a escala mundial. Aquest és un dels objectius principals del llibre.

1.2. Conceptes bàsics sobre l'energia

El concepte d'energia és complex. La definició més genèrica és: "capacitat d'obrar, de produir un efecte". Aquesta definició s'aplica tant als éssers vius i a les persones com als fenòmens naturals i als sistemes tècnics, i inclou aspectes quantitatius i aspectes qualitatius. El llenguatge comú qualifica d'*enèrgica* una persona que té decisió, que sap el que vol, encara que sigui diminuta i físicament dèbil: estem parlant de la dimensió de *qualitat*. Altres cops ens referim a la força enorme de l'*energia* del vent o del mar: aleshores estem parlant de la dimensió de *quantitat*.

La definició clàssica d'energia que la física maneja és: “capacitat d'efectuar treball”, entès aquest com l'efecte de desplaçar el punt d'aplicació d'una força resistent. Aquesta definició és adequada quan el resultat de la transformació és una energia mecànica, però esdevé molt més indirecta quan s'aplica a d'altres camps de la física.

En el món físic, contínuament es produeixen transformacions entre fenòmens de diferent naturalesa (mecànica, electromagnètica, tèrmica, química, nuclear, bioquímica, etc.) en relacions constants, i l'energia és el paràmetre que permet mesurar-ne les equivalències. Hi ha energies que es manifesten com a *estoc*, normalment en forma d'energies potencials: energia dels enllaços químics i de les forces nuclears (combustibles, materials fissionables); energia gravitatòria (preses hidràuliques, etc.). En canvi, d'altres energies es manifesten com a *flux*: entre elles, l'energia associada al moviment dels cossos, l'electricitat, la calor, els corrents d'aire i d'aigua, etc.

En el sistema internacional (SI), l'energia s'expressa en joules (J, i els seus múltiples); a la vida quotidiana, molt lligada a l'electricitat, es prefereix usar la unitat tècnica quilowatt hora (kWh), mentre que, en les avaluacions energètiques d'energia primària, la unitat més freqüent és la tona equivalent de petroli (TEP, o TOE en les sigles angleses). Finalment, en la física de les partícules, s'utilitza com a unitat l'electró-volt (eV).

Dins el concepte d'energia, se solen analitzar diverses realitats que se superposen:

- energia en el sentit de les ciències físiques
- energia humana, fenomen fisiològic i psicològic
- energia utilitzada per les societats humanes

En aquest text, ens centrem en el tercer d'aquests punts de vista. Prèviament, però, fem un repàs breu de les principals lleis que governen l'energia en els sistemes físics.

L'energia en les ciències i les tècniques

Les lleis que regeixen les transformacions energètiques són

Primer principi (o de la conservació de l'energia)

Aquest principi estableix que l'energia no es crea ni es destrueix, sinó que tan sols es transforma. En el món físic, els fenòmens tenen lloc en proporcions definides i, en qualsevol transformació (per exemple, d'energia elèctrica a mecànica, amb una petita dissipació tèrmica), les “quantitats” d'energia abans i després del procés sumen el mateix valor.

Einstein va generalitzar el principi de la conservació a la suma de l'energia i la massa per mitjà de la seva coneguda equació $E = m \cdot c^2$ (c és la velocitat de la llum). Les transformacions entre massa i energia se solen manifestar en els fenòmens nuclears en què petites variacions de massa es converteixen en quantitats enormes d'energia.

La diversitat dels fenòmens físics i la pluralitat de les manifestacions d'energia associades han propiciat l'ús d'una gran quantitat d'unitats d'energia (s'estudien més endavant).

Segon principi (o de la degradació de l'energia)

Estableix que tots els processos naturals tendeixen a estats de més desordre, en què l'energia es dispersa i es degrada. La magnitud física que mesura el desordre és l'*entropia*.

Els processos reals són irreversibles i sempre van en la direcció impulsada per la degradació de l'energia: la calor flueix d'una font calenta a una freda, però no a l'inrevés; l'aigua líquida baixa, però no puja; la llenya crema, però els gasos de combustió no reconstrueixen espontàniament la llenya, etc.

En determinades circumstàncies hi ha subsistemes que augmenten l'ordre, però sempre a costa d'altres subsistemes que adquireixen un desordre igual o superior. Per exemple, el desenvolupament dels éssers vius o el funcionament de les màquines són subsistemes en què l'ordre creix (disminueix l'entropia); però, perquè els éssers vius no es morin o les mà-

quines no s'aturin, cal un flux continu d'energia que es degrada, el qual prové, en darrera instància, fonamentalment de la radiació solar.

Cal fer notar que, com més irreversibles són els processos (més lluny es troben de la reversibilitat), més ràpids són, però també la degradació de l'energia és més gran (augmenta més l'entropia) i, per tant, el rendiment és més baix. En la vida moderna, el "temps és or" (econòmic), però les presses també són "ineficiència energètica" (i ambiental).

Exergia i qualitat

L'*exergia* es defineix com la part màxima d'energia d'un sistema que, en condicions teòriques de reversibilitat, es transforma en treball quan interacciona amb el seu entorn (normalment, el medi ambient) que se suposa constant. La part d'energia restant, sense utilitat pràctica com a treball, rep el nom d'*anergia* i es relaciona amb l'entropia.

Així com l'energia es manté sempre constant (primer principi), l'exergia es va destruint en qualsevol procés físic. Per aquest motiu les fonts d'energia es consumeixen (destrueixen l'exergia a mesura que proporcionen treball o energies equivalents).

No totes les formes d'energia tenen la mateixa capacitat per transformar-se en altres energies amb rendiments elevats. En general, les conversions d'energia tèrmica (de combustió, nuclear, geotèrmica, solar tèrmica, etc.) en energia mecànica o elèctrica tenen rendiments baixos mentre que, en les conversions contràries, els rendiments són elevats, com també les conversions entre energia mecànica i elèctrica. Les energies amb gran facilitat de conversió (especialment, l'electricitat) solen ser també les més versàtils.

Es parla, doncs, d'energies d'alta qualitat (entre elles, la mecànica i l'elèctrica) i energies de baixa qualitat (fonamentalment les tèrmiques). En les primeres, pràcticament tota l'energia es pot convertir en exergia mentre que, en les segones, tan sols es pot obtenir una petita part d'exergia de l'energia disponible.

L'ús econòmic i social de l'energia

Les lleis de la física són invulnerables i, per tant, qualsevol transformació sempre està sotmesa a elles. Tanmateix, l'ús humà de l'energia, tant en la dimensió personal com econòmica i social, hi afegeix consideracions i dinàmiques que recomanen adoptar conceptes específics en aquests camps.

Des del punt de vista econòmic i social, es poden distingir quatre estadis en relació amb l'energia i el seu ús: 1. *energia primària*; 2. *energia intermèdia* (o *secundària*); 3. *ús final de l'energia*; 4. *satisfacció de l'ús de l'energia*. Els descrivim a continuació.

1. Energies primàries

Anomenem *energies primàries* aquells recursos naturals (no transformats ni adequats per sistemes tècnics) amb capacitat potencial per proporcionar energia útil als éssers humans. Són, entre d'altres, el petroli, el gas natural, el carbó, l'urani, la biomassa, l'energia hidràulica, l'energia geotèrmica, l'energia eòlica, l'energia maremotriu (de les ones, dels corrents marins, de les mareas) i, la més abundant de totes, l'energia solar. Sense una transformació o una adaptació adequades, no són utilitzables directament [Rui-2006].

Amb relació a les energies primàries, es distingeix entre recursos i reserves [USGS-1980]:

Recursos. Són materials sòlids, líquids o gasosos d'origen natural, presents a l'escorça terrestre, amb la forma, la quantitat i la concentració adequades per fer factible l'extracció econòmica actual (o potencialment viable en un futur) d'un material o d'un producte.

Reserves. És la quantitat coneguda d'un recurs energètic recuperable i explotable amb les condicions tècniques i econòmiques actuals (o del moment considerat).

Amb l'evolució de les tecnologies i les modificacions de les condicions econòmiques, alguns recursos poden esdevenir reserves explotables en el futur.

2. *Energies secundàries (o intermèdies)*

Són formes energètiques obtingudes per transformació o adequació de les energies primàries, que així esdevenen fàcilment accessibles, manipulables i controlables per a la seva aplicació. Convenientment transformades en *energia final* permeten obtenir-ne efectes per satisfer les necessitats humanes. Les dues formes bàsiques d'*energies intermèdies* són el sistema de combustibles comercialitzats (gasolina, gasoil, querosè, propà i butà líquats, gas natural comprimit o líquat, carbó net i granulat; cal no confondre'ls amb els combustibles primaris que hi ha sota terra) i l'electricitat disponible en les connexions elèctriques [Rui-2006].

3. *Ús final de l'energia*

Són les manifestacions de l'energia en forma d'efectes que satisfan les necessitats humanes: energia mecànica en forma de desplaçament d'un viatger o d'una mercaderia, o per fabricar productes; energia tèrmica en forma de calefacció, o per a processos industrials; radiacions electromagnètiques en forma d'il·luminació artificial, de visualització de pantalles o de transmissió a distància; energia elèctrica transformada en comunicació o informació per mitjà de la informàtica; energia química per a l'obtenció d'aliments, de substàncies i de materials, etc. [Rui-2006].

Fins aquí podem establir índexs d'eficiència energètica: part de l'energia primària es transforma en energia útil per tal de satisfer les necessitats humanes que acabem de descriure. En endavant, les simples avaluacions quantitatives deixen de tenir sentit i les avaluacions qualitatives prenen el relleu.

4. *Satisfacció de l'ús de l'energia*

Es tracta de la satisfacció percebuda de les necessitats derivada de l'ús de l'energia, aspecte ja desvinculat de la gestió tècnica de l'energia i connectat amb l'ús social dels recursos. Per exemple, un automòbil privat pot tenir una gestió tècnica modèlica en els aspectes energètic i ambiental i proporcionar una baixa rendibilitat social, mentre que una flota d'autobusos contaminant i energèticament poc eficient pot tenir una gran rendibilitat social.

És un darrer pas important, més social i vivencial que no pas tècnic, sobre el qual prestem molt poca atenció en el context actual d'energia encara abundant: avaluar la utilitat de l'energia esmerçada. Ens podem preguntar: ha estat útil aquest trajecte, aquesta llum artificial, aquesta comunicació sonora? Han tingut el destinatari adequat? Es podrien obtenir d'una altra manera? Es podrien haver evitat? I un llarg etcètera.

En la concepció dominant del món econòmicament desenvolupat, parlar del problema de l'energia vol dir immediatament cercar les solucions en com trobar noves formes per generar més energia, quan en el futur ens podem trobar amb un declivi forçat per l'exhauriment dels combustibles fòssils. Justament, la millora de la rendibilitat social dels usos pot ser una de les orientacions més eficaces per resoldre la crisi dels recursos, concretament dels energètics.

Esquemes dels estadis econòmics i socials de l'energia

A continuació, es mostra una representació esquematitzada dels estadis de l'energia i el seu ús. En les primeres transformacions, s'assenyalen els rendiments i els índexs d'aprofitament energètic; en el darrer estadi, l'avaluació ha de ser necessàriament qualitativa.

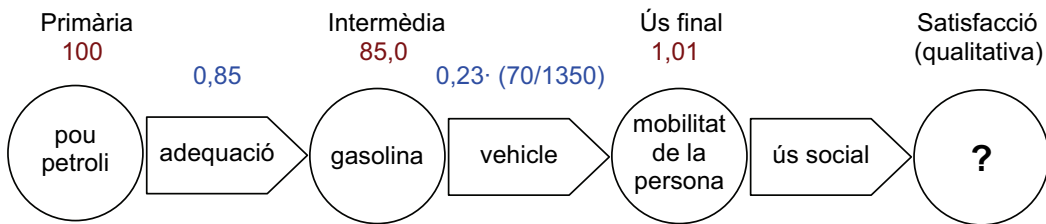
Mobilitat de les persones

Es parteix d'una energia primària, 100 unitats energètiques de petroli, que es transforma (rendiment aproximat del 0,85) en una energia intermèdia comercialitzada, el combustible gasolina, mitjançant l'extracció, la destil·lació i el transport fins a l'usuari.

A partir d'aquí, cal un conversor (el vehicle, amb un rendiment de 0,23) per transformar l'energia química de la gasolina en energia mecànica a la roda (19,5 unitats d'energia

de les 100 del petroli inicial). Tanmateix, tan sols una part de l'energia de la roda transporta el viatger (70 kg dels 1.350 kg del conjunt) i, fent números, només 1,01 de les 100 unitats de l'energia primària arriba al viatger.

Una altra cosa (no menys important) és la satisfacció personal i social a què ha donat lloc aquest viatge, que ja no es pot avaluar en termes d'energia.

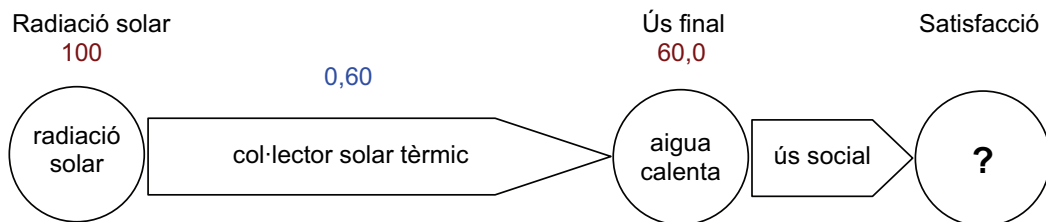


Aigua calenta sanitària

Es parteix de la radiació solar (energia primària) sobre un col·lector solar tèrmic. Com que és un sistema de captació directa i d'autoconsum, no hi ha la necessitat d'una adequació prèvia de l'energia primària per crear una energia intermèdia.

El propi col·lector solar tèrmic genera l'aigua calenta sanitària a la temperatura d'ús, amb un rendiment que pot ser de l'ordre de 0,60 de la radiació solar incident.

Anàlogament al cas anterior, una altra cosa és la satisfacció personal i social a què ha donat lloc aquesta aigua calenta sanitària.



Aquests esquemes faciliten la visualització de les successives transformacions de l'energia i permeten detectar on es pot millorar. Més endavant, s'utilitzen per avaluar l'ús de diversos sistemes elèctrics.

Avançar en la rendibilitat tècnica però també social de l'energia

Des de l'home primitiu fins fa uns dos segles, forçat per la necessitat, l'ésser humà havia estat molt curós a optimitzar l'energia que obtenia. A partir de la Revolució Industrial, les societats desenvolupades han disposat de quantitats creixents d'energia (un regal de la naturalesa que, fins fa ben poc, ens ha semblat il·limitat), circumstància que ha fet oblidar progressivament la preocupació pels usos energètics.

No és el mateix el petroli sota terra que la gasolina destil·lada a l'assortidor del costat de casa. No és el mateix el mineral d'urani que l'electricitat a l'endoll de casa. Entre aquests estadis, hi ha processos que augmenten la disponibilitat i/o la qualitat de l'energia però que comporten ineficiències elevades que l'usuari final no veu.

En la perspectiva del futur declivi de les energies fòssils, cal prendre consciència dels processos ocults que ens faciliten els recursos a casa. Aquest és el camí iniciat per la indústria europea de l'automòbil en assenyalar el procés denominat "del pou al dipòsit" (WTT, *well-to-tank*). Seguint el segon principi de la degradació de l'energia, una part de l'energia primària es perd (es degrada) perquè una altra part augmenti la *qualitat* (la gasolina, l'electricitat). En conjunt, l'energia es degrada.

D'altra banda, tampoc no és el mateix la gasolina a l'assortidor del costat de casa que la seva transformació en el desplaçament d'un vehicle: hi intervé un convertor (l'automòbil) que transforma la gasolina en energia a la roda que desplaçarà el vehicle. Aquest segon procés és denominat per la indústria europea de l'automòbil "del dipòsit a la roda" (TTW, *tank-to-wheel*). De manera anàloga, no és el mateix l'electricitat a l'endoll domèstic que la il·luminació d'un llum o el funcionament d'una ràdio. En aquesta etapa, l'energia es transforma en quelcom tècnicament útil (trajecte, llum, audició), però la seva eficàcia com a energia desapareix, s'exhaureix.

Aquesta nova visió és, sens dubte, un pas endavant important. Tanmateix, la crisi energètica que se'ns acostarà obligarà a anar molt més enllà, a plantejar l'ús final de l'energia (no per a la roda, sinó per al viatge) i la seva rendibilitat social (ha estat útil el viatge?).

1.3. Fonts d'informació

Produccions i consums

Per a les produccions i els consums s'ha partit de les dades de l'Energy Information Administration, agència d'energia del Departament d'Energia del Govern dels Estats Units (EIA-govEUA) <<http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm>>.

L'EIA ofereix sèries de dades de 1980 a 2008 (a febrer de 2011, són disponibles algunes dades de 2009) de tots els països del món i de les set regions en què es reparteix el planeta: Amèrica del Nord (amb Mèxic), Amèrica del Sud i Central, Europa, Euràsia (països de l'antiga URSS), Orient Mitjà (Mediterrani oriental i Golf Pèrsic), Àfrica, i Àsia i Oceania (que comprèn la resta de països d'Àsia i Oceania) (figura 1.1).

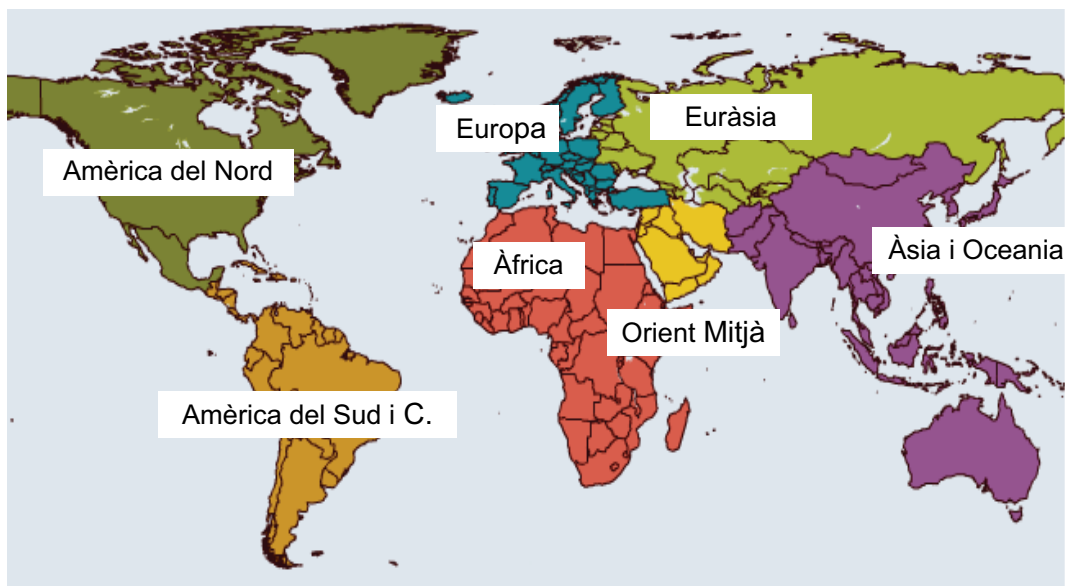


Figura 1.1 Regions del món establertes per l'EIA-govEUA i adoptades en el present treball. Aquestes són: Amèrica del Nord (amb Mèxic), Amèrica del Sud i Central, Europa (amb Turquia), Euràsia (països que formaven l'antiga URSS), Orient Mitjà (Mediterrani oriental i Golf Pèrsic), Àfrica i Àsia (restant) i Oceania. **Font:** EIA-govEUA

Les energies que l'EIA-govEUA analitza són el petroli (i els combustibles líquids), el gas natural, el carbó i l'electricitat. Dintre de l'energia elèctrica, distingeix entre generació tèrmica convencional, la generació nuclear, la generació hidràulica i la generació amb noves

fonts d'energia renovable, agrupades en geotèrmica, eòlica, solar, de les mareas i de les ones, biomassa i residus (totes elles energies comercialitzades).

La informació s'ha completat amb dades sobre la biomassa tradicional (llenya, carbó vegetal, residus de cultius, restes d'animals) que proporciona indirectament l'Agència Internacional de l'Energia (AIE/IEA-OCDE, <<http://www.iea.org/stats/index.asp>>). La biomassa tradicional (no considerada per l'EIA-govEUA perquè no és comercialitzada) és l'única amb què cuina i s'escalfa un 38% de la població mundial (més de 2.600 milions de persones d'Àfrica, del sud-est asiàtic i d'Amèrica del Sud i central), xifra que la IEA-OCDE preveu que encara augmentarà els propers vint anys.

Tot i que és un pas molt important que l'Agència Internacional de l'Energia (IEA-OCDE) inclogui la biomassa tradicional en la seva comptabilitat energètica, el fet que hagi optat per agrupar-la amb els combustibles renovables i l'energia dels residus (*combustible renewables and waste*, CR&W) em sembla un inconvenient ja que no permet delimitar realitats de signes contraris. Els biocarburants i la valorització de residus són tecnologies de les societats avançades orientades al medi ambient, mentre que la biomassa tradicional és el recurs de subsistència de les societats i els països més pobres.

En la majoria dels casos, coneixent les diferents realitats socioeconòmiques dels països, es poden assignar els valors d'IEA en aquest epígraf a un dels dos tipus de recurs (biomassa tradicional, o biocarburants i valorització de residus), però, en alguns casos, com ara el Brasil, amb valors significatius de biomassa tradicional i una producció important de biocarburants, no es pot saber quina part correspon a cada tipus.

És una llàstima no disposar d'una bona estimació de la biomassa tradicional (de la que en viu més d'1/3 de la humanitat) per una gran agència internacional, sobretot quan la pròpia IEA, a l'edició del *World Energy Outlook* de 1998 va incloure un capítol excel·lent sobre biomassa (<http://www.manicore.com/fichiers/world_energy_outlook_1998.pdf>, WEO-1998, capítol 10, p. 157-171) que després no ha tingut continuïtat.

Reserves

Amb relació a les fonts sobre reserves de recursos energètics no renovables, he seguit fonamentalment els criteris de l'EIA-govEUA.

Per a les reserves de petroli i de gas natural, he utilitzat les avaluacions que realitza anualment la revista *Oil and Gas Journal* (la darrera d'elles fa referència a l'any 2007).

Per al carbó, he utilitzat les avaluacions de reserves que realitza el World Energy Council normalment cada dos anys. A l'apartat dedicat a reserves (capítol 3), es resumeixen les estimacions a la fi de 2007 contingudes en el *Survey of Energy Resources, Interim Update 2009*. Durant el curs dels treballs ha aparegut el *Survey of Energy Resources 2010* amb estimacions a la fi de 2008, amb diferències poc significatives respecte a les estimacions de l'any anterior a excepció d'Alemanya. Aquest país, després d'una davallada inexplicable de reserves des de 66.000 Tg (teragrams, o milions de tones) el 1999 fins a 6.700 Tg el 2002, en aquest darrer informe (fi de 2008) se li tornen a atribuir 40.699 Tg (sempre de lignit, el carbó de menys contingut energètic). Atès que el còmput mundial passa de 826.001 a 860.938 Tg, amb una diferència que quasi coincideix amb la d'Alemanya, en el text s'han mantingut les dades de 2007.

Amb relació a les reserves d'urani, s'han pres com a referències les sèries d'avaluacions proporcionades per l'Agència Internacional de l'Energia Atòmica (IAEA, International Atomic Energy Agency), organisme dependent de les Nacions Unides i de reconegut prestigi mundial en aquest àmbit.

Consums acumulats

Un altre aspecte que ens ha semblat especialment rellevant per valorar la situació energètica mundial és el consum acumulat de recursos energètics. Aquest és un indicador de fins a quin punt s'han consumit en els diferents països i regions, les anomenades *reserves originals* (abans d'iniciar-ne el consum) i també de la responsabilitat de cada un dels països en les emissions acumulades de CO₂ fins avui.

La revista *Oil and Gas Journal* proporciona dades sobre els consums acumulats de petroli i gas natural, i la IAEA dona dades de l'urani ja consumit.

Sobre els consums acumulats de carbó (el recurs més important i d'explotació més llunyana en el temps), no n'hem trobat fonts directes, però els hem pogut avaluar indirectament a partir de les dades d'emissions històriques de CO₂ (per països, anys i origen) proporcionades pel CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center), organisme americà amb suport governamental.

Projeccions de consums futurs i declivi de les reserves

Per a les projeccions futures sobre evolució de l'energia, ens hem basat en els documents prospectius *International Energy Outlook* d'EIA-govEUA (<<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/>>) i *World Energy Outlook* d'IEA-OCDE (<<http://www.worldenergyoutlook.org/>>) de les darreres edicions (anys 2008, 2009 i 2010), que representen les visions oficials més optimistes.

També hem utilitzat estudis més crítics, especialment els del col·lectiu Energy Watch Group (<<http://www.energywatchgroup.org/>>), i de membres d'ASPO (Association for the Study of Peak Oil&Gas, <<http://www.peakoil.net/>>). Entre ells, vull destacar les aportacions de l'enginyer francès jubilat J. Laherrère (<<http://aspofrance.viabloga.com/texts/documents>>).

Dades sobre produccions i recursos naturals

Des del principi ens ha semblat que la crisi energètica repercutirà finalment sobre els productes més importants: els destinats a l'alimentació humana i al manteniment de les condicions climàtiques que fan possible la vida. Per tant, en la darrera part del llibre, hem volgut fer un balanç dels recursos naturals de la biosfera.

Han estat d'un valor inestimable les dades i estadístiques proporcionades per l'Organització de les Nacions Unides per a l'Agricultura i l'Alimentació (FAO) a través de les seves bases de dades (<<http://www.fao.org/corp/statistics/es/>>), especialment FAOSTAT.

En l'avaluació de la biomassa, han estat útils els treballs de la xarxa de científics Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE; <<http://www.icsu-scope.org/>>). Cal destacar especialment els documents SCOPE-13 i SCOPE-21.

Els treballs del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC, <<http://www.ipcc.ch/>>) han estat d'ajuda per establir esquemes del cicle del carboni.

Dades sobre emissions i el medi ambient

Hem obtingut les dades d'emissions de CO₂ d'EIA-govEUA en coherència amb els consums de combustibles fòssils (<<http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm>>). L'EIA proporciona l'evolució de les emissions en el període 1980-2009, per països i per regions del món, en funció de cada un dels combustibles fòssils.

Aquestes dades també s'haurien pogut obtenir del CDIAC a partir de períodes molt anteriors (pràcticament des de l'inici de l'ús significatiu de combustibles fòssils en cada país) fins al 2007. A més, el CDIAC també dona el CO₂ emès en el procés de fabricació del ciment (molt menor que per als combustibles fòssils). Però, com ja hem dit, tan sols hem utilitzat les dades del CDIAC per avaluar el consum històric del carbó.

Finalment, els escenaris d'estabilització de les emissions de CO₂ de l'IPCC ens han permès establir un marc de referència per a les conseqüències de les emissions acumulades de gasos d'efecte hivernacle.

1.4. Unitats de mesura

Les bases de dades documentals normalment fan servir unitats diferents i no coherents per a les diferents fonts d'energia (petroli, gas natural, carbó, l'energia nuclear, la hidràulica, combustibles i energies renovables), fet que dificulta l'anàlisi comparativa entre les produccions, els consums i les reserves de cada una d'elles.

Si es vol fer una anàlisi de caràcter general, cal adoptar unes unitats de referència que serveixin per expressar tots els tipus d'energia i a tots nivells a fi de facilitar fer-se una idea dels ordres de magnitud i poder-ne establir comparacions.

Necessitem unitats per a dues magnituds bàsiques: l'*energia* i la *potència* (energia per unitat de temps o flux d'energia per unitat de temps). La magnitud *energia* és adequada per mesurar els recursos energètics de què disposem: en termes econòmics, seria equivalent al *capital*. En canvi, la magnitud *potència* és adequada per mesurar els fluxos d'energia, les produccions, els consums, els intercanvis (generalment es parla d'energia per dia, per any): en termes econòmics, serien els fluxos monetaris, els cobraments, els pagaments i les transferències).

Doncs bé, la unitat d'energia més adequada per mesurar els fluxos (produccions, consums, intercanvis) és el watt ($W = J/s$, un watt és igual a un joule per segon) i els seus múltiples, kW (quilowatt = 1.000 W), MW (megawatt = 1.000.000 W), GW (gigawatt = 1.000.000.000 W) i TW (terawatt = 1.000.000.000.000 W), aquest darrer útil per mesurar la potència o els fluxos d'energia a escala mundial. Amb les quilocalories per dia (kcal/dia), els megawatts hora per mes (MWh/mes) o els bilions de tones equivalents de petroli per any (GTEP/any), s'està parlant de potències (o fluxos d'energia) que es poden expressar en múltiples de watts.

Per mesurar a escala mundial les *energies acumulades* (o reserves de recursos energètics no renovables), preferim usar el terawatt-any (TWA), energia que genera una font d'un TW durant un any (1 TWA = 0,7532 GTEP, milers de milions de tones equivalents de petroli). És un valor enorme, de l'ordre de l'energia generada per les 437 centrals nuclears del món durant un any. Té l'avantatge que, dividint les reserves en TWA pel consum en TW, dona directament els anys que quedarien de reserves si es mantingués el consum actual.

A continuació, es donen les següents ordres de magnitud per a potències:

Taula 1.1. Ordres de magnitud per a potències

10 W_e : bombeta de baix consum (equivalent a uns 30 W_t)
100 W_t : consum endogen d'una persona sedentària (unes 2.065 kcal/dia)
1.000 $W_e = 1 \text{ kW}_e$: estufa elèctrica mitjana (equivalent a uns 3.000 W_t)
10.000 $W_e = 10 \text{ kW}_e$: motocicleta de 125 a 150 cc (13,6 CV)
100.000 $W_e = 100 \text{ kW}_e$: automòbil gran de 2.000 cc (136 CV)
1.000.000 $W_e = 1 \text{ MW}_e$: aerogenerador mitjà-gran (actualment, arriben a 5 MW_e)
1.000.000.000 $W_e = 1 \text{ GW}_e$: gran central elèctrica (equivalent a uns 3 GW_t)
1.000.000.000.000 $W_t = 1 \text{ TW}_t$: per mesurar l'energia consumida al món (uns 18 TW_t)

Elaboració: Carles Riba Romeva

Cal distingir entre TW_t (terawatt tèrmic) i TW_e (terawatt elèctric); el primer correspon a una potència tèrmica i el segon, a una potència elèctrica o mecànica. Atès que qualsevol transformació d'energia tèrmica a elèctrica o mecànica té un rendiment molt baix (de 20 a 50%), s'estableix convencionalment la relació d'equivalència: $1 \text{ TW}_e = 3 \text{ TW}_t$, que és, aproximadament la mitjana mundial en la generació d'electricitat a través de processos tèrmics.

L'EIA-govEUA adopta el valor de 2,90 per a les centrals tèrmiques (que aplica a les energies elèctriques que procedeixen de les fonts hidroelèctrica, eòlica i solar), valors variables segons els països per a l'electricitat nuclear (de 2,95 a 3,31) i un valor doble (6,16) per a l'energia geotèrmica (molt poc significativa a escala mundial).

Diversitat d'unitats

Una de les dificultats més grans per fer-se una idea del que representen els consums mundials d'energia és, a més de les grans xifres difícils de comparar amb referències de la vida quotidiana, la gran disparitat d'unitats de mesura que s'han anat generant en els diferents sectors de l'energia, que no faciliten les comparacions.

Petroli

S'han consolidat dues unitats de mesura diferents, que són el barril de petroli i la tona equivalent de petroli. A més, aquestes dues unitats ni tan sols són d'energia: el barril és una unitat de volum equivalent a 159 litres; i la tona és una unitat de massa, equivalent a 1.000 kg. Els diferents petrolis del món no tenen ni la mateixa densitat ni el mateix poder calorífic, amb la qual cosa les relacions entre aquestes unitats fluctuen d'un lloc a l'altre. A fi d'establir unes relacions de referència, s'ha acordat que l'equivalència entre la TEP i l'energia és d'1 TEP = 10.000 Mcal = 41,868 GJ. De manera semblant, s'ha establert una relació convencional entre TEP i barril (1 TEP = 6,84 b), que pressuposa una densitat del petroli cru de 0,9195 Mg/m³. En algunes parts del llibre, s'ha utilitzat la relació entre barril i energia que resulta de la mitjana real mundial.

Gas natural

De manera semblant, s'utilitzen dues mesures de volum per mesurar la capacitat energètica del gas natural: el metre cúbic (m³) i el peu cúbic (cf o ft³), i la relació entre elles és 1 m³ = 35,315 cf (EIA). La relació entre volum i energia en el cas dels fluids, a més de no ser constant per al gas natural dels diferents jaciments, ha de precisar la pressió i la temperatura a què es fa la mesura (les condicions estàndard són 1 atmosfera i 20°C). La relació convencional entre energia i volum en el gas natural és de 34,7 GJ/m³. En algunes parts del llibre també s'ha utilitzat la relació entre volum de gas i energia que resulta de la mitjana real mundial.

Carbó

Se sol mesurar en tones (Mg), també denominades tones mètriques; els americans utilitzen la tona curta (*short ton*), equivalent a 2.000 lliures o a 0,9072 tones mètriques (EIA). Els diversos carbons tenen poders calorífics molt diferents, per la qual cosa s'ha establert una relació convencional entre la massa de carbó i l'energia: 1 tona equivalent de carbó (TEC) és: 1 TEC = 0,7 TEP = 29,308 GJ/Mg. En aquest cas, també s'ha utilitzat la relació real entre massa i energia, sovint país a país, ja que les diferències arriben a ser molt marcades. Per exemple, per estimar les reserves en energia del carbó, s'ha partit de les dades de reserves en tones de cada categoria de carbó (bituminós, subbituminós i lignit).

Urani

Se sol mesurar en tones d'urani natural, és a dir, una composició d'isòtops amb el 99,3% d'urani U238 (no fissible) i 0,7% d'urani U235 (fissible). Les dades publicades sobre el rendiment real d'una tona d'urani natural són molt més escasses i, com és previsible, aquest valor també varia d'acord amb la tecnologia emprada i la gestió de la central. A les estadístiques d'EIA, es dona directament l'energia tèrmica produïda i l'electricitat generada, però no les tones d'urani natural consumides, per la qual cosa no és possible establir la relació entre massa de combustible i energia. Convencionalment, s'adopta la relació següent: 1 tona d'urani natural (tU_{nat}) = 10.000 TEP = 418,68 TJ.

Electricitat

Els apartats anteriors tractaven d'unitats de recursos d'energia primària, mentre que en aquest apartat, es tracta d'unitats d'una energia transformada: l'electricitat. La unitat més freqüent és el quilowatthora elèctric (kWh, en l'àmbit domèstic i de les petites indústries) i alguns dels seus múltiples: el megawatthora (MWh, en les grans indústries), el gigawatthora (GWh, en grans centrals elèctriques) i el terawatthora (TWh, en la comptabilització energètica dels països i del món).

La taula 1.2 estableix les principals equivalències entre unitats d'energia en diferents sectors i àmbits energètics; la taula 1.3 estableix l'equivalència entre unitats de flux energètic en relació a un temps o potència energètica mitjana.

Taula 1.2. Equivalències entre diferents unitats d'energia										
	TWA	EJ	GTEP	Gb	Tcf	Tm³	MtU	PWh	Ecal	PBTU
TWA	1	31,5360	0,0239	0,1721	1,0162	0,0288	0,0024	0,2778	0,2388	0,9478
EJ	0,0317	1	0,7532	5,4275	32,0481	0,9075	1,4286	8,7600	7,5322	29,8891
GTEP	1,3276	41,8680	1	7,2056	42,5479	1,2048	1,8966	11,6300	10,0000	39,6815
Gb	0,1842	5,8104	0,1388	1	5,9048	0,1672	0,2632	1,6140	1,3878	5,5070
Tcf	0,0312	0,9840	0,0235	0,1691	1	0,0283	0,0445	0,2733	0,2347	0,9326
Tm³	1,1019	34,7504	0,8300	5,9807	35,3148	1	1,5742	9,6529	8,2880	32,9357
MtU	13,2763	418,6800	10,0000	72,0565	425,4793	12,0482	1	116,3000	100,0000	396,8155
PWh	0,1142	3,6000	0,0860	0,6196	3,6585	0,1036	0,1631	1	0,8598	3,4120
Ecal	0,1328	4,1868	0,1000	0,7206	4,2548	0,1205	0,1897	1,1630	1	3,9682
PBTU	0,0335	1,0551	0,0252	0,1816	1,0722	0,0304	0,0478	0,2931	0,2520	1

Prefixos de múltiples d'unitats: k (quilo) = 10^3 ; M (mega) = 10^6 ; G (giga) = 10^9 ; T (tera) = 10^{12} ; P (peta) = 10^{15} ; E (exa) = 10^{18} . Unitats: J (joule); WA (watt-any); TEP (tona equivalent de petroli; TOE, en anglès); tU_{nat} (tona d'urani natural; cal (caloria); BTU (*British Thermal Unity*)).

Equivalències convencionals: 1 TEP = 10 Gcal; 1 TEC (tona equivalent de carbó) = 0,7·TEP; 1 tU = 10.000 TEP; 1 BTU = 1.055,06 J; 1 cal = 4,1868 J (SI); 1 TEP = 6,84 b (barrel de petroli); 1 tèrnia = 1 Mcal; 1 kWh = 3,6 MJ.

Fonts: SI (sistema internacional), EIA-govEUA, IEA-OCDE, [Rui-2006]; **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Taula 1.3. Equivalències entre diferents unitats de potència (o de flux mitjà d'energia)										
	TW	EJ/any	GTEP/any	Mb/dia	Tcf/any	Tm³/any	ktU/any	PWh/any	Ecal/any	PBTU/any
TW	1	31,5360	0,7532	14,8698	32,0481	0,9075	0,0753	8,7600	7,5322	29,8891
EJ/any	0,0317	1	0,0239	0,4715	1,0162	0,0288	0,0024	0,2778	0,2388	0,9478
GTEP/any	1,3276	41,8680	1	19,7415	42,5479	1,2048	0,1000	11,6300	10,0000	39,6815
Mb/dia	0,0673	2,1208	0,0507	1	2,1553	0,0610	0,0051	0,5891	0,5065	2,0101
Tcf/any	0,0312	0,9840	0,0235	0,4640	1	0,0283	0,0024	0,2733	0,2350	0,9326
Tm³/any	1,1019	34,7504	0,8300	16,3854	35,3148	1	0,0830	9,6529	8,3000	32,9357
ktU/any	13,2763	418,6800	10,0000	197,4150	425,4793	12,0482	1	116,3000	100,0000	396,8155
PWh/any	0,1142	3,6000	0,0860	1,6975	3,6585	0,1036	0,0086	1	0,8598	3,4120
Ecal/any	0,1328	4,1868	0,1000	1,9742	4,2548	0,1205	0,0100	1,1630	1	3,9682
PBTU/any	0,0335	1,0551	0,0252	0,4975	1,0722	0,0304	0,0025	0,2931	0,2520	1

Prefixos de múltiples d'unitats i equivalències convencionals entre unitats: Taula 1.2.

Fonts: [Rui-2006], EIA-govEUA, IEA-OCDE; **Elaboració:** Carles Riba Romeva.

1.5. Nova comptabilitat energètica

En aquesta secció, voldria cridar l'atenció sobre el fet que, per prendre consciència del consum enorme d'energia en els països desenvolupats, més enllà de les valoracions econòmiques, calen noves eines de comptabilitat energètica que posin de manifest les limitacions de les lleis de la naturalesa i que proporcionin camins per corregir les actituds i les decisions.

Entre aquestes noves eines, en voldriem presentar dues: 1) *taxa de retorn energètic* (TRE; en anglès EROI, *energy return on investment*) per comprendre certs límits en l'obtenció i transformació de l'energia primària, i 2) *energia grisa* (en anglès, *embodied energy*) que, en les etapes de fabricació i d'ús, constitueix una eina interessant per avaluar l'eficàcia de les diferents opcions en relació amb l'energia.

Taxa de retorn energètic (TRE o EROI)

La TRE és el quocient entre l'energia que proporciona l'ús d'un recurs energètic i l'energia consumida en els processos de la seva obtenció, adequació i/o transformació. Una TRE menor que 1 significa que el recurs proporciona una energia menor que la consumida en la seva obtenció, adequació i/o transformació (es perd energia).

Així, doncs, en un context de penúria energètica, només té sentit explotar recursos amb una TRE clarament superior a 1 (diversos autors assenyalen una TRE mínima compresa entre 3 i 5 per explotar de forma viable un recurs).

Taula 1.4. Valors de TRE/EROI proporcionats per diferents autors			
	Any	TRE/EROI	Referència
No renovables			
Petroli i gas (descobertes)	1940	>100	Cleveland et al. 1984
Carbó (a boca de mina)	1950	80	Cleveland et al. 1984
Petroli i gas (descobertes)	1970	8	Cleveland et al. 1984
Petroli i gas (producció)	1970	23	Cleveland et al. 1984
Carbó (a boca de mina)	1970	30	Cleveland et al. 1984, Hall et al. 1986
Petroli i gas	1984	11 ÷ 18	Cleveland 2005
Gas natural	2005	10	Button i Sell, 2005
Pissarres bituminoses	2005	5,2 ÷ 5,8	Herweyer i Gupta, 2008
Nuclear (aigua lleugera)		4	Cleveland et al. 1984
Renovables			
Hidroelèctrica	1984	11,2	Cleveland et al. 1984
Eòlica	2008	19,8	Kubiszewski i Cleveland, 2008
Col·lector solar	1984	1,9	Cleveland et al. 1984, Hall et al. 1986
Col·lector de concentració	1984	1,6	Cleveland et al. 1984, Hall et al. 1986
Fotovoltaica	1984	1,7÷10	Cleveland et al. 1984
Fotovoltaica	2009	6,56	Kubiszewski i Cleveland 2009
Etanol (canya de sucre)	1984	0,8 ÷ 1,7	Cleveland et al. 1984, Hall et al. 1986
Etanol (blat de moro)	1984	1,3	Cleveland et al. 1984
Metanol (fusta)	1984	2,6	Cleveland et al. 1984
Biodièsel		1 ÷ 3	Hall, Powers et al.
Geotèrmica	1984	4	Cleveland et al. 1984
Fonts: [Cle-1984], [Cle-2005], [Hal-1986], [Her-2005], [Kub-2008], [Kub-2009]. Elaboració: Carles Riba Romeva			

Aquest aspecte limita la visió economicista que pronostica que, quan els preus pugen, el mercat reacciona i ofereix més producte. En el cas dels recursos energètics, això és cert mentre el TRE és clarament superior a 1; en cas contrari, la seva explotació sols és possible si el recurs energètic se subvenciona (per via d'ajuts públics) amb altres recursos energètics de valor superior (aquest és el cas de determinats biocarburants).

Aquest concepte explica l'abandonament de molts jaciments amb recursos encara importants. Si el cost energètic d'explotació és superior (o del mateix ordre) que el rendiment del recurs que se n'extreu, l'activitat s'abandona. Tan sols si es desenvolupen noves tecnologies que requereixin processos amb menys consum d'energia, aquests jaciments poden tornar a ser novament explotats per un temps més.

Aquest principi té algunes excepcions quan la forma de l'energia obtinguda és de qualitat superior a l'energia de procedència, de manera que justifiqui consumir més energia de la que s'obté. Aquest és el cas de la generació d'electricitat a partir de fonts d'energia tèrmica, o de la transformació del carbó en combustible líquid, tan necessari per als sistemes de transport.

Energia grisa (*embodied energy*)

L'energia grisa (en anglès, *embodied energy*), també denominada *energia incorporada* o *energia captiva*, és un concepte de comptabilitat ambiental que es mesura a través de l'energia primària comercialitzada que ha estat consumida en totes les fases del cicle de vida d'un material, producte o servei fins a l'estadi considerat. Pot comprendre:

- L'extracció, la transformació i el transport de les matèries primeres
- La concepció i el disseny d'un producte o servei
- La fabricació d'un producte o la preparació d'un servei
- La comercialització del producte o servei
- L'ús o l'aplicació del producte o la prestació del servei
- El desballestament del producte o servei i la retirada de residus
- La reutilització de components, el reciclatge de materials i l'aprofitament d'energia

És un concepte útil com a indicador de l'eficiència ambiental quan es comparen alternatives equivalents per obtenir un mateix producte o prestar un mateix servei. També permet analitzar els efectes energètics en cada una de les etapes del cicle de vida.

Taula 1.5. Valors d'energia grisa dels materials més comuns						
Materials		Densitats Mg/m ³	Primera obtenció		Reciclatge	Entrades en el procés
			Energia específica GJ/Mg	Energia volumètrica GJ/m ³	Energia específica GJ/Mg	
Metalls	Acer	7,85	35,3	275,3	9,5	Mena de ferro
	Alumini	2,70	218,0	590	28,8	Bauxita
	Coure	8,94	70,0	625	17,5 a 50	Calcopirita
Polimers	Polietilè (LDPE)	0,92	78,1	71,8		Petroli
	Poliamida 6.6	1,14	138,6	158,0		Petroli
	Cautxú	0,93	101,7	91,5		Làtex
Edificació	Ciment	1,50	4,6	6,9		Calç i argila
	Formigó	2,30	0,95	2,2		Ciment i altres
	Vidre	2,50	15,0	37,5		Sílce
Fonts: valors d'energia específica en primera obtenció i reciclatge: [Ham-2008]; valors de les densitats de metalls i polimers: [Rib-2007]; la resta: Internet. Elaboració: Carles Riba Romeva						

L'energia grisa permet visualitzar el volum d'energia que manegem i la poca cura que solem tenir per administrar-la adequadament.

Exemple: la llauna d'alumini

Una simple llauna d'alumini per a beguda té una massa d'uns 25 g. Si l'alumini és de primera obtenció, el simple material de l'envàs (sense la fabricació) ha comportat una inversió energètica (energia grisa) de 5,45 MJ.

Si aquesta energia s'aplica a moure un autobús de 15.000 kg de massa en el pla, amb un rendiment global del sistema propulsor del 20% i un coeficient de resistència al rodolament equivalent de 0,025, podria fer avançar el vehicle uns 300 metres.

Evitar perdre l'energia invertida és un dels motius principals per justificar el reciclatge dels materials. Si la llauna d'alumini anterior fos reciclada, es preservaria per al nou ús la diferència entre l'energia de primera obtenció (5,45 MJ) i l'energia del reciclatge (0,72 MJ). Això és, 4,73 MJ estalviats/recuperats per envàs.

Avaluació de consums d'energia i emissions de gasos d'efecte hivernacle

El Centre de Disseny d'Equips Industrials de la Universitat Politècnica de Catalunya (CDEI-UPC), que dirigeixo, està fent estudis sobre l'energia grisa i les emissions de CO₂ que comporten les activitats industrials i, entre elles, la fabricació i l'ús de béns d'equip industrials i de productes anàlegs.

Els primers estudis constaten que, obsessionats pels preus de venda, la major part de vegades no som conscients dels consums ni de les emissions que comporta la utilització dels aparells i béns durables ni la prestació dels serveis.

Les avaluacions fetes fins ara permeten establir les relacions següents. En els equips domèstics, si l'energia grisa i les emissions associades a la seva fabricació són 1, el consum d'energia i les emissions posteriors durant el seu ús (i, eventualment, la seva eliminació) estan compreses entre 1 i 10 (per exemple, en una rentadora domèstica o un automòbil particular, usualment són de 2,5). En els béns d'equip industrials, que treballen de forma molt més intensiva, els consums i les emissions durant la utilització són molt més elevades i se situen entre 10 i 100 (en les màquines analitzades pel CDEI-UPC s'han trobat valors compresos entre 30 i 80).

Davant la crisi energètica que s'enuncia (vegeu l'evolució dels consums d'energia, les reserves disponibles i les projeccions; capítols 2, 3 i 4), el preu de venda (que sols reflecteix els consums i les emissions de fabricació) és un mal indicador energètic i ambiental. Cal començar a canviar el concepte i analitzar els consums i les emissions del cicle de vida i, fonamentalment, de l'etapa d'ús, que és la més determinant.

En aquest sentit, el CDEI-UPC, amb el suport del Govern de la Generalitat de Catalunya, està desenvolupant metodologies i bases de dades adequades per poder establir avaluacions energètiques i ambientals en l'etapa de disseny conceptual dels béns d'equip, quan les decisions tenen la màxima incidència.

Per obtenir una bona informació i, alhora, per desplegar les màximes potencialitats d'innovació, l'avaluació s'estableix per al conjunt de l'equip i el procés operatiu durant tot el cicle de vida, tant en les etapes d'origenació del bé d'equip (definició, disseny i fabricació), com en les etapes de destinació (ús, manteniment, eventuais reconfiguracions, fi de vida), i en tots els elements i aspectes que coadjuven en el procés.

2. Evolució del consum energètic mundial

2.1. Consum energètic de fonts primàries

En aquest capítol, s'estudia l'evolució del consum d'energia primària en el món segons les diferents fonts primàries i segons les diferents regions del món. Com es pot observar, el creixement absolut en el període 1980-2008 (del qual ofereix dades EIA-govEUA) és molt important i es basa, fonamentalment, en els combustibles fòssils.

Per completar aquesta visió, convé analitzar l'evolució del consum d'energia primària per càpita en el món i en les diferents regions. I, amb aquesta finalitat, hem repassat breument el creixement de la població al món i a les regions en aquest mateix període.

Per a grans àmbits (el món, les regions) i períodes llargs (un any o més), es pot considerar la producció o el consum d'energia com un flux continu mitjà. Una energia per unitat de temps és una potència que es mesura en W (watts) o els seus múltiples.

A escala mundial, s'ha elegit com a unitat de producció o de consum el TW (T = tera = 10^{12} ; 1 TW = milió de milions de watts). Les energies de diferent naturalesa s'han reduït a energia tèrmica equivalent (W_t , watts tèrmics).

A continuació, es presenta una taula amb els consums (potència tèrmica) de les principals fonts d'energia primària de 1980 a 2008 a partir de les dades d'EIA-govEUA, complementades amb valors del consum de combustibles renovables i residus (fonamentalment, la biomassa tradicional) basats en les dades proporcionades per l'Agència Internacional de l'Energia (IEA-OCDE).

Taula 2.1. Evolució del consum d'energia en el món (TW_t) de fonts primàries									
	1980	%	1985	1990	1995	2000	2005	2008	%
Petroli	4,383	42,23	4,117	4,570	4,772	5,203	5,686	5,720	32,02
Gas natural	1,802	17,36	2,120	2,521	2,714	3,043	3,527	3,809	21,32
Carbó	2,338	22,53	2,755	2,981	2,940	3,090	4,098	4,572	25,59
Energia nuclear	0,253	2,44	0,512	0,681	0,778	0,858	0,921	0,908	5,08
No renovables	8,777	84,56	9,504	10,753	11,204	12,194	14,233	15,009	84,01
1980=100	100,00		108,28	122,51	127,66	138,93	162,16	171,00	
Increment per períodes			0,727	1,249	0,451	0,990	2,039	0,776	
Energ. hidroelèctrica	0,599	5,77	0,682	0,746	0,846	0,894	0,967	1,028	5,76
Altres elèctr. renov. ¹	0,016	0,15	0,027	0,056	0,072	0,100	0,145	0,195	1,09
Combustibles renov. ²	0,988	9,52	1,109	1,211	1,302	1,393	1,543	1,634	9,14
Renovables	1,602	15,44	1,818	2,014	2,220	2,387	2,655	2,858	15,99
1980=100	100,00		113,47	125,68	138,56	148,96	165,72	178,35	
Increment per períodes			0,216	0,196	0,206	0,167	0,268	0,203	
Total	10,379	100,00	11,322	12,767	13,424	14,581	16,888	17,867	100,00
1980=100	100,00		109,10	123,04	129,40	140,55	162,80	172,23	
Increment per períodes			0,943	1,445	0,657	1,157	2,307	0,979	

¹ Totes les elèctriques renovables, excepte la hidroelèctrica (eòlica, fotovoltaica, centrals termosolars, marítima, combustibles renovables per a generar electricitat).

² Combustibles renovables i residus: biomassa tradicional, biocarburants, residus urbans.

Fons: EIA-govEUA: petroli, gas natural, carbó, nuclear, hidràulica i elèctriques renovables no hidràuliques; IEA-OCDE: combustibles renovables i residus. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Per mostrar de forma visual l'evolució del consum d'energia en el món durant aquests 28 anys, s'han representat gràficament les dades de la taula 2.1. El gràfic de la figura 2.1 (escala de 0 a 18 TW_t) mostra l'evolució global i el repartiment entre energies renovables i

energies no renovables. El gràfic de la figura 2.2 (escala de 0 a 6 TW_t) representa l'evolució individual de cada una de les fonts d'energia.

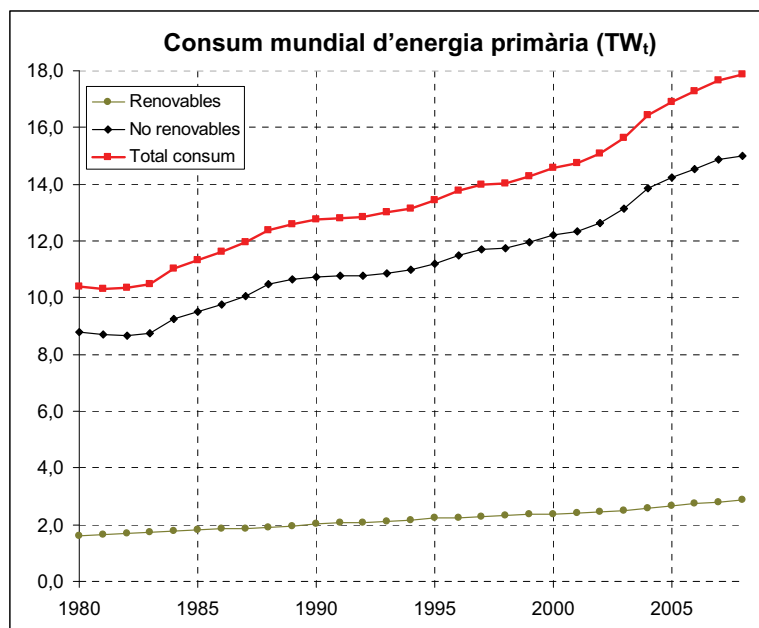


Figura 2.1. Evolució del consum d'energia en el món al llarg del període 1980-2008, així com el seu repartiment en energies renovables i energies no renovables. Escala 0-18 TWt. **Font:** EIA-govEUA, IEA-OCDE. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

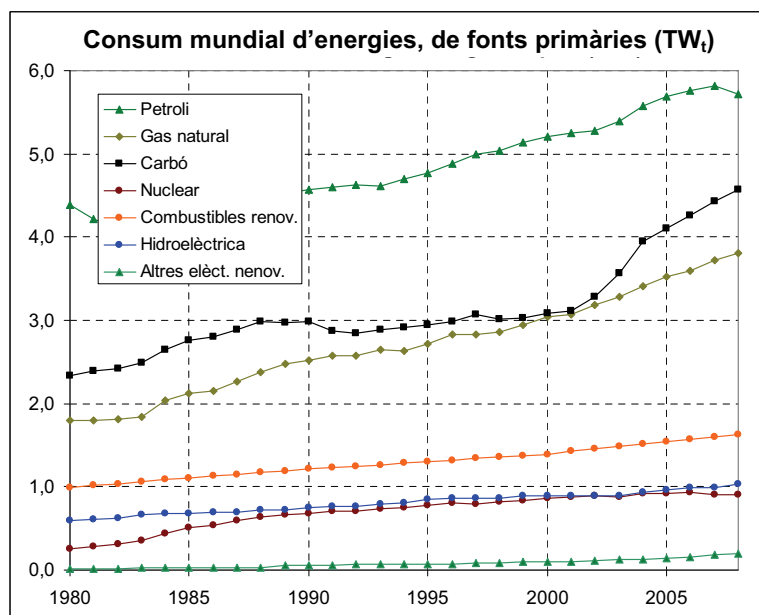


Figura 2.2. Evolució del consum de cada tipus d'energia en el període 1980-2008. **Font:** EIA-govEUA i IEA-OCDE. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La taula 2.1 i les figures 2.1 i 2.2 mereixen els comentaris següents de caràcter general:

Increment molt important del consum d'energia primària

1. El consum d'energia en el món continua augmentant. Concretament, un 72,23% durant el període 1980-2008, amb un increment absolut global de 7,488 TW_t.
2. Els increments del consum d'energia no es moderen, sinó que s'intensifiquen els darrers anys. Després d'increments absoluts de 2,387 TW_t a la dècada 1980-1990 i de 1,814 TW_t a la dècada següent (1990-2000), els darrers vuit anys (2000-2008), s'ha registrat un increment de 3,285 TW_t, si bé en els tres últims ja es nota la crisi.

La major part de l'increment és en energies no renovables

3. En analitzar el repartiment de l'increment absolut (7,488 TW_t), el panorama és decebedor des del punt de vista ambiental. El consum de fonts no renovables augmenta 6,232 TW_t, mentre que l'augment dels combustibles fòssils és de 5,577 TW_t.
4. A més, les energies renovables tan sols absorbeixen 1,258 TW_t d'aquest increment, essent-ne els principals components els *combustibles renovables* (0,649 TW_t, en la seva gran majoria, biomassa tradicional i no biocarburants) i l'*energia hidràulica* (0,429 TW_t).
5. Les noves fonts d'energies renovables (solar, eòlica, marina, geotèrmica, la gran esperança!), tot i haver-se multiplicat per nou durant el període 1980-2008, han experimentat un modest increment absolut de 0,179 TW_t.
6. La diferència absoluta entre energies no renovables i energies renovables no fa més que augmentar. Passa de 7,184 TW_t el 1980 a 13,158 TW_t el 2008.

Els pesos percentuals renovables/no renovables no varien

7. El percentatge de fonts d'energia no renovable quasi no disminueix en els 28 anys del període: baixa de 84,56% a 84,01%. El petroli perd pes (-10,21%) mentre que en guanyen el gas natural (+3,96%) i el carbó (+3,06%). En conjunt, els combustibles fòssils baixen (del 82,20% al 78,96%), percentatge que pràcticament recupera el quart combustible no renovable, l'urani (+2,64%). Cal fer notar que, els darrers anys, els combustibles no renovables tornen a guanyar pes i l'urani en perd.
8. Les fonts energètiques renovables guanyen un petit pes percentual (0,55%, el que perden les no renovables) però continuen representant tan sols el 15,96% del total. L'energia hidroelèctrica pràcticament es manté i els combustibles renovables i els residus (en la seva gran majoria, biomassa tradicional) perden un 0,38%, que es compensa per un augment del pes de les noves *altres fonts elèctriques renovables* en un 0,94% que, malgrat això, tan sols arriba a 1,09% el 2008.

Fonts d'energia renovables i biomassa tradicional

9. Tot i que les energies renovables creixen, la major part d'aquest augment correspon a la *biomassa tradicional* (única energia de què disposen uns 2.600 milions d'habitants, el 39% de la humanitat, en països poc desenvolupats d'Àfrica, Àsia i Amèrica Llatina; en parlarem més endavant) i a l'energia *hidroelèctrica*.
10. Les noves fonts elèctriques renovables continuen essent pràcticament residuals. Malgrat el seu augment relatiu espectacular (s'han multiplicat per 12,5), la seva incidència en els subministrament global d'energia tot just ha superat l'1% el 2008 (concretament, l'1,095%). (vegeu-ne el detall a la figura 2.3).

Noves fonts d'energia renovable

Hi ha la percepció mediàtica que algunes noves fonts d'energia (especialment, l'eòlica i la fotovoltaica o els biocarburants) evolucionen molt ràpidament i que aviat podran substituir els combustibles fòssils. Què hi ha de veritat en aquesta percepció?

És una veritat a mitges. Si bé és cert que aquestes energies s'estan desenvolupant a ritmes molt ràpids (en alguns països), també és cert que la seva aportació a escala mundial és molt petita i que el seu augment és pràcticament irrellevant davant dels increments d'altres components de la paleta energètica (especialment, el gas natural i el carbó).

A fi de posar-ho en relleu, la taula 2.2 desglossa l'evolució de les noves fonts elèctriques renovables (*geotèrmica, eòlica, solar i marítima, o combustibles renovables* usats per produir electricitat) i també l'evolució dels dos principals *biocarburants* (*etanol i biodièsel*, inclosos a la taula 2.1, dins l'apartat de combustibles renovables).

Taula 2.2. Evolució de les fonts elèctriques renovables i dels biocarburants (TW _t)									
	1980	% món	1985	1990	1995	2000	2005	2008	% món
Geotèrmica	0,0094	0,0913	0,0159	0,0246	0,0259	0,0345	0,0379	0,0412	0,2280
Eòlica	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0026	0,0102	0,0333	0,0684	0,3789
Solar i marítima	0,0002	0,0016	0,0002	0,0003	0,0004	0,0004	0,0009	0,0028	0,0154
Comb. renov. i resid.	0,0059	0,0569	0,0109	0,0310	0,0430	0,0546	0,0727	0,0829	0,4588
Total alt. elèct. ren.	0,0156	0,1498	0,0271	0,0562	0,0719	0,1001	0,1448	0,1953	1,0813
Etanol	—	—	—	—	—	0,0133	0,0260	0,0540	0,2988
Biodièsel	—	—	—	—	—	0,0010	0,0049	0,0189	0,1047
Total biocarburants	—	—	—	—	—	0,0143	0,0309	0,0739	0,4035

Font: EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

I, novament, aquests valors també es mostren de forma gràfica (figura 2.3). Malgrat l'evolució espectacular de la generació i el consum els darrers anys, cap de les noves energies renovables supera els 0,09 TW_t l'any 2008 (és a dir, 1/200 de l'energia primària consumida al món). Fora dels biocarburants (una part quasi imperceptible dels *combustibles renovables i residus* que també inclou la biomassa tradicional; línia taronja de la figura 2.2), la suma de tots ells correspon a *altres fonts elèctriques renovables* (línia verda inferior de la figura 2.2).

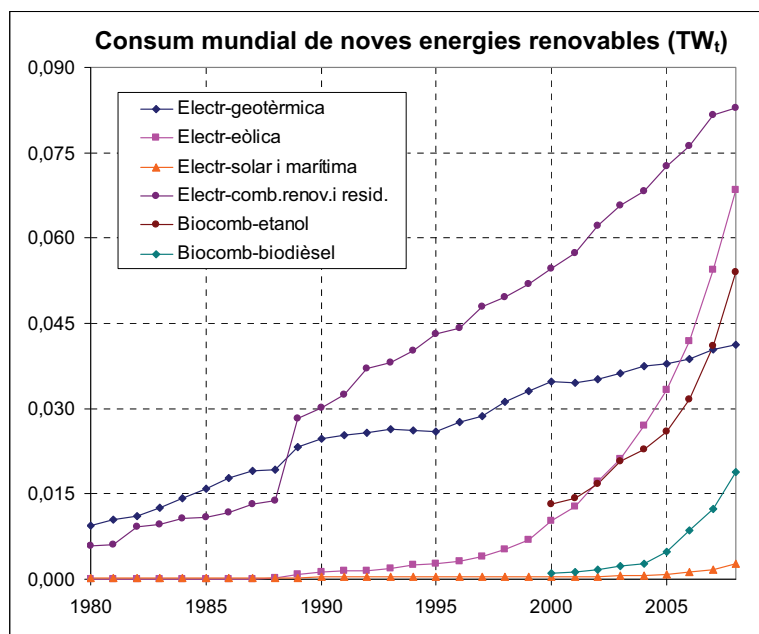


Figura 2.3. Evolució del consum de les altres fonts elèctriques renovables en el període 1980-2008 (escala de 0 a 0,09 TW_t). **Font:** EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Altres fonts elèctriques renovables

L'EIA-govEUA proporciona dades des de 1980. La generació elèctrica més important procedeix dels *combustibles renovables i residus* (0,0829 TW_t el 2008) de creixement sostingut (la discontinuïtat que s'observa el 1988-1989 correspon als EUA). Després ve l'*energia eòlica*, de desenvolupament més recent i creixement molt ràpid (0,0684 TW_t el 2008). L'*energia geotèrmica* s'utilitza des de fa temps però el creixement és moderat (0,0412 TW_t el 2008). Finalment, l'*energia solar* (que inclou l'*energia fotovoltaica* i les *centrals termosolars*), junt amb la generada per les *marees i ones*, tot i que progressa, és imperceptible a nivell mundial (0,0028 TW_t el 2008).

Biocarburants

L'EIA-govEUA proporciona dades des de l'any 2000. El *bioetanol* (produït fonamentalment als EUA, al Brasil i a determinades zones d'Àsia) és el principal biocarburant (el 2000 ja n'existia alguna producció), de creixement ràpid (0,0540 TW_t el 2008). El *biodièsel* (produït fonamentalment a Europa) és pràcticament inexistent el 2000 i, malgrat el seu progrés ràpid, té un pes molt menor (0,0189 TW_t el 2008). Tanmateix, tots dos són insignificants davant del consum de petroli.

Falses expectatives

Hi ha notícies que indueixen a falses expectatives.

Espanya i l'energia eòlica

Per exemple, s'exalta el fet que a Espanya «l'energia eòlica supera per primera vegada la nuclear» (*La Vanguardia*, 2-12-2009). Certament, Espanya és un dels líders mundials en energia eòlica, però la seva producció anual (no puntual, a altes hores de la matinada i en un dia especialment ventós), tan sols representa el 13% de l'energia elèctrica produïda l'any 2009 i el 5,5% de tota l'energia primària consumida, mentre que el conjunt de combustibles no renovables continua pesant més del 85%.

La Xina i el lideratge en energies renovables

També indueix a falses expectatives que la Xina, poc després de desactivar amb els EUA la Conferència de Copenhaguen sobre el Canvi Climàtic, anunciï que «planeja que un terç de la seva energia sigui renovable l'any 2050» (*El Mundo*, 7-12-2009). La Xina ha passat de consumir 0,886 TW_t de carbó l'any 2000 (el 28,5% mundial) a 1,868 TW_t el 2008 (el 42,58% mundial; un augment del 110,8% en 8 anys). En canvi, l'any 2008, el conjunt de les noves energies renovables (bàsicament col·lectors solars tèrmics per a aigua calenta en edificis, en què la Xina és líder mundial destacat) sumaven 0,035 TW_t (menys de l'1,5% del seu consum d'energia primària), tot i que, això sí, amb tendència a l'alça.

No vol dir que aquestes fites no siguin importants en el camí de les energies renovables, però o són realment més escasses del que s'insinuen, o són inabastables o, fins i tot, contradictòries amb altres aspectes de les polítiques energètiques dels països.

Biomassa tradicional

Crec que és oportú fer aquí unes consideracions sobre la *biomassa tradicional* (inclosa a l'apartat "Combustibles renovables i residus"; taula 2.1 i figura 2.2) en especial per la importància que té en molts països i entre les poblacions menys afavorides.

La *biomassa tradicional* (llenya del bosc, carbó vegetal, restes de cultius i residus d'animals) és l'energia dels pobres i, atès que no sol entrar en els circuits comercials, les grans agències d'informació (entre elles, l'EIA-govEUA) l'han marginada.

La primera vegada que és objecte de un reconeixement oficial és en l'edició de 1998 de l'informe anual del IEA-OCDE, *World Energy Outlook* [WEO-2008], al capítol 10, titulat «Biomass». La sensació és que els autors s'adonen de la importància d'aquesta font d'energia i en fan un tractament alhora sincer i delicat. Comença així:

«L'energia de la biomassa representa actualment (el 1998) aproximadament el 14% del consum mundial d'energia final, un percentatge més gran que el del carbó (12%) i comparable al del gas (15%) i l'electricitat (14%). En els països en via de desenvolupament, en els quals viuen les 3/4 parts de la població mundial, l'energia de la biomassa ... correspon, de mitjana, a 1/3 del consum d'energia final i prop del 75% de l'energia utilitzada a les llars. Per a una gran part de la població rural d'aquests països, i per a les capes més pobres de les poblacions urbanes, la biomassa és sovint l'única font d'energia disponible i que es poden permetre per cobrir les necessitats bàsiques de cuinar i escalfar-se...». Actualment, la biomassa tradicional ha baixat en percentatge a causa del creixement superior d'altres fonts energètiques, però en termes absoluts ha augmentat.

I fa unes primeres avaluacions numèriques de la biomassa tradicional per al 1995 i una projecció per al 2020, que reproduïm a continuació (IEA-OCDE dóna les xifres en MTEP, milions de tones equivalents de petroli; aquí, per coherència, hem traduït les xifres a TW_t):

Taula 2.3. Avaluació de la biomassa tradicional (TW_t) segons IEA								
Països i regions	1995				Projecció 2020			
	Biomass.	Conven.	Total	% biom.	Biomass.	Conven.	Total	% biom.
Xina	0,273	1,147	1,421	23,8	0,297	2,789	3,087	9,6
Àsia de l'Est	0,155	0,616	0,771	25,2	0,181	1,693	1,873	9,6
Àsia del Sud	0,324	0,377	0,701	85,9	0,409	1,077	1,486	27,5
Amèrica Llatina	0,110	0,600	0,710	18,4	0,126	1,309	1,435	8,8
Àfrica	0,299	0,300	0,599	99,6	0,601	0,574	1,175	51,2
Països en desenvolup.	1,162	3,040	4,202	38,2	1,614	7,441	9,056	17,8
Altres no-OCDE	0,037	1,924	1,961	1,9	0,040	2,958	2,998	1,3
OCDE	0,189	5,749	5,937	3,3	0,228	7,348	7,577	3,0
Total món	1,387	10,713	12,100	13,0	1,883	17,748	19,630	9,6
Els valors originals en MTEP (o MTOE) s'han traduït a TW_t . Font: World Energy Outlook 1998 [WEO-2008], capítol 10 (IEA-OCDE). Elaboració: Carles Riba Romeva								

L'IEA-OCDE ha incorporat la biomassa tradicional en la seva comptabilitat però, en fer-ho dintre d'un apartat denominat "Combustibles renovables i residus" (on hi ha els biocarburants i dels residus industrials i urbans), desdibuixa aquest aspecte tan important per a un nombre creixent de persones de la Terra, malgrat tots els progressos.

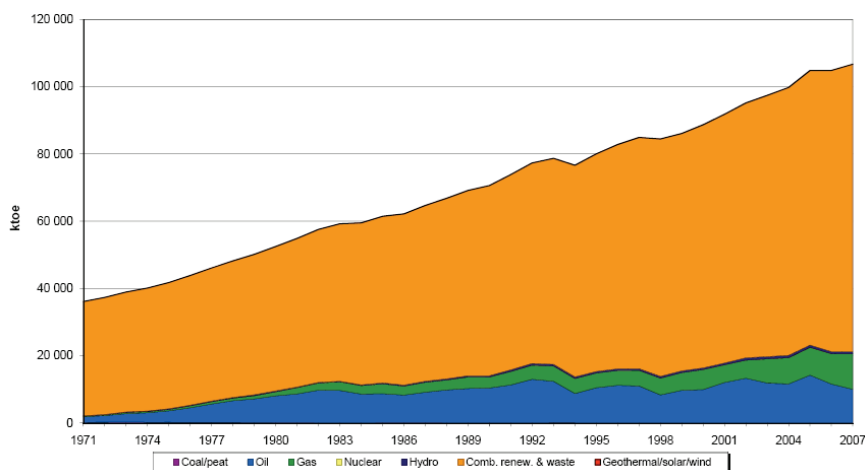
Anàlisis posteriors de l'IEA-OCDE [WEO-2006] ressalten altres aspectes de l'ús de la biomassa, com són la causa de malalties per la inhalació de fums o el deteriorament dels boscos, i propugnen polítiques per eliminar l'ús de biomassa tradicional (no comercialitzada).

A la figura 2.4 es reproduïxen les gràfiques de l'evolució del perfil energètic de tres països significatius, des del punt de vista del consum de la biomassa tradicional.

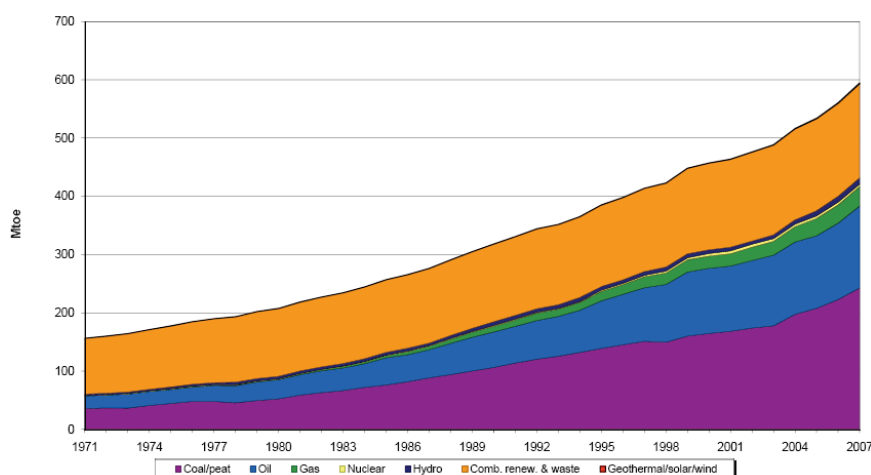
Nigèria, malgrat tenir importants reserves de petroli i de gas natural que exporta, és molt representatiu dels països subsaharians. La subsistència dels seus quasi 150 milions d'habitants (Alemanya i França juntes) es basa en la biomassa tradicional (prop del 80% de l'energia consumida). Concretament, el seu consum ha passat de 27 a 84 MTEP/any en el període 1971-2007 (de 0,037 a 0,111 TW_t), amb un augment quasi proporcional a la població.

El cas de l'Índia pot semblar diferent, però no ho és tant. La biomassa tradicional, que representa poc més del 27% del consum energètic, és, en termes absoluts, de 165 MTEP/any el 2007 (0,219 TW_t). I, al Brasil, on és difícil destriar la biomassa tradicional de la producció de biocarburants, el valor conjunt és de 71 MTEP/any (0,094 TW_t).

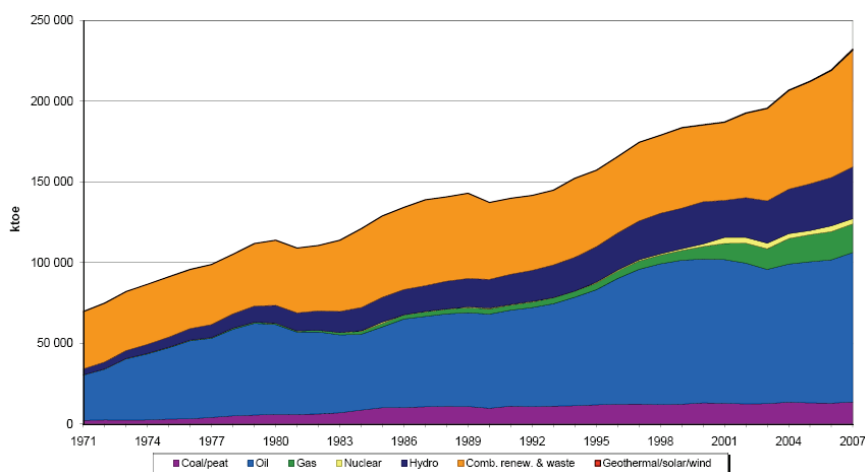
Potser s'està cometent un gran error marginant o amagant aquesta realitat.



Nigèria. Població: 1971: 55 Mhab; 2007: 146 Mhab. Escala d'energia en kTOE.



Índia. Població: 1971: 560 Mhab; 2007: 1.124 Mhab. Escala d'energia en MTOE



Brasil. Població: 1971: 98 Mhab; 2007: 196 Mhab. Escala d'energia en kTOE

Figura 2.4. Gràfiques de l'evolució del subministrament total d'energia en tres països d'Àfrica, Àsia i Amèrica Llatina significatius en consum de biomassa tradicional (franja superior en color taronja). S'hi han afegit les xifres de la població. **Font:** IEA-OCDE. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

2.2. Consum energètic per regions

La taula 2.4 i la seva representació a la figura 2.5 permeten analitzar l'evolució del consum d'energia primària a les regions del món establertes anteriorment.

Taula 2.4. Evolució del consum d'energia en el món (TW _t), per regions									
	1980	%	1985	1990	1995	2000	2005	2008	%
Amèrica del Nord	3,068	29,56	3,048	3,399	3,673	3,998	4,106	4,039	22,61
Amèrica del Sud i c.	0,481	4,64	0,524	0,595	0,700	0,809	0,912	0,990	5,54
Europa	2,440	23,51	2,492	2,612	2,644	2,813	2,993	3,012	16,86
Euràsia	1,575	15,17	1,875	2,051	1,420	1,356	1,494	1,562	8,74
Orient Mitjà	0,196	1,89	0,287	0,376	0,463	0,581	0,764	0,875	4,90
Àfrica	0,428	4,12	0,514	0,580	0,655	0,742	0,875	0,930	5,21
Àsia i Oceania	2,191	21,11	2,582	3,152	3,870	4,282	5,744	6,458	36,15
Total	10,379	100,0	11,322	12,766	13,424	14,581	16,888	17,866	100,0
Índex 1980=100									
Amèrica del Nord	100,00		99,35	110,81	119,72	130,32	133,83	131,66	
Amèrica del Sud i C.	100,00		108,96	123,69	145,36	168,05	189,45	205,66	
Europa	100,00		102,12	107,04	108,36	115,27	122,65	123,45	
Euràsia	100,00		119,05	130,26	90,15	86,14	94,89	99,20	
Orient Mitjà	100,00		146,41	191,90	236,09	296,32	389,62	446,35	
Àfrica	100,00		120,09	135,53	153,09	173,42	204,55	217,35	
Àsia i Oceania	100,00		117,84	143,86	176,63	195,40	262,14	294,71	
Fonts: EIA-govEUA: petroli, gas natural, carbó, nuclear, hidràulica i noves fonts renovables. IEA-OCDE: combustibles renovables i residus. Elaboració: Carles Riba Romeva									

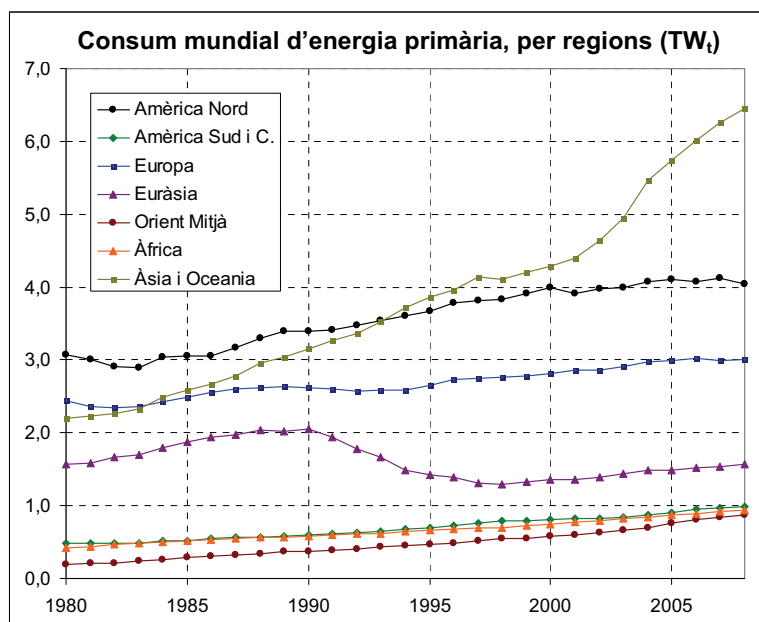


Figura 2.5. Evolució del consum d'energia primària per regions en el període 1980-2008 (escala de 0 a 7 TW_t). **Font:** EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La taula 2.4 i la figura 2.5 suggereixen els comentaris següents:

Els increments absoluts. Àsia, el màxim augment

1. *Àsia i Oceania* és la regió que registra l'increment principal de consum d'energia en el període 1980-2008 (+4,267 TW_t, el 56,99% del total mundial de +7,487 TW_t). La segueix ja a molta distància *Amèrica del Nord* (+0,971 TW_t, el 12,97% mundial).
2. Les quatre regions següents (*Amèrica del Sud i Central, Europa, Orient Mitjà i Àfrica*) tenen increments entre 0,500 i 0,680 TW_t (de 6,7 a 9,1% mundial). Finalment, *Euràsia* experimenta globalment una davallada lleugera de -0,013 TW_t.

Els increments percentuals. Orient Mitjà, i Àsia i Oceania, els màxims

3. *Orient Mitjà* encapçala la llista amb un augment del consum en el període considerat de +346,35% i el segueix *Àsia i Oceania*, amb un augment de +194,71%.
4. Dues regions més experimenten increments importants (en gran manera compensats pels augments de població): *Àfrica*, amb augments de +117,35%, i *Amèrica del Sud i Central*, amb el +105,66%.
5. A *Amèrica del Nord i Europa*, els increments són molt més moderats (+31,66% i 23,45%), mentre que *Euràsia* no experimenta cap increment.

Canvi de pes relatiu. Àsia i Oceania es posa en primer lloc

6. L'ordre de les regions per consum d'energia el 1980 era: *Amèrica del Nord, Europa, Àsia i Oceania i Euràsia* i, a notable distància, *Amèrica del Sud i Central, Àfrica i Orient Mitjà*.
7. Al final del període (2008), *Àsia i Oceania* s'havia situat al primer lloc, després de superar *Amèrica del Nord i Europa*. La resta de regions segueixen el mateix ordre.

Modificació del pes relatiu. Les regions del primer món baixen

8. Les regions més desenvolupades el 1980 perden pes el 2008: *Amèrica del Nord* (-6,95%), *Europa* (-6,65%) i *Euràsia* (-6,43%, reflecteix l'ensorrament del bloc soviètic).
9. Hi ha dues regions que guanyen pes, però de forma molt moderada: *Amèrica del Sud i Central* (+0,90%) i *Àfrica* (+1,09%).
10. Finalment, hi ha dues regions que augmenten el seu pes de forma espectacular: *Àsia i Oceania* (+15,04%; passa del 21,11% mundial al 36,15%), com a reflex de la dinàmica de Xina i, en menor mesura, de l'Índia. I *Orient Mitjà* (+3,01%, però de població petita), amb un creixement induït per la gran disponibilitat d'energia.

La connexió entre economia i energia

11. De forma general, les economies més dinàmiques (*Àsia i Oceania, Orient Mitjà*) van associades a increments importants del consum d'energia.
12. En aquest sentit, el cas d'*Euràsia* és paradigmàtic: després d'augmentar el consum d'energia un 30,26% fins al 1990, l'esfondrament polític i econòmic del bloc soviètic a partir de 1990 induïx una disminució del consum d'energia fins al -17,80% el 1998, que remunta posteriorment al -0,82% el 2008.

A partir de les dades de la taula 2.6 i la figura 2.6, i també del coneixement de l'evolució de la població al món i a les regions (taula 2.8), a les properes planes (secció 2.3) s'analitza la qüestió interessant de l'energia primària consumida per càpita en cada un d'aquests àmbits com també la seva evolució en el temps.

Aquest és un dels aspectes bàsics que cal comprendre de la situació geoestratègica de les diferents poblacions a fi de poder orientar les accions que cal emprendre.

2.3. Població i energia per càpita

A les pàgines següents s'analitza l'evolució de la població mundial i de les regions en el període estudiat com a pas previ per calcular-ne l'energia per càpita. Com a referència, també hi introduïm un esquema de l'energia consumida per càpita en les successives civilitzacions humanes.

Evolució de la població del món

Un altre dels grans problemes del món és la sobrepoblació. Observat en una perspectiva històrica, el creixement poblacional de la humanitat els darrers dos segles representa una veritable explosió:

Taula 2.5. Evolució de la població humana els dos darrers segles		
1830	1.000 Mhab	Per primera vegada, la humanitat arriba a aquesta xifra
1930	2.000 Mhab	100 anys (augment del 100%)
1960	3.000 Mhab	30 anys (augment del 50%)
1974	4.000 Mhab	14 anys (augment del 33%)
1987	5.000 Mhab	13 anys (augment del 25%)
1999	6.000 Mhab	12 anys (augment del 17%)
2012	7.000 Mhab	13 anys?
Font: diverses fonts i l'EIA-govEUA. Elaboració: Carles Riba Romeva		

L'ésser humà ha anat desallotjant les altres espècies d'animals superiors i confinant-les en àrees cada cop més reduïdes.

Avui dia, la població humana és molt superior a la de qualsevol de les espècies superiors d'animals salvatges i sols és comparable amb la d'espècies domèstiques associades a la seva pròpia alimentació. Acompanyen els 6.690 milions d'humans que som en el món (el 2008) 1.350 milions de vaques (5 vegades menys), 1.100 milions d'ànecs, 1.080 milions d'ovelles, 940 milions de porcs, 860 milions de cabres, etc., i tan sols som superats per 18.400 milions de pollastres i gallines (unes tres vegades més). (<http://www.fao.org/corp/statistics/es/>)

La taula 2.6 mostra l'evolució de la població mundial per regions en el període estudiat:

Taula 2.6. Evolució de la població del món (Mhab), per regions									
	1980	%	1985	1990	1995	2000	2005	2008	%
Amèrica del Nord	320,78	7,21	341,29	362,96	389,25	413,32	434,28	447,36	6,69
Amèrica del S. i c.	292,02	6,56	324,02	357,44	389,23	419,86	450,07	468,32	7,00
Europa	530,42	11,91	543,38	557,67	570,80	580,95	591,69	597,29	8,93
Euràsia	265,92	5,97	277,78	288,36	290,85	288,72	285,13	283,69	4,24
Orient Mitjà	95,02	2,13	114,96	135,27	152,30	169,46	186,44	198,99	2,97
Àfrica	478,11	10,74	553,52	631,05	713,82	803,94	903,59	967,83	14,47
Àsia i Oceania	2.469,84	55,48	2.696,19	2.949,01	3.187,01	3.409,17	3.610,42	3.727,22	55,71
Món	4.452,11	100,00	4.851,14	5.281,76	5.693,26	6.085,43	6.461,63	6.690,69	100,00
ΔMhab/any			79,81	86,12	82,30	78,43	75,24	76,35	
Índex 1980=100									
Amèrica del Nord	100,00		106,39	113,15	121,35	128,85	135,38	139,46	
Amèrica del S. i c.	100,00		110,96	122,40	133,29	143,78	154,12	160,37	
Europa	100,00		102,44	105,14	107,61	109,53	111,55	112,61	
Euràsia	100,00		104,46	108,44	109,38	108,57	107,22	106,68	
Orient Mitjà	100,00		120,99	142,36	160,29	178,35	196,22	209,43	
Àfrica	100,00		115,77	131,99	149,30	168,15	188,99	202,43	
Àsia i Oceania	100,00		109,16	119,40	129,04	138,03	146,18	150,91	
Món	100,00		108,96	118,63	127,88	136,69	145,14	150,28	
Font: EIA-govEUA. Elaboració: Carles Riba Romeva									

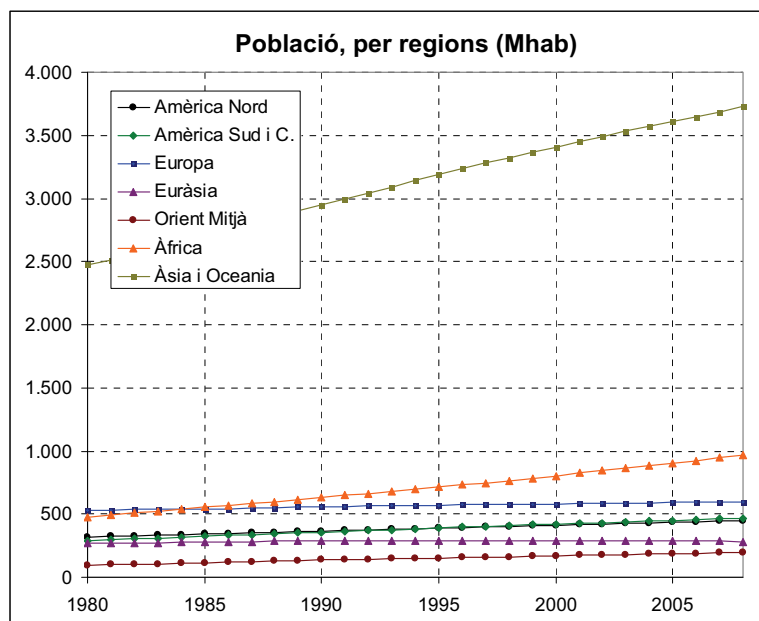


Figura 2.6. Evolució de la població de les regions en el període 1980-2008 (escala de 0 a 4.000 Mhab). **Font:** EIA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La taula 2.6 i la representació gràfica corresponent, la figura 2.6, suggereixen els comentaris següents:

La població mundial continua creixent

1. En el període 1980-2008 (aproximadament, una generació), la població mundial creix 2.238,58 Mhab (milions d'habitants) cosa que representa un 50,28% d'augment.
2. Els creixements semblen alentir-se, però totes les previsions situen el màxim de població mundial entre 8.500 i 10.000 Mhab cap a la meitat de segle XXI. Per tant, en poc més de 200 anys (des de 1830), s'haurà multiplicat la població humana del planeta gairebé per deu.

Els augments absoluts de les regions

3. Totes les regions creixen (excepte *Euràsia* els darrers anys). Però els grans augments absoluts es donen a *Àsia i Oceania* (1.257,84 Mhab, prop de la població actual de Xina) i a *Àfrica* (489,72 Mhab, més que la població actual d'Amèrica del Nord).
4. Les cinc restants regions experimenten un creixement conjunt de 491,48 Mhab: *Amèrica del Sud i Central*, 176,30 Mhab; *Amèrica del Nord*, 127,58 Mhab; *Orient Mitjà*, 103,97 Mhab; *Europa*, 66,87 Mhab; i *Euràsia*, 17,77 Mhab.

Els augments relatius de les regions

5. Hi ha dues regions que dupliquen la població en aquest període: *Orient Mitjà* (increment del 109,43%), rica en recursos energètics, i *Àfrica* (102,43%), la més pobre.
6. Tres regions més creixen proporcionalment no lluny de la mitjana mundial: *Amèrica del Sud i Central*, deu punts per sobre (60,37%); *Àsia i Oceania*, quasi a la mitjana mundial (50,91%), i *Amèrica del Nord*, més de deu punts per sota (39,46%).
7. Finalment, hi ha dues regions que tenen augments relatius petits: *Europa* (12,61%) i *Euràsia* (6,68%).

Les civilitzacions i el consum d'energia

El desenvolupament de les civilitzacions humanes ha anat associat a un increment progressiu del consum d'energia per càpita (figura 2.7). Per il·lustrar aquesta relació, és molt gràfic donar els resultats prenent com a unitat el consum d'energia endosomàtica (energia basal + energia d'activitat) per dia d'una persona mitjana activa, que es pot traduir en uns 120 W_t de potència tèrmica mitjana.

Segons Cook (figura 2.7), des de les civilitzacions agrícoles primitives que consumeixen unes 4,8 vegades l'energia endosomàtica del cos humà (576 W_t/hab; encara la situació d'una part important d'Àfrica i Àsia), s'evoluciona vers les civilitzacions industrials que consumeixen 31 vegades l'energia endosomàtica (3.720 W_t/hab; situacions una mica inferior a la d'Europa i Euràsia) i les societats postindustrials que arriben a consumir 92,7 vegades l'energia endosomàtica (11.124 W_t/hab; situació aproximada d'EUA)

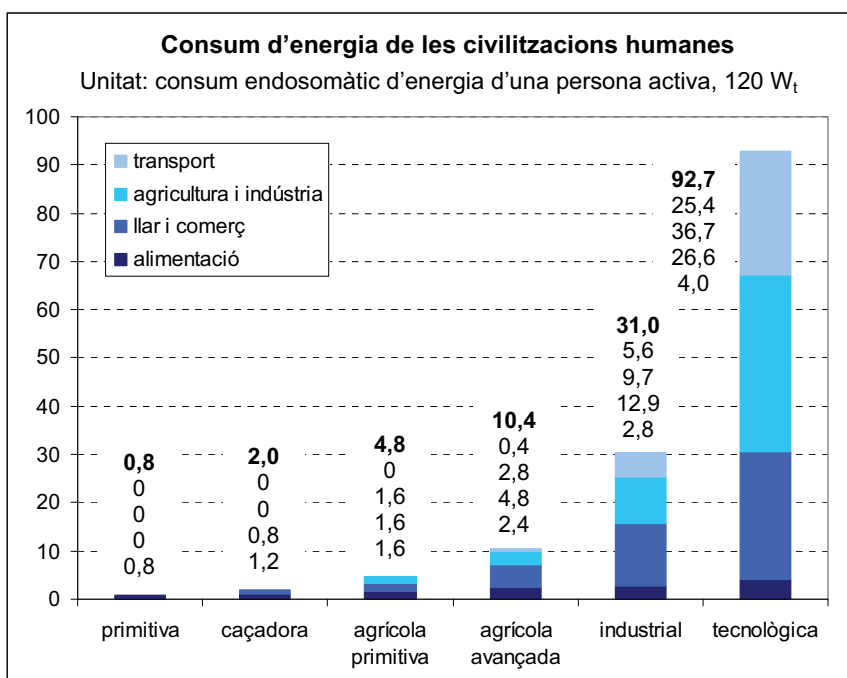


Figura 2.7. Representació del consum diari d'energia per càpita en diferents civilitzacions: humans primitius (fa 1.000.000 d'anys), caçadors europeus (fa 100.000 anys), primeres civilitzacions agrícoles (fa 5.000 anys); agricultures avançades europees (segle XV); societat industrial (segle XIX) i societat tecnològica avançada (finals del segle XX). En comptes de mesurar-ho en kcal/dia, s'ha pres com a unitat el consum endosomàtic d'energia d'una persona activa d'avui dia (120 W_t). **Font:** Cook [Coo-1971]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

En tot cas, en la civilització humana d'avui hi ha una correlació entre consum d'energia i la puixança o el declivi de les societats. Per exemple, en diversos estats de l'exbloc soviètic, com també a Cuba o a Corea del Nord, els declivis econòmics que van tenir lloc després de la caiguda del mur de Berlín queden reflectits clarament en les corbes de consum d'energia.

Un dels reptes de futur serà trobar noves formes de desenvolupament humà en un context de declivi dels recursos dels combustibles fòssils. Caldrà cercar fonts d'energia alternatives per substituir-los? És el camí que implícitament sembla que seguim, tot i que no he estat capaç d'identificar-les. O caldrà idear un nou tipus de desenvolupament desconectat de l'augment (o, fins i tot, associat a una disminució) dels recursos energètics?

Evolució de l'energia consumida per càpita

Les dades anteriors sobre consum d'energia en el món i en les diferents regions (taula 2.4), combinades amb les dades sobre població (taula 2.6), permeten establir els valors del consum d'energia per càpita (taula 2.7). S'utilitza la unitat W_t/hab.

Taula 2.7. Evolució del consum d'energia primària per càpita (W _t /hab), per regions									
	1980	Món=100	1985	1990	1995	2000	2005	2008	món=100
Amèrica del Nord	9.563	410,22	8.930	9.365	9.435	9.672	9.454	9.028	338,09
Amèrica del Sud i c. biomassa tradicional ¹	1.648	70,69	1.619	1.666	1.797	1.926	2.026	2.113	79,15
	327		345	309	286	268	290	302	
Europa	4.600	197,33	4.586	4.684	4.632	4.841	5.058	5.043	188,87
Euràsia	5.922	254,00	6.748	7.133	4.881	4.698	5.240	5.506	206,20
Orient Mitjà	2.063	88,50	2.497	2.781	3.039	3.428	4.097	4.397	164,67
Àfrica	895	38,40	929	919	918	923	969	961	35,99
biomassa tradicional ¹	420		414	417	419	423	432	435	
Àsia i Oceania	887	38,06	958	1.069	1.214	1.256	1.591	1.733	64,89
biomassa tradicional ¹	224		224	223	216	211	214	215	
Món	2.331	100,00	2.334	2.417	2.358	2.396	2.614	2.670	100,00
biomassa tradicional ¹	222		229	229	229	229	239	244	
1980=100	100,0		100,11	103,68	101,14	102,78	112,11	114,54	

¹ El consum de biomassa tradicional per càpita és inclòs en el consum d'energia primària per càpita de l'àmbit geogràfic corresponent (la línia immediatament superior).
Font: EIA-govEUA i IEA-OCDE (biomassa tradicional). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La figura 2.8 és la representació gràfica de les dades de la taula 2.7:

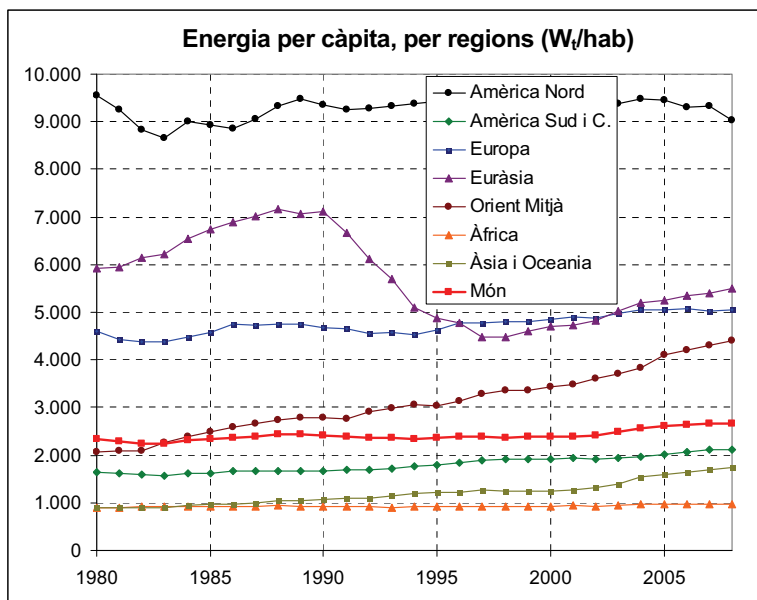


Figura 2.8. Evolució de l'energia consumida per càpita en les diferents regions del món en el període 1980-2008 (escala de 0 a 10.000 W_t/hab). **Font:** EIA-govEUA (energia i població). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Les dades de la taula 2.7 i la representació gràfica corresponent de la figura 2.8, suggereixen els comentaris següents:

El consum mundial d'energia per càpita s'ha mantingut quasi constant

1. El consum per càpita s'ha mantingut pràcticament constant (uns 2.400 W_t/hab, aproximadament unes 20 vegades l'energia endosomàtica mitjana de la persona humana) durant el període 1980-2000, i sols ha repuntat lleugerament a principi del segle XXI fins arribar a 2.670 W_t/hab l'any 2008, just abans d'esclatar la crisi econòmica.
2. El darrer augment del consum mundial d'energia per càpita coincideix amb la creació de les bombolles financeres i immobiliàries i l'escapada econòmica de la Xina i altres països emergents. L'esclat de la crisi econòmica actual no serà un símptoma de l'exhauriment de les capacitats de la Terra per proporcionar recursos més enllà del consum actual?

Rics i pobres es diferencien pel consum d'energia per càpita

3. El consum mitjà d'energia per càpita al món és de 2.670 W_t/hab.
4. L'any 2008, quatre regions (*Amèrica del Nord, Europa, Euràsia i Orient Mitjà*) que sumen 1.527 milions d'habitants (23% del món) consumeixen una potència de 9,488 TW_t (53% del món), amb un consum mitjà per càpita de 6.212 W_t/hab (entre 9.028 i 4.397 W_t/hab).
5. Tres regions més (*Amèrica del Sud i Central, Àsia i Oceania i Àfrica*), amb una població de 5.163 milions d'habitants (77% del món), consumeixen 8,378 TW_t (47% del món), amb un consum mitjà per càpita de 1.627 W_t/hab (entre 2.113 i 961 W_t/hab). La pitjor situació és la d'Àfrica (36, prenent com a 100 el consum per càpita mundial).

Diferències espectaculars entre regions

6. Hi ha grans diferències regionals en el consum d'energia per càpita: *Amèrica del Nord* (inclou Mèxic) consumeix 9.028 W_t/hab (baixant), mentre que *Àfrica* consumeix unes deu vegades menys (961 W_t/hab; pràcticament la meitat com a biomassa tradicional).
7. *Estats Units d'Amèrica* és la potència amb el màxim consum per càpita: en tot aquest període, s'ha mantingut pràcticament per sobre dels 11.000 W_t/hab i ha assolit un màxim de 12.000 W_t/hab l'any 2000.

Evolució del consum d'energia per càpita

8. Dues regions pràcticament dupliquen el consum d'energia primària per càpita durant el període 1980-2008: *Orient Mitjà*, amb un augment del 113,13% i un consum al final de període de 4.397 W_t/hab, i *Àsia i Oceania*, amb un augment del 95,29% i un consum l'any 2008 de 1.733 W_t/hab (però el valor absolut està per sota de la mitjana mundial).
9. *Amèrica del Nord, Àfrica i també Europa* (5.086 W_t/hab), *Euràsia* (5.506 W_t/hab) i *Amèrica del Sud i Central* (2.113 W_t/hab) varien poc el consum per càpita.
10. És interessant observar la fluctuació del consum d'energia per càpita d'*Euràsia*. Primer augmenta fins a més de 7.100 W_t/hab i, després de la caiguda del règim soviètic, l'any 1995, baixa fins per sota d'Europa (uns 4.500 W_t/hab); posteriorment, amb la revalorització dels seus recursos energètics, torna a pujar al final del període (uns 5.500 W_t/hab el 2008). És una altra constatació de la connexió entre economia i energia.

El consum de biomassa tradicional

11. El consum per càpita de *combustibles renovables i residus* en el conjunt del món augmenta lleugerament en el període estudiat de 222 a 244 W_t/hab. D'aquests, el 83,7% correspon a les regions d'*Àfrica, Àsia i Oceania i Amèrica del Sud i Central*.
12. En tres regions del món hi ha un consum important de *combustibles renovables i residus*, que, de forma pràcticament exclusiva, és atribuïble a la *biomassa tradicional* (s'assenyalen en color a la taula 2.7): *Àfrica* (435 W_t/hab), *Àsia i Oceania* (215 W_t/hab) i *Amèrica del Sud i Central* (302 W_t/hab). A *Àfrica*, aquest consum per càpita augmenta lleugerament, mentre que a les dues regions restants, disminueix lleugerament.

3. Reserves d'energies no renovables

3.1. Avaluació de les reserves d'energia

Els combustibles fòssils i l'urani són fonts d'energia no renovables que, actualment, cobreixen el gruix del subministrament d'energia en les societats desenvolupades i en via de desenvolupament (el 84,00% de la producció i el 84,12% del consum mundials). A més, aquests percentatges pràcticament no s'han modificat al llarg dels 28 anys estudiats.

Per tant, en qualsevol anàlisi de l'evolució del subministrament d'energia, és molt important avaluar les reserves de cada un d'aquests recursos.

La *reserva* és un recurs energètic tècnicament i econòmicament recuperable, concepte que, estrictament, només té sentit aplicar als recursos no renovables (el petroli, el gas natural, el carbó i l'urani). Cada un d'aquests recursos se sol mesurar amb unitats diferents (barrils, b; peus cúbics, cf; tones, Tg; quilotones d'urani natural, ktU_{nat} o GgU_{nat}). Aquí hem fet un esforç per traduir les quantitats a una unitat comuna: el terawatt tèrmic any: TW_{tA}.

L'avaluació de les reserves ha originat controvèrsies, moltes d'elles amb fonaments prou sòlids per pensar que, en alguns casos, s'han sobrevalorat. Per evitar discussions, però, hem partit de les avaluacions reconegudes per algunes de les grans agències o associacions internacionals. Hem utilitzat les fonts d'informació següents per a les reserves: petroli i gas natural: *Oil & Gas Journal* (dades acollides per l'EIA-govEUA); carbó: WEC (acollides per l'EIA, excepte les dades dels EUA); urani: NEA-IAEA (a partir del *Red Book 2007*). Els resultats es donen a les taules 3.1 (per regions) i 3.2 (per països).

Taula 3.1. Reserves de combustibles en el món (TW_{tA}), per regions

		Petroli	Gas nat.	Carbó	Urani	Total		Població
	Font d'informació	Oil&Gas J. 2007	Oil&Gas J. 2007	WEC 2007	NEA-IAEA 2007	diversos 2007		EIA 2007
Món	Unitats físiques	Gb ¹	Tcf ¹	Tg ¹	ktU ¹			
	Mesures físiques	1.316,7	6.189,4	826.002	5.468,8			
	Factor de conversió	TW _{tA} /Gb	TW _{tA} /Tcf	TW _{tA} /Mst	TW _{tA} /ktU			
	Mitjana mundial	0,19639 ²	0,03480 ²	0,000698 ²	0,013751 ²			
	Unitat energètica	TW _{tA}	TW _{tA}	TW _{tA}	TW _{tA}	TW _{tA}	% món	Mhab
	Món	258,577	215,383	577,032	75,200	1.126,191	100,00	6.614,13
	% sobre recursos	22,96	19,12	51,24	6,68	100,00		
2	Amèrica del Nord	41,385	9,743	177,955	10,506	247,676	21,99	443,06
6	Amèrica del Sud i c.	20,946	9,125	11,428	4,054	44,376	3,94	462,28
7	Europa	3,030	5,964	16,065	1,566	26,626	2,36	595,51
1	Euràsia	19,452	68,352	152,503	23,010	263,316	23,38	284,12
3	Orient Mitjà	145,268	90,164	1,188	1,559	238,180	21,15	194,96
5	Àfrica	22,014	17,375	25,108	14,365	78,863	7,00	945,91
4	Àsia i Oceania	6,483	14,661	185,873	20,139	227,155	20,17	3.688,28

¹ Gb (giga) = 10⁹ barrils; Tcf (tera) = 10¹² peus cúbics; Tg = (tera) = 10⁶ tones (de totes les categories de carbó); ktU (quilo) = 10³ tones d'urani natural.

² Els càlculs s'han realitzat sobre la base de: *petroli*, valor mitjà mundial, 43,02 GJ/Mg (mínim 37,89 i màxim 44,89); *gas natural*: valor mitjà, 38,76 kJ/m³ (mínim 29,96 i màxim 48,84); *carbó*: sobre la base de països i valors mitjans de rendiment energètic per a cada tipus de carbó (taula 3.5); valor mitjà: 22,03 GJ/Mg (mínim, 5,26 i màxim 32,09); *urani*: valor mitjà mundial, 433,64 TJ / MgU_{nat}.

Fonts: *Oil & Gas Journal* (dades recollides per l'EIA-govEUA): reserves de petroli i de gas natural; WEC, World Energy Council): reserves de carbó (també recollides per l'EIA-govEUA a MST); NEA-IAEA (*Red Book 2007*): reserves d'urani. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Taula 3.2. Reserves dels diferents combustibles en el món (TWtA), per països

		Petroli	Gas nat.	Carbó	Urani	Total		Població
Món	Unitat	TWtA	TWtA	TWtA	TWtA	TWtA	% món	Mhab
	Món	258,577	215,383	577,032	75,200	1.126,191	100,00	6.614,13
	% sobre reserves	22,96	19,12	51,24	6,68	100,00		
1	Estats Units	4,069	7,259	180,049	4,661	196,039	17,41	301,29
2	Rússia	11,803	56,708	106,858	7,502	182,871	16,24	141,38
3	Xina	3,147	2,797	85,056	0,934	91,933	8,16	1.321,85
4	Austràlia	0,297	1,105	58,051	17,092	76,546	6,80	20,75
5	Iran	26,842	34,409	1,188	0,022	62,461	5,95	65,40
6	Aràbia Saudita	51,860	8,406			60,266	5,35	27,59
7	Canadà	34,832	1,983	5,092	5,819	47,727	4,24	32,94
8	Kazakhstan	5,901	3,503	19,182	11,238	39,824	3,54	15,28
9	Índia	1,078	1,313	35,521	1,002	38,915	3,46	1.124,13
10	Qatar	2,939	31,891			34,830	3,09	0,81
11	Àfrica del Sud	0,003		23,732	5,983	29,717	2,64	48,37
12	Ucraïna	0,078	1,366	24,594	2,743	28,781	2,56	46,30
13	Emirats Àrabs Units	18,937	7,510			26,447	2,35	4,44
14	Iraq	22,391	3,923			26,314	2,34	27,50
15	Veneçuela	16,422	6,071	0,487		22,980	2,04	26,02
16	Kuwait	20,105	1,926			22,032	1,96	2,51
17	Nigèria	7,125	6,371	0,159		13,655	1,21	143,31
19	Líbia	8,011	1,844			9,855	0,88	6,05
18	Brasil	2,328	0,376	3,038	3,828	9,570	0,85	193,92
20	Algèria	2,280	6,098	0,052	0,268	8,699	0,77	33,36
21	Indonèsia	0,826	3,566	3,669	0,080	8,140	0,72	234,69
22	Colòmbia	0,293	0,124	6,174		6,591	0,59	42,60
23	Uzbekistan	0,117	2,211	1,464	1,526	5,318	0,47	27,08
24	Polònia	0,019	0,157	4,268		4,443	0,39	38,52
25	Noruega	1,476	2,947	0,005		4,413	0,39	4,64
26	Sèrbia i Montenegro			4,112		4,112	0,37	9,92
27	Namíbia		0,077		3,781	3,858	0,34	2,07
28	Níger			0,060	3,768	3,828	0,34	14,21
29	Mèxic	2,483	0,500	0,782	0,025	3,791	0,34	108,70
30	Turkmenistan	0,118	3,503			3,621	0,32	38,50
32	Alemanya	0,073	0,269	3,046	0,096	3,485	0,31	82,40
33	Egipte	0,733	2,049	0,018		2,800	0,25	75,68
35	Pakistan	0,056	0,816	1,291		2,163	0,19	169,12
42	Regne Unit	0,752	0,606	0,119		1,477	0,13	60,78
44	Tailàndia	0,061	0,482	0,547		1,091	0,097	65,15
45	Sudan	0,850	0,104			0,955	0,085	39,38
54	Turquia	0,060	0,010	0,559	0,100	0,729	0,065	74,77
57	Vietnam	0,121	0,236	0,110	0,088	0,555	0,049	86,52
60	Japó	0,012	0,056	0,314	0,091	0,473	0,042	127,43
67	Itàlia	0,124	0,198	0,009	0,084	0,415	0,037	58,18
68	Espanya	0,029		0,205	0,155	0,393	0,035	40,45
69	Birmània	0,010	0,353	0,001		0,364	0,032	47,37
70	Filipines	0,027	0,120	0,211		0,358	0,032	94,16
77	França	0,024	0,012		0,161	0,197	0,017	63,71
79	Bangla Desh	0,005	0,164			0,169	0,015	152,03
86	Congo (Kinshasa)	0,035		0,074	0,037	0,146	0,013	64,39
93	Corea del Sud			0,083		0,083	0,007	48,25
121	Etiòpia					0,000	0,000	79,94

Fonts: Reserves de petroli i de gas natural: *Oil & Gas Journal* (dades recollides per l'EIA-govEUA); reserves de carbó: WEC; reserves d'urani: IAEA-NEA (*Red Book 2007*). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Una altra taula interessant (taula 3.3) és la que assenyala els primers països en reserves de cada recurs energètic i el percentatge mundial en aquest recurs.

Taula 3.3. Primers països en reserves de cada un dels recursos energètics no renovables									
Països		Petroli			Països		Gas natural		
		TW _t A	%	% acum			TW _t A	%	% acum
1	Aràbia Saudita	51,860	20,06	20,06	1	Rússia	56,708	26,33	26,33
2	Canadà	34,832	13,47	33,53	2	Iran	34,409	15,98	42,30
3	Iran	26,842	10,38	43,91	3	Qatar	31,891	14,81	57,11
4	Iraq	22,391	8,66	52,57	4	Aràbia Saudita	8,406	3,90	61,01
5	Kuwait	20,105	7,78	60,34	5	Em. Àrabs Units	7,510	3,49	64,50
6	Em. Àrabs Units	18,937	7,32	67,67	6	EUA	7,259	3,37	67,87
7	Veneçuela	16,422	6,35	74,02	7	Nigèria	6,371	2,96	70,83
8	Rússia	11,803	4,56	78,58	8	Algèria	6,098	2,83	73,66
9	Líbia	8,011	3,10	81,68	9	Veneçuela	6,071	2,82	76,48
10	Nigèria	7,125	2,76	84,43	10	Iraq	3,923	1,82	78,30
Països		Carbó			Països		Urani		
		TW _t A	%	% acum			TW _t A	%	% acum
1	EUA	180,049	31,13	31,13	1	Austràlia	17,092	22,73	22,73
2	Rússia	106,858	18,47	49,60	2	Kazakhstan	11,238	14,94	37,67
3	Xina	85,056	14,70	64,30	3	Rússia	7,502	9,98	47,65
5	Austràlia	58,051	10,04	74,34	4	Àfrica del Sud	5,983	7,96	55,61
4	Índia	35,521	6,14	80,48	5	Canadà	5,819	7,74	63,34
8	Ucraïna	24,594	4,25	84,73	6	EUA	4,661	6,20	69,54
6	Àfrica del Sud	23,732	4,10	88,84	7	Brasil	3,828	5,09	74,63
7	Kazakhstan	19,182	3,32	92,15	8	Namíbia	3,781	5,03	79,66
9	Colòmbia	6,174	1,07	93,22	9	Niger	3,768	5,01	84,67
10	Canadà	5,092	0,88	94,10	10	Ucraïna	2,743	3,65	88,32
Fonts: Reserves de petroli i de gas natural: <i>Oil & Gas Journal</i> (dades recollides per l'EIA-govEUA); reserves de carbó: WEC; reserves d'urani: NEA-IAEA (<i>Red Book 2007</i>). Elaboració: Carles Riba Romeva									

Les taules 3.1, 3.2 i 3.3 porten a fer els comentaris següents:

Reserves finites

- 1) Les reserves estimades de combustibles no renovables en el món són d'1.126,191 TW_tA. Al ritme actual de consum d'aquests combustibles, 15,009 TWt (taula 2.1), representen uns recursos per a 75 anys. Més endavant s'analitzen les dinàmiques de nous descobriments, de consum i d'exhauriment.
- 2) És freqüent analitzar la relació (R/P, reserves/producció) per a cada una de les fonts d'energia, i els resultats són: petroli: $258,577/5,720 = 45,2$ anys; gas natural: $215,383/3,809 = 56,5$ anys; carbó: $577,032/4,572 = 126,2$ anys; urani: $75,200/0,908 = 82,8$ anys. Per tant, des d'aquest punt de vista sembla que encara hi ha un cert marge per reaccionar. Més endavant se'n faran simulacions més realistes.

Concentrades i mal repartides

- 3) Les fonts d'energia no renovables estan molt mal repartides geogràficament. Dos països (Rússia i els EUA) es reparteixen quasi a parts iguals més del 33% de les reserves mundials amb tan sols el 6,7% de la població mundial. I els primers deu països (els dos anteriors i la Xina, l'Iran, l'Aràbia Saudita, Austràlia, l'Índia, el Canadà, Kazakhstan i Qatar) sumen 831,4 TW_tA que representen el 73,7% de les reserves mundials.
- 4) L'anàlisi dels primers deu països també amaga un desequilibri. Si separem la Xina i l'Índia, els vuit països restants tenen unes reserves de 700,6 TW_tA (62,1% mundial) per a una població de 605,4 milions d'habitants (el 9,2% del món), mentre que aquests

dos països disposen d'uns reserves energètiques de 130,8 TW_tA (11,6%) per a una població de 2.446,0 milions d'habitants (el 37,0% del món).

- 5) En totes les fonts energètiques (petroli, gas natural, carbó i urani), quatre països sumen més del 50% de les reserves del món (60% en el gas natural i el carbó) i, deu països sumen més del 80% (excepte el gas natural, que hi està a tocar).

Desequilibri a favor del carbó (el combustible més contaminant)

- 6) Les reserves més importants al món són les de carbó (el combustible amb més impacte en el canvi climàtic), el 51,2%, que contràriament al que molta gent suposa, és el recurs més concentrat. Vuit països (EUA, Rússia, Xina, Austràlia, Índia, Ucraïna, Àfrica del Sud i Kazakhstan) sumen 533,0 TW_tA (el 92,1% de les reserves mundials). Diversos d'aquests països no s'han compromès amb el protocol de Kyoto.
- 7) Les segones reserves en importància són les de petroli (les més properes a l'exhauriment), el 22,96%, també concentrades. Vuit països (Aràbia Saudita, Canadà, Iran, Iraq, Kuwait, Emirats Àrabs Units, Veneçuela i Rússia) sumen 203,19 TW_tA (el 78,6% de les reserves mundials). Fora del Canadà i Rússia, la resta pertanyen a l'OPEP.
- 8) Les reserves de gas natural (el menys contaminant dels combustibles fòssils) són una mica inferiors a les de petroli (19,12%) i es concentren en tres països, Rússia, Iran i Qatar, que sumen 123,01 TW_tA (el 57,1% de les reserves mundials). Els segueixen sis països (Aràbia Saudita, Emirats Àrabs Units, EUA, Nigèria, Algèria i Veneçuela) amb un total de 41,72 TW_tA més, que donen un acumulat del 76,5% de les reserves mundials.
- 9) Finalment, les reserves més petites (i de molt) són les d'urani (6,68%), també concentrades en pocs països. Els tres primers (Austràlia, Kazakhstan i Rússia) sumen 35,83 TW_tA, el 47,7% mundial, i els sis països següents (Àfrica del Sud, Canadà, els EUA, Brasil, Namíbia i Níger) sumen 27,84 TW_tA més, que donen un acumulat del 84,7% de les reserves mundials d'urani.

Repartiment de les reserves per regions i aspectes estratègics

- 10) Quatre regions del món (*Euràsia, Amèrica del Nord, Orient Mitjà i Àsia i Oceania*) tenen, cadascuna, entre el 20,0 i el 23,4% de les reserves mundials d'energia. En tres d'aquestes regions, les reserves principals són el carbó (*Amèrica del Nord, Àsia i Oceania* i *Euràsia*), mentre que a l'*Orient Mitjà* són el petroli i el gas natural. *Euràsia* és la més equilibrada (a més del carbó, té les primeres reserves d'urani del món i les segones de gas natural). *Amèrica del Nord* també té les segones reserves de petroli del món (una mica enganyoses, ja que són fonamentalment les sorres bituminoses del Canadà); i *Àsia i Oceania* té les segones reserves d'urani del món.
- 11) Les tres regions restants són més escasses en recursos energètics: *Àfrica* té el 7,0% de les reserves mundials, força equilibrades; *Amèrica del Sud i Central* té el 3,9%, diversificades però amb poc urani; finalment, *Europa*, a la rigorosa cua, té un escàs 2,36% de les reserves mundials, que són fonamentalment de carbó de baixa qualitat.
- 12) El carbó és estratègic per a alguns grans països que tenen pocs recursos alternatius en relació amb el seu consum o les seves necessitats. En concret, els EUA, país més consumidor d'energia del món en termes absoluts i per càpita (3,49 TW_t i 11.584 W_t/hab, el 2007); la Xina, el país més poblat del món (1.321,8 Mhab el 2007) i el segon més consumidor d'energia (2,91 TW_t, el 2007), i l'Índia, el segon país més poblat del món (1.124,1 Mhab, el 2007). És difícil que hi renunciïn. En la mateixa dependència del carbó hi ha també el Japó, Corea del Sud, Austràlia (aquest darrer subministra els dos anteriors) i també Àfrica del Sud, que crema el 93% del carbó que es consumeix a Àfrica.
- 13) Hi ha països desenvolupats, amb elevats consums d'energia per càpita, que no disposen pràcticament de reserves. Alguns d'aquests països amb més població són: Corea del Sud (48,3 Mhab i 0,083 TW_tA de reserves), França (63,7 i 0,197), Espanya (40,5 i 0,393), Itàlia (58,2 i 0,415) o el Japó (127,4 i 0,509). I, en unes condicions lleugerament millors, el Regne Unit (60,8 i 1,477) i Alemanya (82,4 i 2,829).

- 14) Hi ha altres països molt poblats que tindran dificultats per desenvolupar-se a causa de la gran escassetat de recursos energètics. Alguns dels més poblats són Etiòpia (79,9 Mhab, sense reserves conegudes), Congo Kinasha (64,4 Mhab i 0,146 TW_A); Bangla Desh (152,0 i 0,169), les Filipines (94,2 i 0,358), Birmània (47,4 i 0,364), el Vietnam (86,5 i 0,555). I, en unes condicions lleugerament millors Tailàndia (65,2 i 1,091), el Pakistan (169,1 i 2,163), Egipte (75,7 i 2,800) o Mèxic (108,7 i 3,791).

3.2. Anàlisi de les reserves de petroli i de gas natural

Hi ha diverses fonts d'informació que, periòdicament, proporcionen dades sobre les reserves de petroli i gas natural. Entre les més conegudes, hi ha l'empresa petroliera BP, les revistes *Oil & Gas Journal* i *World Oil*, l'Organització de Països Exportadors de Petroli i l'associació internacional *Cedigaz*. No totes les informacions coincideixen, però mostren un grau d'aproximació acceptable (taula 3.4).

Taula 3.4. Diferents estimacions de reserves de petroli i de gas natural								
	Petroli				Gas natural			
Regions	BP ¹ fi 2007	O&G J. ² fi 2009	W. Oil ³ fi 2007	OPEP ⁴ 2007	BP ¹ fi 2007	Cedigaz fi 2008	O&G J. ² fi 2009	W. Oil ³ fi 2007
	Gb	Gb	Gb	Gb	Tcf	Tcf	Tcf	Tcf
Amèrica del N.	70,31	209,91	57,54	25,94	308,29	308,46	308,79	314,06
Amèrica del S.	111,21	122,69	104,79	134,69	272,84	260,09	266,54	246,98
Europa	15,57	13,66	13,80	15,11	207,65	218,13	169,09	168,98
Euràsia	128,15	98,89	126,00	129,05	1.890,89	1.900,26	1.993,80	2.104,00
Orient Mitjà	755,32	746,00	727,31	741,57	2.585,35	2.609,32	2.591,65	2.570,22
Àfrica	117,48	117,06	114,72	119,57	514,92	514,33	494,08	504,21
Àsia i Oceania	40,85	34,01	40,05	38,28	510,69	531,81	430,41	527,58
Món	1.238,89	1.342,21	1.184,21	1.204,18	6.290,64	6.342,41	6.254,36	6.436,03
¹ BP, <i>Statistical Review of World Energy</i> , juny de 2008. ² <i>Oil & Gas Journal</i> , vol. 106.48 (22 de desembre de 2008), PennWell Corporation. ³ <i>World Oil</i> , vol. 229 Núm. 9 (setembre de 2008), Gulf Publishing Company. ⁴ OPEC (OPEP, Organització dels Països Exportadors de Petroli), <i>Annual Statistical Bulletin</i> , 2007. ⁵ <i>Cedigaz</i> , Centre International d'Information sur le Gaz Naturel et tous Hydrocarbures Gazeux), <i>Natural Gas in the World</i> , juliol de 2008. Font: Les fonts citades. Elaboració: Carles Riba Romeva								

Aquest treball pren com a referència les avaluacions d'*Oil & Gas Journal* recollides per l'EIA-govEUA. Aquesta elecció té dos avantatges: 1. El nivell de desagregació per països és superior a les altres fonts. 2. Facilita la coherència amb la resta de dades de l'EIA.

Per establir comparacions, cal transformar les dades físiques (b, *barrils* de petroli; cf, *peus cúbics* de gas natural) en dades energètiques (TW_A, *terawatts tèrmics any*), però no tots els petroli o el gas natural de diferents procedències tenen la mateixa qualitat energètica. El factor de conversió s'ha establert, país a país, prenent com a referència el "poder calorífic brut" (*gross heat content*, en BTU/barril, o BTU/cf) proporcionat per l'EIA, tant per al petroli com per al gas natural. Hem considerat que les reserves no seran de qualitat millor que els combustibles que el 2007 s'extreien de sota terra.

Evolució de les estimacions de les reserves de petroli

Un aspecte molt important per valorar les estimacions de reserves de petroli és saber com han evolucionat al llarg del temps (vegeu la figura 3.1 a partir de les successives avaluacions realitzades pel *Oil & Gas Journal*).

La primera observació és que les reserves sempre han augmentat (en principi, a causa de nous descobriments), en comptes de disminuir com a conseqüència del consum.

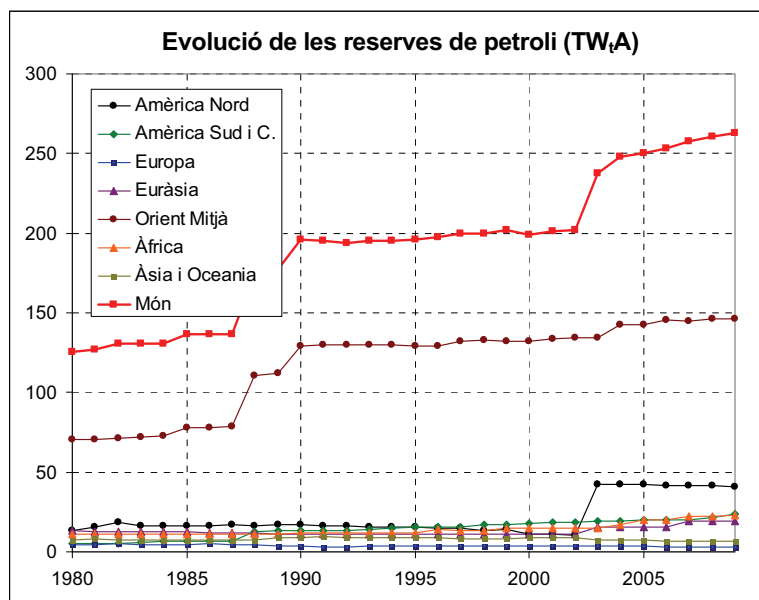


Figura 3.1. Evolució de les reserves de petroli (segons *Oil&Gas Journal*), traduïdes a TWiA. **Font:** EIA (*Oil&Gas Journal*). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

El fet que els augments de les reserves hagin superat el consum de petroli ha donat ales als optimistes i a les indústries petrolieres per manifestar que aquest recurs és pràcticament inexhaustible i que les noves extraccions són tan sols una qüestió de preu.

Però cal analitzar dues discontinuïtats que han originat els principals increments de les reserves els darrers temps: anys 1987-1990 i 2002-2003 (figura 3.1).

La primera discontinuïtat (de 1987 a 1990) té una explicació reconeguda i fins i tot acceptada per l'Agència Internacional d'Energia (*World Energy Outlook 2008*, [WEO-2008]). A partir de 1982, i per controlar els preus del mercat internacional, l'OPEP decideix establir quotes de producció en funció, entre d'altres coses, de les reserves de cada país.

La seqüència històrica de dades mostra que, en pocs anys, els països de l'OPEP revisen a l'alça les seves reserves de petroli: el 1985, Kuwait les augmenta de 66,8 a 92,7 Gb (G = giga, 10^9 barrils); l'any 1988, ho fan els Emirats Àrabs Units (de 33,1 a 98,1 Gb), l'Iran (de 48,8 a 92,9 Gb), l'Iraq (de 47,1 a 100,0 Gb) i Veneçuela (de 25,0 a 56,3 Gb), i, dos anys més tard, el 1990, ho fa l'Aràbia Saudita (de 172,6 a 257,6 Mb). En total, una revisió a l'alça de 304,0 Gb. És allò que el col·lectiu Energy Watch Group [EWG-2008] anomena «reserves polítiques».

La segona discontinuïtat (de 2002 a 2003) respon a l'acceptació com a reserves de petroli (convencional) d'una part substancial de les sorres bituminoses d'Athabasca (Canadà), per part de la revista *Oil&Gas Journal*. D'aquesta manera, les sorres bituminoses d'Athabasca (Canadà), una espècie de sorra amb quitrà, passen a ser considerades les segones reserves de petroli del món (de 4,9 Gb a 180,0 Gb). Un bonic increment de 175,1 Gb.

Per una raó, «reserves polítiques», o per una altra, «petrolis extrapesats no convencionals», es pot dubtar de l'efectivitat de 479,1 Gb de petroli, el 36,4% dels 1.316,7 Gb de reserves mundials de 2007.

Així mateix, és bo contrastar l'anterior seqüència d'estimació de reserves amb l'evolució de les noves descobertes de pous (figura 3.2), segons J. Laherrère, enginyer jubilat de la petroliera francesa Total [Lah-2008].

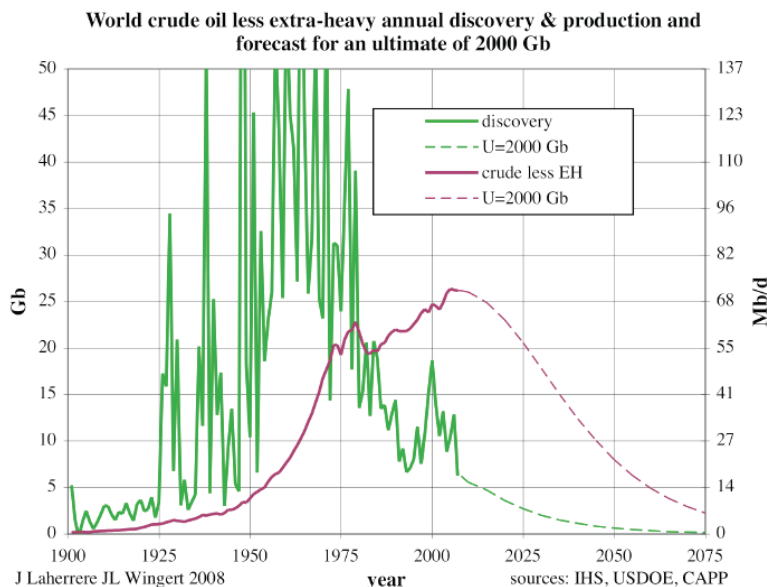


Figura 3.2. Descobriments anuals de petroli en el món (en verd) i producció (en lila). Previsions en línies discontinües. **Font:** J. Laherrère i J. L. Wingert [Lar-2008]

La figura 3.2 mostra que els nous descobriments de petroli decauen abruptament a partir de l'any 1975, mentre que la producció (i el consum) continuen pujant, encara que de forma més moderada després de les crisis del petroli de 1973 i 1979. Els nous descobriments no justifiquen els creixements de les estimacions de reserves de petroli d'Oil & Gas Journal.

La figura 3.2 també mostra el zenit del petroli, del qual es parlarà més endavant.

Evolució de les estimacions de reserves de gas natural

De manera anàloga, les estimacions de les reserves de gas natural també han anat creixent en el temps (s'han més que duplicat en el període 1980-2008, figura 3.3) i també presenten algunes discontinuïtats, més en sintonia amb els nous descobriments de camps de gas.

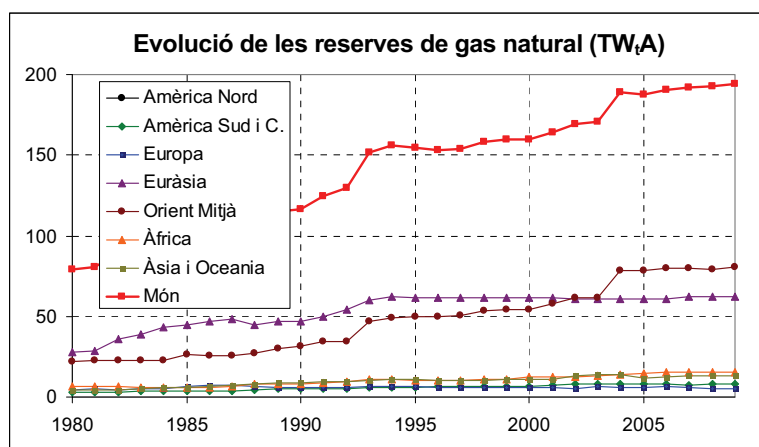


Figura 3.3. Evolució de les reserves mundials de gas natural, traduïdes a TWtA. **Font:** Oil & Gas Journal (EIA-govEUA). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Laherrère també proporciona una gràfica amb els nous descobriments de gas natural, comparats amb l'evolució de la producció (i del consum).

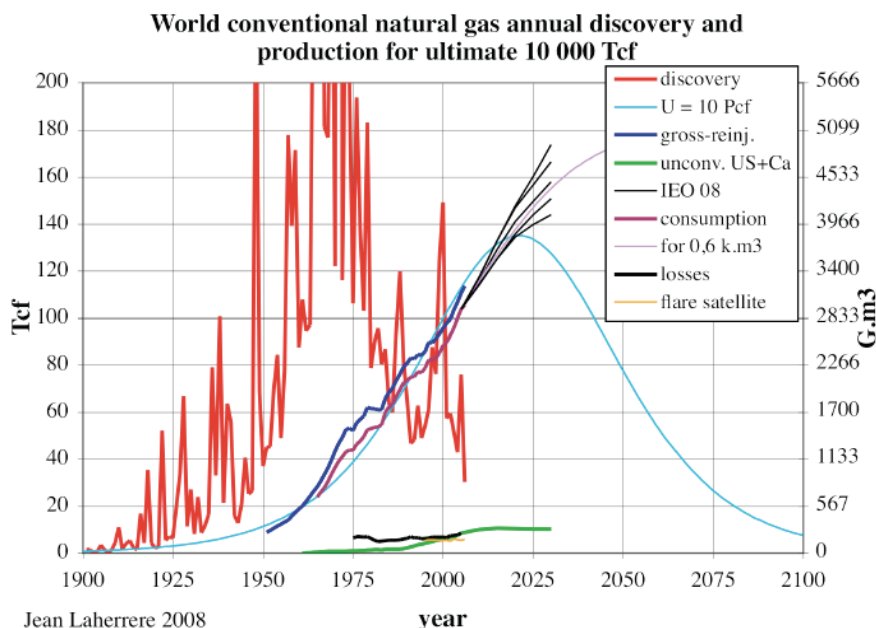


Figura 3.4. En *vermell*: descobriments anuals de gas convencional en el món; en *blau*: gas reinjectat; en *lila*: gas consumit; en *verd*: gas no convencional; en *negre*: pèrdues; en *groc*: cremadors de gas en els pous (detectats per satèl·lit), en *blau clar*: previsió de producció-consum; en *negre fina* (diverses línies): previsions d'*International Energy Outlook* (IEO-2008, EIA-govEUA). **Font:** J. Laherrère i J. L. Wingert [Lar-2008]

La figura 3.4 mostra que, si bé en els darrers anys encara hi ha hagut alguns descobriments importants de gas natural, la tendència és a la baixa. Per tant, les dades de les figures 3.3 i 3.4 per al gas natural són més concordants, tot i que podria ser interessant indagar en les discontinuïtats de 1992 i 2003 que s'observen a la Figura 3.3.

En tot cas, aquesta gràfica també assenyalava (amb un cert retard respecte al petroli), el zenit del gas natural entre els anys 2015 a 2020.

3.3. Anàlisi de les reserves de carbó

El carbó és el combustible fòssil més abundant i també el que té uns impactes ambientals locals (contaminació per fums), regionals (pluja àcida) i mundials (emissions de CO₂ a l'atmosfera) més importants. Per tant, la seva avaluació té una gran incidència.

El carbó va ser el combustible amb el qual es va desenvolupar la Revolució Industrial de final del segle XVIII i al llarg del segle XIX a Europa i als Estats Units. Va ser la base fonamental del desenvolupament dels països del bloc soviètic i, avui dia, continua essent la base energètica principal de molts països (Xina, Índia, Estats Units, Japó, Corea del Sud, Austràlia, Àfrica del Sud)

Darrerament, des que ha començat a escassejar el petroli en relació amb la demanda (com denota el preu màxim de tots els temps de 140 \$/barril el 2007, just abans d'iniciar-se la crisi financera), algunes grans potències econòmiques (especialment la Xina i els Estats Units) n'han incrementat el consum, fet que incideix en el consum mundial.

El World Energy Council (WEC), organització internacional amb seu a Londres fundada el 1923, capdavantera en els estudis sobre energia, des de l'any 1924 proporciona periòdicament estimacions, entre altres, dels recursos i de les reserves de carbó que constitueixen una referència sobre aquest tema. La taula 3.5 reproduïx les dades de les darreres set

estimacions de reserves de carbó dels principals països productors i del conjunt del món (que presenten una major coherència global que les anteriors).

Taula 3.5. Evolució de les estimacions de les reserves de carbó (Tg, o milions de tones)¹

Països	1992 ² (1990)	1995 ² (1993 ?)	1998 ² (1996)	1999 ² (2001)	2002 ² (2004)	2005 ² (2007)	2007 ² (2009)
Estats Units	240.561	240.558	246.643	249.994	246.643	242.721	238.308
URSS	241.000	241.000					
Rússia	URSS	URSS	157.010	157.010	157.010	157.010	157.010
Xina	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500	114.500
Índia	62.548	69.947	74.733	84.396	92.445	59.498	58.600
Austràlia	90.940	90.940	90.400	82.090	78.500	76.600	76.200
Àfrica del Sud	55.333	55.333	55.333	49.520	48.750	48.000	30.408
Kazakhstan	URSS	URSS	34.000	34.000	31.279	31.300	31.300
Ucraïna	URSS	URSS	34.356	34.153	34.153	33.873	33.873
Alemanya	80.069	67.300	67.000	66.000	6.739	6.708	6.708
Polònia	41.200	42.100	14.309	22.160	14.000	7.502	7.502
Regne Unit	7.148	2.500	1.500	1.500	220	155	155
Indonèsia	32.063	32.063	5.220	5.370	4.968	4.328	4.328
Sèrbia i Mont.	16.570	16.570	16.472	16.256	16.591	13.885	13.885
Brasil	2.359	2.845	11.950	11.929	10.113	7.088	7.059
Colòmbia	4.539	4.539	6.749	6.648	6.611	6.959	6.814
Resta del món	73.821	75.369	89.207	83.760	79.857	65.293	67.109
Món	1.039.183	1.031.610	984.211	984.453	909.064	847.488	826.001

¹ La sèrie temporal s'inicia el 1924 i hi ha vuit estimacions abans de la de 1992. Tanmateix, les primeres no s'han reproduït a causa de les omissions o la major incoherència de les dades.

² Reserves a la fi de l'any (entre parèntesis, la data de publicació).

Font: *Survey of Energy Resources* del WEC (World Energy Council), recollides per l'EIA-govEUA (excepte les dades dels EUA). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Estimacions poc precises en les reserves de carbó

Tal com fa notar l'Energy Watch Group en el seu estudi sobre el carbó [EWG-2007], les dades del World Energy Council «són de pobra qualitat». Probablement, això es deu que WEC recull informació de diferents països amb criteris no uniformes de comptabilització.

1. En el període considerat (1992-2007, taula 3.5), les reserves disminueixen contínuament (contràriament a les de petroli, a les de gas natural i, com es veurà al capítol 8, a les d'urani). Concretament, disminueixen en 213.182 Tg, mentre que, segons l'EIA, la producció mundial de carbó en aquests setze anys ha estat de 80.413 Tg; per tant, hi ha una revisió global a la baixa de 122.769 Tg de reserves de carbó, no justificada pel consum.
2. Hi ha diversos països de grans recursos que disminueixen de forma injustificada les reserves de carbó. L'Índia, després d'incrementar les estimacions fins a 92.455 Tg el 2002, baixa sobtadament a 58.600 Tg el 2007; L'Àfrica del Sud cau des de 55.333 Tg el 1999 fins a 30.408 Tg el 2007; Indonèsia, sense reserves significatives el 1989, puja primer a 32.063 Tg el 1992 però cau a 5.220 Tg l'any 1998; semblantment, el Brasil puja de 2.845 a 11.950 Tg el 1998 i després baixa a 7.088 el 2005.
3. Tanmateix, les revisions de reserves a la baixa més espectaculars es donen en alguns països europeus en estat avançat d'explotació (o en fase final): Alemanya, amb unes reserves estimades de 80.069 Tg l'any 1992, les redueix sobtadament deu anys després (2002) a 6.739 Tg; Regne Unit, que el 1980 se li reconeixien 45.000 Tg (fora de la taula 3.5), avui dia té unes reserves de carbó residuals (155 Tg), o Polònia, amb unes reserves reconegudes de 41.200 Tg l'any 1992 que han anat fent successius descensos i oscil·lacions fins a situar-se avui dia en 7.502 Tg.

Qualitats dels carbons

4. Els carbons presenten qualitats molt més diverses que el petroli o el gas natural (taula 3.6). Així, doncs, per quantificar la importància de les reserves, cal traduir el tonatge en recursos d'energia. No són el mateix una tona d'antracita (uns 32 GJ/Mg) que una tona de carbó bituminós (més de 23,865 GJ/Mg, segons l'IEA), que una tona de carbó subbituminós (entre 17,435 i 23,865 GJ/Mg, segons l'IEA) i una tona de lignit (menys de 17,435 GJ/Mg), que pot arribar a 5,5 GJ/Mg en els lignits de baixa qualitat. Per països, els valors extrems de qualitats de carbó són Veneçuela i Grècia (32,087 i 5,261 GJ/Mg).

Taula 3.6. Reserves de carbó per regions segons el tipus (2007) i l'equivalent energètic

Regions	Tipus de carbó ¹				Energia primària	
	Antr./bitum. Tg	Subbitum. Tg	Lignit Tg	Total Tg	Total ² TW _e A	Rend.E.M. ³ GJ/Mg
Amèrica del Nord	113.281	100.473	32.526	246.280	186,043	23,823
Amèrica del Sud i c.	6.964	8.019	24	15.007	10,252	21,545
Europa	8.433	3.567	34.068	46.068	16,065	10,997
Euràsia	93.609	114.049	18.337	225.995	152,503	20,698
Orient Mitjà	1.386	0	0	1.386	1,188	27,033
Àfrica	31.839	171	3	32.013	25,108	24,734
Àsia i Oceania	155.809	38.540	64.904	259.253	185,873	22,610
Món	411.321	264.819	149.862	826.002	577,032	22,031

¹ Antracita/bituminós; subbituminós; lignit.

² Valors energètics obtinguts a partir del tonatge de les reserves de carbó estimades l'any 2007 (font: WEC) i rendiment energètic mitjà per a cada regió (en GJ/Mg) l'any 2007.

³ Rendiment energètic mitjà obtingut a partir dels valors del tonatge total i de l'energia primària dels carbons extrets en cada país l'any 2007 (font: EIA-gov EUA). Se suposa que les reserves no són de millor qualitat que el carbó que es produeix avui dia; en tot cas, tendiran a donar un rendiment energètic inferior a mesura que s'exhaureixin els recursos de millor qualitat.

Fonts: *Survey of Energy Resources 2009*, de WEC (World Energy Council), recollides per l'EIA (excepte les dades d'EUA); IEA-OCDE; EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

5. Les grans regions carboníferes (Àsia i Oceania, Amèrica del Nord i Euràsia) reparteixen les seves reserves entre carbons d'alta qualitat (antracites i butiminosos) i de baixa qualitat (subbituminosos i lignits). Europa, que va a continuació, té més del 80% dels carbons de baixa qualitat (fonamentalment, lignits) i des d'un punt de vista energètic, queda darrera d'Àfrica, amb un tonatge més baix però de carbons quasi exclusivament d'alta qualitat. Amèrica del Sud, amb un tonatge inferior (la meitat d'Àfrica i un terç d'Europa), reparteix els carbons entre alta i baixa qualitat. I, finalment, l'Orient Mitjà té unes reserves de carbó quasi testimonials però d'alta qualitat.
6. Els països amb més reserves (superiors a 4.000 Tg) se situen en els següents grups de qualitats de carbó: a) més del 90% de carbons d'alta qualitat: Àfrica del Sud (100,0), Colòmbia (94,4), Índia (92,2), Kazakhstan (90,0) i Polònia (80,1); b) entre el 40 i el 60%: Xina (54,3), Canadà (52,8), Austràlia (48,3), EUA (45,7) i Ucraïna (45,3); c) entre el 20 i el 40%: Indonèsia (39,8), República Txeca (37,2) i Rússia (31,3); d) menys del 20%: Alemanya (2,3), Brasil (0,0) i Sèrbia i Montenegro (0,0).

Per tant (i com posa de manifest l'Energy Watch Group en la seva anàlisi sobre el carbó [EWG-2007]), aquestes observacions porten a pensar que, probablement, hi ha menys reserves de carbó de les que es presumeix. I, a més, a mesura que s'extreuen els millors carbons, els que resten són cada vegada de menys qualitat.

4. Creixements i projeccions

4.1. Divorci entre projeccions de creixement i reserves

En aquest capítol, es contrasten les projeccions de creixement dels consums energètics previstos per les grans agències de l'energia (l'EIA, Energy Information Administration, del Govern dels EUA i la IEA, Agència Internacional d'Energia, de l'OCDE), amb les reserves d'aquests recursos acceptades avui dia. Aquest supòsit condueix a un creixement continu fins que, cap a l'any 2060, s'exhaureixen les darreres reserves de carbó i es produeix el col·lapse de l'actual sistema de desenvolupament tecnològic i econòmic.

Aquesta visió poc optimista és contrastada pels defensors de l'actual societat del creixement que al·leguen que els *recursos energètics* són molt superiors a les *reserves* (cosa que és certa) i que la seva extracció és tan sols una qüestió de tecnologia i de preu. Per tant, el desenvolupament tecnològic i el mercat proporcionaran els recursos necessaris per a diverses generacions futures, de manera que no cal preocupar-se.

Aquesta darrera «visió antropocèntrica» falsament optimista de la realitat és contrastada més endavant (capítol 5) per una «visió ecosfèrica» [Gar-2010] més realista en què s'analitzen els límits que la naturalesa imposa a l'explotació dels seus recursos i que, per primera vegada, afecten la globalitat de la humanitat: el *zenit de producció* i el requeriment d'una *taxa de retorn energètic* (TRE, o EROI en anglès) sensiblement superior a 1.

Des de fa un temps, les grans agències de l'energia (EIA-govEUA i IEA-OCDE) fan projeccions de creixement del consum d'energia per als propers 20 o 25 anys. Concretament, l'informe anual de l'EIA, *International Energy Outlook 2010* [IEO-2010], preveu un creixement del consum per al conjunt de les energies no renovables (petroli, gas natural, carbó i urani) de l'1,313% anual (en progressió geomètrica) des de 14,562 fins a 19,915 TW_t en el període 2006-2030, i l'informe anual de la IEA, *World Energy Outlook 2009* [WEO-2009], projecta un creixement de 13,564 a 19,367 TW_t, per al mateix període.

A partir d'aquestes dades, i de les reserves totals de recursos energètics no renovables el 2007 (1.126,191 TW_tA, capítol 3) s'ha projectat el procés d'exhauriment d'aquests recursos a partir dels tres pressupòsits següents:

- a) El consum anual d'energies no renovables augmenta segons l'increment anual (geomètric) calculat a partir dels valors de 2006 i 2030 (taula 4.1). Dóna projeccions notablement coincidents per a les dues fonts d'informació considerades.
- b) Tots els recursos energètics (petroli, gas natural, carbó i urani) participen solidàriament, és a dir, quan un recurs s'exhaureix, els altres recursos incrementen el consum per cobrir les projeccions totals de consum d'energia.
- c) No s'incrementen les reserves de recursos energètics. Si bé aquest supòsit no és cert en alguns dels recursos (especialment, el gas natural), no és així en els dos recursos més abundants: les reserves de carbó no han fet més que baixar els darrers anys i els cada cop més escassos nous descobriments de petroli poden quedar àmpliament compensats per les falses «reserves polítiques» (capítol 3).

Com s'indica a continuació (taula 4.1), extrapolant els creixements previstos per l'EIA-govEUA i la IEA-OCDE (que no fan sinó que reflectir les tendències de consum actuals, sense considerar els límits de les reserves), s'arribaria a l'exhauriment de tots els combustibles no renovables l'any 2060 o 2061 (és a dir, dintre de 50 anys!).

Taula 4.1. Projeccions de creixement de l'EIA-govEUA i de la IEA-OCDE¹						
Energies no renovables (petroli, gas natural, carbó i urani) solidàriament						
Font	Unitats	Consum al món			Reserves	
		2006 ¹	2030 ¹	% anual ²	2007	any d'exhaustió
EIA-govEUA	TW _t PBTU	14,562 435,3	19,915 595,3	1,313		2060
IEA-OCDE	TW _t MTOE	13,564 10.217	19,367 14.588	1,495		2061
Avaluació C. Riba	TW _t A				1.126,191	

¹ S'han adoptat els valors dels anys 2006 i 2030 ja que eren comuns a les dues fonts d'informació (EIA i IEA).
² Percentatge de creixement anual (geomètric) en el període 2006-2030.
Fonts: EIA-govEUA, IEA-OCDE, el propi treball. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

En l'anàlisi que ve a continuació, s'ha partit de les dades i projeccions de l'EIA-govEUA (d'altra banda, molt properes a les de la IEA-OCDE). Si se segueix la hipòtesi de participació conjunta dels diferents recursos no renovables en el consum projectat, es dona la situació següent:

Les reserves de petroli (258,490 TW_tA l'any 2007) són les primeres a exhaurir-se l'any 2046 (dintre de 36 anys!). Amb el petroli exhaurit (fins aleshores el principal recurs energètic), si es manté el creixement previst per l'EIA, els consums es reparteixen entre les restants fonts no renovables encara amb reserves, i així successivament.

Aleshores, els exhauriments es precipiten en cadena durant els 15 anys següents: 3 anys després (2049), s'exhaureixen les reserves mundials de gas natural (215,164 TW_tA el 2006); 3 anys més tard (2052), s'exhaureixen les reserves mundials d'urani (72,564 TW_tA el 2006); finalment, 9 anys després (2060) s'exhaureixen ràpidament les restants reserves de carbó (577,032 TW_tA l'any 2007). La figura 4.1 mostra aquesta seqüència.

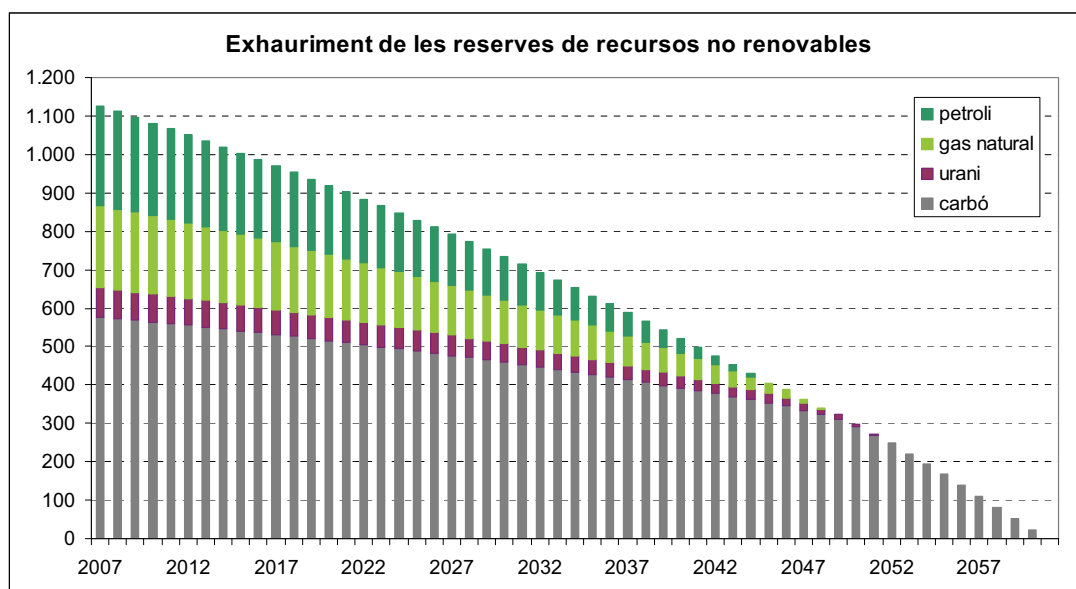


Figura 4.1. Exhauriment progressiu de les reserves de recursos no renovables (petroli, gas natural, carbó i urani) en el supòsit que actuen solidàriament cobrint les projeccions de consum de l'EIA. **Font:** EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

En començar a fallar els grans recursos energètics fòssils, es produeix un «efecte dòmino». Després d'exhaurir-se el petroli i el gas natural vers l'any 2049, encara resten més de la meitat de les reserves de carbó (uns 310 TW_{tA}), però aleshores, el carbó pràcticament sol (l'urani és residual) només pot sostenir el consum requerit poc més de 10 anys. Això fa veure l'inconvenient d'analitzar el sistema energètic recurs a recurs, com fan els índexs R/P (reserves/producció) que tractarem a continuació.

Les enganyoses relacions R/P (reserves/producció)

Les grans agències d'informació, les companyies petrolieres i els governs sovint utilitzen les relacions R/P (reserves/producció) de cada recurs individual per avaluar el temps que resta abans que s'exhaureixin. Aquests índexs R/P són un engany ja que:

1. No preveuen l'evolució futura del consum, sinó tan sols el consum actual. En efecte, les noves demandes tendeixen a l'alça, mentre que les eventuais noves descobertes, tendeixen a la baixa (forma de paràbola de la figura 4.1).
2. No tenen en compte la necessitat de repartir el consum dels recursos ja exhaurits entre els que encara són extraïbles. Per exemple, les immenses reserves de carbó totes soles cobreixen pocs anys de la demanda mundial d'energia.
3. No preveuen determinats efectes desfavorables com ara que, un cop exhaurit el petroli, quantitats creixents de gas natural i de carbó es transformaran en combustibles líquids destinats al transport. Aquestes transformacions tenen rendiments molt baixos i escurcen significativament les capacitats energètiques dels recursos originals.

Això és així seguint les pautes de creixement pronosticades per l'EIA-govEUA i la IEA-OCDE i també reclamades i desitjades per la majoria dels governs i les grans corporacions, i tàcitament acceptades per àmplies capes socials, sense informació precisa sobre els límits energètics.

Tanmateix, els límits que la naturalesa imposa (fonamentalment, el *zenit*, secció 4.3, i la *TRE*, secció 1.5) faran que les coses esdevinguin d'una altra manera i que l'escassetat es percebi molt abans, si la crisi actual no n'és ja una manifestació.

Reserves i recursos

L'informe anual *World Energy Outlook* de l'Agència Internacional d'Energia (IEA), de forma general i concretament a l'edició de 2008 [WEO-2008], tranquil·litza l'opinió pública mundial dient que “el món fins ara no va escàs de petroli ni de gas”. I continua dient: “les reserves provades de petroli i líquids de gas natural oscil·len entre 1,2 i 1,3 Tb o 10^{12} barrils (incloent-hi 0,2 Tb de petroli no convencional)” (quantitat que coincideix amb la consignada en aquest treball), tot i que reconeix que “la major part de l'augment de les reserves prové de revisions fetes els anys vuitanta per països de l'OPEP més que de nous descobriments”. Més endavant, WEO-2008 afegeix: “en definitiva, els recursos recuperables de petroli convencional, incloses totes les reserves provades i probables dels jaciments descoberts, els augments de les reserves i els jaciments per descobrir, es calculen en uns 3,5 Tb. Només una tercera part, 1,1 Tb, han estat extretes fins ara”. I, encara continua afirmant que “els recursos potencialment recuperables a llarg termini, comprénent el petroli extrapesat, les sorres petrolíferes i les pissarres bituminoses..., arriben als 6,5 Tb. Si s'hi afegeixen els recursos de les transformacions de carbó a líquids i de gas a líquids, el potencial s'incrementa fins a 9 Tb”. Entre 5 i 7 vegades les reserves de petroli provades!

Respecte al gas natural, WEO-2008, després d'afirmar que les “reserves provades avui dia són de 180 Tm³” (uns 6.350 Tft³, valor lleugerament superior al consignat en aquest treball), afirma que “les reserves provades actuals, junt amb l'augment de les reserves i els recursos no descoberts podrien superar els 400 Tm³”, i encara afegeix que “els recur-

sos de gas no convencional –que comprenen el gas de carbó, el gas compacte i el gas pissarra– encara són més abundants i podrien superar els 900 Tm³. 5 vegades les reserves de gas natural provades!

Aquestes xifres de la IEA (que volen tranquil·litzar el món econòmic) fan més referència a una estimació genèrica de recursos que a una avaluació seriosa de reserves. L'explotació de molts dels recursos ressenyats queda molt limitada, a la pràctica, per les conseqüències del *zenit de producció* i de la *taxa de retorn energètic*.

Tanmateix, l'edició de l'any següent [WEO-2009] passa per alt la qüestió de les reserves de petroli i rebaixa les de gas, mentre que fa un toc d'atenció sobre la necessitat urgent d'inversions energètiques si es vol assegurar la disponibilitat energètica.

Però, en tot cas, si fos possible extreure tots els recursos descrits a WEO-2008 (i suposem que els propietaris no renunciaran a explotar-los completament), aleshores, definitivament, el canvi climàtic no té solució (capítol 9).

4.2. Visió a partir de les reserves originàries

Quan es parla de reserves d'un recurs, es fa referència a la quantitat d'aquest recurs encara extraïble. Les *reserves originàries* (o *ultimate reserves*) fan referència al conjunt dels recursos ja extrets i extraïbles, com si ens situéssim a l'origen de l'extracció. En cada moment històric concret, aquests recursos originaris es reparteixen en dos sumands: la *producció acumulada*, o recursos ja consumits, i les *reserves* o recursos del futur.

La visió dels recursos des de la perspectiva dels recursos originaris ens ajuda a prendre consciència del patrimoni energètic inicial i del ritme de consum.

Els ritmes de producció i les reserves s'han analitzat anteriorment (capítols 2 i 3) i és relativament fàcil obtenir les dades per fer aquesta anàlisi. Tanmateix, la *producció acumulada* des de l'inici de l'extracció del recurs presenta una dificultat addicional pel menor interès que desperta (ja és passat, no resol el problema actual ni futur) i la dificultat de fer avaluacions amb dades més fragmentades i menys fiables.

Produccions acumulades

A continuació, s'expliquen els procediments que s'han seguit per a l'obtenció de les produccions acumulades. Per al petroli, el gas natural i l'urani (els recursos energètics no renovables d'extracció més recent) es parteix d'estimacions publicades per organitzacions reconegudes. En canvi, per a la producció acumulada de carbó (amb una història de més de 200 anys), hem hagut de recórrer a avaluacions indirectes més complexes.

Petroli i gas natural

En el cas del petroli i del gas natural, s'ha procedit de la manera següent. La USGS (United States Geological Survey), al seu informe 98-468 (*Identified Reserves, Undiscovered Resources and Futures*, <<http://pubs.usgs.gov/of/1998/of98-468/>>) proporciona unes estimacions de la producció acumulada l'1 de gener de 1993 de petroli (Gb) i de gas natural (Tcf) per a les diferents regions del món i els principals països que tenen aquests recursos. La resta de producció acumulada (1993-2007) s'ha obtingut sumant les produccions anuals d'aquests dos recursos proporcionades per l'EIA-govEUA.

Carbó

L'avaluació de la producció acumulada de carbó ha resultat més complexa, ja que no hem trobat cap font d'informació que proporcioni aquestes dades directament. La taula 4.2 s'ha elaborat (creiem que amb una aproximació suficient i contrastada) a partir de:

a) *Emissions de carboni a l'atmosfera per combustió del carbó*

El CDIAC [Bod-2010], centre americà que compta amb el suport del Departament d'Energia (DOE) del Govern dels EUA, proporciona valors de les emissions de carboni originades per diferents causes (entre elles, la combustió del carbó) per als diferents països, en un període que abasta des de l'origen de l'ús significatiu dels combustibles fòssils a cada país (en algun cas, des de 1751) fins a 2007.

Atès que les emissions de carboni es relacionen amb el *consum acumulat* de carbó, aquestes xifres s'han traduït a energia consumida, i s'han corregit amb les importacions i les exportacions per transformar-les a *producció acumulada* d'energia primària de carbó.

b) *Estimació de les importacions-exportacions*

L'EIA-govEUA proporciona dades sobre les importacions i les exportacions de carbó entre 1980 i 2007 (de fet, fins al 2008 a dia d'avui). Atès que els mercats de carbó eren relativament menors abans de 1980, a partir de les dades anteriors i d'informacions sobre la històrica de les importacions-exportacions de carbó en els diferents mercats del món, s'han fet les corresponents extrapolacions per avaluar el volum dels intercanvis anteriors.

Els resultats són els que s'il·lustren a la taula 4.2

Taula 4.2. Estimació de la producció acumulada i de les reserves originàries de carbó						
Regions	CDIAC emissions Tg C ¹ ant. 2007	Traducció a consum TW _t A ant. 2007	EIA Imp-exp TW _t A ant. 2007	Total producció TW _t A ant. 2007	Reserves futures TW _t A post. 2007	Reserves Originàries TW _t A anterior 1750
Amèrica del N.	45.475,4	59,011	3,529	62,540	186,043	248,583
Amèrica del S.	985,3	1,279	0,288	1,567	10,252	11,819
Europa	56,565,0	73,401	-5,206	68,195	16,065	84,260
Euràsia	18,255,0	23,689	0,853	24,542	152,503	177,045
Orient Mitjà	177,0	0,230	-0,192	0,038	1,188	1,226
Àfrica	4.287,3	5,563	1,399	6,962	25,108	32,070
Àsia i Oceania	45.053,2	58,463	-0,670	57,793	185,873	243,666
Món	71,965	221,636	0,000	221,636	577,032	798,669

¹ La transformació d'emissions de carboni (C) en energies es basa en una conversió de 89,6 gCO₂/MJ (= 24,44 gC/MJ = 0,00129765 TgC/TW_tA) que és la mitjana dels carbons (la relació entre el CO₂ emès i l'energia primària difereix molt poc entre els diferents tipus de carbó).

Fonts: CDIAC, per a les emissions de carboni acumulades fins a 2007 per combustió de carbó; EIA-govEUA, per a les importacions i exportacions 1980-2007; EIA-govEUA i altres fonts, per avaluar les importacions i exportacions anteriors. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Urani

Les avaluacions de la producció acumulada d'urani són senzilles d'obtenir, ja que el Red Book proporciona aquesta dada. En concret, el Red Book 2007 fa una estimació de la producció acumulada d'urani fins a la fi de 2007 (vegeu el capítol 8).

Resum sobre les reserves originàries

La taula 4.3 estableix el resum de dades sobre *reserves originàries* de cada un dels recursos (petroli, gas natural, carbó i urani) per a cada una de les regions del món (Amèrica del Nord, Amèrica del Sud i Central, Europa, Euràsia, Orient Mitjà, Àfrica i Àsia i Oceania), repartits en els seus components (*producció acumulada* i *reserves futures*) per a l'any 2007. També inclou diversos percentatges i la referència de la població de cada una de les regions.

Taula 4.3. Producció acumulada, reserves futures i reserves originàries (TW_tA)

Regions	Petroli ¹			Gas natural ¹			Carbó ¹		
	Prod acu ant. 2007	Resv fut post. 2007	Resv orig ant. 1750	Prod acu ant. 2007	Resv fut post. 2007	Resv orig ant. 1750	Prod acu ant. 2007	Resv fut post. 2007	Resv orig ant. 1750
Amèrica del N.	52,1	41,4	93,5	40,3	9,7	50,1	62,5	186,0	248,5
Amèrica del S.	18,7	20,9	39,6	2,9	9,1	12,0	1,6	10,3	11,9
Europa	12,1	3,0	15,1	10,0	6,0	16,0	68,2	16,1	84,3
Euràsia	31,1	19,5	50,5	25,1	68,4	93,5	24,6	152,5	177,1
Orient Mitjà	56,7	145,3	202,0	5,3	90,2	95,4	0,0	1,2	1,2
Àfrica	18,9	22,0	40,9	3,0	17,4	20,4	6,9	25,1	32,0
Àsia Oceania	16,6	6,5	23,1	7,0	14,7	21,7	57,8	185,9	243,7
Món	206,1 44,4%	258,6 55,6%	464,7 100,0%	93,7 30,3%	215,4 69,7%	309,1 100,0%	221,6 27,75%	577,1 72,25%	798,7 100,00%
Regions	Urani ¹			Energies no renovables ¹			Resv orig %	Exhaur. %	Població Mhab
	Prod acu ant. 2007	Resv fut post. 2007	Resv orig ant. 1750	Prod acu ant. 2007	Resv fut post. 2007	Resv orig ant. 1750			
Amèrica del N.	10,7	10,5	21,2	164,4	247,7	412,1	24,6	40,1	443,1
Amèrica del S.	0,1	4,1	4,1	23,1	44,4	67,5	4,0	34,4	462,3
Europa	6,5	1,6	8,1	95,2	26,6	121,8	7,3	78,4	595,5
Euràsia	5,8	23,0	28,8	86,3	263,3	349,6	20,8	24,7	284,1
Orient Mitjà	0,0	1,6	1,6	62,0	238,2	300,1	17,9	20,7	194,9
Àfrica	5,6	14,4	19,9	33,6	78,9	112,5	6,7	30,4	945,9
Àsia Oceania	2,6	20,1	22,7	76,7	227,2	303,9	18,5	27,0	3.688,3
Món	31,3 29,4%	75,2 70,6%	106,5 100,0%	541,3 32,5%	1.126,2 67,5%	1.667,5 100,0%	100,0	32,9	6.614,1

¹ En cada un dels recursos, hi ha tres columnes: *producció acumulada* anterior a 2007; *reserves futures* posteriors a 2007; *reserves originàries* abans del consum massiu (simbòlicament, abans de 1750).
Fonts: EIA-govEUA, CDIAC, *Red Book 2007*. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La visió a partir de les *reserves originàries* proporciona una imatge molt més completa de la situació. En efecte, posa en relleu l'ús dels recursos que ja hem fet (*producció acumulada*) i les possibilitats futures d'ús dels recursos.

En aquest sentit, és especialment allisonadora la situació d'Europa que, des del punt de vista dels recursos originaris no està en la pitjor de les situacions però que, en canvi, l'ús històric dels recursos ens situa en una rigorosa posició de cua en el context energètic internacional. Europa, que va ser la regió que va encapçalar el desenvolupament industrial basat en grans consums d'energia fòssil, també ha d'encapçalar el repte d'aprendre a desenvolupar-se en un context d'energia decreixent.

A continuació, s'estableixen dues seqüències de representacions gràfiques.

La primera (figures 4.2 a 4.6) mostra els estats actuals (any 2007) en relació a la *producció acumulada* i les *reserves futures* de cada recurs i del conjunt de recursos no renovables per a les diferents regions i per al món.

La segona (figures 4.7 a 4.13) reproduïxen la mateixa seqüència d'exhauriment dels recursos no renovables de la figura 4.1, però en el format de *reserves originàries* repartides entre la *producció acumulada* i les *reserves futures*.

En totes aquestes figures, la línia vertical 0 representa el moment actual (2007, data més recent en què es tenen estimacions de reserves i produccions). A mà esquerra, hi ha la *producció acumulada* (recursos consumits, de color rosa) i, a mà dreta, hi ha les *reserves futures*, repartides entre les que està previst consumir en els propers 5 anys (segons les previsions de l'EIA-govEUA o de la IAE-OCDE, fonamentalment coincidents; en color vermell) i la resta de reserves futures (en color lila).

Representació de les reserves originàries, segons tipus

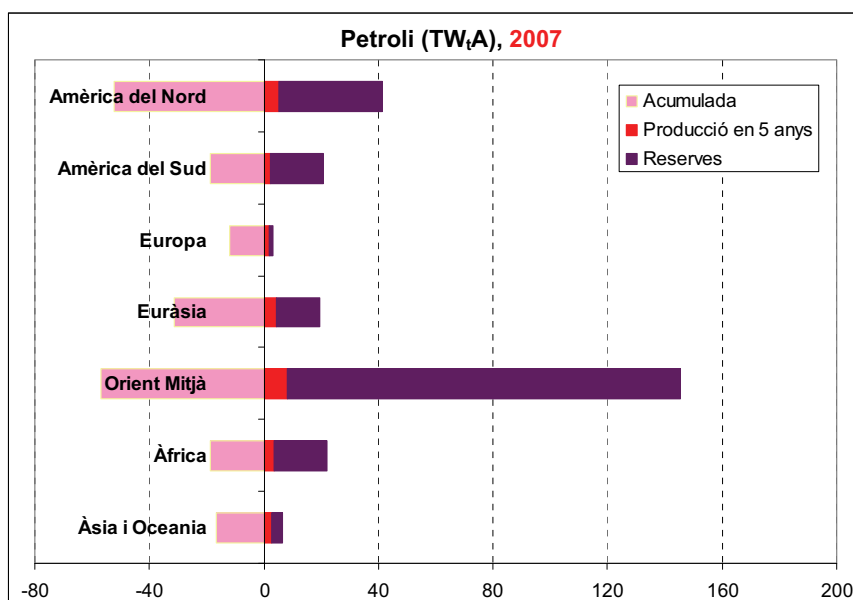


Figura 4.2. Petrolí: *producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures*, per regions. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

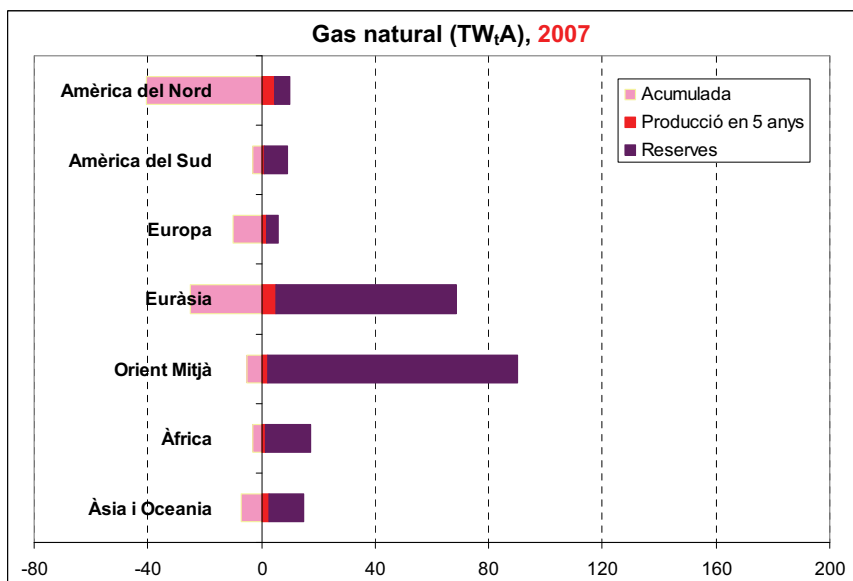


Figura 4.3. Gas natural: *producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures*, per regions. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

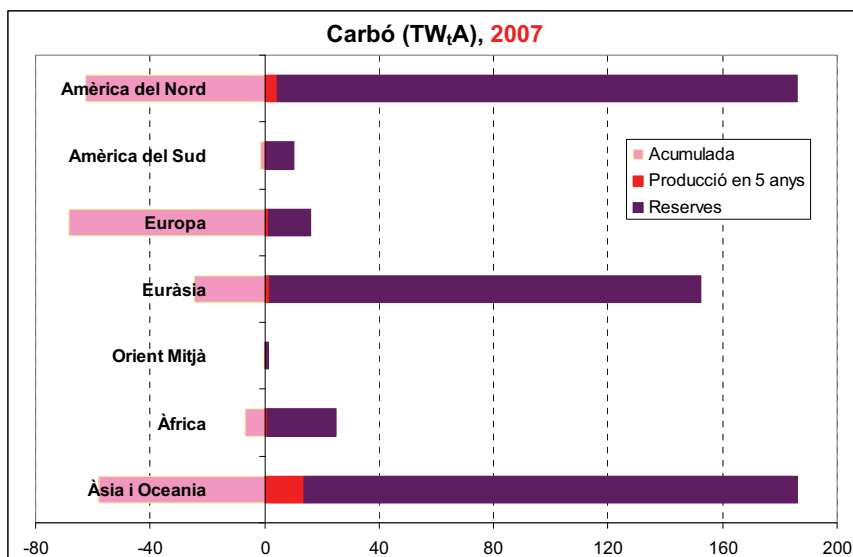


Figura 4.4. Carbó: *producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures*, per regions. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

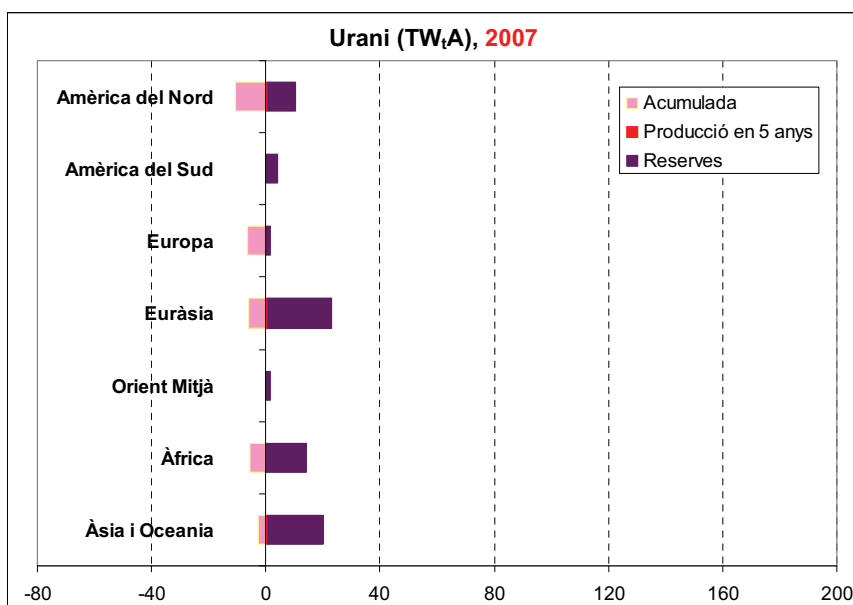


Figura 4.5. Urani: *producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures*, per regions. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Cal assenyalar que, en les quatre representacions anteriors (figures 4.2 a 4.5), s'ha mantingut la mateixa escala a fi de facilitar la percepció de la importància dels diferents recursos entre si.

En la representació de la figura 4.6 per al conjunt de recursos energètics no renovables, s'ha hagut de canviar l'escala a efectes pràctics.

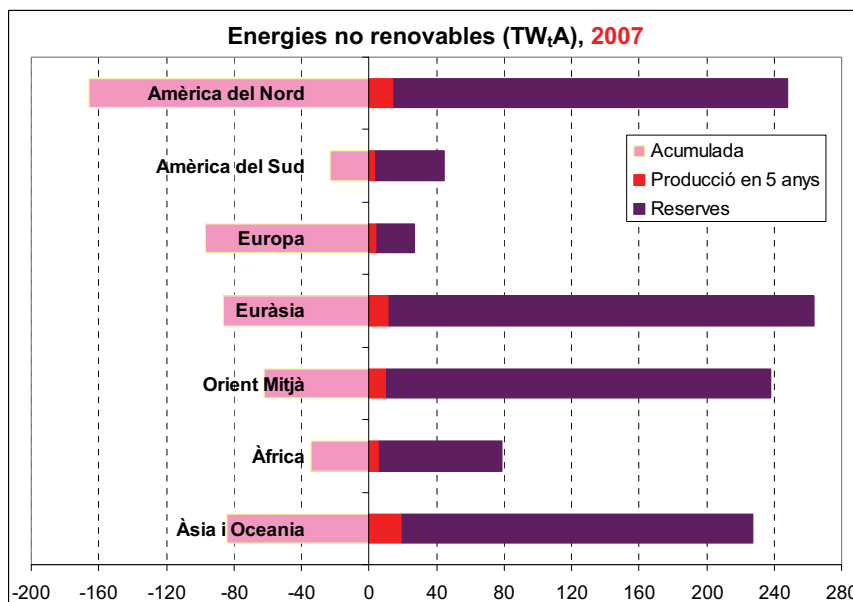


Figura 4.6. Energies no renovables: *producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures*, per regions. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris als resultats de les estimacions de produccions acumulades, reserves futures i reserves originàries (taula 4.3 i figures 4.2 a 4.6).

Produccions acumulades

- 1) Les *produccions acumulades* del conjunt de recursos energètics no renovables fins a l'any 2007 (552,7 TW_{tA}) són, aproximadament, 1/3 de les *reserves originàries* estimades avui dia.
- 2) La *producció acumulada de petroli* en termes relatius és la més important entre els recursos energètics no renovables (206,1 TW_{tA} i el 44,4%); si s'eliminen les «reserves polítiques» de petroli (increments de l'OPEP dels anys vuitanta; inclusió de les sorres bituminoses del Canadà; 479,1 dels 1.316,7 Mb (mega barrils) de reserves de 2007), aquest percentatge s'eleva fins al 54,8%. Això significaria que ja hem superat el zenit del petroli.
- 3) La *producció acumulada* dels altres tres combustibles no renovables se situa entre el 26,7 i el 30,3% de les *reserves originàries*, és a dir, que ja s'ha consumit una part considerable de les reserves. El percentatge més baix és el de carbó.

Exhauriment dels recursos, per regions

- 4) Destaca l'exhauriment dels recursos d'Europa. De les *reserves originàries* d'Europa (123,4 TW_{tA}, superiors a Àfrica i Amèrica del Sud i Central), n'hem exhaurit pràcticament les 4/5 parts (78,4%). I això és veritat en pràcticament tots els recursos: petroli (el 80,1%), el carbó (80,9%) i l'urani (80,2%), i tan sols se n'escapa una mica el gas natural (62,5%).
- 5) En aquest sentit, Europa és l'avantguarda del món: l'articulació de polítiques sense carboni respondrà a la manca de combustibles fòssils per cremar. De moment, continuem cremant els d'altres regions: el petroli de l'Orient Mitjà, el gas natural de Rússia i el carbó d'Àfrica, però, a mesura que la situació energètica mundial esdevingui més crítica, Europa patirà un escanyament de la seva economia tradicional.
- 6) En segon lloc, destaca Amèrica del Nord que ja ha consumit 2/5 de les seves reserves originàries (40,1%). Tot i tenir les reserves originàries més elevades (413,3 TW_{tA}, pràcticament 1/4 del món, el 24,6%, per a una població del 6,7%), la producció acumu-

lada de combustibles no renovables és de quasi 1/3 del món (el 30,0%; la segueix Europa, amb el 17,5%). Ha exhaurit el 85,1% del petroli convencional (eliminant la ficció de les “sorres bituminoses” del Canadà), el 80,4% del gas natural i el 50,5% de l'urani (malgrat les reserves excel·lents del Canadà). Tan sols resta el 74,8% del carbó, malgrat que n'ha consumit quasi tant com Europa (62,5 TW_tA).

- 7) Destaquen els casos d'Amèrica del Sud i d'Àfrica, que, malgrat ser regions poc desenvolupades i disposar de reserves originàries escasses (67,7 i 113,3 TW_tA, el 4,0 i el 6,7% mundials, molt inferiors a les seves poblacions), han consumit, fraccions considerables de les seves reserves originàries (el 34,4 i el 30,4%), fonamentalment a favor d'Amèrica del Nord i d'Europa.
- 8) Àsia i Oceania tenen uns recursos originaris importants (311,2 TW_tA, el 18,5% mundial), mal repartits a favor de la molt poc poblada i rica Austràlia, que difícilment podran atendre les necessitats de desenvolupament del 55,7 % de la població mundial. Pràcticament els recursos se centren en el carbó (81,8%). El nivell d'exhauriment és del 71,9% per al petroli, el 32,3% per al gas natural, tan sols del 23,7% del carbó (reserves originàries de 236,3 TW_tA), i l'11,4% per a l'urani (fonamentalment a Austràlia).
- 9) Finalment, en aquest repartiment desigual dels recursos energètics, dues regions (Orient Mitjà i Euràsia) acumulen el 38,7% de les reserves originàries, amb el 7,2% de la població mundial. A més, ho fan amb els combustibles més estratègics: el 54,4% del petroli (202,0 TW_tA a l'Orient Mitjà i 50,5 a Euràsia) i el 61,1% del gas natural (95,4 TW_tA a l'Orient Mitjà i 93,5 a Euràsia). Euràsia també té recursos significatius de carbó i els primers recursos d'urani del món (27,1%). Aquestes dues regions també presenten els nivells d'exhauriment més baixos del món (el 20,7% a l'Orient Mitjà i el 24,7% a Euràsia).

Seqüència d'exhauriment de les energies no renovables

A continuació, es mostra una seqüència de l'exhauriment dels recursos energètics mundials realitzada a partir dels pressupòsits de la figura 4.1 (creixements del consum previstos per l'EIA-govEUA). Però ara s'hi inclouen les produccions acumulades.

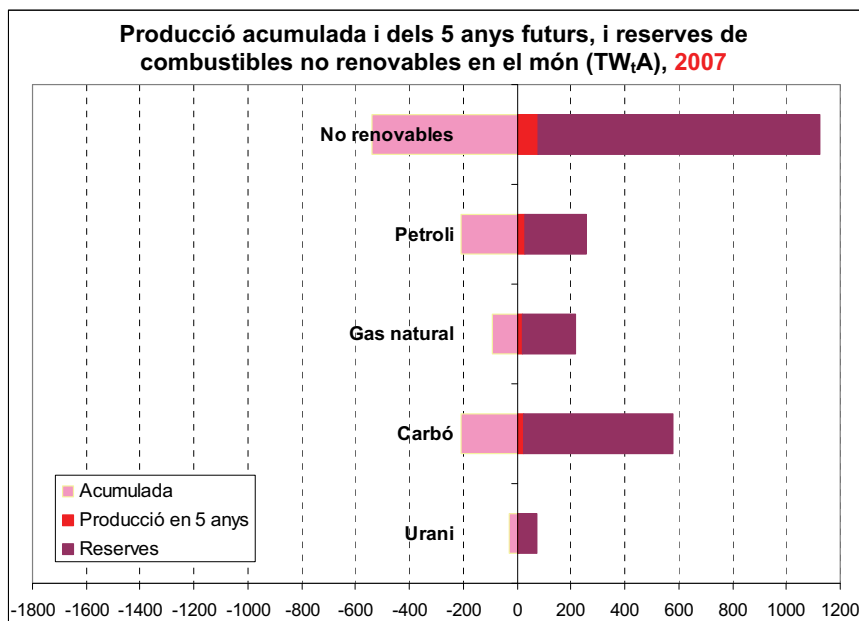


Figura 4.7. Energies no renovables en el món, 2007: producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures. **Fons:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

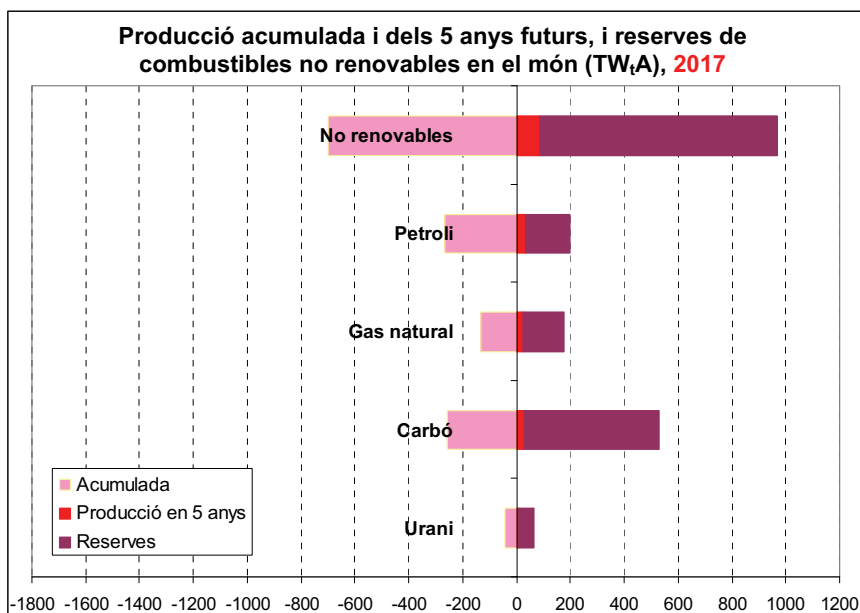


Figura 4.8. Energies no renovables en el món, 2017: producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

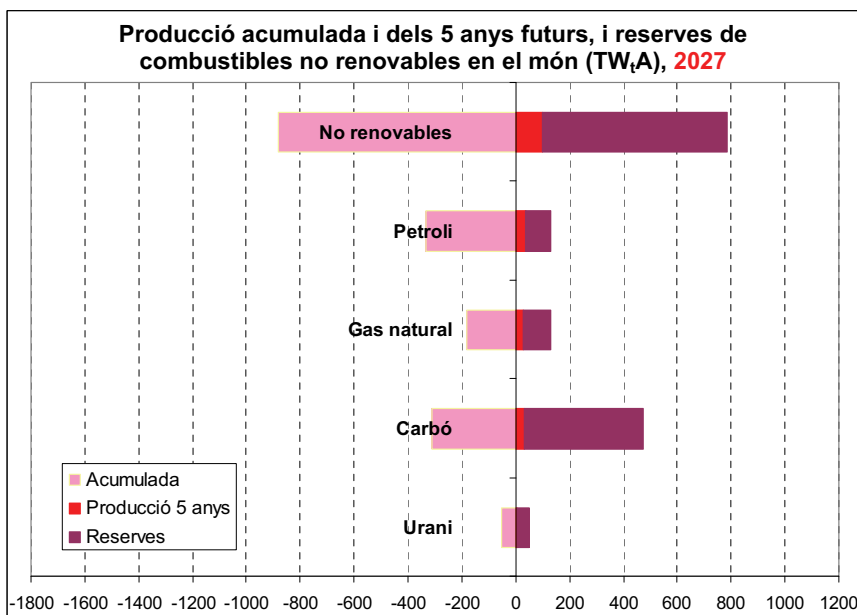


Figura 4.9. Energies no renovables en el món, 2027: producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

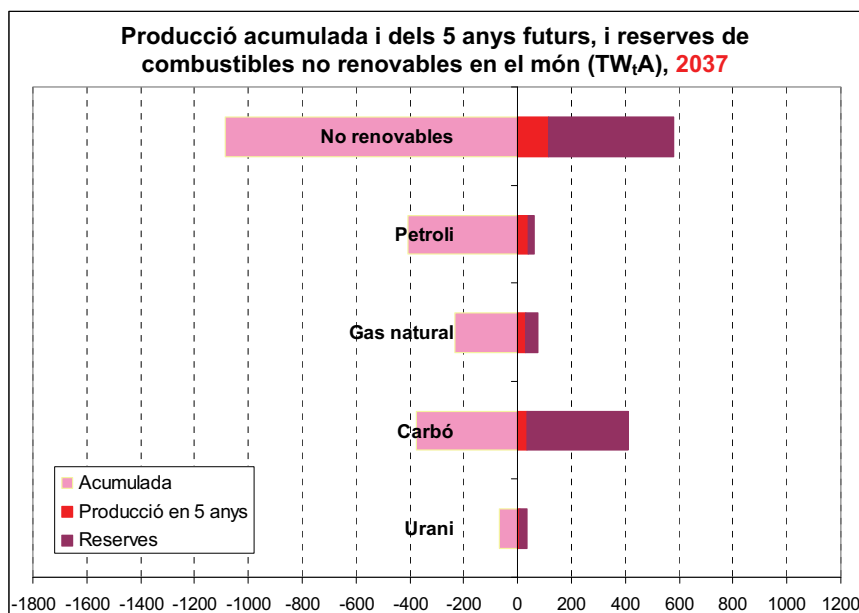


Figura 4.10. Energies no renovables en el món, 2037: producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures. **Fons:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

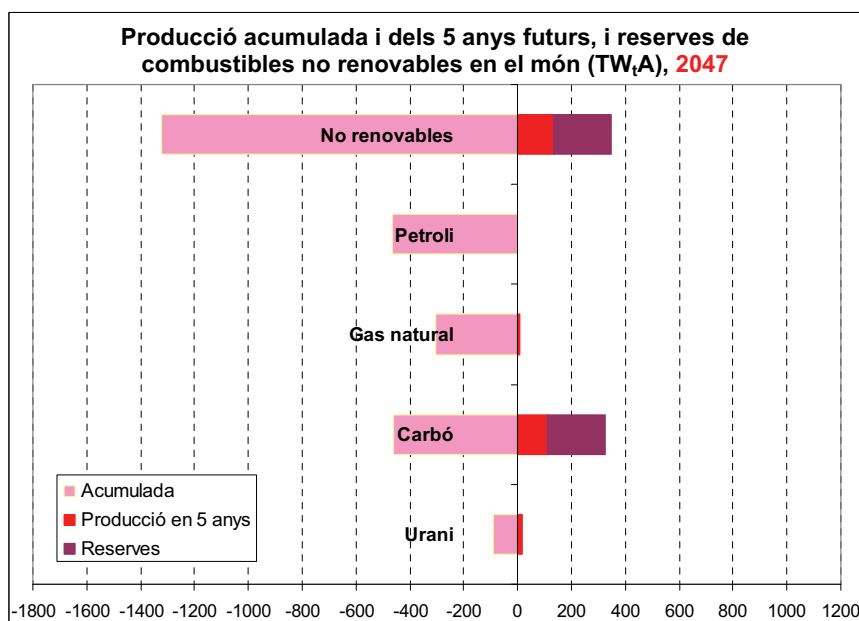


Figura 4.11. Energies no renovables en el món, 2047: producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures. **S'ha exhaurit el petroli (2046) i estan a punt de fer-ho el gas natural i l'urani.** **Fons:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

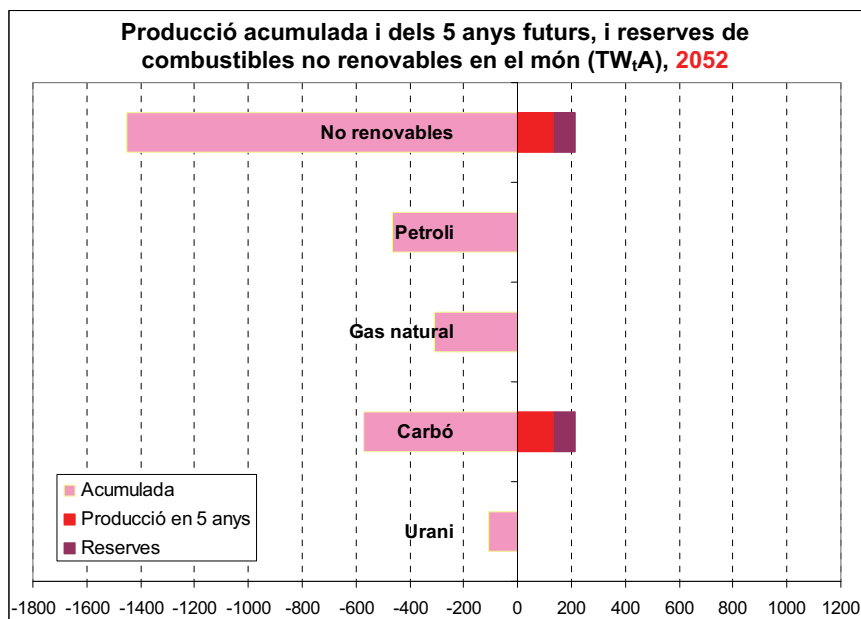


Figura 4.12. Energies no renovables en el món, 2052: producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures. S'ha exhaurit el gas natural (2049) i l'urani (2052). El carbó sol cobreix la demanda mundial d'energia. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

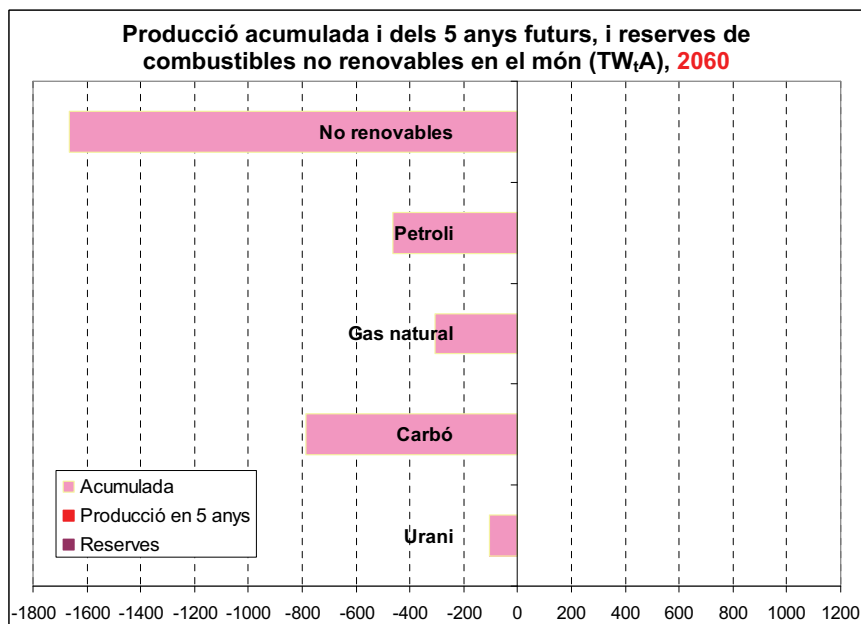


Figura 4.13. Energies no renovables en el món, 2060: producció acumulada; producció dels propers 5 anys; reserves futures. El 2060 s'han exhaurit totes les energies no renovables. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

4.3. El zenit dels diferents combustibles

Certament, la tecnologia i l'economia poden influir en l'obtenció de recursos energètics, però no de la forma determinant que pressuposen les concepcions economicistes i la visió antropocèntrica dominant.

La naturalesa té les seves pròpies lleis i, si no les tenim en compte, acaba recordant-nos-ho d'una manera o una altra. Hi ha hagut moltes civilitzacions sobre la Terra que han entrat en decadència o han desaparegut a causa d'haver exhaurit els recursos del seu medi. Fins ara, s'han desplaçat o han estat substituïdes per altres civilitzacions en altres indrets basades en nous recursos per explotar.

El problema d'avui dia és que el conjunt de la humanitat està desbordant les capacitats de recursos del conjunt de la Terra, fet que es manifesta de diferents maneres (empremta ecològica, declivi dels recursos, canvi climàtic).

Hi ha diversos límits amb relació als recursos energètics no renovables, entre els quals citarem el *zenit de producció* i la disminució de la *taxa de retorn energètic* (TRE, o EROI, *energy return on investment*) per sota d'un llindar determinat.

A continuació ens centrem en el primer.

El problema de la "seguretat energètica" (a curt termini) no és tant l'exhauriment de les reserves com el límit del ritme de producció. I aquí entra en joc la teoria del *zenit* (de producció) d'Hubbert.

L'any 1956, M. K. Hubbert, geofísic reconegut mundialment i consultor de l'empresa petroliera Shell, va predir que la producció de petroli als Estats Units arribaria al seu màxim (*zenit*, o *peak*) vers 1970 i que després començaria a declinar. Amb el temps, aquesta predicció ha resultat ser d'una exactitud remarcable.

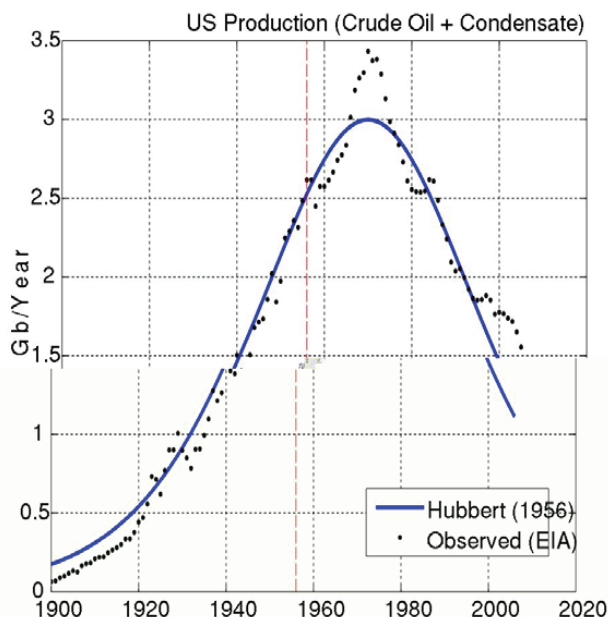


Figura 4.14. Correlació entre les prediccions d'Hubbert i la producció de petroli als EUA. **Font:** Wikipedia (*Hubbert peak theory*)

La teoria del *zenit* (o *peak*) d'Hubbert, desenvolupada inicialment per predir la producció de petroli dels Estats Units, estableix que l'extracció del petroli (o d'un recurs de naturalesa anàloga) en una zona geogràfica suficientment extensa segueix una corba en forma de campana simètrica, que té el seu màxim (*zenit* o *pic*) quan s'ha exhaurit la meitat de

les reserves del recurs. A partir d'aquest moment, la producció comença a declinar fins que s'exhaureix.

Aquesta teoria té una acceptació cada cop més gran i ha donat origen a l'associació internacional ASPO (*Association for the Study of Peak Oil&Gas*), amb importants organitzacions nacionals a més de 25 països de tots els continents i que, entre d'altres, acull destacats científics i tècnics jubilats de les principals companyies petrolieres.

El març de 1998, Colin Campbell, geòleg jubilat de l'empresa petrolera BP (*British Petroleum*), i Jean Laherrère, enginyer petrolier jubilat de l'empresa petrolera francesa Total (actualment, membres d'ASPO) publicaven un article a *Scientific American* sota el títol "La fi del petroli barat" (<http://dieoff.org/page140.pdf>), "*The End of Cheap Oil*", [Cam-1998]) on, entre altres coses, argumentaven que els nous descobriments són cada vegada menors i tendeixen a un valor asimptòtic no molt superior a les reserves actuals.

L'estimació de les reserves últimes

Un dels arguments de les grans agències de l'energia per tranquil·litzar l'opinió pública sobre el problema energètic és que encara resten moltes reserves per descobrir [WEO-2009].

Les *reserves últimes* (que inclouen les reserves actuals més els descobriments futurs fins a l'exhauriment del recurs), en les quals es basa la teoria del zenit d'Hubbert, no són fàcils d'avaluar. Probablement, qui més i millor ha treballat per respondre aquesta qüestió (on calen nous criteris d'avaluació) és l'enginyer jubilat de l'empresa petrolera francesa Total, J. Laherrère, consultor sobre temes d'energia.

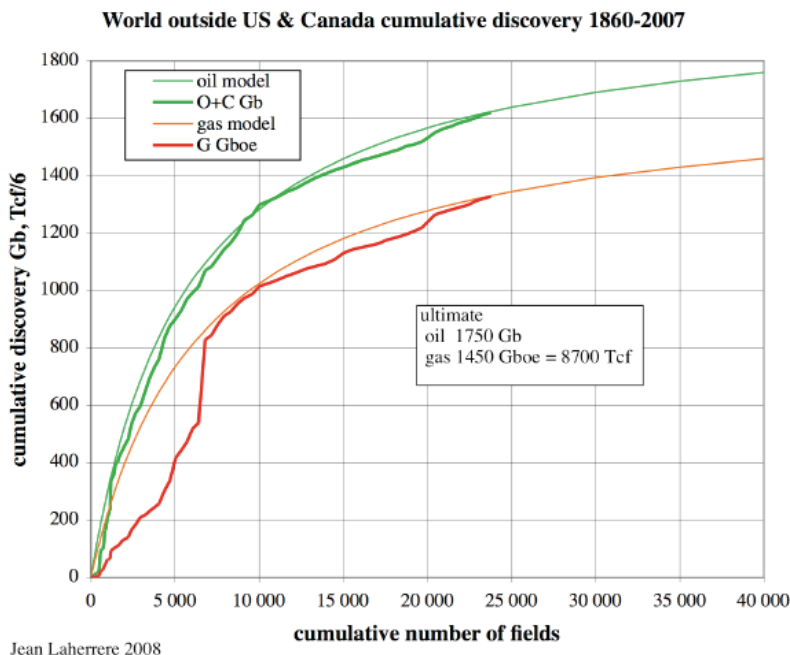


Figura 4.15. Descobertes acumulades (1860-2007), excepte els EUA i el Canadà. Exclou els EUA i el Canadà ja que el seu nombre elevadíssim de pous (la titularitat va lligada a la propietat del sòl) no el fa comparables amb la situació a la resta del món. **Font:** J. H. Laherrère [Lah-2009]

Inicialment, va basar el seu mètode en les corbes de desnatació (*creaming curves*), dissenyades per la petrolera Shell els anys vuitanta, basades en el nombre de pous exploratoris (NFW, *New Field Wildcat*). Tanmateix, davant de la dificultat d'obtenir informació so-

bre els pous exploratoris històrics, Laherrère relaciona les descobertes acumulades (de cru o de gas natural) amb el nombre de camps d'aquests combustibles (figura 4.15).

Les corbes resultants tendeixen vers uns límits a partir dels quals Laherrère [Lah-2009] infereix el valor de les *reserves últimes* de petroli i de gas natural (és a dir, el conjunt dels recursos extrets i extraïbles durant tota la vida dels camps). A la figura 4.15 s'indica que aquests valors són de 1.750 Gb (10^9 barrils) per al petroli i de 8.700 Tcf (10^{12} peus cúbics) per al gas natural, a les quals cal afegir 65 Gb i 180 Tcf corresponents als EUA i al Canadà.

Estimacions del zenit dels diferents combustibles

El zenit del petroli i els combustibles líquids

J. Laherrère ha publicat múltiples estudis sobre l'evolució de la producció dels recursos energètics i, en especial, el petroli i els combustibles líquids. Un bon resum de les seves estimacions i conclusions és el treball que va presentar junt amb J-L. Wingert a la VII Conferència anual d'ASPO a Barcelona [Lah-2008].

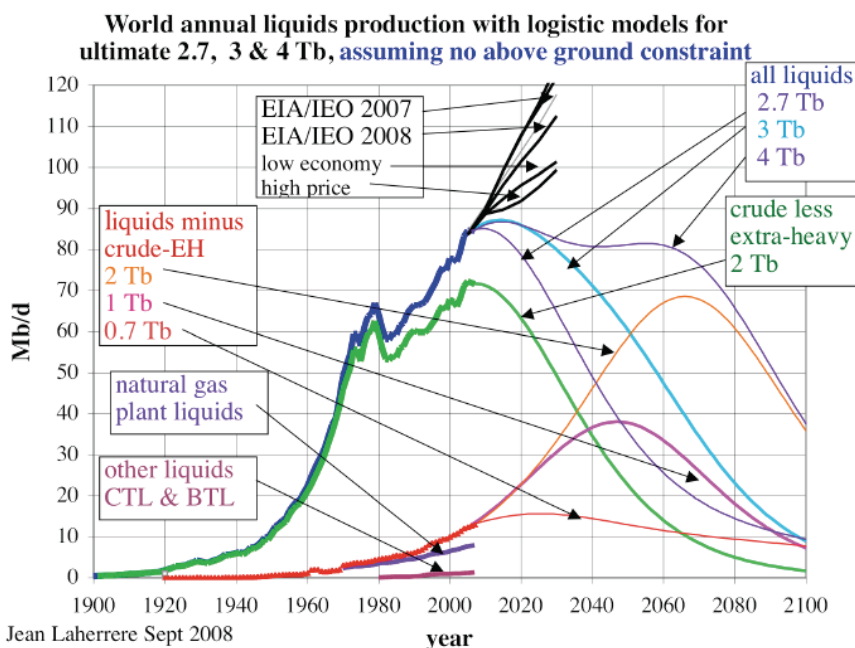


Figura 4.16. Previsions del J. Laherrère [Lah-2008] sobre el zenit del petroli. Producció anual de (combustibles) líquids amb models logístics per a reserves últimes de 2,7 Tb, 3 Tb i 4Tb, considerant restriccions raonables sense tensions socials ni increments importants i ràpids de preus (*no above ground constraints*). Font: J. Laherrère, J.L. Wingert [Lah-2008]

La figura 4.16 resumeix les estimacions i previsions de Laherrère per al conjunt de combustibles líquids, per la qual cosa cal avaluar les reserves últimes corresponents (inclouen el petroli ja consumit, les reserves descobertes i les que encara s'han de descobrir) de tots els tipus de combustibles líquids naturals i sintètics. Laherrère distingeix entre:

Petroli barat:

Petroli convencional (línia verda), sense petrolis extrapesats EH. La línia gruixuda és el petroli ja consumit i la línia prima són les previsions de producció. Segons Laherrère, el zenit va tenir lloc el 2006, amb 71 Mb/dia per a unes reserves últimes de 2 Tb. El declivi farà que, vers l'any 2060, el petroli convencional sigui residual.

Líquids del gas natural (NGPL, *Natural Gas Plant Liquids*, fonamentalment propà i butà (gasos que s'extreuen amb el gas natural, fàcilment liquables amb una petita pressió). La línia gruixuda inferior (color morat) indica els consums fins al present. La línia gruixuda superior de color blau assenyalava els consums de petroli convencional + NGPL, amb un valor màxim de 85 b/dia vers el 2009 (segons la figura, és pràcticament el zenit). Les previsions per al conjunt de combustibles líquids (continuació de la corba blava) s'estudien més endavant.

Petrolis cars: en acostar-nos al zenit, se cerca substituir el petroli convencional per altres combustibles líquids no convencionals. Fonamentalment:

Petroli extrapesat (o *EH*, *extra-heavy*) extrets de sorres bituminoses (Canadà, Veneçuela) amb uns recursos últims de 0,5 Tb.

Petrolis sintètics: transformació en combustibles líquids de la biomassa (*BTL*, *biomass-to-liquids*), del gas natural (*GTL*, *gas-to-liquids*) i del carbó (*CTL*, *coal-to-liquids*).

A més de les reserves últimes de petroli convencional (2 Tb), Laherrère estableix tres escenaris amb diferents valors de reserves últimes de petrolis no convencionals: el mínim amb 0,7 Tb addicionals; el mitjà, amb 1 Tb addicional i el superior, amb 2 Tb addicionals. Els *petrolis no convencionals* requereixen més inversions i la seva explotació és més lenta que la dels petrolis convencionals (evolució segons les corbes inferiors en forma de campana de colors roig, 0,7 Gb; lila, 1 Gb i carbassa, 2 Gb).

Podria semblar que els diferents escenaris de reserves últimes (2,7 3 i 4 Tb) en farien variar molt el zenit. Tanmateix, si se sumen l'evolució de les produccions dels petrolis convencionals i no convencionals, s'obtenen zenits (valor i data) molt pròxims entre si i les úniques variacions es donen en l'evolució posterior a l'inici del declivi (corbes superiors decreixents, continuació de la corba blava gruixuda).

El model sense restriccions anormals (causades per crisis econòmiques) situa el *zenit* dels combustibles líquids (petrolis convencionals i no convencionals) entre els anys 2010 i 2015 per a un valor proper als 85 Mb/dia. Caldrà estar atents a l'evolució de la producció mundial. Els darrers cinc anys, ha estat de: 84,59 Mb/dia (2005); 84,65 Mb/dia (2006); 84,52 Mb/dia (2007); 85,45 Mb/dia (2008); 84,37 Mb/dia (2009).

Les estimacions de les grans agències de l'energia (EIA-govEUA i IEA-OCDE), sempre creixents (línies negres de la figura 4.16), entren en flagrant contradicció amb el model d'Hubbert i les estimacions de Laherrère (i de molts altres autors que han fet estudis anàlegs), i tot fa pensar que mai no seran possibles.

La pressió de la demanda, les millores tecnològiques i l'esforç inversor poden modificar, dintre d'uns límits el valor i el moment del zenit del petroli, però el seu declivi arribarà irremeiablement, i com més l'haguem forçat, més abrupte serà la caiguda.

El zenit del petroli i el seu declivi posterior tindran conseqüències econòmiques determinants. Atès que els combustibles líquids són la base del transport i tenen una substitució molt difícil (capítol 5), no serà possible mantenir la globalització basada en la segmentació de les produccions en localitzacions allunyades i que permet gaudir (a les societats més benestants) de tota classe de productes procedents d'arreu del món i en tot moment. Representa, doncs, un sostre al creixement generalitzat de l'economia com fins ara.

Avui dia, el declivi del petroli ja és una realitat en molts països del món. A més dels EUA han passat el zenit, entre d'altres: Veneçuela (1970), Líbia, (1970), el Canadà (1974), Indonèsia (1977), Egipte (1993), L'Índia (1995), Síria (1995), Argentina (1998), el Regne Unit (1999), Austràlia (2000), Noruega (2001) i Mèxic (2004). La situació en els principals països del golf Pèrsic és poc coneguda, però es creu que el seu zenit no és lluny.

El zenit del gas natural

De manera anàloga al petroli i els combustibles líquids, J. Laherrère també fa una estimació del zenit de producció per al gas natural (figura 4.17).

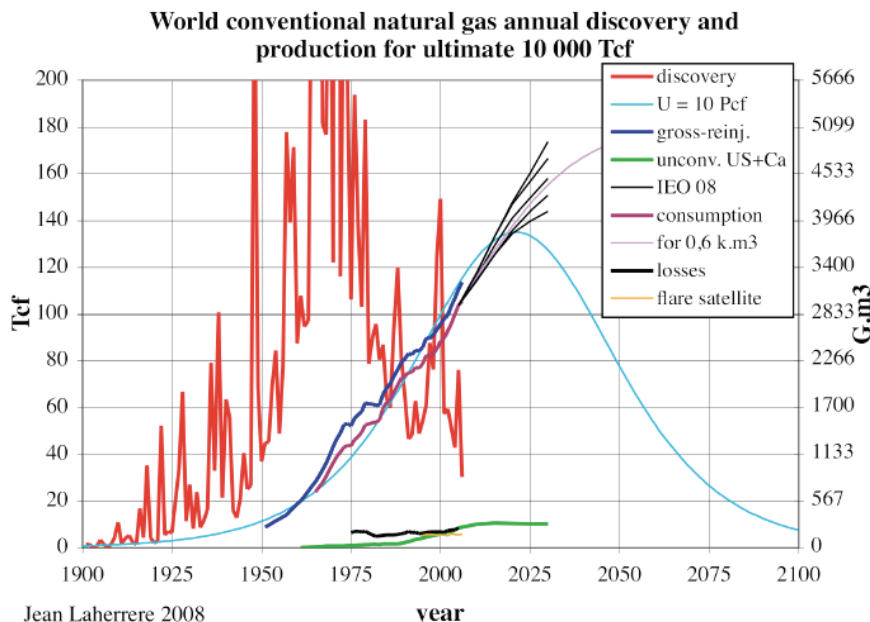


Figura 4.17. Resultat de l'estimació de J. Laherrère sobre el zenit del gas natural per a unes reserves últimes de 10 Pcf (10.000 Tcf) on, a més del consum, té en compte la reinjecció de gas natural en pous de petroli, els gasos no convencionals i les pèrdues (incloses les dels cremadors). **Font:** ASPO-França [Lah-2008]

En aquesta estimació de J. Laherrère, el zenit mundial del gas natural tindria lloc vers l'any 2020 per a una producció d'uns 135 Tcf (10^{12} peus cúbics/any). Tan sols en 10 anys! Com a terme de referència, les produccions mundials dels darrers anys proporcionades per l'EIA són: 100,08 Tcf (2005), 103,42 Tcf (2006), 105,77 Tcf (2007), 109,79 Tcf (2008) i 106,47 Tcf (2009).

És interessant constatar novament que les previsions de creixement de les gran agències de l'energia (EIA-govEUA i IEA-OCDE) per al gas natural durant els propers anys (línies negres de la figura 4.17) estan fora de tota realitat.

Nous descobriments minvants

Alguns dels nous jaciments descoberts recentment sembla que confirmen aquestes tendències:

Tupí (Brasil). L'any 2006, el Brasil descobreix a 265 km de la costa el gran jaciment de Tupí, amb unes reserves d'entre 5 i 8 Gb (milers de milions de barrils) que requereixen una perforació a més de 2.000 metres de profunditat, i una explotació comercial molt complexa. Prenent la xifra superior d'aquesta estimació, representa el 0,61% de les reserves mundials de petroli, és a dir, 94 dies de consum d'aquest combustible (uns 3 mesos).

Repsol (Veneçuela). L'any 2009, Repsol troba uns grans jaciments de gas natural a Veneçuela, amb unes reserves d'entre 190.000 i 226.000 Mm³ (milions de metres cúbics). El valor superior d'aquesta estimació representa el 0,11% de les reserves mundials de gas natural, és a dir, 25 dies de consum d'aquest combustible (menys d'un mes).

Certament, aquests recursos són d'una importància enorme per als països on es localitzen i per a les companyies explotadores, però representen una aportació insignificant per al subministrament a escala mundial.

El zenit del carbó

Tot i que Laherrère també fa una estimació del zenit de la producció mundial de carbó, hem preferit reproduir les estimacions del Watch Energy Group [WEG-2007], més en sintonia amb les fonts utilitzades en el nostre estudi per a aquest combustible (figura 4.18).

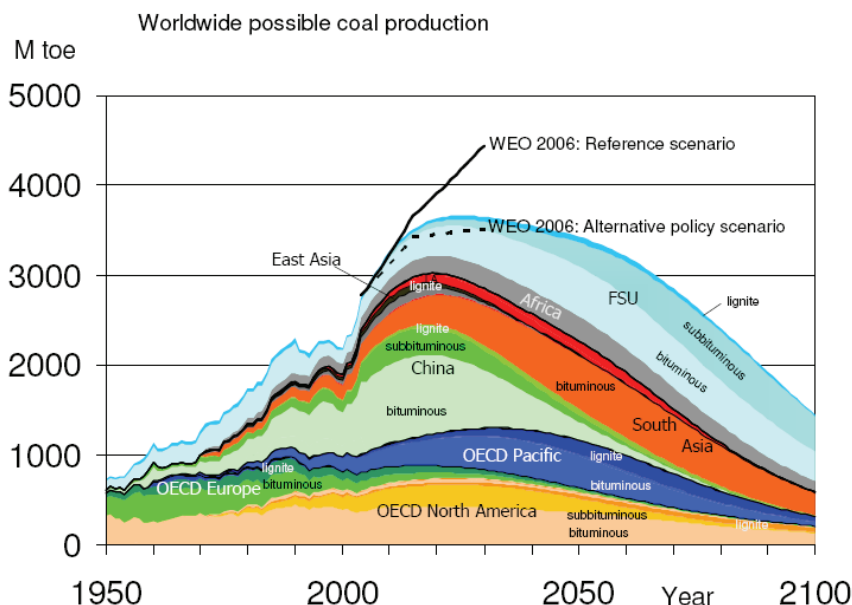


Figura 4.18. Estimació del Watch Energy Group sobre l'evolució de la producció mundial de carbó i el seu zenit. Alhora, també es mostra l'evolució dels principals països productors i el carbó se separa en categories de bituminós i subbituminós. **Font:** WEG [WEG-2007]

Aquesta estimació es fa tones equivalents de petroli (TEP, o TOE en anglès). El zenit se situa, aproximadament entre els anys 2025 i 2030 per a una producció màxima de 3.650 TOE/any (4,85 TW_t). Segons EIA, les produccions de carbó en els darrers anys (traduïdes a energia) han estat de 4,116 TW_t (2005), 4,269 TW_t (2006), 4,440 TW_t (2007) i 4,572 TW_t (2008). Anàlogament als casos anteriors, les estimacions de l'IEA-govEUA [WEO-2006] seguint la tendència actual de creixement del consum (línia negra superior de la figura 4.18) no podran fer-se realitat.

Per tant, malgrat que les reserves de carbó són les més importants, el zenit de producció arribarà relativament aviat i a un valor no molt superior a la producció actual. Això sí, el declivi serà més suau i prolongat que en els combustibles fluids. Aquesta estimació està en sintonia amb la percepció que les estimacions de reserves de carbó de la WEC (World Energy Council) són sobredimensionades.

És interessant observar que el zenit mundial de carbó anirà lleugerament precedit pel zenit de producció de carbó de la Xina; en aquest cas, amb un declivi relativament ràpid. Per tant, el miracle del creixement xinès (basat en un 75% en l'energia del carbó produït al mateix país) té una data de caducitat relativament propera.

El zenit de l'urani

La producció acumulada d'urani l'any 2007 era de 2.194 milers de tones d'urani natural ($\text{ktU}_{\text{nat}} = \text{GgU}_{\text{nat}}$), mentre que les reserves estimades pel *Red Book 2007* (NEA-IAEA) eren de 5.468 GgU_{nat} per a aquell mateix any.

El Watch Energy Group [WEG-2006] presenta una projecció de l'evolució futura de la producció d'urani natural (figura 4.19) on es manifesta el zenit de l'urani natural.

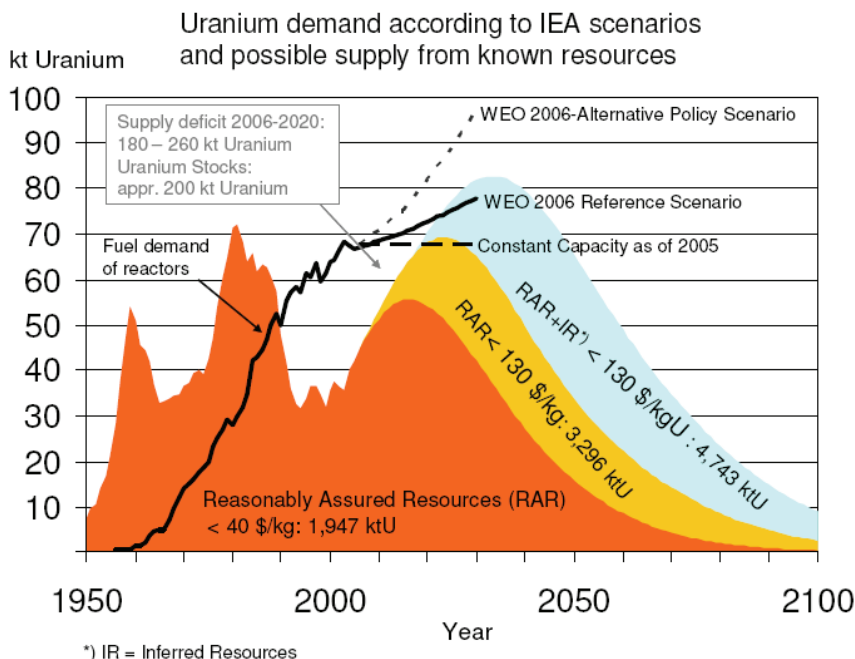


Figura 4.19. Estimació del Watch Energy Group sobre l'evolució passada i futura de la producció mundial d'urani natural i el seu zenit, on es mostra la influència de considerar diversos tipus de reserves segons el cost. La unitat usada és kt d'urani, o 1.000 tones d'urani natural. **Font:** WEG [WEG-2006]

L'evolució històrica de la producció d'urani ja ha mostrat dos pics, aproximadament, els anys 1960 i 1980. Cal tenir en compte que hi ha influït molt la producció de material fissible per a les armes atòmiques durant la guerra freda.

El que ens importa més, però, és el zenit del futur relacionat amb l'exhauriment global d'aquest recurs. Segons les estimacions del WEG, per a unes reserves $\text{RAR} + \text{IR} < 130$ \$/kg (vegeu el capítol 8), aquest tindria lloc entre els anys 2030 i 2035 per a una producció màxima de 82 $\text{MgU}_{\text{nat}}/\text{any}$ (o $\text{ktU}_{\text{nat}}/\text{any}$; figura 4.19).

Com a terme de referència, la producció els darrers anys ha estat de (WNA, World Nuclear Association): 41,72 GgU_{nat} (2005), 39,44 GgU_{nat} (2006), 41,28 GgU_{nat} (2007), 43,85 GgU_{nat} (2008) i 50,77 GgU_{nat} (2009). Tot i que aquest és el zenit més favorable, també és el recurs que incideix menys a cobrir els consums actuals.

Comentari general sobre els zenits

El fenomen dels zenits no significa l'acabament dels recursos (com se suposava al capítol 4 sobre projeccions i exhauriments). Els zenits de producció dels diferents combustibles simplement escanyen el creixement. És un toc d'atenció seriós que ens obligarà a canviar el paradigma de desenvolupament (de creixement energètic a decreixement energètic), ahora que s'allarguen els terminis per fer la ineludible reconversió.

Part 2

Energies secundàries (o intermèdies)

Als capítols anteriors s'han estudiat les *energies primàries*, és a dir, les energies que la naturalesa ens ofereix. Són el petroli (cru), el gas natural, els carbons i l'urani que es troben en l'escorça terrestre, però també són l'energia geotèrmica, l'energia de les mareas, l'energia de la radiació solar i, indirectament, l'energia del vent, dels salts d'aigua, de les ones del mar i de la biomassa.

Les *energies primàries* no es poden utilitzar directament, sinó que han de ser transformades en *energies secundàries* (o *intermèdies*) útils (manipulables i controlables) per tal de satisfer les necessitats humanes. Les principals formes d'energia secundària són l'*electricitat* i els *combustibles*.

Cal no confondre el petroli (energia primària) amb els seus derivats (gasolina, gasoil, querosè, propà, butà, etc.), o el gas natural (energia primària confinada entre roques) amb els productes de gas transformats (gas natural comprimit, CNG; gas natural liquat, LNG), o les roques sedimentàries de carbó (energia primària) amb els combustibles sòlids transformats (granulats d'antracita, hulla, lignit, coc, o briquets de torba, etc.) a peu d'indústria, de central elèctrica o de llar, o les menes d'urani (energia primària) amb el combustible d'urani amb què s'alimenten les centrals nuclears.

En tots els casos calen transformacions més o menys importants per fer efectiva la utilització de l'energia. Aquests processos no són gratuïts i normalment comporten despeses d'energia i emissions de gasos que afecten el clima. Per tant, l'energia implicada en les fonts secundàries es compon de dos sumands: l'energia útil que proporciona el recurs i l'energia consumida en la seva obtenció. I, de forma anàloga, les emissions d'una font secundària també es componen de dos sumands: les emissions per fer efectiva l'energia (normalment la combustió) i les emissions originades en la seva obtenció.

Els dos grans sistemes d'energia secundària són els *combustibles* i l'*electricitat*.

Els *combustibles* formen un gran sistema d'energies secundàries (o intermèdies). Normalment són derivats del petroli, del gas natural o del carbó, però també poden provenir de la biomassa o dels residus. S'utilitzen en el transport (especialment els líquids), en calefacció, processos industrials, etc.

L'*electricitat* és una altra energia secundària (o intermèdia), obtinguda per transformació de diverses fonts primàries (combustibles fòssils, energia nuclear, energia hidràulica, eòlica, solar, geotèrmica, etc.). És una energia molt versàtil i un dels mitjans principals per connectar les fonts primàries amb una gran diversitat de necessitats: llum, calor i fred, sistemes informàtics i de comunicació, accionament d'aparells i màquines, processos industrials, etc.

5. Els combustibles comercials

5.1. D'energies primàries a energies secundàries

Aquest capítol tracta del primer gran grup d'energies secundàries, els combustibles comercials, mentre que el capítol següent estudia l'altra gran energia intermèdia, l'electricitat. Abans, però, voldríem fer una anàlisi i un balanç de com es transformen les energies primàries en energies secundàries, i dels principals sectors econòmics a què van destinades.

A aquest efecte, és interessant la presentació de dades que fa l'Agència Internacional de l'Energia (IEA-OCDE) a l'apartat d'estadística, sota l'epígraf de "balances" per al conjunt del món <http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?COUNTRY_CODE=29>.

En aquest balanç, l'IEA-OCDE designa el subministrament total d'energia primària per mitjà de les sigles TPES (*Total Primary Energy Supply*) que es transforma en el consum final total, designat per les sigles TFC (*Total Final Consumption*), que es materialitza a través de les energies intermèdies (combustibles comercials, electricitat i uns petits consums directament en calor). Finalment, en aquest mateix balanç s'indiquen els destins per sectors de les diferents energies intermèdies (taula 5.1).

Entre el subministrament total d'energies primàries (TPES) i el consum final total (TFC), hi ha el conjunt de processos de transformació i d'adequació de les energies primàries en energies intermèdies (o secundàries).

Taula 5.1. Balanç dels fluxos d'energia en el món segons el consum, per sectors (2008)									
Conceptes	Carbó GW _t	Petroli i derivats GW _t	Gas natural GW _t	Fonts electr.⁶ GW _t	CR&W⁷ GW _t	Electricitat⁸ GW _e	Calor⁸ GW _t	Total GW _t	%
TPES¹	4.400	5.389	3.440	1.430	1.626	0	1	16.286	100,0
Centrals E-CG-C ³	-2.879	-360	-1.348	-1.410	-115	2.304	419	-3.389	-20,8
Refineries i transform. ⁴	-310	-48	-1	0	-72	0	0	-431	-2,6
Autoconsums, pèrdues ⁵	-119	-331	-348	-1	-18	-384	-76	-1.276	-7,8
<i>Total costs energètics</i>	-3.307	-740	-1.696	-1.411	-205	1.920	342	-5.097	-31,3
TFC²	1.093	4.650	1.744	20	1.421	1.920	343	11.190	68,7
Sectors primaris	13	144	7	0	9	49	5	227	1,4
Indústria	857	441	611	1	253	800	150	3.113	19,1
Comercial, serv. públics	31	142	231	2	22	449	43	920	5,6
Transport	5	2.854	103	0	60	31	0	3.053	18,7
Residencial	102	296	556	9	1.069	525	130	2.687	16,5
No especificat	36	19	47	8	7	66	15	198	1,2
<i>Total usos energètics</i>	1.043	3.896	1.555	20	1.421	1.920	343	10.198	62,6
Usos no energètics	50	753	189	0	0	0	0	992	6,1

¹ Subministrament total d'energia primària. ² Consum final total (energies intermèdies).
³ Centrals elèctriques, de cogeneració i de calor. ⁴ Refineries del petroli i altres transformacions de combustibles, entre elles carbó, gas natural i biomassa, a líquids. ⁵ Autoconsums, pèrdues i altres ajustos del propi sistema energètic abans de subministrar les energies intermèdies.
⁶ Diverses fonts primàries d'energia elèctrica: energia nuclear, 946 GW_t; energia hidroelèctrica, 366 GW_e; Geotèrmica i solar tèrmica, 93 GW_t; eòlica, fotovoltaica, maremotriu, 26 GW_e.
⁷ Combustibles renovables i residus (entre ells, la biomassa tradicional).
⁸ Energies intermèdies subministrades com a electricitat (GW_e) o calor (GW_t).
⁹ Suma dels valors de les diferents columnes. Energia total en cada un dels estadis del balanç.
Font: Agència Internacional d'Energia (IEA-OCDE), estadística, balanç; les dades originals són en kTEP (milers de tones equivalents de petroli). S'ha preferit emprar la unitat GW en comptes de TW a fi d'adaptar-se millor als valors menors dels consums. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

El camí de les energies primàries a les intermèdies és el que la indústria de l'automòbil ha denominat WTT (*well-to-tank*, del pou al dipòsit), que comporta processos i costos importants de recursos i energia.

Però, és tan fàcil anar a omplir el dipòsit de combustible del vehicle a la gasolinera de la cantonada o, encara més, endollar un aparell elèctric al corrent i engegar-lo o encendre la calefacció de gas natural, que les poblacions de les societats desenvolupades tendim a desconeixer o a infravalorar aquests proveïments.

Comparativa de les taules 5.1 i 2.1

Cal dir que les dades de la taula 5.1 (IEA-OCDE, dades en GW) i les de la taula 2.1 (EIA-govEUA, dades en TW) procedeixen de fonts diferents i apliquen criteris de comptabilitat no coincidents; per tant, les xifres no són les mateixes, i la discrepància global és de 1.581 GW_t sobre el total de 17.876 GW_t (-8,85% en les dades de la IEA-OCDE).

La meitat d'aquesta discrepància es deu a la diferència de criteris utilitzats entre la IEA-OCDE i l'EIA-govEUA. La primera agència suma les energies primàries tèrmiques (del petroli, del gas natural, del carbó, urani, geotèrmica, solar tèrmica i dels combustibles renovables i residus), amb les energies elèctriques (ja transformades i, per tant, intermèdies) procedents de la font primària hidràulica i altres fonts elèctriques renovables (eòlica, fotovoltaica i mareomotriu).

Si, com fa l'EIA-govEUA, s'haguessin comptabilitzat les energies elèctriques no tèrmiques com a energia primària equivalent (energia tèrmica que hauria estat necessària per a produir-les, factor 3), l'energia primària hidroelèctrica de la IEA-OCDE passaria de 366,3 GW_e (nota 6 de la taula 5.1) a 1.098,8 GW_t, amb un increment de 732,5 GW_t, i les energies eòliques, fotovoltaïques i mareomotrius passarien de 26,4 GW_e (nota 6 de la taula 5.1) a 79,1 GW_t amb un increment de 52,7 GW_t. En total, una aproximació de 785,2 GW_t.

L'altra meitat correspon fonamentalment a avaluacions inferiors de la IEA-OCDE en els combustibles fòssils, de les quals no conec la causa: -331 GW_t en el petroli; -369 GW_t en el gas natural, i -172 GW_t en el carbó.

Anàlisi de les dades de la taula 5.1

La taula 5.1 aporta molta informació sobre el sistema energètic mundial. Algunes de les observacions més destacades són:

Generació d'energies intermèdies

1. L'electricitat té uns costos de generació altíssims. Descomptant-ne els 392 GW_e obtinguts de fonts no tèrmiques (un 17% del total; taula 5.1, nota 6), les pèrdues tèrmiques en la generació (3.389 GW_t) són molt superiors a l'energia elèctrica generada (2.304 - 392 = 1.912 GW_e). Si, a més, hi afegim la part corresponent d'autoconsums i pèrdues (indestriables amb les dades de la taula 5.1), ens apropem a la coneguda relació: 1 W_e = 3 W_t.
2. L'adequació dels combustibles (extracció, rentatge, destil·lació, transport, transformacions, liquació, compressió, etc., segons els combustibles) té un cost energètic directe molt inferior al de la electricitat (uns 431 GW_t en total). Però cal afegir-hi la part corresponent d'autoconsum i pèrdues.
3. En conjunt, el pas d'energies primàries a energies intermèdies (WTT, segons la terminologia de la indústria automobilística) té un cost elevadíssim de 5.097 GW_t (el 31,3% de l'energia primària), n'és la causa principal la generació elèctrica.
4. a la generació d'electricitat i l'adequació i la transformació dels combustibles primaris, s'hi destinen 3.307 GW_t de carbó (el 75% del recurs primari) i 1.696 GW_t de gas natural (el 49,3% del recurs). També s'hi destinen fraccions inferiors de petroli (740 GW_t, el 13,7% del recurs) i de combustibles renovables i residus (205 GW_t, el 12,6% del recurs).

Consums finals d'energia

5. En els consums finals, destaca l'ús de combustibles líquids en el transport (2.854 GW_t, el 61,4% del recurs consumit i el 93,5% del consum en transport). Aquest ús, creixent en el temps, és dispers en l'espai i no permet el segrest de CO₂.
6. En segon lloc, destaca el consum de biomassa tradicional en les llars dels països pobres (1.069 GW_t, el 75,2% del consum final dels combustibles renovables i els residus). Aquesta xifra corrobora la importància de la llenya del bosc, el carbó vegetal i els residus de cultius i animals per a les poblacions menys desenvolupades, xifrades en més de 2.600 milions d'habitants en tot el planeta.
7. El carbó romanent de la producció elèctrica s'usa fonamentalment en la indústria (857 GW_t, el 82,2% del carbó per a usos finals). En canvi, el gas natural destinat a usos finals és més important (1.744 GW_t), però té un repartiment més dispers en què en destaquen, els usos industrials (611 GW_t), els usos residencials (556 GW_t) i els comercials i de serveis (231 GW_t), mentre que és residual el destinat a transport (103 GW_t).
8. Tot i que el valor de l'electricitat (1.920 GWe) és inferior al dels combustibles líquids derivats del petroli (4.650 GW_t), en ser una energia d'alta qualitat l'obtenció de la qual requereix una energia primària unes tres vegades superiors, representa el màxim esforç entre les energies intermèdies. El consum elèctric més gran té lloc a les indústries (800 GWe, equivalent a uns 2.400 GW_t), després ve l'ús residencial (525 GWe, equivalent a uns 1.575 GW_t), seguit de prop pels usos comercials i de serveis (449 GWe, equivalent a uns 1.337 GW_t).
9. Cal remarcar que els sectors primaris (i, de forma destacada, l'agricultura) originen consums directes d'energia relativament reduïts en el concert global (227 GW_t, l'1,3% de les energies primàries i el 2,0% de les energies intermèdies). No obstant això, l'ús de fertilitzants i de pesticides indueix altres consums no negligibles repartits entre l'energia dels corresponents processos industrials i els usos no energètics com a matèries primeres.
10. Finalment, els usos no energètics dels combustibles fòssils són relativament importants (992 GW_t, el 6,1% dels recursos primaris) i ni destaquen els que es basen en el petroli i els seus derivats (753 GW_t, el 75,9% d'aquests recursos).

5.2. Derivats dels combustibles fòssils i usos

Els combustibles fòssils (el petroli, el gas natural i el carbó) són els recursos energètics bàsics de l'economia mundial actual. Segons l'EIA-govEUA (taula 2.1), representen conjuntament prop del 80% de l'energia primària consumida l'any 2008 (concretament, el 78,93%), repartida entre el 32,02% de petroli (que baixa en percentatge), el 21,32% de gas natural i el 25,59% de carbó (aquests dos darrers pugen).

Totes les altres fonts d'energia primària juntes a escala mundial (és a dir, l'energia hidroelèctrica, l'energia nuclear, la biomassa tradicional, els biocombustibles, l'energia dels residus i les noves fonts d'energia renovables) sumen el 21,07%, una mica menys que el combustible fòssil de menor consum, el gas natural.

I aquesta tendència no s'ha modificat significativament en els quasi 30 darrers anys en què la participació dels combustibles fòssils ha passat de ser el 82,12% l'any 1980 al 78,93% el 2008 (una pèrdua de -3,19% que pràcticament recupera l'energia nuclear +2,64%).

El que sí que ha canviat significativament en aquest període és el repartiment entre els combustibles fòssils: el pes del petroli perd més de deu punts percentuals (-10,21%), mentre que el gas natural n'augmenta uns quatre (+3,96%) i el carbó, uns tres (+3,06%, amb un augment molt accelerat en els darrers anys).

Com s'ha vist a la secció anterior, els combustibles fòssils s'utilitzen pràcticament en tots els sectors econòmics, però en volem destacar dues utilitzacions específiques notables:

- El *petroli* i els seus derivats s'utilitzen de forma massiva i quasi exclusiva en els diferents sistemes de transport (carretera, aviació, navegació marítima i, en menor proporció, el ferrocarril). La seva anàlisi serà l'objecte de la secció següent.
- El *carbó* i, darrerament de forma creixent, el *gas natural* són algunes de les bases principals de la generació elèctrica.

El petroli i els seus derivats

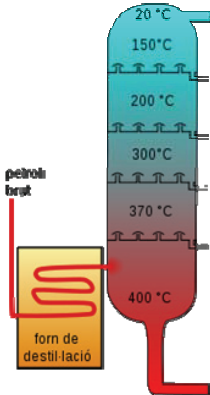
El petroli cru, tal com surt del pou, conté impureses i elements volàtils que no el fan útil ni tan sols per cremar en calderes. Però, en canvi, està format per una mescla d'hidrocarburs de gran valor que, convenientment separats i refinats, proporcionen combustibles per a diferents tipus de motors de combustió interna i també matèries primeres per a processos petroquímics que són la base de la fabricació de productes com ara plàstics, elastòmers, lubricants, dissolvents, detergents, fibres tèxtils, fertilitzants, pesticides i un llarg etcètera.

Les diferents categories de petroli brut es classifiquen per la seva densitat en °API (American Petroleum Institute). Els petrolis lleugers ($> 31,1^\circ$ API) i de baix contingut de sofre són els més fàcils de refinar (com ara el Brent de la mar del Nord, o el WTI, West Texas Intermediate). Els petrolis crus mitjans tenen gravetats API d'entre 22,3 i $31,1^\circ$ API; els petrolis crus pesats, d'entre 10 i $22,3^\circ$ API, i els extrapesats, tenen gravetats inferiors a 10° API.

Destil·lació fraccionada

El procés que s'utilitza per separar els diferents hidrocarburs del petroli és la destil·lació fraccionada. És un procés de separació física per mitjà de la calor que consisteix a evaporar el cru (barreja de líquids amb punts d'ebullició diferents però propers) en un forn i fer-lo passar a través d'una torre de destil·lació amb diversos plats travessers a diferents alçades amb forats de pas. A mesura que els vapors ascendeixen per la torre es van refredant, es van condensant les fraccions amb menors punts d'ebullició i els líquids són decantats en cada un dels plats. Sovint s'utilitza una segona torre de destil·lació de pressió menor que l'atmosfèrica per aconseguir un refinament major.

La figura 5.2 proporciona un esquema de la destil·lació fraccionada, amb indicació de les fraccions principals (grups d'hidrocarburs amb longituds de cadena i punts d'ebullició similars), amb els rangs de temperatures, de llargada de cadenes i una estimació dels percentatges que se n'obtenen, així com les principals aplicacions de cada una d'elles.

Taula 5.2. Destil·lació fraccionada i derivats del petroli					
	Fracció	Temp. °C	Cadena	% ¹	Aplicació
	Gasos líquids	20 a 40	C ₁ a C ₅	7	Bombones
	Nafta	70 a 120	C ₅ a C ₉	10	Química
	Gasolina	120 a 160	C ₅ a C ₁₀	40	Automoció
	Querosè	160 a 250	C ₁₀ a C ₁₆	8	Aviació
	Dièsel	260 a 330	C ₁₄ a C ₂₀	24	Automoció
	Lubricants	300 a 370	C ₂₀ a C ₅₀	1	Lubricació
	Olis pesats	360 a 400	C ₂₀ a C ₇₀	4	Vaixells, centrals
	Asfalts i residus	> 400	> C ₅₀	6	Carreteres

¹ Aquestes proporcions són molt variables en funció dels processos de craqueig i de reformació posteriors.
Fonts: Figura de Viquipèdia; altres fonts. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Abans d'entrar a la unitat de destil·lació, sol haver-hi una eliminació de les sals minerals, i després de la destil·lació hi pot haver-hi diversos processos com ara:

Craqueig

La fracció de gasolina que s'obté de la destil·lació simple del petroli sol ser inferior a la demanda mentre que en altres fraccions de cadena més llarga passa a l'inrevés. El procés de *craqueig* s'ha desenvolupat a fi d'evitar aquests desequilibris. Consisteix a escalfar els hidrocarburs a altes temperatures i sota pressió, normalment amb la presència d'un catalitzador i, de vegades, en una atmosfera d'hidrogen, de manera que les cadenes llargues es fraccionen en cadenes més curtes semblants a les que componen la gasolina.

Reformació catalítica

És un tractament químic addicional que utilitza la calor, la pressió i diferents catalitzadors, i que té per objecte trencar enllaços de cadenes lineals d'hidrocarburs per reformar-les com a cadenes ramificades (per exemple, l'isooctà que proporciona una major eficiència en els motors d'explosió, major octanatge), o crear alquens (hidrocarburs amb dobles enllaços), base de molts processos per fabricar plàstics per polimerització o per crear compostos aromàtics, matèria primera de molts productes petroquímics.

Refinament

En tots els productes destil·lats, s'han d'eliminar les impureses per obtenir-ne uns productes de qualitat, aptes per al consum.

El gas natural

El gas natural és un recurs d'energia primària que està format per una mescla de gasos lleugers en què predomina el metà (generalment més del 80%, i pot arribar fins al 95%) però que també conté altres gasos en diferents proporcions, normalment no útils o contaminants, com ara el nitrogen, l'heli, el diòxid de carboni (CO_2) i l'àcid sulfhídric (H_2S).

El gas natural es presenta de diverses formes en els jaciments: a) com a *gas associat* en pous de petroli, tot formant la capa superior o dissolt en el líquid; b) com a *gas no associat* quan en els pous no hi ha pràcticament petroli. Entre aquests, hi ha els pous de gas natural sol (anomenats de *gas sec*) i els pous que combinen gas natural i hidrocarburs de baix pes molecular que es poden condensar (anomenats *condensats de gas natural*).

Condicionament

El gas natural no s'utilitza directament a la sortida del pou sinó que se sotmet a diversos processos de purificació. Alguns dels components que formen part del gas obtingut del pou se separen de la mescla, ja que no tenen capacitat energètica (el nitrogen o el CO_2) o perquè en poden dificultar l'ús (el CO_2 interferiria en el procés de liquació criogènica).

D'altra banda, els hidrocarburs més pesants (propà, butà) són separats i comercialitzats a part, ja que la seva presència podria causar accidents durant la combustió del gas natural. També s'elimina el vapor d'aigua, ja que a pressions elevades i temperatures properes a l'ambient es formen hidrats de metà que poden obstruir les conduccions. Finalment, els compostos de sofre es redueixen fins a nivells molt baixos per tal d'evitar al màxim la corrosió en les instal·lacions i els efectes de la pluja àcida.

Per alertar sobre possibles fugues en els usos domèstics, s'afegeixen traces de compostos de la família dels mercaptans per proporcionar l'olor característica amb què reconeixem el gas natural.

Emmagatzematge i transport

La dificultat principal del gas natural és el gran volum que ocupa en condicions ambientals que en dificulta l'emmagatzematge i el transport.

Les dues formes principals de transport a distància del gas natural són els gasoductes i la conversió a gas natural líquid. Tant un sistema com l'altre comporten instal·lacions complexes i despeses energètiques importants, que disminueixen l'atractiu del gas natural.

D'altra banda, el transport i la manipulació del gas natural solen fer inevitable un cert percentatge de fuites, fet que disminueix considerablement l'avantatge de les menors emissions de CO₂ de gas natural durant la combustió (recordem que el metà té un efecte hivernacle unes 25 vegades més potent que el CO₂, i és per això que, en els jaciments o en les instal·lacions petrolíferes on el gas natural no es pot aprofitar, es prefereix cremar-lo).

Aplicació a la propulsió de vehicles

L'aplicació del gas natural com a combustible per a vehicles té l'inconvenient del gran volum que ocupa en condicions atmosfèriques. O bé ha de ser comprimit a grans pressions o bé líquid en condicions criogèniques. Això afegeix complexitat i masses importants en els sistemes d'emmagatzematge, que li treuen atractiu davant dels combustibles líquids.

Els carbons

Com es veurà més endavant (capítol 7), la formació d'aquest recurs a partir, fonamentalment, de l'enterrament de grans masses de matèria vegetal, va donar lloc a capes de carbó intercalades amb capes de sediments minerals, que s'han mantingut en la localització originària (sense migracions, com en el cas del petroli i el gas natural) però que, posteriorment, poden haver estat sotmeses a plegaments o a altres modificacions geològiques.

Hi ha dos tipus fonamentals de jaciments de carbó: aquells en què les capes de carbó afloren a la superfície, i que donen lloc a les *mines a cel obert*, i aquells que es troben a més profunditat i que donen lloc a les *mines subterrànies*.

Mines a cel obert

En aquests jaciments, en què unes excavadores gegantines arrenquen les capes superficials del terreny on hi ha les vetes de carbó i les capes de material estèril, l'explotació es disposa en grades descendents fins a una profunditat màxima d'uns 400 metres i creix en extensió. Les explotacions a cel obert tenen els avantatges de la seva ràpida implementació, una recuperació elevada del recurs (fins al 90%, enfront d'un màxim del 50% en les mines subterrànies), uns costos d'explotació més moderats i unes condicions laborals menys perilloses, però també uns impactes ambientals i paisatgístics més elevats.



Figura 5.1. Mina a cel obert a Latrobe Valley, Austràlia, amb excavadora.
Font: <http://www.theage.com.au/environment/brumbys-dirty-secret-coal-for-export-20091013-qvnp.html>

Les explotacions a cel obert són cada dia més freqüents, especialment als Estats Units, al Canadà, a Austràlia i, en menor mesura, als països d'Euràsia i a Àfrica del Sud, alhora que, comparativament, fan menys rendibles les explotacions subterrànies.

Mines subterrànies

Encara avui constitueixen el mode d'explotació més freqüent. En tota instal·lació hi ha un pou principal per on accedeixen els treballadors de la mina amb un ascensor i per on s'extreu el material per mitjà d'un muntacàrregues, i un segon pou de ventilació per renovar l'aire de la mina i evitar l'acumulació de gasos explosius (el temut *grisú*).

A la part inferior de la mina, hi ha un sistema de galeries transversals a diferents nivells, connectades verticalment entre si, que permet accedir a les vetes del mineral i posar-les en comunicació amb el pou principal per on s'extraurà el carbó. Per evitar que les galeries s'enfonsin, es deixen pilars a cada capa, fet que limita l'extracció màxima del carbó existent a un 50%. El transport del material a l'interior de les galeries se sol fer per mitjà de vagonetes i, en les instal·lacions més modernes, també amb cintes transportadores.

Amb la profunditat augmenten les dificultats d'explotació i els costos: la temperatura creix (a 1.000 metres, uns 30 °C) i l'eliminació del grisú (de fet, metà) és cada vegada més costosa. Es considera que el límit d'explotació és de 1.500 metres, però la major part de les mines operen en profunditats molt menors, entre 100 i 500 metres. La proporció de carbó en la formació geològica, i el gruix i la inclinació de les vetes, són factors que incideixen en els costos. Els mitjans tècnics moderns d'explotació augmenten els avantatges en les mines més favorables davant de les menys favorables.

Carbons comercialitzats

El carbó sempre surt barrejat amb materials que en disminueixen la qualitat i en dificulten la utilització. Per tant, un cop extret el material de la mina, i abans de comercialitzar-lo, se segueixen processos físics de trituració i de rentatge.

Hi ha tres grans categories de carbó (capítol 7): a) *carbons bituminosos*, de poder calorífic elevat, entre els quals hi ha la hulla i el carbó de coc (també s'hi inclou l'antracita); b) *carbons subbituminosos*, de poder calorífic més moderat, major humitat i contingut de cendres; c) *lignits*, els carbons menys evolucionats, de poder calorífic més baix, amb més humitat i contingut de cendres.

Però els carbons arrencats de l'escorça terrestre també es distingeixen per les condicions i la qualitat de la presentació [Mer-2007]. Hi ha quatre categories comercials de *carbons nobles* (<10% de cendres) segons la granulometria: 1) de dimensions entre 20 i 120 mm; 2) de dimensions entre 6 i 20 mm; 3) carbons de grans fins, amb partícules d'1 a 10 mm; i 4) carbons polvoritzats amb partícules que poden arribar a 100 µm. També s'utilitzen altres classificacions com: *carbons sense granulometria*, que contenen des de la pols als trossos grans; *carbons mixtos*, amb un 20-30% de cendres; *carbons en brut*, tal com surten de la mina; *carbons secundaris*, procedents del rentatge i amb un 40% de cendres; o, *carbons recuperats*, procedents de basses de decantació o de residus anteriors.

Característiques dels principals combustibles intermedis

La taula 5.3 proporciona les característiques dels principals combustibles intermedis comercialitzats. En dona:

- 1) la densitat (Mg/M³)
- 2) l'energia màssica, tant la consumida en la seva obtenció com la proporcionada durant la combustió (LHV, *lower heating value*, calor específica inferior, descomptant-ne la calor de vaporització del vapor d'aigua), o en tot el cicle de vida del combustible
- 3) l'energia volumètrica, anàlogament al punt anterior (MJ/litre o MJ/m³)
- 4) les emissions de CO₂, tant en la seva obtenció com durant la combustió, o en el conjunt del cicle de vida.

Taula 5.3. Característiques dels principals combustibles intermedis

Combustible	Densitat	Energia volumet.	Energia massica ¹			Emissions (equiv. CO ₂) ²		
			obtenció	LHV	cicle vida	obtenció	combust.	cicle vida
Líquids	kg/litre ¹	MJ/litre	MJ/kg	MJ/kg ²	MJ/kg	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t
Gasolina	0,745	32,2	6,0	43,2	49,2	12,5	73,4	85,9
Dièsel	0,832	35,9	6,9	43,1	50,0	14,2	73,2	87,5
Querosè (aviació)	0,720	31,5	4,8	43,7	48,5	9,8	71,2	81,0
LPG (propà i butà)	0,550	24,8	5,4	45,1	50,5	7,9	65,7	73,6
Biodièsel (soja)	0,890	32,8	43,8	36,8	80,6	-28,9	76,2	47,3
Etanol (canya sucre)	0,794	21,3	48,0	26,8	74,8	-60,9	71,4	10,5
Etanol (remolatxa)	0,794	21,3	34,8	26,8	61,6	-41,7	71,4	29,7
Etanol (blat)	0,794	21,3	34,8	26,8	61,6	-20,8	71,4	50,6
LGN (líquid)	0,428	19,3	14,0	45,1	59,1	19,9	56,2	76,1
Hidrogen líquid (GN)	0,071	8,5	135,7	120,1	255,8	126,3	0,0	126,3
Gasos	kg/m ³ ³	MJ/m ³	MJ/kg	MJ/kg ²	MJ/kg	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t
Hidrogen comp. (GN)	0,090	10,8	119,3	120,1	262,2	104,7	0,0	104,7
Hidrogen (de carbó)	0,090	10,8	198,8	120,1	340,8	232,8	0,0	232,8
Hidrogen (electròlisi)	0,090	10,8	342,2	120,1	482,4	203,8	0,0	203,8
Gas natural (EU-mix)	0,777	35,0	6,0	45,1	56,2	8,4	56,2	64,6
Gas natural (Sibèria)	0,777	35,0	15,1	45,1	65,3	21,7	56,2	77,9
Sòlids	Mg/m ³ ⁴	MJ/litre	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t
Antracita	1,105	32,6	2,8	29,5	32,3	15,8	96,8	112,6
Bituminós	0,833	23,2	2,6	27,8	30,4	15,8	87,3	103,1
Subbituminós	0,816	16,2	2,4	19,9	22,3	15,8	90,3	106,1
Lignit	0,801	11,9	2,4	14,9	17,3	15,8	91,6	107,4
Torba	0,350	4,6	1,0	13,0	14,0	10,0	106,0	116,0
Llenya	0,425	6,0	1,1	14,0	15,1	-85,0	93,0	8,0
Carbó vegetal	0,250	7,4	26,5	29,5	56,0	640,0	145,0	785,0

¹ Els valors de LHV (*lower heating value*; poder calorífic inferior) dels combustibles líquids i gasosos s'han obtingut de [WTW-WTT1-2007] i els dels combustibles sòlids de l'IPCC (carbons) i FAO (torba, llenya i carbó). L'energia consumida en l'obtenció dels combustibles s'ha calculat a partir de [WTW-WTT2-2007].

² Les emissions de la combustió dels combustibles líquids i gasosos s'han obtingut de [WTW-WTT2-2007] i els dels combustibles sòlids, de [IPCC-2005], annex 1, pàg. 398 (excepte per al carbó vegetal). Les emissions generades en l'obtenció dels combustibles líquids i gasosos s'han obtingut de [WTW-WTT2-2007]; les dels combustibles sòlids han estat estimades per l'autor a partir de dades de [WTW-WTT2-2007].

³ Els valors de les densitats dels combustibles líquids s'han obtingut de [WTW-WTT2-2007].

⁴ Els valors de les densitats dels combustibles sòlids s'han obtingut de l'IPCC.

Fonts: [WTW-WTT1-2007], [WTW-WTT2-2007], [IPCC-2005], FAO. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Conversors d'energia i rendiments

Un dels aspectes més determinants de les societats desenvolupades d'avui dia és el desenvolupament d'una gran quantitat i diversitat de conversors d'energia per transformar l'energia primària en formes útils d'energia, fonamentalment en energia elèctrica (els sistemes generadors) i en energia mecànica (els diferents tipus de motors).

A vegades les cadenes de transformacions són complexes. Per exemple, l'energia mecànica que eleva l'ascensor de casa és proporcionada per un motor elèctric que s'alimenta d'una electricitat generada per l'energia mecànica produïda per una turbina que transforma una energia termodinàmica del vapor d'aigua, que alhora ha rebut l'energia d'una reacció de combustió procedent de l'energia dels enllaços químics d'un combustible. I, en cada un d'aquests passos, tenen lloc unes pèrdues d'energia que en van disminuint el rendiment.

Doncs bé, malgrat que aquest és un aspecte determinant dels sistemes tecnològics, hi ha una nebulosa de coneixement sobre el tema i pocs textos s'atreveixen a fer-ne recomanacions i a donar-ne xifres, ni que siguin aproximades. La taula 5.4 n'és un resum:

Taula 5.4. Rang de potències i rendiment dels motors, generadors i altres sistemes			
Dispositiu o màquina	Rangs	Rendiments %	Aplicacions
Rendiments del cicle de Carnot a diferents temperatures			
Rendiment = $(1 - T_2/T_1)$ T_2 , temperatura de la font calenta (en °K) T_1 , temperatura de la font freda (en °K) (°K = °C + 273,15)	de 200 a 80 °C de 380 a 180 °C de 580 a 250 °C de 630 a 250 °C de 1000 a 600 de 1000 a 250	25,4 30,6 38,7 42,1 31,4 58,9	Central nuclear Turb. vapor subcrítica Turb. vap. Supercrítica Turbina de gas Cicle combinat
Transformacions d'energia tèrmica a energia mecànica o elèctrica ¹			
Màquina de vapor Coet ² Motor de combustió interna Otto Motor de comb. interna dièsel (lleuger) Turbina eòlica Turbina de gas Motor Stirling Motor combustió interna dièsel (lent) Turbina de vapor subcrítica Turboreactor de doble flux Turbina de vapor supercrítica Cicle combinat turbina gas/turbina vapor	de 0,5 kW a 10 MW de 0,1 a 500 kW de 0,1 a 1000 kW de 100 W a 5 MW de 25 kW a 0,4 GW de 0,1 a 25 kW > 1 MW Fins a 1,5 GW de 5 a 100 MW òptim 0,8 GW de 0,3 a 0,6 GW	de 5 a 12 0 a 100 (16) de 18 a 25 de 25 a 35 de 25 a 40 de 30 a 35 de 30 a 40 de 35 a 45 de 33 a 36 de 35 a 40 de 36 a 42 de 50 a 56	Indústria, ferrocarril Aeroespacial Automòbil Automòbil, camió Aerogenerador Cent. elèctrica, aviació Cent. elèctrica solar Vaixells Central elèctrica Aviació comercial Central elèctrica Central elèctrica
Transformacions d'energia elèctrica a energia lumínica ³			
Làmpada incandescent, halògena Làmpada fluorescent Làmpada de vapor de sodi Il·luminació per LED	de 25 a 150 W de 6 a 30 W de 70 W a 1 kW de 60 mW a 20 W	de 2 a 4 de 9 a 15 de 12 a 30 de 8 a 12	Il·luminació tradicional Il·lum. baix consum Il·luminació viària Noves aplicacions
Transformacions energia tèrmica a energia tèrmica			
Caldera tradicional Caldera de condensació Panells solars tèrmics	de 5 kW a 200 MW de 30 a 50 °C de 30 a 60 °C	de 60 a 80 de 85 a 105 de 40 a 80	Generació de vapor Generació de vapor Aigua calenta sanitària
Transformacions energia d'alta qualitat a altra energia ¹			
Turbines hidràuliques Motor elèctric Motor elèctric Motor elèctric Generador elèctric Resistències elèctriques Bateria elèctrica (càrrega/descàrrega)	de 1 a 10 kW de 10 a 100 kW > 100 kW de 0,2 a 1,5 GW Liti-ió	de 85 a 95 de 75 a 90 de 85 a 95 de 92 a 98 >90 >95 de 80 a 90	Plena càrrega Plena càrrega Plena càrrega Centrals elèctriques Calefaccions, anàlegs Acumulació electricitat
Sistemes vius			
Fotosíntesi (FAO) ⁴ Muscle ¹		de 3 a 6 de 14 a 27	Energia solar incident Animals
¹ Dades inspirades en < http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_conversion_efficiency >. ² Varia des de 0% a l'arrencada fins a 100% quan la velocitat del vehicle iguala la de sortida dels gasos. El rendiment mitjà de la llançadora espacial de la NASA per posar una càpsula en òrbita a 111 km d'altura i 30.000 km/h de velocitat és de 16% < http://en.wikipedia.org/wiki/Rocket >. ³ < http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficacy#Overall_luminous_efficacy >. ⁴ Fotosíntesi < http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e05.htm#TopOfPage >.			
Fonts: diverses; entre elles, diferents articles de viquipèdia, [Mar-2011]. Elaboració: Carles Riba Romeva			

Comentaris a la taula 5.4:

1. El cicle de Carnot (cicle tèrmic en condicions de reversibilitat en funció de les temperatures de la font calenta i la freda, T_1 i T_2 en °K) dóna rendiments energètics no molt més grans que els de les màquines reals, i això vol dir que, en general, són màquines ben optimitzades tècnicament, amb un rendiment exergètic elevat (l'exergia seria la màxima energia mecànica teòrica que se'n pot obtenir).
2. Totes les màquines que converteixen energia tèrmica (o d'un gas compressible) en mecànica tenen rendiments baixos: motors de combustió interna, turbines de gas i de vapor, turboreactors, i també les turbines eòliques.
3. Les transformacions entre energia mecànica i elèctrica usualment tenen rendiments molt elevats i les pèrdues solen estar determinades, en gran manera pels elements auxiliars. Per tant, els generadors elèctrics (d'energia mecànica a elèctrica) i els motors elèctrics (d'energia elèctrica a mecànica) solen tenir rendiments superiors al 80%, que augmenten amb la dimensió de la màquina i la regularitat de les velocitats i càrregues respecte al punt nominal de funcionament.

5.3. El petroli, recurs estratègic

En comparar el petroli (líquid) amb els altres combustibles fòssils gasosos (gas natural) i sòlids (carbó), es percep el gran avantatge que presenta, especialment en el transport.

El *petroli convencional* (45,3 MJ/kg i 38,87 MJ/litre, densitat de 0,858 kg/litre), els seus derivats (gasolina, gasoil, querosè), així com els gasos liquats del petroli (LPG, fonamentalment el propà i el butà) són combustibles fòssils de gran concentració energètica que, gràcies a la seva naturalesa líquida, són fàcils de transportar, de manipular i d'emmagatzemar en condicions relativament segures.

Les emissions de gasos d'efecte hivernacle, 68,0 gCO₂/MJ, es troben en una situació intermèdia entre el gas natural, menys contaminant, i el carbó, més contaminant.

Aquests avantatges dels combustibles líquids han fet que el seu mercat sigui mundial (les relacions d'exportació–importació de cru són, aproximadament, la meitat de la producció) i que el petroli hagi esdevingut la nostra referència energètica (és freqüent reduir les mesures d'altres fonts energètiques a TEP, tona equivalent de petroli, TOE, en anglès).

Taula 5.5. Característiques dels principals combustibles fòssils primaris						
Combustibles		Densitat	Contingut energètic		Gasos d'efecte hivernacle	
		Mg/m ³	MJ/kg	MJ/litre	kgCO ₂ /kg	kgCO ₂ /MJ
Gas natural	gas	0,00072	48,3	0,0348	2,250	0,0502
	líquid	0,45	48,3	21,7	2,250	0,0502
Petroli cru	global	0,82	44,8	36,76	2,800	0,0620
	convencional	0,858	45,3	38,87	3,100	0,0680
	liquats de gas	0,55	50,0	27,25	3,000	0,0600
Carbó	global	1,32	21,92	28,9	1,950	0,0896
Nota: les xifres en negreta s'han obtingut per càlcul a partir de les dades de les taules de l'EIA-govEUA.						
Fonts: EIA i altres. Elaboració: Carles Riba Romeva						

De forma simplificada, se solen establir relacions convencionals entre les mesures de volum o massa d'alguns combustibles i el contingut energètic. Per exemple: 1 TEP (tona equivalent de petroli) = 10.000 Mcal = 41,868 GJ; 1 TEC (tona equivalent de carbó) = 0,7 TEP = 7.000 Mcal = 29,308 GJ; o també 1 tU_{nat} (tona d'urani natural) = 10.000 TEP = 418,68 TJ.

A la taula 5.5 s'assenyalen en negreta els valors obtinguts com a mitjana mundial de l'any 2008 dels combustibles respectius (EIA-govEUA). És a dir, són valors mesurats (o estimats a partir de mesures).

Densitat energètica elevada

A continuació, es proporcionen diversos exemples que il·lustren la gran densitat energètica del petroli, que normalment passa desapercebuda:

Exemple 1 (com substituir el petroli?)

Ramon Sans Rovira, bon amic i company enginyer, em va fer saber un dia que havia temptejat (i, com a conseqüència del resultat, havia descartat) el sistema d'acumulació d'energia que descriu a continuació:

Es basava en una torre adossada a un edifici (per exemple, de 20 metres), amb una gran pesa semblant a la d'un rellotge de torre. Unes plaques fotovoltaïques produïrien energia durant les hores solars i, per mitjà d'un petit motor, aniria elevant la pesa. Després, el propi motor, transformat en generador, proporcionaria energia elèctrica mentre la pesa aniria baixant. Conceptualment és molt interessant, però cal fer números.

Són aquests: 1 litre de gasolina conté una energia primària tèrmica d'uns 32,2 MJ_t (taula 5.2) que, transformada en mecànica (amb un rendiment del 25% d'un bon motor tèrmic), dóna 8,05 MJ (8.050.000 J). Si la pesa de la torre té una massa de 1.000 kg (equivalent a la massa d'un automòbil petit, 9.800 N), aquesta energia permetria elevar la pesa-automòbil fins a 821,4 metres d'altura! I, un dipòsit de 40 litres de gasolina, permetria elevar-la fins a l'estratosfera, 32.857,1 metres! Imagineu un automòbil elevat a 821 metres amb 1 litre de gasolina: no hi ha color a com substituirem el petroli?

Exemple 2 (acumular i transportar energia)

Ens hem acostumat a la gran autonomia que permet l'automòbil de motor tèrmic convencional, i a la facilitat i rapidesa amb què omple el dipòsit de combustible.

En efecte, un automòbil amb el dipòsit ple (40 litres, o 29,8 kg de gasolina, i una energia tèrmica de 1.288 MJ_t, taula 5.2) pot recórrer una distància d'uns 600 km i situar una energia mecànica a la roda de 75 kWh. Doncs bé, per a aquesta mateixa energia a la roda, amb un sistema de propulsió elèctric (rendiment bateria-roda de 0,75), caldrien unes bateries de 100,0 kWh. Les bateries de plom-àcid (0,035 kWh/kg) pesarien 2.857,1 kg i les de liti-ió (0,150 kWh/kg), uns 666,7 kg, en lloc dels 29,8 kg de gasolina.

D'altra banda, el temps de fer benzina (posem per cas, 120 segons per a 40 litres) representa una potència tèrmica de $1.288 \text{ MJ} / 120 \text{ s} = 10,62 \text{ MW}_t$, que, traduïda a elèctrica (factor de reducció d'1/3) seria de 3,54 MW_e. És una potència enorme, unes 1.000 vegades superior a la potència d'una llar familiar (3,5 kW_e)! Per tant, la recàrrega de bateries d'un automòbil elèctric no és tan sols una qüestió tècnica de les bateries, sinó sobretot de les fonts de subministrament elèctric.

A més, cal no oblidar que darrere de l'endoll hi ha un sistema elèctric que, en una gran proporció (mix elèctric), no fa sinó que utilitzar de forma remota una gran quantitat d'energia tèrmica, obtinguda principalment de combustibles fòssils.

Exemple 3 (alimentar les persones o els automòbils?)

El consum mitjà en aliments d'una persona adulta és d'unes 3.000 kcal/dia, equivalents a 12.558 MJ/dia; per tant, l'energia d'un litre de gasolina alimentaria energèticament unes 3 persones durant un dia.

El consum mundial de combustibles líquids és de 85 Mb/dia (milions de barrils per dia; 1 barril = 159 litres), que equivaldrien al consum alimentari d'una població de 40.500 milions d'habitants, és a dir, quasi 6 vegades la població mundial actual, que és d'uns 6.800 milions d'habitants.

El petroli davant dels altres combustibles fòssils

Els combustibles alternatius al petroli, el gas natural i el carbó, presenten bastants inconvenients, que s'analitzen a continuació:

El gas natural davant del petroli

El gas natural té una densitat energètica molt baixa (0,0348 MJ/litre, unes 1.000 vegades inferior a la del petroli). Això implica instal·lacions cares i voluminoses de tractament, de manipulació i de transport.

El transport del gas natural o bé es realitza per mitjà de gasoductes voluminosos i vulnerables, o bé s'ha de liquar. Aquesta darrera alternativa implica, primer, eliminar-ne algunes impureses i, després, refredar el gas natural fins a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pressió poc superior a l'atmosfèrica (tancs criogènics als punts d'origen i de destinació, vaixells criogènics en el transport). I, malgrat tot, la densitat energètica resultant del gas natural líquid (LNG) és un 60% de la del petroli (21,7 MJ/litre).

Tot això fa que el mercat mundial de gas natural sigui molt més reduït que el del petroli. Aquesta baixa densitat energètica també dificulta la seva aplicació als vehicles i al transport. En canvi, produeix baixes emissions de CO_2 (0,0502 $\text{kgCO}_2/\text{MJ}_i$), aspecte que potencia la seva aplicació a la cogeneració i al cycle combinat.

El carbó davant del petroli

El carbó, que ja havia estat el combustible principal en els inicis de la industrialització, davant de la perspectiva del declivi del petroli està recuperant el protagonisme, especialment en aquells països que disposen d'importantes reserves (la Xina, l'Índia, els EUA).

Tanmateix, els carbons presenten diversos inconvenients greus. Tenen una densitat energètica inferior a la del petroli (la mitjana del carbó produït al món és entre 22 MJ/kg i 29 MJ/litre) i, pel fet de no ser líquid, l'extracció, la manipulació i el transport són menys eficients. A més, no tan sols és el combustible fòssil que produeix més gasos d'efecte hivernacle (0,0896 $\text{kgCO}_2/\text{MJ}_i$), sinó que també és el que produeix la contaminació local més greu (fums, pluja àcida).

El petroli i les alternatives en el transport

Aquestes característiques fan que el petroli i els seus derivats (gasolina, querosè, gasoil) siguin molt difícils de substituir pràcticament a tots els sistemes de transport, tant de passatgers com de mercaderies (automòbils, autobusos, camions i furgonetes, avions, vaixells i en una proporció menor, els ferrocarrils).

En cas que aquest combustible manqui, com farem córrer els vehicles per les carreteres? Com faran les llargues travessies els vaixells? Com enlairarem els avions? Quan el petroli flaquegi, com se sostindrà l'economia globalitzada?

El declivi del petroli comportarà una situació molt difícil a la nostra societat que posarà en crisi tot el nostre sistema de funcionament. El petroli és la base del transport (automòbils, camions, avions, vaixells), i de la nostra alimentació (tractors i maquinària agrícola, fertilitzants, pesticides, pinsos, transports de productes agrícoles i ramaders, transformacions posteriors, envasos), com també de la major part d'altres activitats.

Les alternatives són molt complexes. Com es veurà a la part 3, una és allargar al màxim l'era actual dels combustibles líquids: és l'estratègia dels *combustibles no convencionals* (petrolis extrapesats, sorres bituminoses, pissarres bituminoses) i de les *transformacions a líquids* (CTL, o carbó a líquid; GTL, gas a líquid), però aquestes etapes també tenen els dies comptats. I l'estratègia dels *biocombustibles líquids* (BTL, o biomassa a líquids) és clarament insuficient per mantenir la tendència actual.

Altres estratègies passen necessàriament per transformacions socials i tecnològiques molt més profundes, com ara la reorientació vers les noves energies no renovables.

6. L'electricitat

6.1. El sistema elèctric

Fora de petits sistemes autònoms aïllats, pràcticament tota l'energia elèctrica generada i utilitzada es transmet a través de xarxes elèctriques interconnectades en àmplies zones geogràfiques (a escala de país i, en menor mesura, també a escala regional o internacional).

Els diferents centres generadors hi aporten l'energia que produeixen (centrals tèrmiques i nuclears, centrals hidroelèctriques, parcs eòlics, hortes solars i, darrerament, molts petits generadors industrials i particulars), alhora que els diferents usuaris absorbeixen energia quan la necessiten (encenen llums, connecten electrodomèstics, sistemes de comunicació i aparells informàtics, posen en funcionament màquines i altres processos industrials).

A diferència dels combustibles, l'energia elèctrica presenta un conjunt de particularitats molt determinants, que s'enuncien a continuació. Més endavant, després de presentar l'evolució del consum elèctric durant els darrers 28 anys, ens aturarem a analitzar més detalladament la seva significació i les conseqüències.

Aquestes particularitats són:

1. *Energia no acumulable*

L'electricitat es consumeix (s'ha de consumir) en el mateix moment en què es genera, i pràcticament no és acumulable. Per això, un dels problemes més importants en la gestió de la xarxa elèctrica és fer concordar les importants variacions de la demanda (segon a segon) amb el conjunt dels sistemes de generació.

2. *Participa d'un mix*

La interconnexió a través d'una xarxa fa que no es pugui discernir la procedència de l'energia elèctrica. El consum participa d'un *mix* que combina els diferents sistemes de generació (tèrmic, nuclear, hidroelèctric, eòlic, fotovoltaic, geotèrmic, etc.), i cal comptabilitzar la mitjana del rendiment i de les emissions de CO₂ del conjunt del sistema.

3. *Rendiments de generació baixos*

La major part de l'electricitat del món (81%) s'obté d'energia tèrmica (combustibles fòssils, energia nuclear, combustibles renovables i energia geotèrmica), amb un rendiment mitjà que, junt amb les pèrdues de distribució, se situa per sota d'1/3. Aquest no és conseqüència d'una mala gestió, sinó de les tecnologies utilitzades majoritàriament (turbines de vapor) i de les lleis que regeixen els cicles termodinàmics.

4. *Energia d'alta qualitat*

És una energia d'alta qualitat ja que pot ser transformada amb rendiments elevats (generalment, superiors al 80%) i alhora té una gran versatilitat. L'energia mecànica també és d'alta qualitat, mentre que aquelles que es manifesten com a energia tèrmica (química, nuclear, solar tèrmica) són de baixa qualitat. Cal tenir en compte, doncs, els baixos rendiments dels processos globals d'obtenció de l'energia elèctrica.

6.2. Producció i consum d'energia elèctrica

La taula 6.1 resumeix l'evolució dels components del sistema elèctric mundial.

En primer lloc, s'indica l'energia primària consumida en produir electricitat en el seu equivalent tèrmic. A continuació, s'indica l'energia elèctrica generada (a sortida de central) i els seus components: procedent d'energia tèrmica convencional (combustibles fòssils), de centrals nuclears, de centrals hidroelèctriques, de sistemes renovables no hidroelèctrics (geotèrmica, eòlica, solar fotovoltaica, centrals solars, marítima de les ones i les marees, etc.).

Més endavant, s'indiquen les pèrdues per distribució en les línies elèctriques i, finalment, es proporciona el consum elèctric (a l'endoll de l'usuari domèstic o industrial). Cal destacar el baixos rendiments globals del sistema elèctric (darreres files de la taula 6.1): rendiment de generació (B/A) i rendiment global (D/A, energia consumida/energia primària).

Taula 6.1. Evolució del sistema elèctric mundial, segons les fonts primàries										
Energia		1980	%	1985	1990	1995	2000	2005	2008	%
Primària equiv. (TW_t)	A	2,807		3,328	3,966	4,382	5,018	5,863	6,387	
Generació (TW_e)	B	0,915	100,00	1,080	1,289	1,438	1,663	1,980	2,181	100,00
Tèrmica convencional		0,638	69,71	0,690	0,815	0,889	1,060	1,308	1,469	67,38
Nuclear		0,078	8,54	0,163	0,218	0,252	0,280	0,301	0,297	13,62
Hidroelèctrica		0,197	21,49	0,223	0,245	0,280	0,299	0,330	0,356	16,33
Renovables no hidr.		0,004	0,38	0,006	0,014	0,019	0,027	0,043	0,061	2,80
Bombament hidràulic		-0,001	-0,12	-0,001	-0,002	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,13
Pèrd. Distrib. (TW_e)	C	0,079		0,091	0,104	0,128	0,158	0,183	0,189	
Consum (TW_e)	D	0,836		0,988	1,186	1,310	1,506	1,797	1,991	
1980=100		100,0		118,2	141,8	156,7	180,0	214,9	238,2	
Rendiment B/A (W _e /W _t)		0,326		0,324	0,325	0,328	0,331	0,338	0,341	
Rendiment D/A (W_e/W_t)		0,298		0,297	0,299	0,299	0,300	0,306	0,312	
% pèrdues (C/B)·100		8,60		8,45	8,06	8,88	9,49	9,25	8,68	

Font: EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La figura 6.1 representa gràficament les principals dades de la taula anterior. S'hi indiquen pel seu valor, l'evolució de l'energia primària utilitzada, de l'electricitat generada (a sortida de central), de l'electricitat consumida (endoll de l'usuari) i, dintre de l'electricitat generada, la part renovable i l'encara ínfima part de les renovables no hidràuliques.

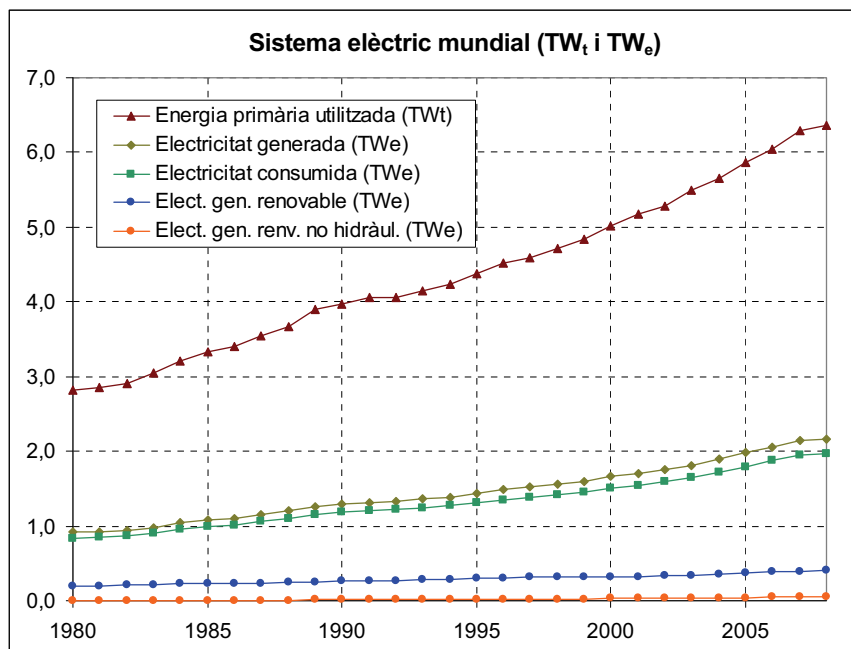


Figura 6.1. Evolució del sistema elèctric. Relació entre l'energia primària utilitzada (o equivalent), l'electricitat generada i l'electricitat consumida (la diferència són les pèrdues de distribució). També mostra l'electricitat generada a partir de fonts renovables, i de noves fonts renovables no hidroelèctriques. **Font:** EIA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Per construir la taula 6.1 i la figura 6.1, i agregar les produccions d'electricitat de diferents orígens (tèrmica, nuclear, hidràulica, eòlica, fotovoltaica, geotèrmica, etc.), s'han traduït totes elles a energia primària tèrmica equivalent (criteri adoptat per l'EIA-govEUA, però no per la IEA-OCDE).

Moltes centrals elèctriques generen l'electricitat a partir d'energia tèrmica (carbó, gas natural, energia nuclear, geotèrmica, combustió de residus, biomassa) i, aleshores, no hi ha dificultat a agregar energia com a energia primària dels combustibles. Però, quan es vol agregar l'electricitat produïda pels sistemes hidroelèctric, eòlic o fotovoltaic, on no hi ha intervenció de cap energia tèrmica, no tenim una unitat de mesura comuna.

Un exemple del mercat alimentari pot il·lustrar molt bé aquesta qüestió: tothom sap que no és el mateix comprar 1kg de pit de pollastre (en el nostre cas, l'electricitat) que 1 kg d'animal sencer (en el nostre cas, l'energia tèrmica primària). Hi ha una equivalència que es tradueix en el preu (de l'animal sencer, se n'obté una fracció de pit de pollastre).

De forma anàloga, per a l'electricitat obtinguda de fonts primàries no tèrmiques, s'estableix convencionalment que 1 unitat d'energia elèctrica equival a 3 unitats d'energia tèrmica (rendiment global de les centrals tèrmiques de generació elèctrica). Aquesta és la raó per la qual, en les dades de l'EIA-govEUA, les energies mundials hidroelèctrica (en equivalent primari) i nuclear són del mateix ordre (16,35 i 13,67%, respectivament) mentre que, en les dades de la IEA-OCDE, l'energia hidroelèctrica (en W_e) és unes tres vegades inferior a la nuclear (en W_t).

En aquest treball s'ha adoptat el primer criteri de les energies equivalents.

Les dades de la taula 6.1 i la representació gràfica de la figura 6.1 permeten fer els comentaris següents:

- 1) L'aspecte més destacat del sistema elèctric mundial és que el rendiment entre l'energia elèctrica a la sortida de les centrals generadores i l'energia tèrmica primària a l'entrada del sistema és el 34,1% (es perd el 65,9% de l'energia primària utilitzada, fonamentalment en forma d'energia tèrmica), rendiment que quasi no ha millorat els darrers 28 anys (del 32,6% al 34,1%).
- 2). L'energia elèctrica que rep l'usuari encara és menor a causa de les pèrdues en les línies de distribució elèctrica (a escala mundial, el 8,68% de l'energia elèctrica a la sortida dels centres generadors). Així, doncs, el rendiment mitjà mundial de l'energia elèctrica a l'endoll de casa o de la fàbrica és del 31,2%.
- 3) La utilització d'energia elèctrica implica, doncs, un rendiment en la generació molt baix, encara que l'ús posterior de l'energia elèctrica pugui ser molt eficient. En concret, utilitzar energia elèctrica per generar calor (calefaccions, escalfadors d'aigua, cuines, generadors de vapor, etc.) sol comportar una de les més grans ineficiències del nostre sistema energètic, ja que parteix d'un rendiment global de generació tèrmica-elèctrica del 31,2%, per després tornar a donar calor.
- 4) La major part de l'electricitat del món s'obté de combustibles no renovables (81,00%) i prové majoritàriament de combustibles fòssils (67,38%) i, la resta, de l'energia nuclear (13,62%), a més d'una petita fracció de les energies renovables (biomassa, residus, etc.). Aquesta és la causa principal del baix rendiment del sistema. Com a mínim, també el 67,38% de l'energia elèctrica mundial va associada a emissions intenses de CO_2 a causa dels combustibles fòssils (en gran proporció, del carbó).
- 5) L'electricitat obtinguda de les energies renovables és del 19,13%, principalment de l'energia hidroelèctrica (16,35%). Malgrat l'augment ràpid, les noves fonts d'energia elèctrica renovables (eòlica, geotèrmica, solar tèrmica, solar fotovoltaica, ones i marees) que tan sols genera el 2,80% de l'electricitat mundial el 2008.

- 6) Cal destacar negativament el fet que, durant els 28 anys estudiats, les energies renovables han perdut pes en el sistema elèctric (del 21,87% l'any 1980 al 19,13% el 2008, que representa una pèrdua del 2,76%). L'augment de les noves energies renovables (la gran esperança) no ha compensat la pèrdua de pes de l'energia hidroelèctrica (-5,16%).

Evolució del consum mundial i distribució regional

La producció i el consum d'electricitat evolucionen molt més ràpidament que la producció i el consum del conjunt d'energies. Aquí tan sols voldríem deixar constància d'aquest fet i de la seva distribució regional i, més endavant fer una reflexió sobre les seves conseqüències. La taula 6.2 mostra l'evolució de la producció i el consum d'electricitat per regions.

Taula 6.2. Evolució dels consums elèctrics, per regions									
	1980	%	1985	1990	1995	2000	2005	2008	%
Consums elèctrics en GW_e/any									
Amèrica del Nord	2.461,0	33,6	2.779,0	3.371,6	3.753,1	4.257,9	4.544,7	4.658,7	26,7
Amèrica del S. i c.	269,8	3,7	350,0	420,6	523,0	649,1	767,1	873,5	5,0
Europa	2.006,0	27,4	2.280,2	2.526,3	2.640,4	2.941,9	3.230,5	3.361,3	19,3
Euràsia	1.168,6	16,0	1.382,5	1.460,9	1.074,4	1.031,9	1.139,3	1.244,9	7,1
Orient Mitjà	84,5	1,2	150,1	204,6	285,2	385,1	520,7	629,7	3,6
Àfrica	170,4	2,3	222,3	277,6	317,1	367,3	472,9	525,2	3,0
Àsia i Oceania	1.162,8	15,9	1.494,4	2.123,6	2.882,7	3.551,4	5.063,4	6.151,5	35,3
Món	7.323,1	100,0	8.658,4	10.385,2	11.476,0	13.184,7	15.738,7	17.444,8	100,0
Consums elèctrics en TW_e									
Amèrica del Nord	0,281	33,61	0,317	0,385	0,428	0,486	0,519	0,532	26,71
Amèrica del S. i c.	0,031	3,68	0,040	0,048	0,060	0,074	0,088	0,100	5,01
Europa	0,229	27,39	0,260	0,288	0,301	0,336	0,369	0,384	19,27
Euràsia	0,133	15,96	0,158	0,167	0,123	0,118	0,130	0,142	7,14
Orient Mitjà	0,010	1,15	0,017	0,023	0,033	0,044	0,059	0,072	3,61
Àfrica	0,019	2,33	0,025	0,032	0,036	0,042	0,054	0,060	3,01
Àsia i Oceania	0,133	15,88	0,171	0,242	0,329	0,405	0,578	0,702	35,26
Món	0,836	100,00	0,988	1,186	1,310	1,505	1,797	1,991	100,00
Consums elèctrics: índexs de creixement (1980=100)									
Amèrica del Nord	100,0		112,9	137,0	152,5	173,0	184,7	189,3	
Amèrica del S. i c.	100,0		129,8	155,9	193,9	240,6	284,4	323,8	
Europa	100,0		113,7	125,9	131,6	146,7	161,0	167,6	
Euràsia	100,0		118,3	125,0	91,9	88,3	97,5	106,5	
Orient Mitjà	100,0		177,6	242,1	337,5	455,7	616,2	745,2	
Àfrica	100,0		130,4	162,9	186,0	215,5	277,5	308,1	
Àsia i Oceania	100,0		128,5	182,6	247,9	305,4	435,4	529,0	
Món	100,0		118,2	141,8	156,7	180,0	214,9	238,2	
Font: EIA-govEUA; Elaboració: Carles Riba Romeva									

En primer lloc, cal ressenyar l'augment significativament més elevat del consum elèctric en relació amb l'augment del consum general d'energia (índex 238,2 en lloc de 172,2).

Però, si s'observen els creixements individuals de cada una de les regions del món, alguns d'ells són espectaculars i afecten algunes de les regions més poblades del planeta. L'índex de creixement de l'Orient Mitjà és del 745,2; el d'Àsia i Oceania, del 529,0; el d'Amèrica del Sud i Central, del 323,8, i el d'Àfrica de 308,1. Totes aquestes regions més que tripliquen el consum elèctric.

Certament, l'accés a l'electricitat és un dels principals índexs de desenvolupament de qual-sevol societat i encara hi ha una part molt important de la humanitat que no hi té accés. Concretament, 1.441 milions de persones, el 21,1% de la població mundial, segons dades de 2008 de la IEA (WEO 2010, o <http://www.iea.org/weo/electricity.asp>), distribuïdes territorialment de la forma següent:

Taula 6.3. Habitants sense accés a l'electricitat		
	Mhab	% població ¹
Amèrica Llatina	31	6,6
Orient Mitjà	22	10,5
Àfrica sub-sahariana	585	69,5
Xina i Àsia de l'Est	186	9,2
Àsia del Sud	612	37,8
Resta del món	5	
Món	1.441	21,1
¹ Percentatge sobre la població de cadascun dels àmbits geogràfics. Font: IEA-OCDE, Agència Internacional d'Energia (WEO 2010)		

En el context del proper declivi dels recursos energètics fòssils, es plantegen diverses qüestions relacionades amb l'electricitat: Com proporcionar electricitat a aquest 21,1% de població mundial (1,5 vegades la dels països desenvolupats) que encara no en té? Es podrà sostenir en les societats desenvolupades la tendència al "tot elèctric"? Fins a quin punt algunes de les societats que s'estan desenvolupant ara (especialment la Xina) ho fan d'una forma adequada respecte a l'electricitat? Més endavant reprendrem algunes d'aquestes qüestions.

6.3. Característiques i limitacions de l'electricitat

A continuació, s'analitzen amb més detall algunes de les característiques del sistema elèctric (ja anunciades a la introducció) i les seves implicacions

1. *Energia no acumulable*

L'electricitat es produeix al mateix moment que es consumeix. Els sistemes d'acumulació per mitjà de preses hidràuliques reversibles o, més recentment, la previsió de l'acumulació en bateries del futur parc d'automòbils elèctrics, demanen inversions molt considerables, i tan sols poden acumular una part petita de l'energia generada. En efecte, el bombament hidràulic mundial representava el 0,13% el 2008 (taula 6.1); la transformació del 10% del parc espanyol d'automòbils de 2008 en elèctric (2,2 milions d'unitats) amb una circulació de 15.000 km/any, acumularia el 2,3% de l'energia elèctrica generada a Espanya.

Per això, un dels problemes més importants en la gestió de la xarxa elèctrica és fer concordar les importants variacions de la demanda (minut a minut) amb el conjunt dels sistemes de generació. L'energia nuclear, per la seva inflexibilitat, i les energies eòlica i fotovoltaica, per la seva variabilitat, són les que plantegen més dificultats.

Per il·lustrar la gestió de la xarxa elèctrica, es mostra l'evolució de l'estructura de generació d'electricitat a Espanya en temps real facilitada per Red Eléctrica Española (REE).

S'han elegit dues dates: el dia 5 de maig de 2010, extraordinàriament ventós, amb les centrals tèrmiques de carbó pràcticament aturades i les de cicle combinat de gas natural a mitja potència ajustant la demanda; i el dia 14 de setembre de 2010, poc ventós (especialment quan les darreres hores del dia la demanda és més elevada), en què es van posar en funcionament les centrals tèrmiques de carbó i de cicle combinat.

És interessant observar:

- La generació d'electricitat nuclear és pràcticament constant i se li dona prioritat davant de les altres centrals tèrmiques. Aquesta inflexibilitat fa que l'energia nuclear

no participi en l'ajust entre generació i demanda alhora que desplaça les ineficiències cap a altres components del sistema.

- b) L'energia eòlica és absolutament variable i cal aprofitar-la quan es produeix.
- c) Les centrals tèrmiques (sobretot les de cicle combinat) són la basa principal de què disposa el sistema elèctric per ajustar la generació a la demanda.

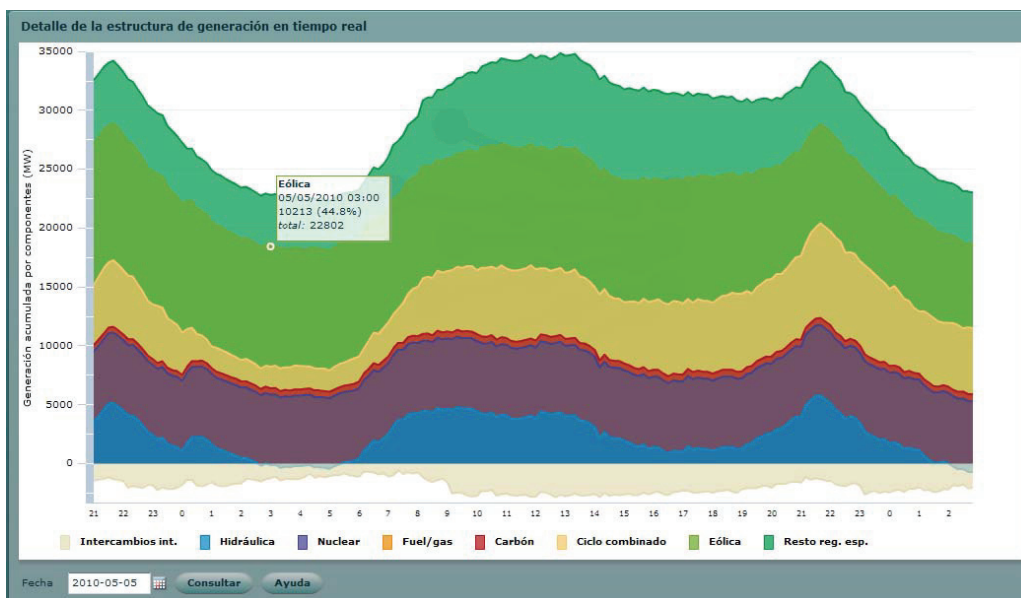


Figura 6.2. Estructura de la generació elèctrica en temps real, segons REE (<https://demanda.ree.es/generacion_acumulada.html>, el 5 de maig de 2010), dia especialment ventós (44,8% de generació d'energia eòlica a les 3.00 h). **Font:** REE (5/5/2010).

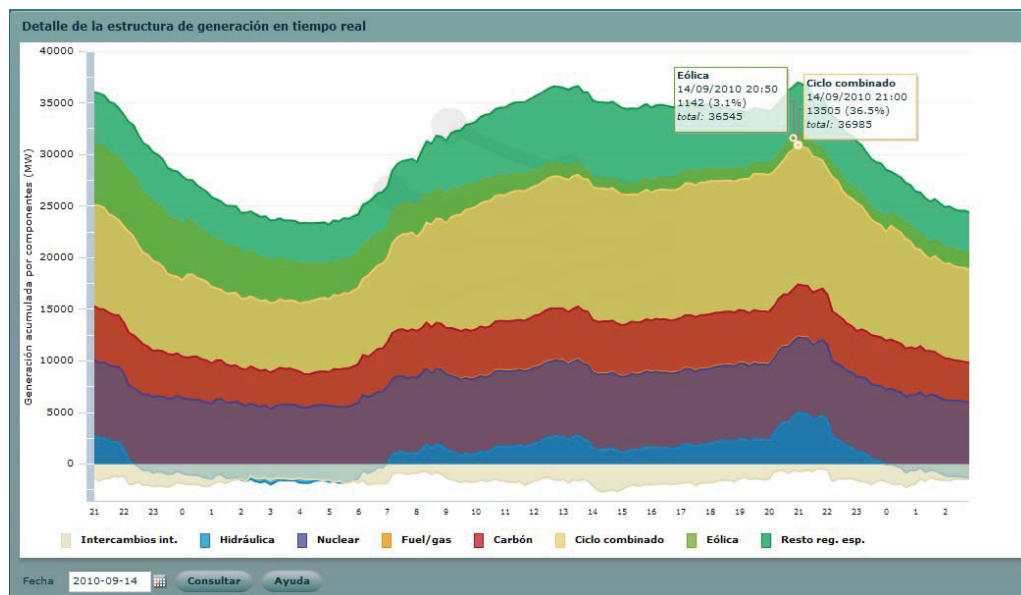


Figura 6.3. Estructura de la generació elèctrica en temps real, segons REE (<https://demanda.ree.es/generacion_acumulada.html>, el 14 de setembre de 2010, dia poc ventós (3,1%, a les 20.50 h). **Font:** REE (14/09/2010)

2. Participa d'un mix

La interconnexió a través d'una xarxa elèctrica fa que la procedència de l'energia elèctrica no es pugui destriar. Tant els generadors com els consumidors d'energia elèctrica col·loquen o detreuen energia de la xarxa, on és fa indestriable saber la procedència o la destinació de cada kWh. Per tant, un consumidor determinat no pot al·legar que consumeix energia eòlica o d'una font determinada, sinó que ha de comptabilitzar la mitjana del rendiment i de les emissions de CO₂ del sistema.

A continuació, la taula 6.4 mostra els diferents orígens de l'electricitat i els rendiments de les diferents regions del món, com també de tres països que ens han semblat significatius (els EUA, la Xina i Espanya), segons l'EIA (cap d'aquestes regions o països intercanvien més d'1,5% de la seva producció elèctrica, excepte Espanya, que ho fa el 3,75%). El *mix* elèctric és la combinació dels diferents sistemes de generació elèctrica (tèrmica, nuclear, hidroelèctrica, eòlica, fotovoltaica, geotèrmica, etc.) i es correlaciona directament amb les emissions de CO₂.

Taula 6.4. Origen de l'energia elèctrica, per regions (mix del 2008, en %)							
Regions i països	tèrmica	nuclear	hidro-elèctrica	renovab. no-hidr.	rendim. net	pèrdues distribució	rendim. Total
	%	%	%	%	W _e /W _t	%	W _e /W _t
Amèrica del Nord	65,43	18,10	13,45	3,15	0,339	6,79	0,316
Amèrica del S. i c.	31,02	2,01	63,90	3,09	0,344	16,14	0,289
Europa	52,91	25,13	15,64	6,68	0,340	7,18	0,317
Euràsia	65,99	17,49	16,36	0,24	0,339	11,56	0,295
Orient Mitjà	98,77	0,00	1,18	0,06	0,345	13,18	0,299
Àfrica	81,62	1,93	16,12	0,53	0,345	11,81	0,309
Àsia i Oceania	77,90	7,57	13,13	1,45	0,343	8,35	0,315
Món	67,38	13,62	16,33	2,80	0,341	8,68	0,312
Espanya	60,70	19,09	7,93	12,66	0,344	5,11	0,314
EUA	71,05	19,57	6,19	3,35	0,339	5,97	0,322
Xina	81,29	2,03	16,22	0,46	0,345	5,96	0,323
Les quatre primeres columnes: percentatge de les energies primàries, segons la procedència (sumen 100%); columna cinquena: rendiment net: relació energia elèctrica produïda i energia primària usada; columna sisena: percentatge de pèrdues de distribució (xarxa elèctrica) sobre l'energia produïda pel centre generador; columna setena: rendiment global des de l'energia primària fins a l'endoll elèctric de l'usuari. Font: EIA-govEUA. Elaboració: Carles Riba Romeva							

S'observa:

- El *mix elèctric* de les diferents regions i països del món té composicions diferents. Les interconnexions elèctriques entre molts països són encara relativament petites i les interconnexions entre regions són pràcticament residuals.
- Els rendiments de les diferents regions i països són força baixos però bastant uniformes entre si, independentment del *mix*.
- En canvi, les emissions de gasos d'efecte hivernacle (especialment, CO₂) presenten grans diferències entre regions i entre països a causa, fonamentalment, de la composició del *mix* de cada un d'ells. Aquest aspecte s'analitza al punt següent.

3. Rendiment i emissions de CO₂ dels consums elèctrics

S'ha estès la idea errònia que l'electricitat consumeix poca energia i que no emet gasos d'efecte hivernacle. A més, en cas de generalitzar-se el vehicle elèctric, la substitució de combustibles (gasolina, dièsel, amb fortes càrregues impositives) per l'electri-

citat (amb gravàmens molt més baixos) farà que l'administració perdi un dels seus impostos principals.

La paradoxa de l'automòbil elèctric

Ha contribuït de forma determinant a estendre aquestes idees errònies la propaganda enganyosa que fan moltes empreses automobilístiques en la defensa de les noves versions en l'automòbil elèctric (altament subvencionades) i la greu irresponsabilitat dels governs per no corregir o precisar aquestes falsedats.



Figura 6.4. Ha esdevingut una pràctica generalitzada utilitzar lemes com ara «zero emission» en els llançaments publicitaris d'automòbils elèctrics. **Font:** premsa (19/09/2010)

Les afirmacions anteriors reflecteixen la ignorància del concepte de *cicle de vida*.

És cert que el motor de l'automòbil elèctric té un rendiment molt elevat i que no emet gasos d'efecte hivernacle en la transformació elèctrica que va de la bateria a les rodes. Però és fals si es té en compte tot el cicle de vida que va de la font primària fins a l'energia a les rodes, ja que la generació de l'energia elèctrica, que depèn del *mix* de cada país o cada regió, sol ser altament contaminant.

Fora d'Amèrica del Sud i Central, amb un pes relativament baix de combustibles fòssils en la generació d'electricitat (30,75%), en la resta de regions aquesta participació supera el 50% i, en les regions més poblades (Àfrica, i Àsia i Oceania), se situa al voltant del 80% i arriba al 95% a l'Orient Mitjà.

Quins són, doncs, els consums comparatius d'energia primària i les emissions de CO₂ d'un automòbil tèrmic i un automòbil elèctric connectat a la xarxa? A aquest efecte, s'analitzen les emissions de CO₂ basades en els *mix* elèctrics del món i de tres països: Espanya (representatiu d'Europa), els EUA i la Xina (taula 6.5).

Taula 6.5. Emissions de CO ₂ de diferents <i>mixs</i> elèctrics (2008)						
	Contribució de les fonts d'energia primària en cada <i>mix</i> elèctric					
	Líquids	Gas natural	Carbons	Nuclear	Renovables	Total
	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	
	87,6	67,6	114,1	25,0	8,0	
Àmbits	%	%	%	%	%	%
Món	5,58	20,64	41,16	13,62	19,13	100,00
Espanya	6,06	30,28	24,35	19,07	20,59	100,00
EUA	1,79	20,89	48,37	19,57	9,54	100,00
Xina	1,01	0,91	79,37	2,03	16,68	100,00
Àmbits	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t	gCO ₂ /MJ _t
Món	4,89	13,95	46,96	3,41	1,53	70,74
Espanya	5,31	20,47	27,79	4,77	1,65	59,98
EUA	1,56	14,12	55,19	4,89	0,76	76,53
Xina	0,88	0,62	90,56	0,51	1,33	93,90
¹ Les petites diferències en les sumes són del bombament en les centrals hidroelèctriques. Fonts: Valors de les emissions, taula 5.3; <i>mix elèctric</i> , segons fonts oficials de cada país. Elaboració: Carles Riba Romeva						

En funció de les dades anteriors, es comparen les emissions de gasos d'efecte hivernacle d'un automòbil de tracció tèrmica i un altre de tracció elèctrica.

Ens hem basat en l'esquema WTW (*well-tank-wheel*, o jaciment-dipòsit/bateria-roda) [WTW-2007]. A les figures 6.5, 6.6 i 6.7 s'indica, per mitjà de cercles, l'energia en cada un dels estadis del procés i, per mitjà de requadres-fletxa, els processos de transformació amb els rendiments i les emissions de CO₂ en cada un d'ells.

Es parteix de les hipòtesis següents:

Consum a la roda d'un automòbil mitjà: 0,45 MJ/km (0,125 kWh/km). *Tracció tèrmica*: rendiment d'extracció, destil·lació i transport del combustible: 0,85 [WTW-WTT2-2007]; rendiment del dipòsit de combustible a la roda: 0,23. *Tracció elèctrica*: rendiment de les fonts primàries d'energia a la bateria (inclou també la càrrega de la bateria): 0,28; rendiment de la bateria a roda (inclou la descàrrega de la bateria): 0,72.

Emissions. *Tracció tèrmica*. Valors de la taula 6.5 (mitjana de gasolina i dièsel: 13,4 gCO₂/MJ per obtenir el combustible [WTW-WTT2-2007] i 73,3 gCO₂/MJ en la seva combustió, referides a l'energia del combustible en el dipòsit). *Tracció elèctrica*. Valors de la taula 6.5 (referits a l'energia primària).

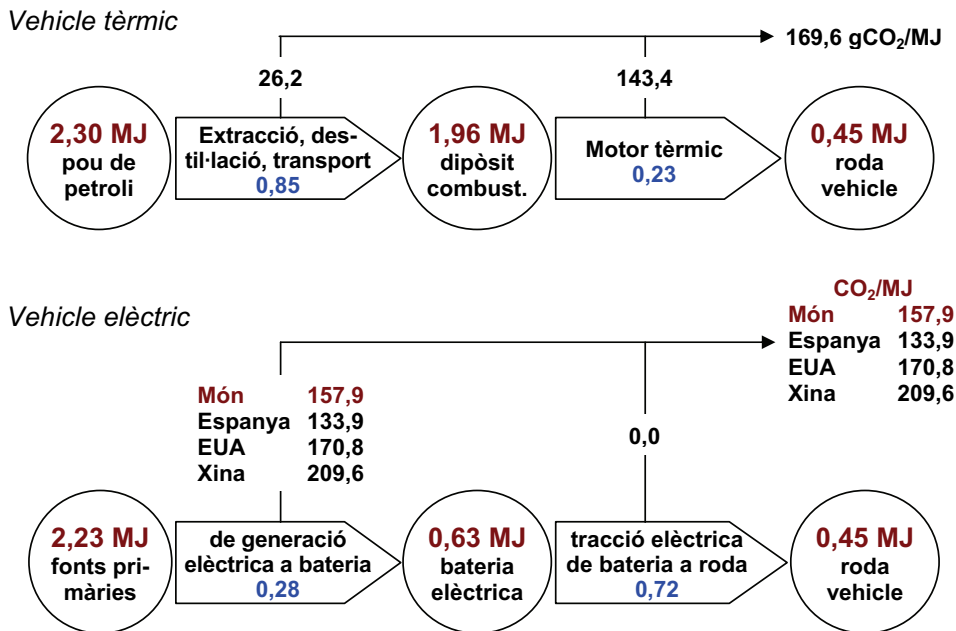


Figura 6.5. Comparació entre l'energia consumida i les emissions de gasos d'efecte hivernacle entre un vehicle de tracció tèrmica i un de tracció elèctrica.

Elaboració: Carles Riba Romeva.

Per tant, sense modificar els actuals *mix* de generació d'energia elèctrica en els diferents països i regions, l'automòbil elèctric no és cap solució a les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Més encara, l'obsessió per emular l'automòbil convencional (que continua pesant 1.350 kg, que pot circular a 180 km/h i que sol transportar un sol viatger), fa que altres alternatives de transport esdevinguin opaques.

Malgrat que l'enunciat WTW (*well-to-wheel*, [WTW-2007]) adopta un punt de vista sobre el cicle de vida complet del combustible, centra l'atenció en l'energia que es proporciona a la roda del vehicle, en lloc de fer l'èmfasi en el transport del viatger.

Alternatives de mobilitat

Més enllà de la reflexió que caldrà fer en un futur proper sobre la necessitat o la utilitat de determinats desplaçaments (viatges de negocis, turisme de cap de setmana, esdeveniments esportius, sovint superflus), el simple fet de centrar l'atenció en el viatger i no en la roda ja aporta una gran llum sobre les alternatives de transport.

A continuació, s'analitza com diferents tipus de transport transformen 100 MJ d'energia a la roda en el desplaçament del viatger. Tan sols s'ha tingut en compte la relació de masses, però l'anàlisi també es podria enriquir amb altres paràmetres, com ara la velocitat i la resistència a l'aire o els diferents tipus de rodolament (pneumàtic, roda-carril).

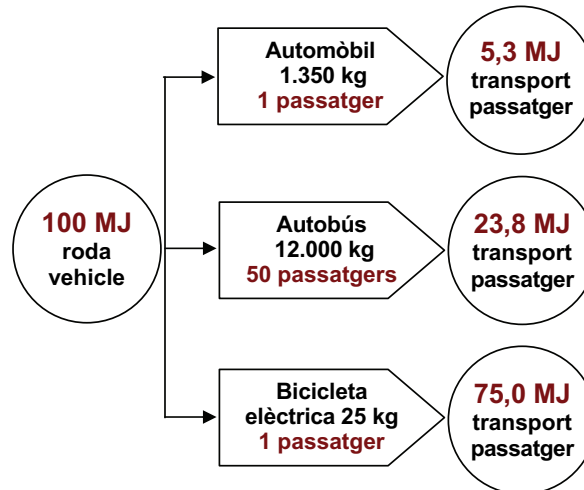


Figura 6.6. Rendibilitat energètica de diferents alternatives de transport. **Elaboració:** Carles Riba Romeva.

4. Energia d'alta qualitat

Com ja s'ha dit, una energia és d'alta qualitat quan pot transformar-se en qualsevol altre tipus d'energia amb rendiments elevats (generalment, >80%). L'electricitat (com també la mecànica) és una energia d'alta qualitat, mentre que aquelles que s'acaben manifestant com a tèrmiques (química, nuclear, solar tèrmica) són de baixa qualitat.

Cal tenir en compte que, per obtenir l'energia elèctrica (no disponible directament de la naturalesa), són necessaris processos de generació a partir d'energies primàries, generalment amb rendiments de transformació molt baixos (el 31,2% en la mitjana mundial a l'endoll domèstic o industrial; taula 6.1). Això fa reflexionar sobre si estem fent un ús adequat de l'energia elèctrica.

En aquest sentit, crida l'atenció una observació de Richard Duncan, enginyer elèctric americà que, en la seva coneguda obra *World Energy Production, Population Growth, and the Road to the Olduvai Gorge* [Dun-2001], diu que sense les funcions cibernètiques crucials C3 (comunicació, computació i control), l'actual civilització industrial quedaria mutilada.

I afegeix (i aquesta és una observació de gran interès) que aquestes funcions crucials tan sols requereixen un 15% de l'electricitat consumida. L'energia elèctrica restant es consumeix en altres funcions, moltes d'elles purament tèrmiques.

Potser la visió de Duncan és excessivament esquemàtica. A les tres funcions bàsiques C3, caldria afegir la il·luminació (de la qual se'n fa un abús! només cal mirar fotografies nocturnes de la Terra des de l'espai), l'accionament elèctric (del qual també se'n fa un abús! només cal observar la quantitat de petits aparells que sempre s'han accionat a mà

i ara es fa amb un petit motor elèctric) i determinats processos industrials íntimament relacionats amb l'electricitat (com ara l'electròlisi). Però això no impedeix la reflexió de fons, que apunta, sobretot, a pensar si té sentit consumir una part molt important de l'energia elèctrica (tan costosa d'obtenir!) en funcions purament tèrmiques (calefaccions, cuines, etc.), que l'únic avantatge que ens aporten és la comoditat del "tot elèctric".

El rendiment de la calefacció elèctrica

Per il·lustrar aquest aspecte, a continuació es comparen el rendiment energètic i les emissions de CO₂ tant per a una calefacció de gas com per a una calefacció elèctrica d'una llar. Es pren com a referència l'obtenció de 3,6 MJ tèrmics de confort, que seria el confort que donaria 1 kWh de calefacció elèctrica. El procés és el següent (figura 6.6):

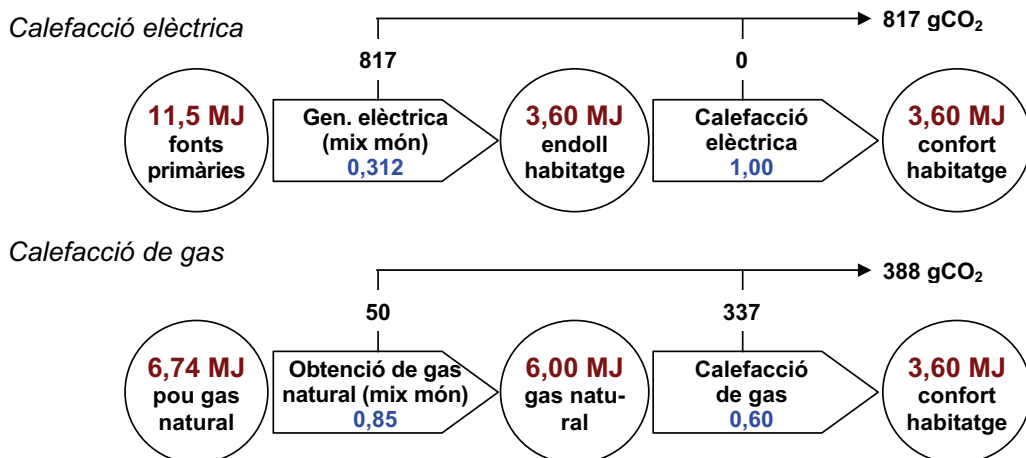


Figura 6.7. Comparació de l'energia primària consumida i de les emissions de gasos d'efecte hivernacle entre una calefacció elèctrica i una calefacció de gas. **Elaboració:** Carles Riba Romeva.

En definitiva, amb els valors dels *mixs* del món en electricitat i gas, la calefacció elèctrica consumeix un 70% més d'energia primària i emet un 110% més de gasos d'efecte hivernacle que amb la calefacció de gas.

6.4. Noves tecnologies elèctriques

Avui dia, s'està fent un gran esforç per millorar la generació d'electricitat en diverses direccions. D'una banda, s'està procurant millorar les centrals tèrmiques convencionals (fonamentalment, les de gas i de carbó) a fi d'obtenir-ne rendiments més elevats. I, de l'altre, la generació d'electricitat basada en les noves tecnologies d'energies renovables (fonamentalment, l'eòlica i la solar, però també les de les ones i de les mareas) és un dels camps amb més activitat. Tanmateix, com es veurà al capítol 9, tot i que aquestes energies han tingut uns creixements molt ràpids els darrers anys, tot just representen una ínfima part de la producció mundial total.

Probablement, amb el declivi dels combustibles fòssils caldrà imposar limitacions a l'ús de l'energia elèctrica. Caldrà posar límits a la tendència al "tot elèctric" (d'acord amb el toc d'atenció que fa Duncan). Però també caldrà transformar el sistema elèctric a més petita escala i en favor de la producció distribuïda ja que, a més d'aprofitar uns recursos cada cop més escassos, tindrà uns efectes educadors molt beneficiosos que caldrà posar sobre la taula els propers anys.

Millors en la producció elèctrica convencional

Els principals tipus de noves centrals elèctriques amb rendiments millorats són:

- a) *Sistemes i centrals de cogeneració* (CHP, *combined heat and power*). La idea és simple: aprofitar l'energia tèrmica dels gasos residuals de combustió d'un sistema de generació elèctric convencional per a d'altres processos que requereixen calor. D'aquesta manera, s'aconsegueix un rendiment global que pot arribar a ser superior al 80%, si bé el rendiment energia elèctrica/energia tèrmica continua essent el que és habitual (d'un 35%) i la resta (fins a més d'un 40% addicional) correspon a un rendiment d'energia tèrmica/energia tèrmica.
- b) *Centrals de cycle combinat* (CCGT, *combined cycle gas turbine*), que utilitzen el combustible en més d'un cycle termodinàmic en cascada. Inicialment, els gasos de combustió a alta temperatura (normalment, entre 1.100 i 1.300°C) impulsen una turbina de gas semblant a la dels motors d'aviació. Després, els gasos d'escapament s'utilitzen per produir vapor d'aigua (entre 450 i 650°C), que mou una turbina de vapor convencional. A la pràctica s'obtenen rendiments globals (energia elèctrica/energia tèrmica) entre el 50 i el 60% (entre el 20 i el 25% superiors a les centrals tèrmiques convencionals). El mateix principi s'aplica també en els motors marins (COGAS, *combined gas and steam*). Alhora, també és possible aprofitar la calor residual del cycle combinat seguint el principi de cogeneració.

La cogeneració pot utilitzar qualsevol combustible, mentre que el cycle combinat té requeriments més estrictes ja que s'ha de poder utilitzar inicialment el combustible en la turbina de gas. En les centrals de cycle combinat el combustible més utilitzat és el gas natural, com també determinats combustibles fluids que es polvoritzen. A més de millorar el rendiment, la utilització del gas natural en el cycle combinat té l'avantatge d'una reducció substancial de les emissions de CO₂ per unitat d'energia generada.

Una altra tecnologia utilitzada en els països que disposen de grans quantitats de carbó (especialment, EUA) és la *gasificació integrada en cycle combinat* (IGCC, *integrated gasification combined cycle*) que integra com a primer procés de la central la transformació del carbó en gas per obtenir-ne un gas sintètic (syngas). En aquest cas, no és tan clar que els beneficis d'aquesta tecnologia compensin les pèrdues de la transformació del carbó en gas (rendiment global, emissions de CO₂ per unitat d'energia generada).

D'altra banda, s'estan desenvolupant nous sistemes intel·ligents que permetran gestionar la connexió dels consums en els moments més adequats (hores baixes durant la nit, moments de gran producció d'energia eòlica, etc.) per tal de millorar el rendiment global del sistema elèctric (això sí!, trencant el principi d'ús a qualsevol hora i de qualsevol intensitat).

Al capítol 9 s'analitzen les noves alternatives de generació d'energia elèctrica a partir de fonts renovables.

Part 3

Fonts alternatives d'energia

Cada dia és més evident el límit dels recursos energètics fòssils a través dels primers símptomes del zenit de producció i l'amenaça del seu declivi. En canvi, els actuals dirigents econòmics i polítics del món amaguen aquests fets i continuen apostant per un desenvolupament basat en el creixement constant del consum d'energia i de recursos materials.

Les societats postindustrials (fonamentalment, les dels països de l'OCDE) consumeixen entre 50 i 100 vegades la potència endosomàtica d'una persona (la que requereix com a ésser viu), tendència que han seguit els sectors líders dels països en via de desenvolupament (Xina, Índia i Brasil, entre d'altres). En l'altre extrem, la major part de l'Àfrica subsahariana, extenses zones del sud-est asiàtic i també algunes zones d'Amèrica Llatina consumeixen de 5 a 10 vegades la potència endosomàtica, majoritàriament en forma de biomassa tradicional.

Sovint es creu que la societat cibernètica requereix menys energia. Però, tal com mostren les dades de les grans agències (EIA-govEUA i IEA-OCDE), l'ús de l'energia fòssil no ha fet més que augmentar i tan sols una crisi com l'actual (que tolerem tan malament) n'iniciï un lleu descens. El discurs dominant demana sortir-ne creixent econòmicament com sigui, sense parar-se a pensar si la naturalesa ens assegura els recursos per fer-ho.

Hi ha tres diferents enganys que porten a obviar una reflexió de fons sobre l'energia:

1. La premsa adesiara publica notícies sobre nous descobriments de recursos energètics fòssils (cada cop més inaccessibles i costosos) que fan la impressió que encara estem molt lluny que s'exhaureixin. Però quan els nous jaciments s'avaluen en el context mundial, es constata que cobreixen tan sols el consum energètic mundial de dies o, com a màxim, de mesos.
2. També es pregonen noves formes d'energia inexhaurible (reactors nuclears de tercera generació, fusió nuclear, etc.) però no es diu que, fins i tot suposant l'èxit (no assegurat) d'aquests projectes, les primeres plantes operatives d'energia no arribarien fins més enllà de 2030, quan el declivi dels combustibles fòssils ja serà una realitat punyent.
3. Finalment, moltes persones convençudes de les opcions sostenibles pensen que tan sols cal substituir recursos fòssils per noves energies renovables lliures de carboni. Tanmateix, aquestes energies alternatives mai no podran proporcionar el doll abundant d'energia de què avui dia encara disposem gràcies als combustibles fòssils (i, en especial, al petroli).

Quan es fan previsions futures amb energies alternatives, cal tenir en compte:

- a) La coherència amb el subministrament mundial i regional en funció dels recursos energètics considerats i de l'evolució de la població.
- b) Els temps necessaris d'implantació de les energies alternatives i els costos d'inversió.
- c) La interdependència dels diferents fenòmens. Un cop iniciat el declivi d'un recurs fòssil (per exemple, el petroli), el problema no serà com omplir el dipòsit de l'automòbil, sinó com transformar el sistema productiu i com alimentar les persones.

La part 3 d'aquest llibre analitza altres fonts d'energia: combustibles no convencionals, alternatives nuclears i noves energies renovables. Com veurem, cap d'elles no garanteix els consums actuals d'energia i, menys encara, els creixements futurs que pregonen les grans agències d'energia. Avui, l'única alternativa efectiva són les noves energies renovables (com ja ho van ser en el passat), tot i que obligaran a reduir dràsticament els consums en els països desenvolupats i a introduir grans canvis socials i tecnològics.

7. Els combustibles no convencionals

7.1. Origen dels combustibles fòssils

Els combustibles fòssils inclouen, fonamentalment, el petroli i el gas natural, constituïts bàsicament per hidrocarburs (compostos de carboni i hidrogen) i els carbons, formats predominantment per l'element carboni.

Tant uns com els altres s'han format durant milions d'anys a partir de restes orgàniques d'organismes vius, els primers fonamentalment de microorganismes (plàncton, algues i bacteris) presents en les masses aquoses (oceans i llacs) i els segons, de restes de vegetals superiors (troncs fulles, arrels) i, en alguns casos, d'espores.

Aquestes recursos energètics són el resultat d'un llarg procés que comença amb la formació de sediments amb un contingut significatiu de matèria orgànica, que després experimenten diverses transformacions sota circumstàncies particulars. Sense determinants processos biològics, químics i geològics (descomposició anaeròbica, piròlisi, moviments tectònics) de gran durada en el temps (fins a centenars de milions d'anys), la matèria orgànica difusa atrapada en els estrats sedimentaris no s'hauria transformat ni concentrat, i avui dia no disposaríem dels combustibles fòssils que coneixem.

Formació dels hidrocarburs

Els combustibles basats en els hidrocarburs són, fonamentalment, líquids (el *petroli cru*) i gasosos (*gas natural*), tot i que també hi ha hidrocarburs en estat sòlid o quasi sòlid (alguns *petrolis extrapesants*, les *sorres bituminoses* i les *pissarres bituminoses*).

Les etapes principals de la formació dels combustibles fòssils líquids i gasosos són:

Sedimentació

En les darreres etapes de la Terra, els medis aquosos (aiguamolls, llacs i oceans) han vist viure i morir multitud de generacions d'organismes vius. La major part d'aquesta biomassa ha reciclat els seus materials per mitjà de la respiració i la descomposició, però una petita part ha quedat atrapada en els sediments, on s'ha mesclat amb fang i sorra. Aquest procés, encara present, és quasi imperceptible a escala humana però adquireix una gran importància a escala geològica (de milions a centenars de milions d'anys).

Formació de querogen

Després de la sedimentació, la fracció orgànica difusa en petits filets (en proporcions molt baixes, sovint de l'ordre de l'1%) experimenta un primer procés anaeròbic causat per bacteris, i es transforma en una substància sòlida insoluble anomenada *querogen*, que roman fossilitzada. El querogen, molt disseminat, és difícilment explotable com a combustible, però a escala planetària representa una massa d'uns 10.000.000 Pg de carboni (Pg = 10^{15} grams) [SCOPE13-1979], quantitat unes 1.000 vegades superior a les reserves de carbó, i entre 2.000 i 3.000 vegades les reserves de petroli o de gas.

Piròlisi

A partir de la tectònica de plaques, les capes sedimentàries s'enfonsen lentament (entre centenars i milers de metres) i la temperatura i la pressió augmenten. Inicialment se separa CO_2 i aigua salada però, en créixer la profunditat, la matèria orgànica (querogen) inserida en el sediment experimenta un lent procés de fragmentació química (piròlisi) que dóna lloc als hidrocarburs i que pot durar entre desenes i centenars de milions d'anys.

Formació del petroli i del gas natural

La piròlisi del querogen a profunditats moderades (temperatures entre 60° i 120°C) origina, preponderantment, hidrocarburs líquids (cadena més llargues). Però, si la roca que

conté el querogen s'endinsa en capes més profundes i assoleix temperatures més altes ($>120^{\circ}\text{C}$), aleshores la piròlisi s'intensifica i produeix hidrocarburs gasosos (cadena més curta) deixant un residu de betum. Tots els components que resulten d'aquest procés (aigua, CO_2 , hidrocarburs líquids i gasosos, betum) queden inserits en els petits intersticis de la roca sedimentària (anomenada *roca mare*), normalment poc permeable, en substitució del querogen.

Migració i trampes

L'augment de la pressió pot acabar venent la impermeabilitat de la *roca mare* i expulsar els hidrocarburs líquids i gasosos (*migració primària*) vers altres estrats més permeables (*roca magatzem*). En el seu moviment ascendent a causa de la baixa densitat (*migració secundària*), aquests hidrocarburs poden quedar atrapats per alguna *trampa*, com ara un plec anticlinal o una falla d'estrats impermeables (argila, sal) i formar una acumulació (*jaciment*). El petroli i el gas natural hi solen anar associats. En els jaciments menys profunds, hi sol predominar el petroli (sovint amb una capa d'aigua a la part baixa) i, en els més profunds, el gas natural. Es poden extreure per simple descompressió (el fluid brolla sol) o per bombament.

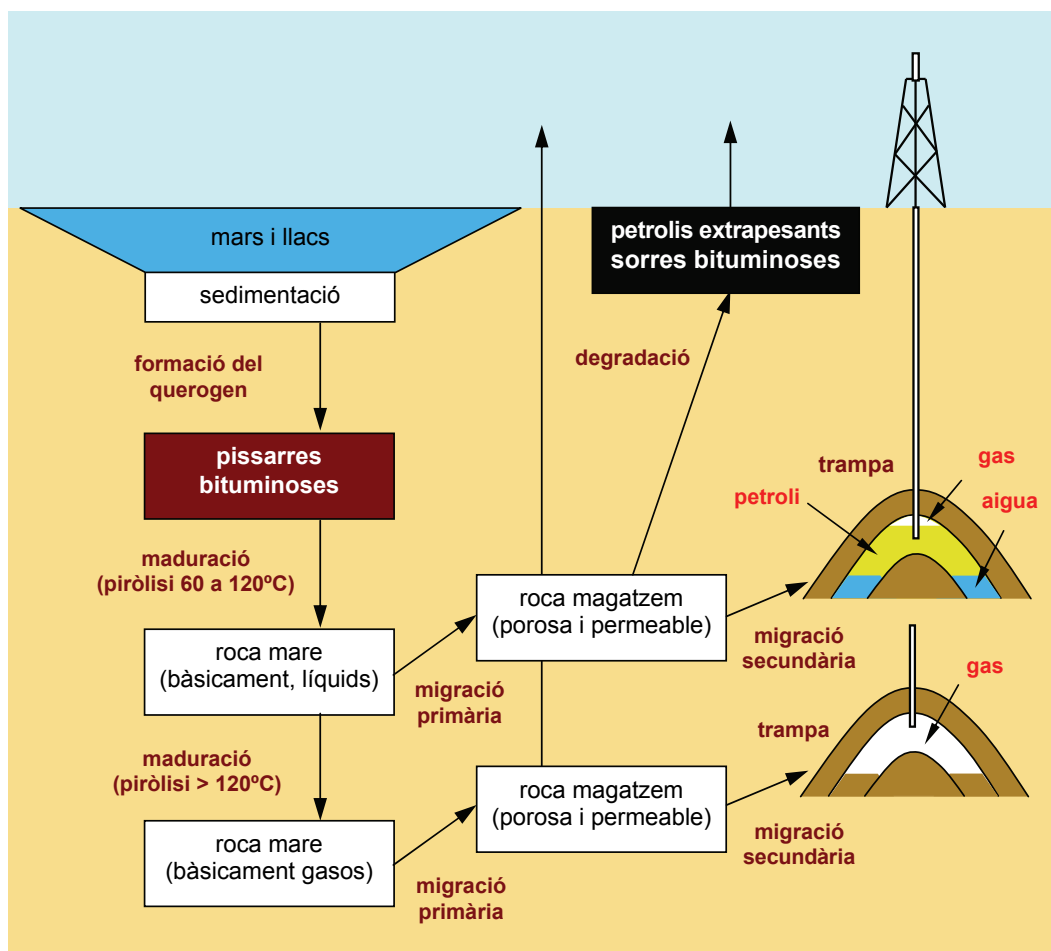


Figura 7.1. Esquema del procés de formació dels combustibles fòssils fluids (petroli i gas natural). Convé ressaltar la posició de les *pissarres bituminoses* al principi del procés, com a petrolis immadurs encara no formats, i de les *sorres bituminoses* al final del procés, com a petrolis degradats que han perdut la major part dels seus components volàtils. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Altres evolucions del querogen

Pissarres bituminoses (en anglès, oil shales)

Són roques sedimentàries que contenen querogen encara no pirolitzat (abans de la formació del petroli i del gas natural), de consistència sòlida semblant als lignits, però amb un contingut de matèria orgànica molt més baix que els carbons en formació. Per transformar-los en petroli cal realitzar un procés artificial de piròlisi a alta temperatura (a 500°C, per accelerar un procés que geològicament es realitza durant milions d'anys). Malgrat que els recursos de pissarres bituminoses en el món són immensos (uns 2,83 Tb, més del doble de les reserves de petroli convencional), el balanç energètic per a l'obtenció del querogen i la seva transformació en petroli resulta difícilment rendible.

Petrolis extrapesants i sorres bituminoses (en anglès, extra heavy oil i oil sand o tar sand).

Si, després de la migració primària, el petroli format per piròlisi del querogen no troba una trampa on formar un jaciment, aquest acaba pujant fins a la superfície, on els components volàtils s'escapen i els components líquids són degradats per l'acció de les bactèries i transformats en betums (barreja de components orgànics d'alta viscositat i matèries inorgàniques). Els dipòsits més importants en el món són els *petrolis extrapesants* de la Franja de l'Orinoco (Veneçuela) i les *sorres bituminoses* d'Athabasca (Canadà). Els recursos mundials són immensos (2,48 Tb i 3,27 Tb, respectivament, que equivalen a unes quatre vegades les reserves de petroli convencional), però són molta seva obtenció presenta importants dificultats i tan sols 0,31 Tb són comptabilitzats com a reserves.

Formació dels carbons

Els carbons deriven també d'una varietat de querogen formada a partir de matèria orgànica. Però, a diferència del petroli i del gas natural, és el resultat de grans masses vegetals de les zones continentals que originen un sediment on la matèria orgànica és majoritària. Això fa que, en el procés posterior de litificació o diagènesi (transformació en una roca) l'element carboni esdevingui majoritari i els hidrocarburs hi siguin en menor proporció.

Origen i transformació del carbó

Malgrat que els carbons s'han originat en totes les eres geològiques des que van aparèixer les plantes terrestres ara fa prop de 400 milions d'anys, fou durant el carbonífer superior i el permia (de 310 a 230 milions d'anys enrere) que es van donar les circumstàncies més favorables per a la seva formació: creixement de grans masses de vegetació frondosa composta de plantes gegants en un clima tropical; poca profunditat dels mars, amb canvis sobtats de nivell, combinats amb períodes de pluges molt intenses, on els aiguamolls i les zones inundables van enterrar periòdicament grans volums de vegetació (les futures vetes de carbó); aparició d'arbres amb escorça llenyosa (lignificada) quan encara no hi eren presents els microorganismes capaços de descompondre-la.

A través d'un enfonsament progressiu durant milions d'anys, amb pressions i temperatures creixents, aquestes capes de matèria vegetal densa es van anar *fossilitzant*, eliminant progressivament la humitat i els components volàtils (hidrocarburs lleugers, CO₂) i augmentant el %C (carboni) de manera que s'anaven transformant en carbons cada cop més evolucionats: de la *torba* al *lignit*, al *carbó sub-bituminós*, a l'*hulla (bituminosa)* i a l'*antracita*.

Essent els carbons matèries en estat sòlid, no experimenten migracions com els hidrocarburs fluids (petroli i gas natural) i, per tant, es troben en el lloc de formació, si bé normalment les vetes estan molt deformades pels moviments tectònics i els plegaments.

Caracterització dels carbons

Els principals paràmetres tecnològics que s'utilitzen per caracteritzar els carbons són la composició, el contingut d'humitat, la proporció de volàtils, el contingut de cendres i, sobretot, el poder calorífic. La taula 7.1 proporciona rangs de valors per a cada un dels tipus de carbó.

Composició química. Els carbons secs (sense humitat) es caracteritzen perquè tenen un contingut d'hidrogen aproximadament de la meitat que els petrolis (4%) i un contingut de carboni (C) elevat que varia entre >50% a les torbes i >90% a les antracites.

Humitat. Aigua lliure que pot ser eliminada per evaporació en aire calent a 105°C. És un component no combustible del carbó que augmenta el seu pes mort, consumeix calor i debilita l'estructura física. Va des de >75% a la torba fins a <10% a l'antracita.

Volàtils. Gasos adsorbits durant la formació del carbó, essencialment CO₂ i metà (CH₄). El seu contingut tendeix a disminuir amb el grau d'evolució del carbó. S'alliberen quan el carbó és destil·la a temperatures d'uns 1.000°C en absència d'aire.

Cendres. Matèria mineral inorgànica sòlida que queda com a residu de la combustió. Alguns carbons contenen sofre (S) o compostos de nitrogen que, en la combustió, donen lloc a la formació d'àcids corrosius causants de la pluja àcida.

Poder calorífic (PC). Energia que proporciona la combustió del carbó en sec (sense humitat). El poder calorífic de les matèries volàtils sol ser inferior al del carbó. El carbó de coc obtingut per destil·lació d'un carbó bituminós baix en cendres i sofre en un forn sense oxigen a uns 1.000°C, on s'eliminen les matèries volàtils, té un poder calorífic superior al del carbó que l'origina (29 MJ/kg), i s'utilitza en els alts forns per produir el ferro.

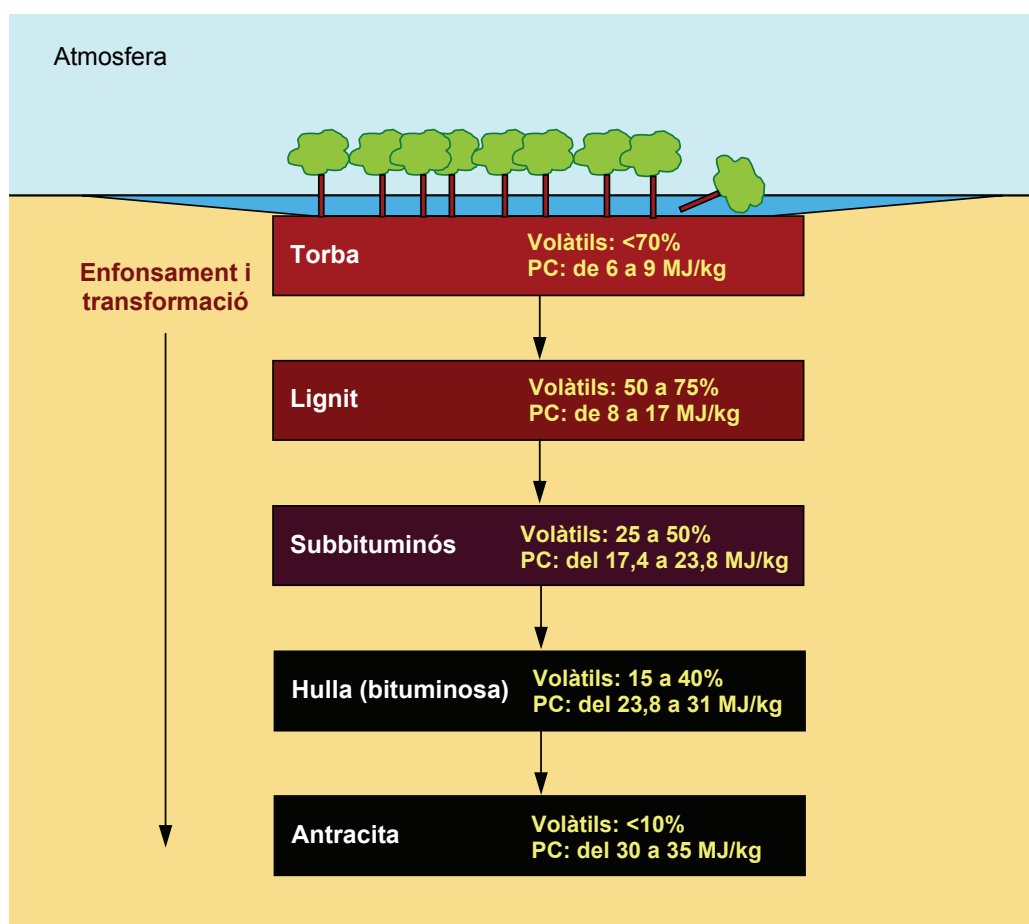


Figura 7.2. Esquema del procés de formació dels carbons. A mesura que la massa vegetal s'enfonsa, va transformant-se progressivament en *torba*, *lignit*, *carbó subbituminós*, *hulla (bituminosa)* i *antracita*. Perden humitat i matèries volàtils i guanyen en contingut de carboni i poder calorífic. **Fonts:** diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Torba

Sediment d'estructura fibrosa, de color marró o negre, que resulta de la compactació i transformació de masses vegetals acumulades en un medi anaeròbic i saturat d'aigua. És el primer pas geològic en la formació dels carbons. D'aspecte esponjós, encara amb cel·lulosa lliure i on es poden reconèixer restes vegetals, la torba té un poder calorífic baix i graus d'humitat molt elevats. Assecada, s'utilitza com a combustible.

La torba s'ha anat formant contínuament des que hi ha plantes superiors, ara fa prop de 400 milions d'anys. Avui dia cobreix uns 3 milions de km² (sis vegades la superfície d'Espanya, un 2% de la superfície terrestre emergida) i constitueix un gran dipòsit de carboni.

Lignit

És el primer carbó pròpiament dit, però també el de més baixa qualitat. Pot tenir una consistència engrunadissa i, en alguns casos, reflecteix vestigis de la matèria vegetal, però ja no conté cel·lulosa lliure. El seu color pot ser marró (sovint se'l coneix com a carbó bru) o negre, té un elevat contingut d'humitat (si bé menor que la torba) i alts continguts de volàtils. S'utilitza gairebé exclusivament com a combustible per a la generació de vapor i electricitat, si bé sovint té continguts significatius de sofre que són la causa de la pluja àcida.

Carbó subbituminós

Categoria de carbó que habitualment no apareix en les classificacions europees de propietats intermèdies entre el lignit i el carbó bituminós, de color marró fosc a negre suau i consistència engrunadissa (es pot considerar com a lignit de millor qualitat). S'utilitza principalment com a combustible per a la generació de vapor i d'electricitat.

Hulla (carbó bituminós)

Carbó dens, dur, trencadís i estratificat, de color negre i brillantor mat, amb un contingut important d'hidrocarburs en forma de betum, d'humitat relativament baixa i poder calorífic elevat. És el carbó més abundant i més consumit en el món i s'utilitza principalment en la generació elèctrica, en processos industrials de combustió i en la fabricació de coc.

El carbó de coc s'obté per destil·lació de l'hulla a temperatura molt alta i en absència d'aire, per eliminar la major part de les matèries volàtils (procés molt contaminant). Els gasos obtinguts solen ser útils industrialment i el sòlid que en resulta (el carbó de coc, lleuger, porós i d'elevat poder calorífic), s'usa en la fabricació del ferro i de l'acer (baixes impureses) i és molt apreciat com a combustible domèstic (pocs fums i poca contaminació).

Antracita

És el carbó format a més profunditat, més evolucionat i de més alta qualitat. És una matèria dura, negra i brillant, però també difícil d'extreure, amb el contingut més elevat de carboni lliure i els continguts més baixos de matèries volàtils i humitat. El seu poder calorífic és dels més elevats, malgrat que és difícil d'iniciar-ne la combustió.

És relativament poc abundant a la natura i s'utilitza sobretot en processos industrials i en les calefaccions residencials.

Taula 7.1. Tipus i característiques dels carbons

Carbons	Densitat Mg/M ³	Carboni (C) (sec) % ¹	Humitat %	Volàtils (sec) %	Cendres (sec) %	Poder calorífic (sec) MJ/kg
Torba	(seca) <1	40 a 60	>50	>75	50	6 a 9
Lignit	1,1 a 1,3	60 a 75	25 a 50	50 a 75	30 a 50	9 a 17,4
Subbituminós	1,2 a 1,4	70 a 80	15 a 25	25 a 50	20 a 30	17,4 a 23,8
Hulla (bituminós)	1,2 a 1,5	75 a 90	5 a 15	15 a 40	10 a 20	23,8 a 31
Antracita	1,4 a 1,8	>90	1 a 6	<10	0 a 10	30 a 35

¹ El contingut de carboni en els carbons es reparteix entre el carboni lliure i el carboni que forma part d'hidrocarburs. Tan sols a l'antracita, el %C s'acosta al carboni lliure.

Fonts: diverses. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

7.2. Obtenció cada cop més difícil

Se solen denominar *combustibles fòssils convencionals* aquells que s'obtenen directament de la natura en condicions d'extracció relativament fàcils en zones relativament accessibles i que requereixen processos relativament poc consumidors d'energia per a la seva adequació al consum. Són: a) els *petrolis líquids* obtinguts de pous a terra ferma i de pous en aigües poc profundes; b) el *gas natural* obtingut de pous no excessivament profunds en dipòsits concentrats i prop del consum; c) els *carbons* de qualitat obtinguts de mines a cel obert o subterrànies fàcilment accessibles.

Tanmateix, l'escorça terrestre emmagatzema una quantitat molt superior de matèria orgànica com a resultat de múltiples cicles biològics de plantes i animals, l'enterrament de la matèria orgànica morta junt amb sediments, el seu enfonsament i la seva transformació en diferents graus durant centenars de milions d'anys. Com ja s'ha dit (secció 7.1), els sediments contenen uns 10.000.000 Pg de C, la major part en forma de querogen poc concentrat, o de matèria orgànica transformada però molt difusa en roques o en situacions d'accessibilitat molt difícils que no en permeten l'explotació.

La transformació d'una ínfima part d'aquesta matèria orgànica en combustibles fòssils aptes per a les nostres necessitats energètiques (anomenats *recursos*, que contenen uns 6.000 Pg de C) és fruit de circumstàncies molt particulars que rarament es donen i constitueixen un regal de la natura. I, encara, tan sols una fracció d'aquests combustibles fòssils es troben en concentracions i amb l'accessibilitat adequades per a la seva explotació (anomenats *reserves*: 1.316,7 Gb de petroli, 6.189,4 Tcf de gas natural i 826.002 milions de tones de carbó; vegeu la taula 3.1), que contenen 675,55 Pg de C, poc més de 1/10 dels recursos.

El fet que hi hagi una gran quantitat de matèria orgànica esparsa per l'escorça terrestre condueix sovint al miratge de confondre-la amb reserves. Certament, amb nous desenvolupaments tecnològics es podran explotar i transformar alguns recursos complementaris, com són els *petrolis no convencionals* i el *gas natural no convencional*. Però, com veurem a continuació, tan sols se'n podrà obtenir una part molt petita (en gran part avui dia ja comptabilitzada com a *reserves*) i a un ritme molt lent, que no podrà compensar el declivi dels combustibles fòssils convencionals.

Recursos no convencionals

A fi d'evitar o d'endarrerir els efectes del declivi i l'exhauriment dels *combustibles fòssils convencionals* (fàcils de posar en valor), les companyies petrolieres, molts governs i una part important de la ciutadania dels països desenvolupats tenen les esperances posades en els *recursos fòssils no convencionals*, que comprenen diverses vies per obtenir nous combustibles líquids i gasosos de dificultats d'extracció i/o transformació creixents.

Aquestes noves estratègies són:

- Explotar jaciments de petroli i gas convencional en aigües profundes (a més de 500 metres) i en indrets d'accés difícil (per exemple, el mar Àrtic).
- Extreure i transformar petrolis degradats (sorres bituminoses, petrolis extrapesants) i petrolis encara no formats (el querogen de les pissarres bituminoses).
- Obtenir diversos tipus de gas no convencional d'accés difícil (gas compacte, o *tight gas*; gas de carbó, o *coalbed gas*, i gas de pissarra, o *shale gas*)
- Intentar aprofitar energèticament els *hidrats de metà* (o *clatrats de metà*) dels talussos continentals i del *permagel* (en anglès, *permafrost*).
- Convertir el gas natural i el carbó en combustibles líquids aptes per al transport (GTL, *gas-to-liquid*, i CTL, *coal-to-liquid*) o convertir biomassa en combustibles (BTL, *biomass-to-liquid*, a partir de cultius terrestres, d'algues marines o de la biomassa dels boscos).

Totes aquestes estratègies (excepte algunes formes de biocombustibles de què es parlarà en la secció 9.7) no fan sinó prolongar l'era dels combustibles fòssils amb recursos cada cop més costosos i difícils d'obtenir, l'explotació dels quals es veurà sotmesa a limitacions importants:

- 1) Les taxes de retorn energètic (TRE, o EROI) per a la seva obtenció tendiran a decreixer fins a valors propers o inferiors a 1. Aleshores, la seva obtenció requerirà tanta o més energia de la que proporciona el combustible, i la seva explotació deixarà de tenir sentit.
- 2) El temps i els costos (energètics i econòmics) de les inversions necessàries seran progressivament creixents i menys rendibles, i caldrà avaluar-ne l'eficiència. En tot cas, difícilment arribaran a temps per pal·liar el declivi dels combustibles convencionals.
- 3) Per a un mateix rendiment energètic, l'ús de combustibles no convencionals incrementarà els impactes ambientals i les emissions de CO₂. Cada cop l'impacte ambiental és més gran per obtenir la mateixa energia.
- 4) La conversió de gas natural i de carbó a combustibles líquids precipitarà l'exhauriment d'aquestes reserves abans del que estava previst a causa dels baixos rendiments energètics de les transformacions GTL i, sobretot, CTL.
- 5) Finalment, en el cas hipotètic de descobrir-se nous grans jaciments explotables de petroli o de gas natural, l'alegria quedaria contrarestada per l'increment difícilment assumible de l'impacte ambiental que tindrien la seva obtenció i ús.

En efecte, l'energia basada en el carboni i el canvi climàtic formen part d'una mateixa equació. Si volem resoldre el canvi climàtic, caldrà aprendre a renunciar a explotar els combustibles fòssils (com en la complexa batalla que l'Equador està lliurant per preservar la selva irrepensible del parc natural de Yasuni i renunciar a explotar-ne 0,9 Gb de petroli del seu subsòl, menys d'1/1000 de les reserves mundials).

Des d'aquest punt de vista, els descobriments de nous jaciments (Brasil, Gabon, etc.) són una mala notícia. I l'estratègia de resoldre el declivi tot explotant sistemàticament els *combustibles no convencionals* amb rendiments energètics decreixents i emissions cada cop més elevades ens condueix a un camí totalment equivocat que farà difícilment viable la civilització humana en un futur proper.

7.3. Petrolis no convencionals

En aquesta secció, s'analitzen els combustibles líquids que no procedeixen dels jaciments convencionals de petroli o de gas. Corresponen a fonts primàries que fins ara han estat d'accés difícil o d'extracció i valorització complexa; concretament:

- Petrolis de difícil accés (aigües profundes, *deepwater oil*, Àrtic, etc.)
- Petrolis extrapesants (*extra-heavy oil*)
- Sorres bituminoses (o sorres de quitrà, *oil sand* o *tar sand*)
- Pissarres bituminoses (o esquistos bituminosos, *oil shale*)

A la secció 7.4 s'analitzen els gasos no convencionals i a la secció 7.5, els combustibles líquids destinats al transport obtinguts per transformació d'altres combustibles fòssils primaris (fonamentalment de carbó, CTL, i de gas natural, GTL). Finalment, al capítol 9 sobre les energies renovables, s'analitzaran els combustibles derivats de la biomassa, o biocombustibles.

Dels petrolis convencionals als no convencionals

El *petroli convencional* és aquell que es troba en zones accessibles a terra ferma o prop de la costa, a menys de 500 metres de profunditat i que té les qualitats que permeten processar-los en les refineries convencionals. La producció els darrers anys (uns 66 Mb/dia,

o milions de barrils per dia, el 78% dels 85 Mb/dia de producció global de líquids) ha arribat al seu zenit i comença a mostrar símptomes de declivi. Cal afegir-hi 7,7 Mb/dia (el 9%), resultat de liquar els gasos combustibles que acompanyen el petroli o el gas natural (concretament, el butà i el propà).

Els *petrolis no convencionals* són el resultat d'explotar jaciments menys accessibles i rendibles que els convencionals. Avui dia tenen una producció conjunta d'11,3 Mb/dia (el 13% de la producció global) i es reparteixen de la manera següent: 3,9 Mb/dia (el 4,5%) són petrolis procedents de les sorres bituminoses del Canadà, dels petrolis pesants i extrapesants de Veneçuela i altres països, i del petroli de pissarres bituminoses; 6,5 Mb/dia (el 7,6%) són petrolis extrets d'aigües profundes de més de 500 metres (golf de Mèxic, golf de Guinea i, en el futur, el camp petrolífer de Santos, davant de les costes del Brasil), i 0,9 Mb/dia (l'1%) corresponen a la zona àrtica [Pri-2008].

Etales dels jaciments convencionals

Les etapes successives d'explotació dels jaciments de petroli són:

Recuperació primària. En una primera fase, el petroli emergeix del pou per causes naturals (pressió del gas associat o dissolt, pressió hidrostàtica de l'aigua o drenatge en terrenys propicis); la recuperació primària, que requereix tan sols un sistema de vàlvules per gestionar-la, permet obtenir entre un 12 i un 15% (factor de recuperació) del petroli inicial del jaciment, percentatge que és més elevat en els petrolis lleugers i més baix en els petrolis pesants. Els costos energètics i econòmics de l'obtenció són molt baixos.

Recuperació secundària. A partir d'un determinat grau d'explotació, la pressió disminueix i el petroli ja no flueix a la superfície; aleshores, cal impulsar-lo amb mitjans com la inundació amb aigua (procediment força econòmic) o la injecció de gasos que desplacin el petroli; amb aquests mètodes, més costosos que els de recuperació primària, s'aconsegueixen factors de recuperació addicionals d'entre un 15 i un 20% que donen lloc a factors de recuperació globals del 25 al 35% del petroli inicial del jaciment.

Recuperació millorada (EOR, *enhanced oil recovery*). En altres casos, a causa de la compactat de les roques o de la viscositat elevada dels petrolis (pesants), convé fluidificar el cru per facilitar-ne la circulació vers la superfície. Generalment, això s'aconsegueix per mitjà de diversos procediments: injectant vapor d'aigua en el pou, cremant part del combustible *in situ*, o utilitzant productes químics (detergents) per disminuir la viscositat. Amb tècniques de recuperació millorada EOR, explotacions que ja no eren rendibles sovint tornen a produir, això sí, amb els costos del procés i els preus del combustible més elevats. Aquests mètodes permeten augmentar el factor de recuperació del jaciment d'un 5 a un 15% per situar-lo entre el 40 i el 50%, tot i que els costos i les emissions augmenten sensiblement.

Jaciments marins en aigües profundes

Des de fa temps, es perforen pous de petroli i de gas en el fons marí, els quals cada cop adquireixen més importància. L'informe [IEA-ETSAP-P01-2010] manifesta que el potencial dels camps de petroli i de gas en aigües profundes se situa entre 150 i 200 Gb, una part important ja comptabilitzada com a reserves.

Els primers pous marins es van perforar prop de la costa i en aigües poc profundes amb torres ancorades en el fons del mar (per exemple, els jaciments de Maracaibo, Veneçuela). A mesura que s'exhaureixen els jaciments a terra ferma, avancen les explotacions en el mar a distàncies creixents de la costa i a profunditats més grans (fins a uns 3.000 metres). L'informe esmentat de l'ETSAP estima que el 70% dels recursos en aigües profundes es localitzen en alta mar, entre 2.000 i 4.000 metres de profunditats.

El desenvolupament de jaciments en aigües profundes requereix recursos molt elevats i tan sols són explotables els que tenen les condicions més favorables. S'ha passat de les plataformes fixades al fons (fins a un màxim d'uns 500 metres de profunditat) a les plataformes flotants i, avui dia, s'estan desenvolupant tecnologies de separació i de transport a la costa en instal·lacions situades en el fons marí.

El paradigma d'aquesta tecnologia límit en aigües molt profundes és el jaciment gegant de Tupí (de 5 a 8 Gb), descobert recentment (2006) a 250 km de la costa del Brasil i a una profunditat de més de 2.000 metres. A partir del fons marí, s'ha perforat una capa de sal inestable de 2.000 metres i unes capes de roques més profundes de 2.000 metres més (en total, més de 6.000 metres). Està previst iniciar-ne l'exploració comercial el 2013. La profunditat fa que la plataforma no pugui ser ancorada al fons marí i estigui sotmesa a vents i corrents, fet que exigeix despeses constants d'energia per mantenir la verticalitat de la perforació. A més, cal elevar el petroli fins a la superfície per una sèrie de tubs sotmesos a condicions extremes de pressió i temperatura, als efectes corrosius i a inestabilitats (capa de sal, moviments de la plataforma) que poden comportar una quantitat important d'incidències durant l'explotació. Es preveu que la producció a règim sigui de 0,5 Mb/dia (1/170 de la producció mundial). El jaciment de Carioca descobert recentment (2008) també a la conca submarina de Santos (Brasil), té les mateixes característiques que el de Tupí.

D'altra banda, l'accident recent (2010) de la plataforma petrolífera semisumergible, *Deepwater Horizon* (llogada per BP a Transocean) quan perforava un pou a uns 1.500 metres de profunditat al golf de Mèxic indica els riscos i els límits d'aquesta tecnologia, de la mateixa manera que l'accident de Txernòbil ho va fer el 1986 amb l'energia nuclear. En efecte, ja al final del procés de perforació, el 20 d'abril de 2010, es va produir un escapament de gas i una explosió a la torre, seguida d'un incendi de la instal·lació. Malgrat que diversos vaixells van acudir a apagar el foc, la plataforma es va enfonsar dos dies més tard amb un balanç d'onze morts. L'escapament que es va derivar de l'accident ha vessat petroli al fons del mar durant 106 dies fins que el 5 d'agost BP anunciava que l'havia segellat. En la pugna que va seguir l'accident, Transocean va deixar entendre que BP havia adoptat una sèrie de decisions per estalviar de costos que havien augmentat de risc d'escapament.



Figura 7.3. Incendi de la plataforma petrolífera *Deepwater Horizon* el 20 d'abril de 2010 al golf de Mèxic. **Font:** diari *El País*

Segons experts de la Universitat de Columbia [Cro-2010], aquest accident ha vessat al mar uns 5,2 milions de barrils, dels quals s'han pogut recuperar 0,8. El pitjor naufragi d'un petrolier, l'Amoco Cadiz a les costes de França el 1978, va vessar menys de la tercera part de

petroli i el major desastre d'aquestes característiques, el vessament intencionat de l'Iraq durant la guerra del golf Pèrsic de 1991, en va abocar el doble. Les darreres informacions indiquen que el petroli del golf de Mèxic, a més de tenir un fort impacte visible a les costes del sud dels Estats Units s'està dipositant al fons del mar en una extensa zona on la biota marina quedarà fortament afectada.

Hidrocarburs a l'Àrtic

En un estudi publicat el 2008 [USGS-2008], la United States Geological Survey (USGS) estimava que, per damunt del cercle Àrtic, hi ha uns recursos de 90 Gb (bilions de barrils) de petroli i de 1.670 Tcf (trilions de peus cúbics) de gas natural, la meitat dels quals encara per descobrir i el 85% situats a alta mar.

El mateix informe de la USGS indica que aquestes estimacions s'han fet independentment de considerar els factors operatius, energètics o econòmics que en poden limitar l'explotació, com ara els efectes dels gels marins permanents, la profunditat del mar a la zona dels jaciments o la necessitat de liquar el gas natural per al seu transport.

El conjunt, aquestes estimacions de recursos (no sempre *reserves* explotables) equivalen a 24,7 TW_tA d'energia primària, aproximadament un 5% de les reserves mundials sumades de petroli i gas natural (474 TW_tA, secció 3.1). Si totes aquestes expectatives es fessin realitat, cobririen tan sols el consum mundial de 2,5 anys de petroli i gas natural al ritme actual. Tant les incerteses sobre el seu volum com les dificultats i els baixos rendiments per extreure'ls i posar-los en valor fan que els recursos d'hidrocarburs de l'Àrtic (no tan abundants com es diu sovint) entrin de ple entre els recursos no convencionals.

Explotació dels petrolis no convencionals

Segons la gravetat API (mesura de la densitat d'American Petroleum Institute), els petrolis es classifiquen en *petrolis lleugers* (> 31,1 °API i densitat inferior a 870 kg/m³), *petrolis mitjans* (de 22,3 a 31,1 °API i densitats entre 870 i 920 kg/m³), *petrolis pesants* (de 22,3 i 10,0 °API i densitats entre 920 i 1.000 kg/m³) i *petrolis extrapesants* (inferiors a 10,0 °API i densitats superiors a 1.000 kg/m³).

Els petrolis pesants i extrapesants resulten de la degradació del petroli lleuger quan, en la seva lenta ascensió, cap trampa els reté per formar un jaciment convencional i, exposats als bacteris, l'aigua o l'aire prop de la superfície, en perden les fraccions lleugeres i en resten les fraccions més pesants (el betum). La consistència és molt densa i flueixen amb dificultat, o no flueixen, de manera que la seva extracció, el refinament i el transport són molt més difícils i costosos energèticament que en els petrolis lleugers i mitjans.



Figura 7.4. Esquerra: petroli extrapesant de la Faixa de l'Orinoco (Veneçuela). Dreta: sorres bituminoses d'Alberta (Canadà). **Font:** WWF, *Unconventional Oil, Scrapping the bottom of the barrel?*

Les sorres bituminoses són anàlogues als petrolis pesants i extrapesants, amb la particularitat que el betum s'ha barrejat amb sorra, aigua i altres components i, per tant, no flueixen gens.

Petrolis extrapesants (*extra heavy oil*)

Es coneixen 162 jaciments en 21 països, 13 dels quals són al mar [WEC-2010]. Tanmateix, la Faixa de l'Orinoco (Veneçuela) conté quasi tots els recursos mundials (2.111 Gb, bilions de barrils, d'un total de 2.150 Gb), com també pràcticament la totalitat de les reserves reconegudes. La producció acumulada mundial és de 17,1 Gb (de la qual 14,8 Gb a la Faixa de l'Orinoco). L'empresa veneçolana de petrolis (PDVA) estima unes reserves (extraïbles) de petrolis extrapesants de 235 Gb, de les quals l'informe [WEC-2010] tan sols n'accepta 57,9 Gb (d'un total de 59,1 Gb que hi ha al món) (vegeu la taula 7.2).

Els petrolis extrapesants i les sorres bituminoses són hidrocarburs modificats per bacteris i l'erosió que tan sols difereixen en el grau de degradació que han experimentat a partir del petroli original. Els petrolis extrapesants de Veneçuela estan menys degradats que les sorres bituminoses del Canadà i es troben a més temperatura (> 50°C, en comparació amb el fred del nord del Canadà), la qual cosa en facilita l'extracció; però encara són massa pesants per ser transportats per oleoducte o processats en les refineries convencionals.

Malgrat aquesta circumstància favorable, el fet de disposar de petroli lleuger abundant i la dificultat d'accedir a les tecnologies i als capitals del primer món no han estimulat Veneçuela a desenvolupar aquests recursos com ho ha fet el Canadà. En la dècada de 1980 l'empresa petrolera estatal veneçolana, PDVA, va desenvolupar l'emulsió denominada *orimulsió* (70% de petrolis extrapesants, 30% d'aigua), que permet el transport a través de gasoductes. Aquest producte, que crema en calderes com a substitut del carbó i els olis pesants, no té el valor dels derivats del petroli i, a més, l'alt contingut de sofre i les elevades emissions de partícules el fan difícilment compatible amb les noves normatives ambientals.

Avui dia, els petrolis extrapesants de Veneçuela s'extreuen en fred per mitjà de pous multilaterals horitzontals en combinació amb bombes sumergides, però se n'obtenen factors de recuperació molt baixos (del 8 al 12%). Les plantes de tractament del nord-est de Veneçuela recuperen els diluents per reutilitzar-los i n'eliminen el sofre i el nitrogen i, amb un rendiment d'entre el 87 i el 95%, transformen els petrolis pesants en un petroli sintètic.

Recentment, amb el concurs de PDVA i d'empreses internacionals, el Govern veneçolà ha impulsat un pla de desenvolupament de la Faixa de l'Orinoco. La superfície d'explotació és d'11.593 km² (1/3 de Catalunya), dividida en quatre grans àrees (Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo), amb una producció potencial d'1,2 Mb/dia (milions de barrils per dia) i unes reserves de 25,5 Gb, segons fonts oficials veneçolanes.

Sorres bituminoses (*sand oil*)

Consisteixen en petroli degradat, atrapat en una barreja complexa de sorra, aigua i argila. El betum, hidrocarbur ric en carboni i extremament viscos, es troba en la proporció d'entre 1 i un 20% en les sorres bituminoses.

Se n'han comptabilitzat 598 dipòsits en 23 països [WEC-2010] i no hi ha constància de jaciments en el mar. Tanmateix, les sorres bituminoses es concentren a Atabasca (Canadà) on hi ha 2.434 Gb dels 3.228 Gb del món. D'aquests recursos, 243,2 Gb es consideren reserves (un 7,5%), la major de les quals són al Canadà (170,4 Gb, ja comptabilitzades com a reserves en aquest país).

A part del Canadà, hi ha dipòsits significatius de sorres bituminoses a Kazakhstan (420,7 Gb) i a Rússia (346,8 Gb), amb unes reserves no explotades de 42,0 i 28,4 Gb, respectivament. Els recursos dels Estats Units (53,5 Gb), Nigèria (38,3 Gb) i de Madagascar (16 Gb) pràcticament no es tradueixen en reserves (taula 7.2).

Aquest recurs només s'explota a Alberta, Canadà (1,30 Mb/dia, milions de barrils per dia), on les sorres, amb aproximadament un 10% de betum, són cobertes per 140.000 km² de boscos boreals a les regions d'Athabasca, Peace River i Cold Lake.

Fins a 80 metres de profunditat, les sorres s'extreuen mitjançant tècniques de mineria a cel obert (algunes de les d'Athabasca es veuen des de l'espai). Les sorres són transportades per enormes camions a una planta on el betum se separa de la sorra per mitjà d'aigua calenta i productes químics fins a una proporció del 90%. En la mineria a cel obert cal manipular 2 tones de mineral per produir un barril de petroli (159 litres).

En la mineria *in situ* (sense extracció física de mineral), s'injecta vapor per facilitar que el betum flueixi i així poder-lo extreure. Les tècnica *in situ* més utilitzada a Canadà és el Simulador del cicle de vapor (CSS, *Cycle Steam Simulator*), on el vapor s'injecta per un pou vertical i la mescla de betum s'extreu pel mateix pou de forma cíclica; s'aconsegueixen així factors de recuperació entre el 25 i el 30%. Una segona tècnica *in situ* molt prometedora és el drenatge de vapor assistit per gravetat (SAGD, *Steam Assisted Gravity Drainage*) on el vapor s'injecta a través de pous horitzontals (comencen verticals però, a una determinada profunditat, es corben fins a la direcció horitzontal) i la mescla de betum és recollida per un altre pou horitzontal situat més avall; s'aplica a jaciments més gruixuts, requereix menys energia i se n'obtenen factors de recuperació de fins al 50%.

Tant en un cas com en l'altre, el betum obtingut es transforma en petroli sintètic a través d'un procés d'eliminació de carboni (coccio) o d'addició d'hidrogen (*hidrocracking*) i finalment és destil·lat en productes derivats.

Pissarres bituminoses (*oil shale*)

Són roques sedimentàries que contenen una proporció elevada de matèria orgànica sòlida, en forma de querogen (matèria orgànica poc transformada), de la qual es pot extreure un combustible líquid (o petroli sintètic) per mitjà d'un procés de piròlisi a uns 500°C.

Per sota d'un rendiment de 100 a 125 litres per tona, no és viable convertir la pissarra bituminosa en combustible líquid i, en tot cas, els processos requereixen un gran consum d'energia i emeten grans quantitats de gasos d'efecte hivernacle. També s'utilitza directament com a combustible de baix poder calorífic per a la generació elèctrica, la fabricació de ciment o altres usos industrials. En aquest cas, la rendibilitat és millor.

Habitualment, la pissarra bituminosa s'extreu per procediments de mineria de superfície, però també s'estan experimentant formes de piròlisi *in situ*, que consisteixen a escalfar la roca sota terra per mitjà de diferents procediments (entre ells, l'elèctric) i després bombejar el líquid resultant a la superfície. Aquest procés també genera grans impactes ambientals (filtracions del fluid generat, consums d'energia i emissions).

S'estima que els recursos de pissarra bituminosa, en cas de ser viables, tenen un potencial per proporcionar 4.876 Gb (milers de milions de barrils) de combustible líquid (prop de 4 vegades les reserves de petroli convencional). Els Estats Units concentren més de les 3/4 parts d'aquest recurs a escala mundial, però mai no l'han explotat comercialment (fora d'experiments pilot per a usos militars). Altres països sí que n'han fet ús: entre d'altres, Escòcia des del segle XIX fins al 1940, la Xina, a Fushun, des de 1930 fins recentment (producció de petroli), i, sobretot, Estònia, que ha liderat l'explotació de pissarres bituminoses durant les darreres dècades, que l'ha usat directament com a combustible per a produir electricitat.

Consum energètic i emissions de petroli no convencionals

A causa dels processos d'obtenció i processament costosos i complexos, el consum d'energia i les emissions de gasos d'efecte hivernacle dels petroli no convencionals són considerablement superiors als dels petroli convencionals. A més, tots ells consumeixen molta aigua: en les sorres bituminoses, el consum arriba als 2 o 3 barrils d'aigua per barril de betum.

Amb relació al consum energètic, l'obtenció de petroli sintètic a partir dels petrolis extrapesants (la Faixa de l'Orinoco) requereix fins a un 20 o un 25% del contingut d'energia que pot proporcionar el combustible (taxa de retorn energètic, TRE o EROI, entre 4 i 5). Les sorres bituminoses encara requereixen més energia, fins a un 30% de l'energia del combustible resultant (taxes de retorn energètic, TRE, de 3 a 3,5, ja en el límit de la viabilitat energètica). En les pissarres bituminoses, depèn de la transformació que se'n faci: usats directament com a combustibles, s'assimilen a un lignit, però la seva transformació en combustible líquid per mitjà de la piròlisi presenta greus incògnites de viabilitat que fins ara n'han limitat la producció a valors residuals. Això fa pensar que la taxa de retorn energètic, TRE, no és gaire superior a 1 (alguns autors l'estimen inferior a 1).

Quant a les emissions de gasos d'efecte hivernacle, hi ha disparitats molt grans entre les diferents estimacions. A les emissions en la combustió del petroli obtingut de 74 gCO₂/MJ (procés TTW), segons l'informe ben documentat de l'organització NDRC [Mui-2010], cal sumar un increment d'emissions en l'obtenció (procés WTT) de 32 gCO₂/MJ per a les sorres bituminoses explotades amb mina a cel obert, de 34 a 42 gCO₂/MJ per a l'obtenció *in situ*, i de 80 a 102 gCO₂/MJ per a les pissarres bituminoses (valors que corroborarien la inviabilitat d'explotar-les). No cita explícitament els petrolis extrapesants, però s'haurien de situar entre els valors inferiors de les sorres bituminoses.

Recursos, reserves i producció

La taula 7.2 resumeix aquests aspectes:

Taula 7.2. Recursos, reserves i produccions de combustibles líquids no convencionals ¹								
Tipus	Recursos		Reserves			PA ²	Producció	
	Gb	%	Gb	%	TW _{tA}	Gb	Mb/dia	TW _t
Petroli extrapesant	2.150	100,00	59,1	100,00	11,61	17,09	0,67	0,048
Veneçuela	2.111	98,19	58,0	98,14	11,39	14,78	0,58	0,042
Regne Unit	12	0,56	0,08	0,14	0,02	1,01		
Xina	9	0,42	0,75	1,27	0,15	0,14		
Azerbaidjan	9	0,42	0,125	0,21	0,02	0,76		
Sorres bituminoses	3.329	100,00	243,2	100,00	47,76	6,46	1,30	0,093
Canadà	2.434	73,12	170,4	70,07	33,46	6,40	1,30	0,093
Kazakhstan	421	12,65	42,4	17,43	8,33	0		
Rússia	347	10,42	28,4	11,68	5,58	0,014		
EUA	53	1,59	0	0,00	0,00	0,024		
Nigèria	38	1,14	0,6	0,25	0,12	0		
Pissarres bituminoses	4.876	100,00	?		?	0,005	0,0177	0,0026
EUA	3.707	76,03					0	0
Xina	354	7,26					0,0076	
Rússia	248	5,09					0	0
R.D. Congo	100	2,05					0	0
Brasil	82	1,68					0,0038	
Itàlia	73	1,50					0	0
Jordània	34	0,70					0	0
Austràlia	32	0,66					0	0
Letònia	16	0,33					0,0063	0
Petrolis no convencio. % convencionals	10.265		302,3 27,9		59,37	23,56 2,36	1,99 2,27	0,142
Petrolis convencionals			1.084,0		199,67	1.000,0	83,12	5,590

¹ Fora de les mesures en TW_t i TW_{tA} (avaluades per l'autor), les dades procedeixen d'IEA-ESTAP-P02

² Les xifres corresponen a la producció de gas natural no convencional dels EUA, la més significativa del món, que representa de l'ordre del 40% del gas natural produït en aquell país.

Font: Meyer, R.F. USGS; Dyni, J.R. USGS; IEA-ETSAP-P02-2010 ; **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 7.2:

1. El volum dels recursos de cada un dels petrolis no convencionals supera amb escreix (duplica, triplica o quadruplica) les reserves de petroli convencional. Això pot fer pensar que estem molt lluny de la fi dels combustibles fòssils.
2. Tanmateix, quan es passa a les reserves, les xifres anteriors es redueixen dràsticament. Les reserves de petrolis extrapesants són tan sols un 2,7% dels recursos; les reserves de sorres bituminoses són el 7,3% de les reserves, i, amb relació a les pissarres bituminoses, ni tan sols es consignen reserves.
3. Es comprova que en base a aquests recursos no convencionals molt més abundants que el petroli (10.265 Gb), la producció actual és de tan sols 2 Mb/dia, quan la producció de la resta de combustibles líquids és de 83 Mb/dia, amb unes reserves de poc més de 1.300 Gb. La producció acumulada corrobora aquesta baixa explotació.
4. Quant a les pissarres bituminoses, la seva explotació com a font primària de combustibles líquids sembla difícilment viable en el present i en el futur. La figura 7.5 mostra l'evolució de la feble explotació els darrers anys, amb un pic de producció global l'any 1980. A més, l'ús majoritari ha estat en la combustió directa, no per a la seva transformació en combustibles líquids.

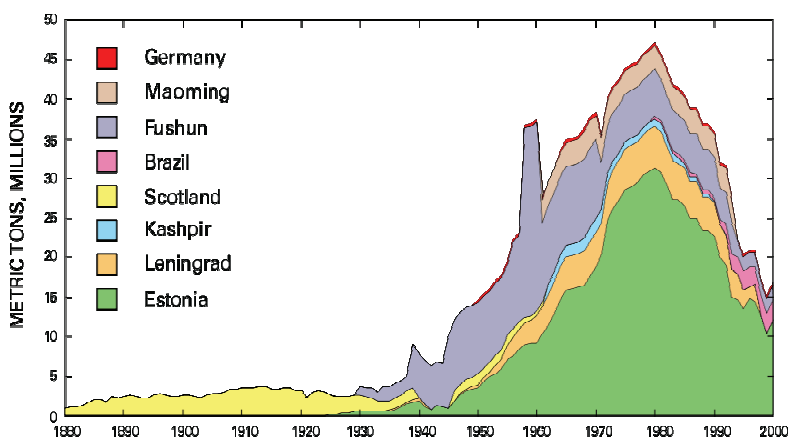


Figura 7.5. Evolució de la producció mundial de pissarres bituminoses amb el zenit de producció el 1980, amb de 46 milions de tones (prop de 4 dies de producció de petroli convencional). **Font:** [Dyn-2006], US Geological Survey

Els petrolis extrapesants i les sorres bituminoses tenen possibilitats de ser explotats en el futur, encara que això sigui una pèssima notícia des del punt de vista ambiental. En efecte, s'aprofita menys l'energia (s'hi enterren altres recursos, com el gas natural o part del petroli obtingut) a un cost ambiental notablement més intens en emissions de CO₂.

Tanmateix, les mateixes grans agències (IEA-OCDE, EIA-govEUA), en les seves projeccions, no preveuen grans augments en la producció de combustibles líquids no convencionals. En concret, les projeccions de l'EIA-govEUA per al 2030 sobre l'evolució d'aquests combustibles líquids no convencionals (*International Energy Outlook 2009*, pàg 22) són molt moderades. Preveu que la producció de sorres bituminoses passi d'1,9 Mb/d (milions de barrils per dia) el 2010 a 4,2 Mb/d el 2030, que els petrolis extrapesants augmentin dels actuals 0,7 Mb/d a 1,2 Mb/d el 2030 i que les pissarres bituminoses, sense una producció perceptible avui dia, arribin a 0,2 Mb/d el 2030. En total, 6,6 Mb/d el 2030, tenint en compte que la producció global de combustibles líquids avui dia és d'uns 85 Mb/d.

A més, per aconseguir aquestes produccions, calen unes fortes inversions en instal·lacions i equipaments, i uns temps llargs d'implantació que cal preveure.

7.4. Gas natural no convencional

Hi ha diverses fonts de gas natural com a recurs d'energia primària que són difícilment explotables perquè són de difícil accés. Aquestes es poden dividir en dos grups:

- a) *Jaciments de gas natural allunyats del consum*, difícilment explotables a causa de la incidència de la molt baixa densitat energètica en el transport. La canalització a través de gasoductes a llarga distància (diversos milers de quilòmetres) o el transport com a gas natural liquat (GNL) en poden constituir alternatives.
- b) *Jaciments de gas natural no convencional*, fonts poc concentrades d'aquest recurs o de difícil accés en el si de l'escorça terrestre que requereixen mètodes d'extracció especials. Els principals tipus són: *gas atrapat (tight gas)*; *gas pissarra (shale gas)*; *gas de carbó (coalbed methane)*, i *hidrats de metà (gas hydrates)*.

Les alternatives al transport de gas natural dels jaciments convencionals allunyats del consum no augmenten les reserves comptabilitzades d'aquest recurs, però sí que en fan més fàcil l'explotació i la comercialització. Els seus efectes, però, seran l'exhauriment més ràpid de les reserves a un cost energètic i ambiental més elevats.

Els jaciments no convencionals de gas natural en una petita part ja són comptabilitzats com a reserves i, en la seva major part, constitueixen simples expectatives de futur. En alguns casos (gas de beta de carbó), tenen impactes ambientals semblants als del gas natural convencional, però, en d'altres (gas atrapat i gas pissarra), poden provocar conseqüències ambientals molt més negatives i la contaminació d'aqüífers. Finalment, els hidrats de metà, pel seu volum global i per la falta de control que pot generar el canvi climàtic, més que un recurs constitueixen una amenaça.

Grans gasoductes i transport amb gas liquat

A causa de la baixa densitat a pressió i temperatura ambient ($0,00072 \text{ Mg/m}^3$) i la consegüent baixa densitat energètica ($0,0348 \text{ GJ/m}^3$), el gas natural no té la mateixa facilitat de transport i d'emmagatzematge que el petroli cru convencional (de $0,858 \text{ Mg/m}^3$ de densitat i de $38,87 \text{ GJ/m}^3$ de densitat energètica, unes 1.000 vegades superiors). Això fa que la comercialització del gas natural (i altres combustibles gasosos) al món sigui molt més petita que la del petroli (i altres combustibles líquids).

En conseqüència, els jaciments de gas natural més allunyats dels principals punts de consum presenten la dificultat del transport per a la seva comercialització. Els dos sistemes de transport més usats del gas natural són el gasoducte (instal·lació cara i relativament vulnerable) i la liqüefacció (solució que requereix instal·lacions importants i el consum de quantitats significatives d'energia). Hi ha una tercera opció, que és transformar gas natural a combustible líquid per al seu consum en substitució del petroli, però que també es realitza amb un cost energètic relativament important.

La solució dels gasoductes ha estat adoptada per productors com Algèria o els països d'Euràsia respecte als països consumidors d'Europa, o pel Canadà respecte als Estats Units. Altres productors (Qatar, Nigèria) opten per no explotar aquest recurs energètic, o cremen el gas natural produït junt amb el petroli, per evitar l'efecte hivernacle molt més elevat del metà al CO_2 (unes 25 vegades), o comencen a optar per altres estratègies de valorització d'aquest recurs, com ara la seva liqüefacció.

Gas natural liquat (GNL)

El gas natural liquat (GNL) redueix molt el seu volum. Per tant, la densitat energètica augmenta espectacularment, fet que en facilita el transport i l'emmagatzematge i, per tant, la comercialització a escala mundial.

Tanmateix, aquest procés requereix importants inversions i consums energètics, que disminueixen sensiblement la *taxa de retorn energètic* (TRE o EROI) d'aquest combustible i augmenten les emissions de gasos d'efecte hivernacle.



Figura 7.6. Vaixell metaner

El transport del gas líquat comporta diversos processos:

Condicionament. Cal eliminar tot allò que pot dificultar el procés de refredament, com ara el diòxid de carboni i l'àcid sulfhídric, així com deshidratar el gas i eliminar-ne les impureses. Això fa que el gas natural líquat sigui de molt bona qualitat.

Refredament. Després, el gas natural es refreda fins que es transforma en líquid a una temperatura de -161°C . El volum es redueix 632 vegades respecte a la pressió atmosfèrica.

Emmagatzematge. El gas natural líquat s'emmagatzema a pressió lleugerament superior a l'atmosfèrica en tancs criogènics especials amb doble paret (la interior d'acer niquelat) constantment refrigerats, per als quals s'estableixen normes de seguretat molt estrictes.

Transport. El gas natural líquat es transporta en vaixells especials, denominats *metaners*, que posseeixen un doble casc i inclouen diversos tancs constantment refrigerats. Els vaixells metaners típics poden transportar entre 75.000 i 260.000 m^3 de gas natural líquat, equivalents a entre 47,4 i 164,3 Mm^3 (milions de metres cúbics) a pressió atmosfèrica.

Regasificació. Un cop arribat al punt de destinació, el gas natural es bomba del vaixell a uns dipòsits criogènics d'emmagatzematge. Per transformar-lo novament en gas, s'expandeix a través d'intercanviadors de calor basats en aire o aigua de mar. Un cop tornat a l'estat gasós, es regula la pressió del gas natural que entra als gasoductes o a la xarxa de distribució.

Segons l'estudi *Well-to-Wheels Report* [WTW-2007], per subministrar gas natural per mitjà del transport com a gas natural líquat (GNL) cal consumir 31 MJ per cada 100 MJ d'energia final disponible en el gas (calen 131 MJ d'energia primària per aprofitar-ne 100 MJ en el gas subministrat).

Dels 31 MJ consumits en el subministrament, 9 MJ són per a la líquefacció, 9 MJ més per al transport criogènic i 3 MJ per a la recepció i la regasificació. El consum de la resta d'etapes (10 MJ entre extracció i condicionament, distribució i compressió) pràcticament coincideix amb les altres formes de subministrament del gas natural.

El rendiment disminueix del 89% per al *mix* europeu al 76% per al GNL, i la taxa de retorn energètic (TRE) es redueix de 9,3 a 4,2 (a menys de la meitat; taula 7.3).

En l'etapa de transport al mercat (líquidació + vaixell metaner + recepció i vaporització), les emissions de CO_2 són diverses vegades més elevades que el subministrament del *mix* europeu i el resultat final és un augment de les emissions en 11,3 gCO_2/MJ_f (taula 7.3).

Taula 7.3. Rendiments energètics i emissions en la comercialització del gas natural							
Etapas de la posada en valor del recurs energètic		GN (mix-EU) MJ/MJ _f ² gCO ₂ /MJ _f ²		GN (7.000 km) ¹ MJ/MJ _f ² gCO ₂ /MJ _f ²		GNL (liquat) MJ/MJ _f ² gCO ₂ /MJ _f ²	
1	Extracció i condicionament	0,02	3,2	0,03	3,6	0,03	3,3
2	Transformació (a l'origen)					0,09	5,7
3	Transport al mercat ³	0,02	1,9	0,19	14,6	0,09+0,03	5,6+1,8
4	Transform. (prop del mercat)						
5	Distribució i compressió	0,01+0,06	0,6+2,8	0,01+0,06	0,6+2,8	0,01+0,06	0,6+2,8
A	Total	0,12	8,5	0,30	21,7	0,31	19,9
B	Rendiment ⁴ = 1/(1+A)	0,89		0,77		0,76	
C	TRE (o EROI) ⁵ = 1/A	8,3		3,3		3,2	
D	Emissions totals per MJ _f ⁶		64,7		77,9		76,1

¹ Transport en gasoducte de 7.000 km
² Consum d'energia (en MJ) i emissions de gasos d'efecte hivernacle equivalents (en gCO₂) per energia del combustible de gas natural final (en MJ_f)
³ En el cas del gas natural liquat (GNL), transport amb vaixell metaner + recepció i vaporització al punt de destinació
⁴ Rendiment definit com a energia final del combustible respecte a l'energia primària
⁵ Taxa de retorn energètic (en anglès, *energy return on investment*)
⁶ L'emissió de gasos d'efecte hivernacle equivalents en la combustió del gas natural és 56,2 gCO₂/MJ_f
Font: Well-to-Wheel Report [WTW-2007]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Evolució previsible del GNL

La primera planta de liquèfacció de gas natural fou construïda el 1941 a Cleveland (EUA) i el primer transport marítim es va fer l'any 1959. Des d'aleshores, aquesta forma de transport s'ha generalitzat de manera que l'any 2008 es van transportar 172,6 Tg (milions de tones) de gas natural liquat de les 2.524,3 Tg de gas natural consumit en aquell any al món (6,8%). Tot fa pensar que aquesta proporció creixerà ràpidament en el futur.

A principis de 2009, hi havia 25 plantes operatives de liquèfacció al món repartides en 15 països, i se n'estan construint 5 més, així com 65 plantes de regasificació operatives en 19 països, i n'hi ha 16 més en construcció. La flota de vaixells metaners és de prop de 300 unitats, amb una capacitat global de 40 milions de m³, i se n'estan construint uns 125 més que incrementaran la capacitat en un 50%.

Totes aquestes infraestructures i inversions configuren una situació que facilita l'explotació de pous en situacions remotes, on les condicions geogràfiques no fan possible el transport per gasoducte. D'altra banda, tal com mostra l'estudi europeu *Well-to-Wheel Report* [WTW-2007], un transport per gasoducte de 7.000 km de longitud té uns costos energètics i uns impactes ambientals semblants al transport de gas natural liquat.

Gas natural no convencional

S'anomena *gas natural no convencional* aquell que no es pot extreure per procediments habituals en pous convencionals. Ho són el *gas compacte (tight gas)*, el *gas pissarra (shale gas)* i el *gas de carbó (coalbed methane, o CBM)*. També s'hi inclouen els hidrats de metà (o clatrats de metà), que avui dia no tenen ús comercial (i, com explicarem més endavant, esperem que no en tinguin).

Els Estats Units són l'únic país amb una producció significativa de gas natural no convencional (prop del 40% de la seva producció) i aquest recurs sembla que podria donar lloc a un desenvolupament energètic considerable durant uns anys de transició.

Tanmateix, com altres recursos d'energia límit, les tècniques per extreure gas natural no convencional (fracturació hidràulica, xarxa de pous horitzontals) planteja problemes ambientals importants, que cal avaluar amb més deteniment.

Gas compacte (*tight gas*) i gas pissarra (*shale gas*)

El gas natural (fonamentalment, compost de metà) es genera, en més o menys proporció, a totes les roques que contenen matèria orgànica en els cicles de formació del petroli i del carbó. Sovint, les roques on es troba el gas natural són de baixa permeabilitat i, per tant, el gas no hi flueix fàcilment i es fa difícil extreure'l. Quan aquest gas es troba en roques que contenen petroli dispers, s'anomena *gas compacte (tight gas)* i, quan es troba en pissarres bituminoses que contenen querogen, s'anomena *gas pissarra (shale gas)*.

A causa de la compacitat i la impermeabilitat del medi i les baixes taxes de flux, el gas està reclòs en els intersticis de les roques i no sol ser rendible obtenir-lo per mitjà de simples pous verticals. La seva producció requereix o bé la tècnica de la *fracturació hidràulica (hydraulic fracturing)* o bé el desplegament de pous horitzontals.

La fracturació hidràulica consisteix a injectar un líquid a elevada pressió en pous perforats en el terreny a fi de provocar sacsejades i produir fractures a les formacions rocoses, de vegades fins a profunditats de 8.000 metres. Per mantenir obertes les fissures després de la injecció, s'afegeix sorra d'alta permeabilitat en el líquid injectat. El gas flueix a través de les roques fracturades i surt pel mateix pou.

Els pous horitzontals constitueixen una altra tècnica per aconseguir una major superfície de contacte amb el dipòsit i permetre una transferència més eficaç del gas. Aquesta tècnica sols és aplicable en terra ferma i dona taxes de recuperació màximes del 20%.

La fracturació hidràulica s'utilitza des de fa més de seixanta anys per augmentar el rendiment dels pous d'hidrocarburs convencionals. Tanmateix, incentivada darrerament per l'increment del preu dels combustibles, ha tingut una expansió ràpida com a mètode d'extracció del gas natural no convencional de les pissarres bituminoses (*oil shales*).

Gas de carbó (CBM, *coalbed methane*)

Les estructures dels jaciments de carbó generen i emmagatzemen quantitats importants de gasos rics en metà. Si el jaciment és suficientment ric i s'explota, el gas s'allibera durant l'extracció, i les pràctiques més recents s'encaminen a capturar-lo no tan sols per raons de seguretat i ambientals, sinó també pel seu valor econòmic.

Però, si el jaciment no és rendible a causa de la seva gran profunditat o de la pobra qualitat del carbó, el metà o el gas de carbó (CBM, *coalbed methane*) resta atrapat en un medi de baixa permeabilitat que, a més, va disminuint amb la profunditat. Com en altres explotacions de gas natural no convencional, per possibilitar-ne l'extracció cal fracturar hidràulicament les capes de carbó i també crear pous horitzontals. Però, atès que l'aigua a pressió atrapa el gas, cal extreure-la per facilitar també la sortida del metà.

Avui dia, s'estan desenvolupant tècniques basades en la injecció de CO₂, que s'absorbeix fàcilment en el carbó i ajuda a alliberar-ne el metà (doble funció d'emmagatzematge geològic del CO₂ i d'obtenció de gas natural).

Recursos, reserves i producció

Les ressenyes sobre gas natural no solen fer distinció entre l'origen convencional o no convencional del combustible. En tot cas, les projeccions de l'EIA-govEUA (*International Energy Outlook 2009*, pàg. 40) en fan una breu referència circumscrita als Estats Units, on es destaca que en aquest país la producció de gas natural no convencional passarà del 47% de la producció global de gas el 2006 al 56% el 2030.

A partir de les dades proporcionades pel document de la IEA-ETSAP-P02, de 2010, la taula 7.4 resumeix aquests aspectes:

Taula 7.4. Recursos, reserves i producció de gas natural no convencional ¹							
Tipus	Recursos			Reserves ²		Producció de 2005 ³	
	Tm ³	%	TW _t A	Tm ³	TW _t A	Tm ³ /any	TW _t
Gas atrapat (<i>tight</i>)	210	22,8	231,4	100	110,2		
Amèrica Nord (ex. Mèxic)	39	4,2	43,0			0,161	0,177
Amèrica del Sud (i Mèxic)	37	4,0	40,8				
Àfrica	55	6,0	60,6				
Àsia i Oceania	51	5,5	56,2				
Gas jac. carbó (<i>coalbed</i>)	256	27,8	282,1	180	198,3		
Amèrica Nord (ex. Mèxic)	85	9,2	93,7			0,051	0,056
Euràsia	112	12,1	123,4				
Àsia i Oceania	49	5,3	54,0				
Gas pissarra (<i>shale</i>)	456	49,5	502,5	380	418,7		
Amèrica Nord (ex. Mèxic)	109	11,8	120,1			0,008	0,009
Amèrica del Sud (i Mèxic)	60	6,5	66,1				
Àfrica	80	8,7	88,1				
Àsia i Oceania	174	18,9	191,7				
Gas natural no conven. % sobre convencionals	922	100,0	1.016	660	727,3	0,220	0,242
				337,6		7,08	
Gas natural convenc.				175	215,4	3,108	3,809

¹ Fora de les mesures en TW_t i TW_tA (avaluades per l'autor), les dades procedeixen de l'IEA-ESTAP-P02.
² Per al gas natural convencional, són pròpiament les reserves; per al gas natural no convencional, són estimacions molt generoses (en %) de la font d'informació (IEA-ETSAP-02, 2010).
³ Les xifres corresponen a la producció de gas natural no convencional dels EUA, la més significativa del món i que representa de l'ordre del 40% del gas natural produït en aquell país.
Font: IEA-ETSAP-P02, 2010. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 7.4:

1. Els recursos estimats de gas natural no convencional, en les seves diferents formes, és enorme i, anàlogament als combustibles líquids, excedeix en molt als recursos de gas natural convencional. Això pot fer pensar que hi ha gas natural per a moltes dècades.
2. En aquest cas, i induïts per la taxa de recuperació elevada que solen tenir els jaciments convencionals de gas natural (fins al 80% del recurs), la IEA-ETSAP ha previst unes taxes de recuperació del mateix ordre que de cap manera es no podran donar en el gas no convencional. En efecte, per aconseguir-ho, caldria perforar molt territori en molts països.
3. Amb relació a la producció, l'únic país que extreu de forma significativa recursos de gas no convencional són els Estats Units, on actualment és de l'ordre del 40% de tot el gas que produeixen. L'experiència mostra que els pous s'exhaureixen molt ràpidament i que cal anar a perforar en altres indrets, en una contínua peregrinació pel territori.

Explotació i impactes del gas no convencional

El gas no convencional té com a característica que es troba disseminat en roques poc permeables on el gas no flueix. Amb les tècniques de fracturació hidràulica i els pous horitzontals, s'aconsegueix fer més permeables els substrats i arribar més a prop d'on és el gas.

Tanmateix, totes aquestes tècniques que van a buscar un gas dispers tenen un gran impacte territorial i encara no en sabem les conseqüències (vegeu la figura 7.7).

D'altra banda, són tècniques que consumeixen una gran quantitat d'aigua i utilitzen substàncies potencialment tòxiques, amb un greu risc de contaminació dels aqüífers. Si bé és cert que molts d'aquests jaciments estan a molta més profunditat que els aqüífers, l'aigua tòxica que entra als pous i en surt els travessa.



Figura 7.7. Vista aèria del parc Allegheny, Estat de Pennsylvania (EUA) a finals de 2009, on es veuen els pous, les carreteres i altres instal·lacions relacionades amb l'explotació de jaciments de gas natural no convencional.

Font: <http://www.savethemountain.net/gas_drilling.html>

En algun cas, i a través del propi pou, s'ha produït una explosió incontrolada a l'atmosfera de desenes de milers de litres del fluid hidràulic per a la fracturació que ha provocat contaminacions greus de l'entorn immediat.

També hi ha incògnites sobre els efectes que una fissuració metòdica de les roques pot tenir sobre el comportament de l'escorça terrestre. En definitiva, els costos de l'exploració massiva de grans extensions del territori i els efectes ambientals i d'estabilitat geològica limitaran, de ben segur, l'explotació d'aquests recursos.

Hidrats de metà (o clatrats de metà)

Són alguns dels compostos més desconeguts de l'escorça terrestre i alhora són vistos per uns com a recursos energètics i per d'altres com a amenaça en el context actual de canvi climàtic. En tot cas, és una realitat que cal no desconèixer.

Els hidrats de metà (o, més científicament, clatrats de metà) són compostos on una fina estructura d'aigua gelada envolta una molècula de gas (normalment, metà).

Aquestes estructures similars al gel tan sols es creen en condicions molt particulars de baixa temperatura i pressió elevada, de manera que la seva presència a la naturalesa queda reduïda als marges continentals dels oceans a profunditats superiors a 300 metres sota l'aigua i en el si de sediments inferiors a 800 metres. Alguns cops afloren en els fons marins, com també en algunes àrees de permafrost (o *permafrost*).

L'origen del metà és la descomposició de matèria orgànica per bacteris anaerobis, més recentment que la del petroli i del gas natural (uns 800.000 anys). Es genera en profunditat i migra cap a la zona on es formen els hidrats per cristallització, en contacte amb l'aigua freda a certa pressió.

Hi ha controvèrsia sobre la quantitat d'hidrats de metà que existeixen a la Terra i encara és objecte d'estudi (especialment a l'oceà Àrtic i a l'Antàrtida). Després d'unes primeres valoracions molt elevades (uns 11.000 PgC (1 PgC = 10^{15} g de carboni associades a aquest compost), sembla que les avaluacions més recents (a la baixa) se situen entre 500 i 2.500

PgC. De tota manera, continua essent una quantitat immensa, equivalent a entre 0,7 i 3,7 vegades la suma de totes les reserves de combustibles fòssils (uns 675 PgC).

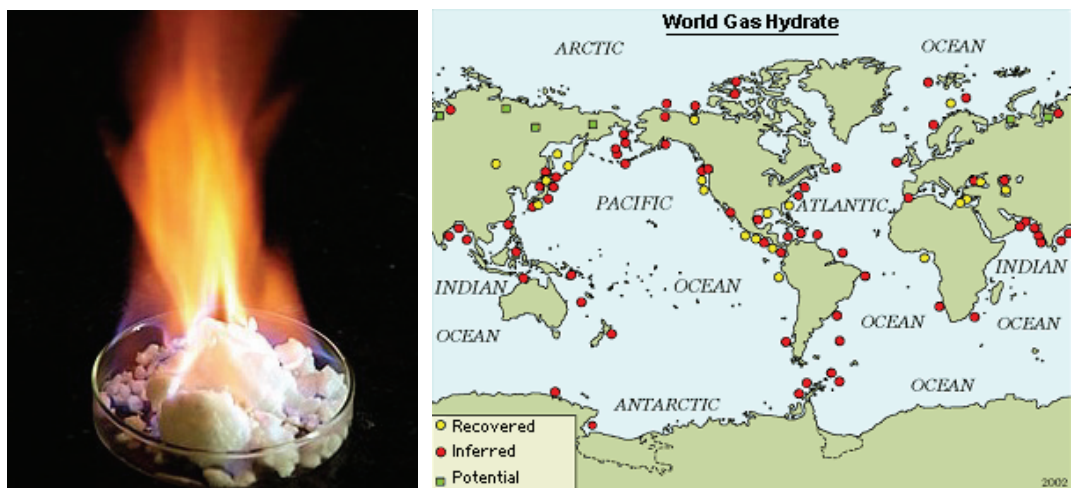


Figura 7.8. Hidrats de metà. Esquerra: combustió d'un hidrat de metà. Dreta: zones de les plataformes continentals del planeta on hi ha hidrats de metà; el mapa de la USGS les classifica com a recursos energètics. **Font:** mapa de US Geological Survey

En les condicions atmosfèriques, aquest compost de color blanc es desfà i allibera metà, que pot ser cremat. Això ha fet pensar en la seva utilització com a font energètica i a aquest efecte s'han iniciat diversos projectes, però la dispersió geogràfica, la inaccessibilitat i la inestabilitat del compost no n'han fet possible fins ara l'explotació comercial.

A causa de canvis en el nivell del mar o de l'augment de la temperatura de les aigües profundes, els hidrats de metà poden perdre les condicions d'estabilitat i dissociar-se alliberant el gas al sediment, el qual, finalment, arriba a l'atmosfera. Atès el potent efecte hivernacle del metà, un alliberament massiu de metà pot ocasionar un canvi sobtat del clima d'efectes catastròfics. Existeix la hipòtesi que una de les extincions massives va ser per aquesta causa.

Per tant, més que un recurs, els hidrats de metà (força desconeguts per al gran públic) poden constituir un perill. Encara més, el canvi climàtic pot tenir entre els seus efectes més perversos i catastròfics la desestabilització d'aquests dipòsits.

7.5. Combustibles obtinguts per transformació

Els combustibles líquids basats en el petroli (gasolina, gasoil, querosè) són la base del transport en les societats desenvolupades modernes (automòbil, camió, avió, vaixell; l'únic mitjà que se n'escapa, en part, és el ferrocarril quan és electrificat).

Però, al mateix temps, el petroli és el primer recurs energètic que amenaça d'escassejar, quan d'altres combustibles menys vitals per al transport (el gas natural i, sobretot, el carbó) tenen un marge més gran de reserves. D'aquí es deriva l'interès per a transformar-lo en combustibles líquids.

Les transformacions principals són:

- La gasificació (carbó, biomassa, residus)
- De gas natural a combustible líquid (GTL, *gas-to-liquid*)
- De carbó a combustible líquid (CTL, *coal-to-liquid*)
- Els biocarburants (o transformació BTL, *biomass-to liquid*)

Els biocarburants es tracten al capítol 9, junt amb les energies renovables. Aquí s'analitzen les transformacions, GTL i CTL.

Hi ha finalment un altre combustible que molta gent confon amb una font primària d'energia però que no és res més que un *vector*, una forma per facilitar la utilització de l'energia:

- De diferents fonts energètiques a *hidrogen*

Cal no confondre els combustibles obtinguts per transformació amb les *fonts d'energia primàries*. Aquests vectors no augmenten les disponibilitats d'energia, ans al contrari, les disminueixen ja que les transformacions es cobren els seus peatges en forma de rendiments.

En tot cas, aquestes transformacions proporcionen combustibles més adequats per a determinades aplicacions (com per exemple, combustibles líquids per al transport) o per evitar contaminacions locals o males consciències (com, per exemple, hidrogen que no produeix CO₂ en la combustió, però que probablement l'ha originat en la fabricació).

Gasificació (carbó i altres matèries orgàniques)

La gasificació del carbó (i altres matèries, com ara la biomassa o determinats residus) consisteix en la seva combustió parcial i controlada (amb escassetat d'oxigen) per tal d'obtenir un gas sintètic de propietats combustibles (*syngas*, barreja d'H₂, CO i CO₂), obtingut en diferents tipus de gasificador (de llit mòbil, de llit fluidificat, etc.).

El gas sintètic (*syngas*) té una gran varietat d'aplicacions: *a)* com a combustible en centrals elèctriques de cicle combinat amb gasificació integrada (IGCC); *b)* ser convertit en gas natural sintètic (SNG); *c)* pot produir hidrogen (H₂); *d)* Es pot transformar en petroli sintètic per mitjà del procés de síntesi Fischer-Tropsch; *e)* com a matèria primera en la fabricació de determinats productes químics. La poligeneració és la fabricació simultània de combustibles, electricitat i productes químics.

La gasificació, que té els seus antecedents en la producció de l'anomenat *gas ciutat* a partir de finals del segle XVIII, propicia un conjunt molt versàtil de processos i aplicacions que flexibilitza la gestió del sistema energètic global. A més, en base a recursos molt repartits i barats, com ara la biomassa i els residus, és una tecnologia que pot proporcionar recursos energètics als països en via de desenvolupament.

L'any 2007 hi havia registrades unes 144 plantes de gasificació arreu del món i funcionaven 427 reactors, amb una capacitat tèrmica global de 56 GW_t, dels quals 31 GW_t en la gasificació del carbó. Hi ha projeccions que indiquen un augment fins a 155 GW_t per al 2015, amb creixements grans sobretot a Àfrica i a l'Orient Mitjà (64%), moderats a Àsia i Oceania (27%), menors a Europa (9%) i pràcticament nuls als Estats Units [IEA-ETSAP-S01-2010].

Tanmateix, els rendiments energètics dels processos de gasificació són baixos i les emissions de gasos d'efecte hivernacle elevades (Vegeu la Taula 7.5).

Transformació de carbó i de gas a líquids (CTL i GTL)

Davant del zenit del petroli convencional i del seu futur declivi, unes de les alternatives que susciten més expectatives és transformar el carbó (abundant i relativament barat) i el gas natural (difícil de rendibilitzar quan el recurs és allunyat del consum) en combustibles líquids, com la gasolina o el dièsel sintètics (processos CTL, *coal-to-liquid* i GTL, *gas-to-liquid*).

D'aquesta manera, els països amb grans reserves de carbó i escasses reserves de petroli (EUA, Xina, Índia, Austràlia, Àfrica del Sud) veuen la transformació CTL com un mitjà per assegurar-se el subministrament de combustibles líquids, tan necessaris per al transport. D'altres països amb grans reserves de gas natural lluny del consum (Qatar, Nigèria) contemplen els processos GTL com una via per comercialitzar aquest combustible. Però, els baixos rendiments energètics d'aquestes transformacions, les fortes emissions de gasos d'efecte hivernacle i els alts costos d'inversió en infraestructures, imposen severes limitacions a la seva generalització.

La transformació de carbó en petroli sintètic (CTL) té una llarga història, que es va iniciar el 1913 amb la *liqüefacció directa* (DCL) de F. Bergius i el 1923 amb la *liqüefacció indirecta* (ICL) de F. Fischer i H. Tropsch (síntesi FT). A la Segona Guerra Mundial, Alemanya (amb bons recursos de carbó i escassos de petroli) va utilitzar la liqüefacció directa i, durant l'aïllament a causa de l'*apartheid*, Àfrica del Sud (també amb abundants recursos de carbó i escassos de petroli) va iniciar el 1955 la liqüefacció indirecta que encara fa de forma competitiva.

La liqüefacció directa (DCL), basada en la piròlisi i la hidrogenació, és senzilla i té un bon rendiment tèrmic (>60%), però la quantitat i la qualitat de producte obtingut són baixes. La liqüefacció indirecta és més complexa (cal la gasificació prèvia del carbó) i el rendiment tèrmic és més baix (de 50 a 55%), però la quantitat i la qualitat del producte obtingut són millors. La transformació de gas a líquid (GTL) es basa o bé en la conversió directa o bé en l'aplicació del procés de Fischer-Tropsch al gas sintètic.

Aquests processos no són gratuïts, sinó que tenen rendiments energètics i emissions de CO₂ més desfavorables que els dels combustibles d'origen (vegeu la taula 7.5). A més, si es generalitzen, precipitaran l'exhauriment de les reserves de carbó i de gas natural.

Tot i això, les produccions que se'n poden obtenir són limitades, i així ho corroboren les projeccions de l'EIA-govEUA per al 2030 (*International Energy Outlook 2009*, pàg. 22). Preveuen que els 0,2 Mb/dia (milions de barrils per dia) de combustible obtinguts per CTL passin a ser d'1,2 Mb/dia el 2030, i que la producció pràcticament imperceptible de combustibles obtinguts per GTL avui dia passi a ser de 0,3 Mb/dia l'any 2030. Recordem que la producció i el consum actuals de petroli són d'uns 85 Mb/dia.

Finalment, la implantació d'aquests processos requereix un gran esforç inversor. Les plantes industrials són com la combinació d'una central tèrmica i una refineria, i el seu cost d'inversió és d'entre 25.000 i 35.000 euros per barril/dia de capacitat. Els beneficis d'escala s'aturen a partir dels 17.000 barrils/dia ja que, aleshores, cal replicar les instal·lacions.

Dades de l'empresa Sasol (Àfrica del Sud)

L'empresa sud-africana Sasol, líder mundial en la transformació de carbó en líquid, amb més de 50 anys d'experiència, dona les dades següents sobre el procés [SAS-2009]:

- Eficiència tèrmica: del 38 al 42% (segons el carbó i el procés)
- Emissions: 1.000 kgCO₂/barril (aproximadament, 163 gCO₂/MJ)

El procés CTL per produir el combustible líquid emet 163 gCO₂/MJ i, quan es cremi, emetrà uns 74 gCO₂/MJ més (semblant a altres combustibles líquids). Així doncs, el procés complet (CTL + combustió líquid) comporta unes emissions totals de 237 gCO₂/MJ. La combustió directa del carbó hauria emès uns 105 gCO₂/MJ.



Figura 7.9. Vista general de la planta CTL de Sasol a Sagunto (Àfrica del Sud)

L'hidrogen

Vector energètic, no font primària d'energia

Sovint, quan es parla de l'hidrogen, es tracta com si fos una nova font primària d'energia. Això no és així: l'hidrogen no es troba en quantitats abundants en la natura (si hi fos, s'escaparia de la Terra vers l'espai en no quedar atrapat per la gravetat). S'ha d'obtenir, doncs, per transformació a partir d'altres fonts primàries.

L'hidrogen és simplement un vector energètic. Tan sols té sentit produir-lo si presenta avantatges en la utilització en relació amb les fonts d'on prové.

Obtenció de l'hidrogen

Es pot obtenir a partir de combustibles fòssils (i combustibles renovables) o a través de l'electròlisi de l'aigua. S'utilitza tant per alimentar els motors de combustió interna com els motors de pila de combustible (FCV, *fuel cell vehicles*).

La manera més barata d'obtenir l'hidrogen (H_2) és per transformació del gas natural o per gasificació del carbó. No obstant això, aquests processos emeten quantitats molt grans de CO_2 (vegeu la taula 7.5) i, per tant, la producció d'hidrogen a gran escala només pot tenir sentit si es combina amb tècniques de captura i segrestació de carboni.

L'adaptació dels motors de combustió interna a l'hidrogen és una tecnologia madura, relativament fàcil i poc costosa d'implantar i se n'obtenen rendiments lleugerament millors. Les piles de combustible es troben encara en fase experimental i els costos estan fora de mercat, però apunten uns rendiments superiors. El problema, però, és l'obtenció, l'emmagatzematge i la manipulació de l'hidrogen.

Poder calorífic volumètric extremament baix

En la combustió (o oxidació) d'un combustible, es denomina *poder calorífic màssic* la quantitat d'energia que pot proporcionar per unitat de massa, i se sol mesurar en MJ/kg o kWh/kg, i *poder calorífic volumètric*, la quantitat d'energia que pot proporcionar per unitat de volum, i se sol mesurar en MJ/m³ (gasos) o MJ/litre (líquids).

Doncs bé, els combustibles per al transport requereixen un poder calorífic màssic elevat per alleugerir el pes mort. En aquest sentit, els combustibles líquids tenen avantatge sobre les bateries elèctriques, però encara semblen més avantatjosos els combustibles gasosos i, sobretot, l'hidrogen, ja que té un poder calorífic màssic gairebé tres vegades més gran que la gasolina (120,1 MJ/kg, en lloc de 43,2 MJ/kg).

No obstant això, per tal de no ocupar un espai excessiu, els combustibles per al transport també requereixen un poder calorífic volumètric elevat i, en aquest aspecte, els combustibles gasosos són molt inferiors als líquids. En efecte, l'hidrogen en condicions ambientals (no comprimit ni líquid) proporciona gairebé 3.000 vegades menys energia que la gasolina per al mateix volum (0,0108 MJ/l, en lloc de 32,2 MJ/l).

Temperatures criogèniques, altes pressions i absorció química

Són alternatives per manipular i emmagatzemar l'hidrogen. Tanmateix, els condicionaments de pressió i temperatura requereixen equipaments especials i impliquen costos elevats.

L'hidrogen líquid (a -252,9°C) té una densitat de 0,071 kg/l (és a dir, 71 grams per litre) mentre que 1 litre de gasolina conté més hidrogen (116 grams, un 64% més) essent la resta de la massa (uns 730 grams) majoritàriament carboni que també contribueix a l'energia de combustió. Calen instal·lacions de fred i aïllaments molt importants.

Per aconseguir densitats de l'hidrogen comprimit no excessivament allunyades de les del líquid, cal comprimir el gas a pressions altíssimes (entre 350 i 700 bar), amb un consum d'energia que pot ser de l'ordre de l'11 al 15% de l'energia del combustible. El dipòsit resulta molt més voluminós i pesant que el d'un combustible líquid.

També s'han fet nombroses investigacions sobre emmagatzematge de l'hidrogen per absorció en hidrurs metàl·lics o altres substàncies, però totes les solucions encara estan molt lluny d'igualar la densitat energètica en volum dels hidrocarburs líquids.

El dipòsit del vehicle

Per recórrer una distància d'uns 500 km, tenint en compte el millor rendiment del motor, un automòbil estàndard necessita uns 9,5 kg d'hidrogen (amb la pila d'hidrogen, es redueix a 6,1 kg). Si s'opta per la líquidació, el dipòsit tindrà uns 135 litres si s'opta per comprimir a 350 bar, serà de 300 litres i, si s'opta per 700 bar, serà de 150 litres.

Resumint

Recordem de nou que l'hidrogen no és una font d'energia primària, sinó un simple vector energètic. Per tant, consumirà les energies de les transformacions necessàries per obtenir-lo (que acostumen a ser elevades) i emetrà els gasos d'efecte hivernacle que hagin originat aquestes transformacions (que també solen ser molt elevats) (vegeu la taula 7.5).

Per tant, l'hidrogen no és una energia lliure de carboni, com sovint es diu. Anàlogament a l'electricitat, l'hidrogen és lliure de carboni en el seu ús (que és el que es veu), però és fortament contaminant en la seva obtenció. Cal tenir present el cicle de vida complet.

L'anomenada *economia de l'hidrogen* presenta serioses dificultats tècniques i econòmiques, que avui estan molt lluny de ser resoltes. No s'endevina l'avantatge que pot aportar sinó és apagar falsament la mala consciència sobre el canvi climàtic.

Taula 7.5. Rendiments energètics, emissions i costos de diferents transformacions

Transformació	Energia		Emissions gCO ₂ /MJ	Inversió €/GJ (instal·lat)
	Rend. %	TRE		
Gas sintètic (syngas) ¹	de 73 a 75	2,85	55	de 10,4 a 13,2
Gas sintètic + hidrogen ¹	de 73 a 75	2,85	55	de 10,8 a 14,1
Gas natural sintètic (SNG) ¹	60	1,50	78	de 15,5 a 20,9
Carbó a líquid (CTL) ²	48	0,92	120	de 9,8 a 13,5
Gas a líquid (GTL) ²	56	1,27	27	de 3,8 a 4,6
Hidrogen comprimit (de carbó) ³	42	0,71	233	
Hidrogen comprimit (de gas natural) ³	54	1,19	105	
Hidrogen comprimit (electr. mixEU) ³	22	0,28	208	
Hidrogen comprimit (electr. eòlica) ³	56	1,26	9	
Hidrogen líquid (gas nat 4.000 km) ³	43	0,88	126	

¹ Dades obtingudes del document ETSAP-S01-2010, *Syngas production from coal*

² Dades obtingudes del document ETSAP-S02-2010, *Liquid fuels production from coal & gas*

³ Dades obtingudes del document *Well-to-Tank Report*, versió 2c, març de 2007, WTT Apèndix 2, *Description and detailed energy and GHG balance of individual pathways*.

Fonts: IEA-ETSAP-S01 i IEA-ETSAP-S02, de 2010; *Well-to-Tank Report*, versió 2c, març de 2007. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Segrest del CO₂

Al llarg de les eres geològiques, la naturalesa i la vida han generat un gegantí segrest de CO₂, que es manifesta en analitzar el cicle del carboni (vegeu la figura 11.10). La biosfera, els sòls, la matèria orgànica dissolta en els mars, els sediments i el querogè (del qual els combustibles fòssils són una ínfima part) resulten del segrest de CO₂ d'una atmosfera arcaica de la Terra que contenia majoritàriament aquest gas.

Ara, després de quasi dos segles d'explotació dels recursos fòssils i de l'acceleració dels consums els darrers cinquanta anys, les nostres societats desenvolupades ja no poden ocultar els desequilibris que provoquen, i parlem de segrest de CO₂. És com voler recompondre allò que cada dia trenquem sense tenir la intenció de deixar-ho de trencar.

Sovint, el segrest del carboni és la coartada per insistir en camins que caldria abandonar. Com que un dia aquest problema trobarà solució, això em permet continuar treballant amb tecnologies que tan sols es justifiquen si el segrest en volums importants és efectiu. I, com que hi ha tecnologies que tan sols es justifiquen amb el segrest, val la pena continuar investigant encara que les solucions siguin dubtoses. Un peix que es mossega la cua.

Estem parlant d'un segrest tècnic, desconnectat de la natura i que manipula la biosfera. Hi ha un altre segrest cooperatiu, que cerca col·laborar amb la natura i la biosfera per restablir els equilibris. Però això demana un canvi radical de mentalitat. En primer lloc, anar abandonant l'explotació dels combustibles fòssils (causa fonamental dels desequilibris) i, després, fer un gran esforç de comprensió dels complexos fenòmens naturals i actuar amb respecte i no forçant el temps.

Formes de segrest tècnic

Dit això, val la pena analitzar les opcions de segrest tècnic del CO₂ en què s'està treballant.

L'anomenada *captura i emmagatzematge del carboni* (CCS, *Carbon Capture and Storage*) és el conjunt de propostes tècniques per retirar el CO₂ de l'atmosfera o evitar que hi arribi. En l'avaluació ambiental dels processos (per exemple, els inclosos al document WTW de la Unió Europea [WTW-2007]), apareix l'anotació final CCS, que pressuposa que el procés s'acompanya del segrest de CO₂. Òbviament, milloren les emissions, però la realitat del segrest de CO₂ està tot just en la fase de les plantes pilot.

Cal advertir que totes les opcions de segrest tècnic s'apliquen quan es genera CO₂ de forma concentrada (centrals elèctriques, indústria del ciment, siderúrgica, petroquímica, etc.). Es dona per descomptat que una gran part de les emissions de CO₂ generades de forma dispersa (vehicles, aeronaus, vaixells, maquinària agrícola i d'obres públiques, calefaccions domèstiques, consums aïllats, etc.) no podran ser mai segrestades.

Reutilització

No és pròpiament una forma de segrest, però sí una manera d'optimitzar el recurs. Consisteix a capturar el CO₂ que es genera com a residu en molts processos per utilitzar-lo com a entrada en d'altres que en requereixen. Evitaria generar més CO₂ per a aquests processos.

Segrest químic

Generalment, la combustió es fa per aprofitar l'energia dels enllaços químics dels combustibles. Invertir el procés vol dir que, *junt amb el CO₂, s'ha de segrestar de nou l'energia* que prèviament s'havia obtingut. Per tant, no és viable, a menys que el carboni s'incorpori en altres compostos que puguin ser dipositats com a residu.

Injecció en formacions geològiques

Consisteix a injectar CO₂ en formacions geològiques que siguin capaces d'absorbir-lo. Atès que la concentració de CO₂ a l'atmosfera és una preocupació relativament recent, tot i que les tècniques d'injecció en formacions geològiques fa temps que són conegudes, el segrest geològic a llarg termini del CO₂ és un concepte nou.

La primera experiència comercial de segrest de CO₂ va iniciar-se el 2000 a Weyburn (Canadà) i la primera experiència pilot de central d'energia amb sistema CCS integrat va posar-se en marxa a Vattenfall (Alemanya), amb l'objectiu d'analitzar-ne la viabilitat.

Emissions reals de CO₂

Les dades estadístiques d'EIA-govEUA sobre emissions ni tan sols inclouen l'apartat de segrest del CO₂ (tècniques CCS). En canvi, si que constaten que durant el període 2000-2008, les emissions de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera van augmentar a un ritme anual del 3% mentre que la població mundial ho fa a un ritme 2,5 vegades inferior.

8. La incerta alternativa nuclear

8.1. Dels usos militars als usos civils

La major part dels fenòmens físics que percebem sobre la Terra es relacionen amb les forces gravitatòries o electromagnètiques. En canvi, els fenòmens nuclears més significatius es presenten a les estrelles i a l'interior del nostre planeta, en ambients molt allunyats de la biosfera; per això han estat el darrer camp de la física a descobrir-se.

Aquesta energia és poc compresa i el debat nuclear sovint es fa sense fonaments. A continuació, s'analitzen les possibilitats que l'energia nuclear pugui esdevenir una alternativa.

Les reaccions en el nucli atòmic posen en joc energies milions de vegades superiors a la dels enllaços químics per a una mateixa massa. En efecte, la fissió d'un sol àtom d'urani U235 (únic isòtop fissible que es troba a la natura) allibera una energia d'uns 200 MeV (milions d'electró-volts), 40.000.000 vegades superior a les reaccions químiques més energètiques (entre elles, les dels combustibles fòssils). Quan, a finals de 1939, la física alemanya Lise Meitner i el seu nebot també físic Otto Frisch descobrien la fissió nuclear interpretant diversos experiments anteriors d'altres científics, van endevinar immediatament les conseqüències terribles que aquesta energia podria desencadenar.

El primer ús de l'energia nuclear va ser el militar (el seu "pecat original"), a través del desplegament a gran escala del projecte americà Manhattan (iniciat el 1940) i amb els injustificables atacs dels Estats Units sobre la població civil japonesa d'Hiroshima i Nagasaki els dies 6 i 9 d'agost de 1945 amb bombes atòmiques de fissió (o bombes A), d'urani enriquit i de plutoni, respectivament. Enlloc de ser la fi de la Segona Guerra Mundial, aquests atacs van ser l'inici de la Guerra Freda i de la cursa d'armaments. En efecte, la Unió Soviètica feia la seva primera prova nuclear quatre anys més tard, el 1949, i la van seguir el Regne Unit el 1953, França el 1960, la Xina el 1964 i després altres països (Índia, Pakistan, Israel, Àfrica del Sud). Mesentrestant, el 1952, els Estats Units feien explotar la primera bomba d'hidrogen (o bomba H), que combina fusió i fissió, amb una potència centenars de vegades superior, context en què es ratificaren els tractats de no proliferació nuclear (1968).

Però també una tona d'urani natural ($1 \text{ tU}_{\text{nat}}$) proporciona una energia tèrmica primària controlada d'uns 450 T_J (tera, o 10^{12} , de joules tèrmics), que, transformada en energia elèctrica, genera 40,2 GW_eh (o milions de kW_eh; el *Red Book 2007* assenyala una producció mundial de 2.675 TW_eh amb un consum d'urani de 66.500 tU_{nat}). És una quantitat enorme d'energia, equivalent a la que proporcionarien unes 10.500 tones de petroli o 15.000 de carbó.

No fou fins el 1954 (nou anys després de les explosions d'Hiroshima i Nagasaki), que l'URSS va posar en marxa el primer reactor nuclear de producció elèctrica, a Obninsk. Dos anys més tard (1956), el Regne Unit posava en funcionament la central nuclear de Calder Hall i, l'any següent (1957), els Estats Units inauguraven la seva central nuclear de Shippingport. Tanmateix, pocs mesos abans de l'arrencada de la primera central soviètica, l'any 1953, el president Eisenhower dels Estats Units es va avançar amb el seu conegut i mediàtic discurs a l'Assemblea de l'ONU titulat "àtoms per a la pau", on propugnava els usos civils de l'energia nuclear. El seu efecte més visible va ser la creació, el 1957, de l'Agència Internacional de l'Energia Atòmica (IAEA).

La nova esperança nuclear

A partir d'aleshores, s'han construït 565 centrals nuclears en 33 països. A final de 2009, 123 havien estat retirades, 5 més es trobaven en una llarga desconexió i 437 estaven en funcionament. En aquesta mateixa data, hi havia 55 centrals nuclears en construcció, 40 d'elles iniciades a la Xina, Rússia, Corea del Sud i l'Índia, i encara n'hi havia 61 més de planificades (IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World*, 2010).

Després del declivi progressiu de les noves construccions nuclears a partir de l'any 1975 (vegeu la figura 8.2), probablement a causa de la falta de rendibilitat econòmica [Cod-2008], del problema mai no resolt dels residus radioactius i del gran impacte en l'opinió pública dels accidents de Harrisburg (1979) i Txernòbil (1986), el sistema nuclear ha entrat en una fase d'estancament durant els darrers decennis (1990-2010).

Darrerament, davant de la preocupació creixent per l'escassetat del petroli i l'amenaça del canvi climàtic, s'ha relançat una campanya (un primer efecte és la revifada de centrals iniciades els darrers cinc anys 2005-2010) que postula l'energia nuclear com una alternativa amb les dues premisses següents:

- a) És una font d'energia pràcticament inexhaurible.
- b) No produeix emissions de gasos d'efecte hivernacle.

D'aquesta manera, l'energia nuclear es reivindica com la solució a dos dels principals problemes que la humanitat afronta avui dia. Amb el text ja tancat, s'ha produït un nou i gravísim accident nuclear a les centrals nuclears tipus BMR de Fukushima (Japó) per causes naturals (sisme de grau 9,1 i posterior tsunami, el dia 11 de març de 2011), el qual, abans de ser controlat, ja és considerat un accident nuclear tan greu com el de Txernòbil. De segur que farà revisar a la baixa les expectatives nuclears.

La primera de les premisses anteriors pot semblar paradoxal en relació amb les dades del capítol 4 segons les quals les reserves d'urani representaven el 2007, tan sols el 6,37% del conjunt de les reserves de recursos energètics no renovables junt amb el petroli, el gas natural i el carbó. El sistema nuclear és molt complex i poc comprès pel gran públic (fins i tot, per molts dels responsables polítics), i cal analitzar-lo amb molt més deteniment. Tanmateix, tal com es veurà més endavant, l'alternativa nuclear com a gran font energètica del futur es mou entre grans incerteses i la impracticabilitat.

L'afirmació que els recursos nuclears constitueixen una font d'energia inacabable es basa en les consideracions següents:

1) *Els recursos d'urani natural són pràcticament il·limitats. Tan sols és una qüestió de preu.*

Certament, els recursos d'urani natural en el món són enormement més grans que 5,47 milions de tones consignades com a reserves el 2007 (és a dir, extraïbles amb les tecnologies i els paràmetres econòmics actuals).

L'urani natural es troba difós, en petites proporcions, en roques i medis molt abundants (fosfats, granit, aigua de mar) de forma que n'hi ha una quantitat suficient per a les necessitats energètiques de la humanitat durant centenars d'anys.

Atesa la baixa incidència econòmica del combustible nuclear en l'electricitat generada, es tractaria, doncs, d'acceptar uns costos creixents de l'urani natural per poder explotar jaciments cada cop menys favorables però més abundants.

2) *Els reactors reproductors multiplicaran l'ús dels recursos nuclears (urani, tori).*

En funció del seu origen còsmic, l'urani natural de l'escorça terrestre es compon del 0,71% de l'isòtop U235 fissible (el que fa funcionar els reactors nuclears i també les bombes atòmiques) i del 99,28% de l'isòtop no fissible U238 (avui dia, un residu radioactiu). Tanmateix, bombardejant l'urani U238 amb neutrons, aquest es transmuta en l'isòtop de plutoni Pu239, no present a la naturalesa, però altament fissible (usat ja en la bomba atòmica de Nagasaki el 1945) i apte com a combustible nuclear.

La tecnologia dels "reactors reproductors", iniciada ja fa més de cinquanta anys, transformaria l'isòtop U238 (anomenat fèrtil) en plutoni Pu239 (fissible) i això augmentaria les expectatives d'utilització de l'urani natural en un factor d'unes 140 vegades.

Anàlogament, l'isòtop de tori Th232 (tres vegades més abundant en la natura que l'urani fissible), també fèrtil, bombardejat amb neutrons es transmuta en l'isòtop d'urani U233, també fissible, i això augmentaria encara més les capacitats futures del sistema energètic nuclear.

3) La fusió nuclear, la gran esperança energètica del futur

Finalment, la posada a punt de tècniques per controlar la fusió nuclear (reacció que té lloc a les estrelles i al Sol), consistent en la unió de nuclis lleugers (deuteri i triti), per obtenir un nucli d'heli més pesat amb l'alliberament d'una quantitat ingent d'energia, permetria obtenir una nova font energètica pràcticament inexhaurible.

Aquest és el repte del projecte mundial i multilateral ITER. Fins ara, l'energia de la fusió tan sols s'havia usat per fabricar la bomba d'hidrogen (o bomba H).

No cal dir que el tractament dels residus radioactius que s'originen en totes les etapes del cicle nuclear no és un problema menor ni encara un tema resolt. Ni tampoc són problemes menors les qüestions relacionades amb la seguretat i els accidents nuclears, ni les precaucions i limitacions que cal adoptar per evitar la proliferació de les aplicacions militars dels recursos nuclears.

Tanmateix aquí, em sembla bàsic discernir si les tres vies reivindicades per anar més enllà de les reserves actuals d'urani (el 6,37% de les fonts d'energia no renovable) tenen viabilitat tècnica i econòmica i si poden ser implementades en un temps adequat per salvar els efectes del declivi del petroli i dels altres combustibles fòssils (apartat 8.3).

També és rellevant saber si l'energia nuclear té una *taxa de retorn energètic* (TRE) adequada i si està lliure d'emetre *gasos d'efecte hivernacle* o no i, en cas afirmatiu, en quin grau els emet (apartat 8.4). Abans, però, s'exposen breument les dades principals de l'evolució del sistema nuclear.

8.2. Evolució de la producció d'energia nuclear

En aquest apartat, es dona informació sobre l'evolució del parc de centrals nuclears en el món on s'observen dues etapes històriques clarament diferenciades per un punt d'inflexió vers l'any 1990. També s'analitzarà la seva distribució per regions i per països.

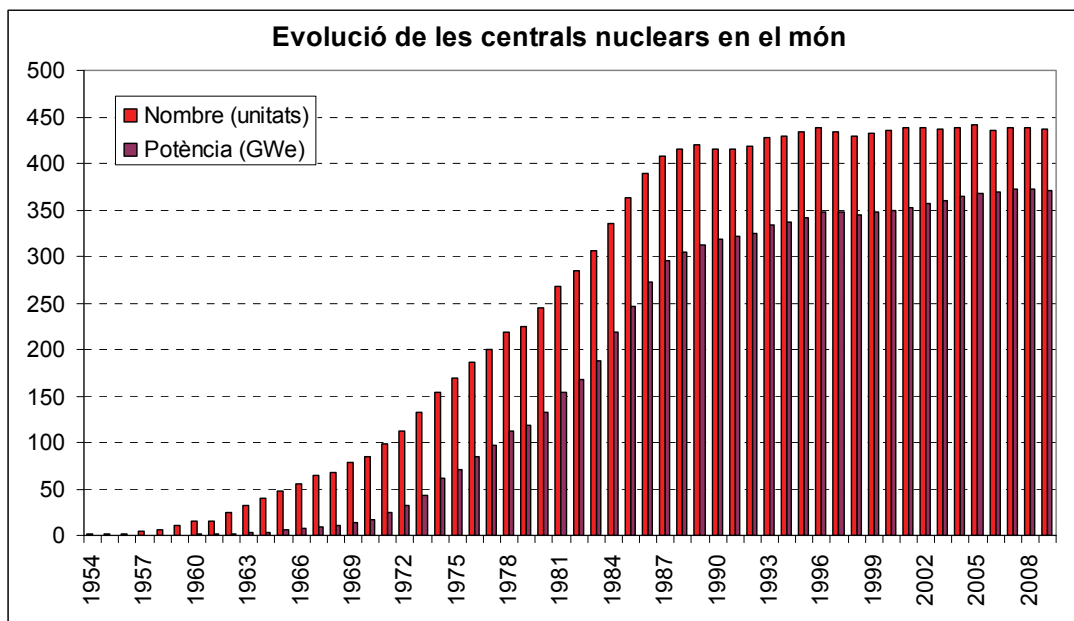


Figura 8.1. Evolució del parc mundial de centrals nuclears per generar electricitat. La primera columna representa el nombre de centrals i, la segona, la potència global instal·lada (GWe). Després d'un creixement ràpid, des del 1990 el nombre de centrals es manté quasi constant, però la substitució de les velles instal·lacions per noves fa augmentar lleugerament la potència instal·lada (i la producció, no representada). **Font:** IAEA, *Nuclear Reactor Power in the World*, 2010 Edition. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La major part de les centrals nuclears van ser construïdes abans de l'any 1990: 486 unitats, de les quals en funcionaven 416 en aquesta data. Les centrals nuclears construïdes posteriorment, entre 1990 i 2009 (79 unitats), cobreixen poc més que les instal·lacions retirades (58 unitats) i el parc s'incrementa en tan sols 21 centrals nuclears (figura 8.1).

En aquest darrer període, 1990-2009, la potència instal·lada i la generació d'electricitat augmenten ja que els nous reactors són més eficaços que els retirats (67,25 GW_e de nova potència instal·lada contra 14,80 GW_e de potència retirada) i la potència mitjana de les instal·lacions creix de 0,765 GW_e, el 1990, a 0,848 GW_e, el 2009.

Tanmateix, el pes de l'energia nuclear en el sistema elèctric mundial disminueix des del seu màxim del 17,7%, l'any 1996, fins al 13,7%, l'any 2008 (4 punts percentuals en 12 anys).

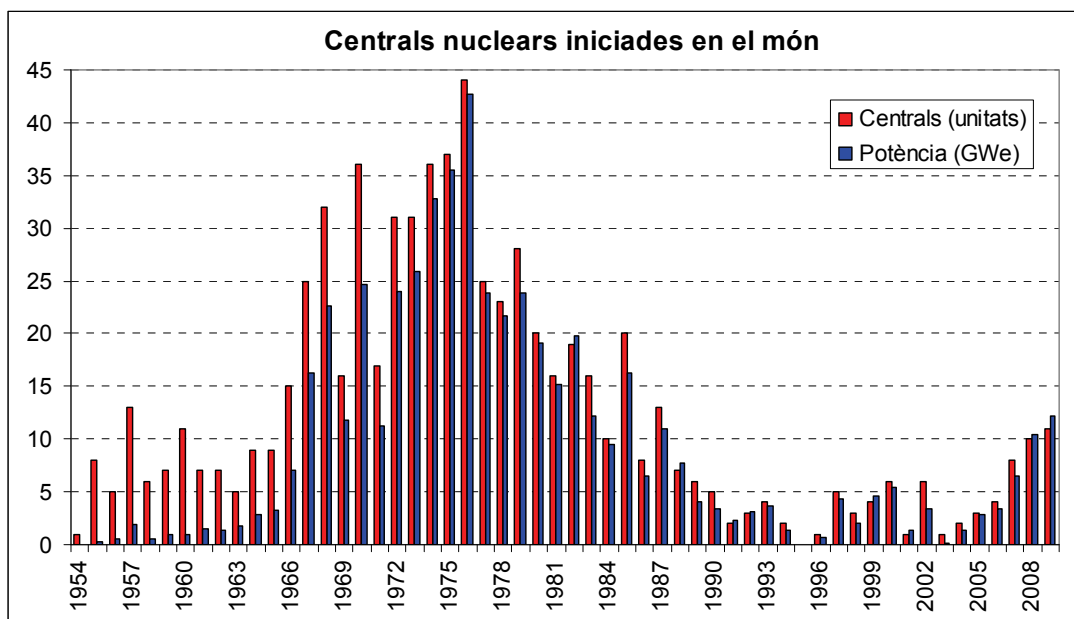


Figura 8.2. Evolució del nombre de centrals nuclears iniciades cada any: nombre d'unitats (primera columna) i potència global en GW_e (segona columna). Fins al 1965, les centrals iniciades eren de poca potència. El gruix de les noves construccions es dona entre 1967 i 1985. Després de l'aturada entre 1990 i 2005, s'inicia una certa recuperació. **Font:** IAEA, *Nuclear Reactor Power in the World*, 2010. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Resumint, a la fi de 2009 hi havia 437 centrals nuclears en funcionament en el món (segons, IAEA) i, després d'uns anys d'estancament en noves iniciatives (declivi des de 1977 fins a 1990 i estancament des d'aleshores, figura 8.2), els darrers anys sembla que hi ha una repuntada moderada de les noves construccions (55 unitats a finals de 2009).

Un altre aspecte que completa la visió del sistema nuclear i que alhora proporciona informació sobre les tendències efectives de l'energia nuclear és l'anàlisi de l'espectre d'edats de les centrals nuclears.

La figura 8.3 mostra que les centrals més joves i amb més capacitats d'explotació futura (edat menor de 20 anys) són tan sols 78 (el 17,8% del parc actual) mentre que la mitjana del parc mundial supera els 25 anys naturals, xifra no gaire llunyana dels 24,6 anys de funcionament a plena potència que atorga com a vida màxima Storm [Sto-2007], corresponents a uns trenta anys naturals.

A més, la majoria de les centrals nuclears velles estan en els països desenvolupats, mentre que les centrals noves es construeixen en països en via de desenvolupament.

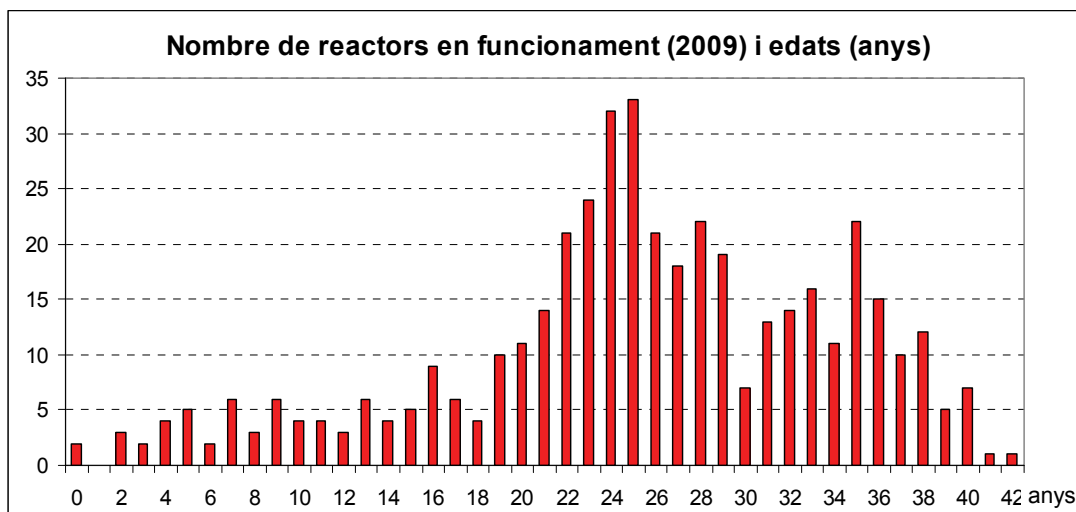


Figura 8.3. Distribució de les edats (en abscesses) dels reactors nuclears en funcionament l'any 2009. La mitjana d'edat és de 25,2 anys i 214 reactors (pràcticament la meitat del parc) tenen més de 25 anys. **Font:** IAEA, *Nuclear Reactor Power in the World*, edició de 2010. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Per completar la visió de l'energia nuclear en el món, és bo analitzar la distribució territorial de les centrals nuclears (taula 8.1). Els països s'han agrupat en *regions nuclears* (on aquesta energia produeix més d'un 15% de l'electricitat) i la *resta de regions* (on aquesta incidència és inferior al 3%). No són exactament les regions de l'EIA que s'han utilitzat en la resta del treball però s'hi aproximen molt. S'ha inclòs Mèxic dins d'Amèrica del Sud i Central (enlloc d'Amèrica del Nord) i s'ha dividit Àsia i Oceania en dos blocs: els països de l'OCDE (on s'hi ha sumat Taiwan) i la resta.

També és molt il·lustratiu el mapa de les localitzacions nuclears (figura 8.4).



Figura 8.4. Distribució de les centrals nuclears en el món (cada punt és una localització amb una central o més). S'hi observen tres zones de gran concentració (Amèrica del Nord, Europa i Japó/Corea del Sud), que coincideixen amb els països desenvolupats. **Font:** IAEA, *Nuclear Reactor Power in the World*, edició de 2010.

Taula 8.1. Centrals nuclears, producció elèctrica nuclear i població (2009)

Món i regions		En funcionament			En construcció			Energia nuclear			Població	
		N ¹	GW _e ²	%	N ¹	GW _e ²	%	TW _e h ³	%	%PE ⁴	Mhab ⁵	%
Món		437	370,7	100,0	55	54,3	100,0	2.558	100,0	13,6	6.614	100,0
Regions nuclears		398	351,9	94,9	27	27,8	51,1	2.433	95,1	21,1	1.414	21,4
Amèrica (Can+EUA)		122	113,3	30,6	1	1,2	2,3	882	34,5	18,7	334	5,1
Europa		149	133,9	36,1	6	6,3	11,5	874	34,2	25,3	595	9,0
Euràsia		47	35,2	9,5	11	9,5	17,5	233	9,1	17,6	284	4,3
Àsia i Oceania ⁶		80	69,5	18,8	9	10,8	19,8	444	17,3	21,6	201	3,0
Resta de regions		39	18,8	5,1	28	26,6	48,9	124,6	4,9	1,7	5.200	78,6
Amèrica (resta)		6	4,1	1,1	1	0,8	1,4	29,9	1,2	1,9	571	8,6
Orient Mitjà		0	0,0	0,0	1	1,0	1,8	0,0	0,0	0,0	195	3,0
Àfrica		2	1,8	0,5	0	0,0	0,0	11,6	0,5	2,0	946	14,3
Àsia Oceania (resta)		31	12,9	3,5	26	24,8	45,7	83,1	3,2	1,8	3.488	52,7
Principals països ⁷												
1	EUA	104	100,7	27,2	1	1,2	2,2	796,9	31,2	20,2	301	4,7
2	França	59	63,3	17,1	1	1,7	3,0	391,8	15,3	75,2	64	1,0
3	Japó	54	46,8	12,6	1	1,4	2,5	263,1	10,3	28,9	127	2,0
4	Rússia	31	21,7	5,9	9	7,5	13,8	152,8	6,0	17,8	141	2,2
5	Corea del Sud	20	17,7	4,8	6	6,8	12,5	141,1	5,5	34,8	48	0,7
6	Alemanya	17	21,5	5,5				127,7	5,0	26,1	82	1,3
7	Canadà	18	12,6	3,4				85,1	3,3	14,8	33	0,5
8	Ucraïna	15	13,1	3,5	2	2,0	3,7	77,9	3,0	48,6	46	0,7
9	Xina	11	8,4	2,3	20	21,6	39,7	62,9	2,6	1,9	1.322	20,6
10	Regne Unit	19	10,1	2,7				62,9	2,5	17,9	61	0,9
11	Espanya	8	7,5	2,0				50,6	2,0	17,5	41	0,6
12	Suècia	10	9,0	2,4				50,0	2,0	37,4	9	0,14
13	Bèlgica	7	5,9	1,6				45,0	1,8	51,7	10	0,16
14	Taiwan	6	5,0	1,3	2	2,6	4,8	39,9	1,6	17,1	23	0,4
15	Suïssa	5	3,2	0,9				26,3	1,0	39,5	8	0,12
16	República Txeca	6	3,7	1,0				25,7	1,0	33,8	10	0,16
17	Finlàndia	4	2,7	0,7	1	1,7	3,2	22,6	0,9	32,9	5	0,08
18	Índia	18	4,0	1,1	5	2,9	5,4	14,8	0,6	2,2	1.141	17,1
19	Hongria	4	1,9	0,5				14,3	0,6	43,0	10	0,16
20	Bulgària	2	1,9	0,5	2	2,0	3,7	14,2	0,6	35,9	7	0,11
21	Eslovàquia	4	1,8	0,5	2	0,9	1,6	13,1	0,5	53,5	5	0,08
22	Brasil	2	1,9	0,5				12,2	0,5	2,9	193	3,0
23	Àfrica del Sud	2	1,8	0,5				11,6	0,5	4,8	48	0,7
24	Romania	2	1,3	0,3				10,8	0,4	20,6	22	0,3
25	Mèxic	2	1,3	0,4				10,1	0,4	4,1	109	1,7
26	Lituània ⁷							10,0	0,4	76,2	4	0,05
27	Argentina	2	0,9	0,3	1	0,7	1,4	7,6	0,3	7,0	40	0,6

¹ Nombre de centrals nuclears a final de 2009, segons la IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World*, 2010

² Potència instal·lada de les centrals nuclears a final de 2009, en GW_e (10⁹ watts elèctrics), segons la IAEA

³ Energia elèctrica produïda d'origen nuclear el 2009, en TW_eh (10¹² wattshora elèctrics), segons la IAEA

⁴ Percentatge de participació de l'energia nuclear en la producció elèctrica total. Món i regions: dades de l'EIA 2007. Països: dades de 2009, segons la IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World*, 2010

⁵ Població de 2007, en Mhab (milions d'habitants), segons l'EIA

⁶ Japó, Corea del Sud, Austràlia i Nova Zelanda (Àsia i Oceania, OCDE), els dos darrers sense centrals nuclears, als quals s'ha afegit Taiwan

⁷ Hi ha 33 països que tenen (o han tingut) centrals nuclears. La llista continua amb Eslovènia (1 central), Holanda (1), Pakistan (2) i Armènia (1). Itàlia (4) i Kazakhstan (1) havien tancat les seves centrals amb anterioritat a 2009, i Lituània les ha tancat durant l'any 2009. Iran està construint la seva primera central nuclear.

Font: IAEA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris sobre la situació actual de l'energia nuclear i la seva evolució:

1. Malgrat el ràpid desenvolupament de les primeres dècades, el sistema d'energia nuclear s'ha estancat des de 1990, quan les noves construccions han reemplaçat poc més que les que s'han retirat.
2. El ritme de construcció de noves centrals (tot i la revifalla) no reposarà el parc mundial actual. El prolongat temps mitjà de construcció d'una central (7,8 anys el darrer decenni) fa que les 55 centrals en construcció representin tan sols 7 noves plantes per any. En canvi, existeixen 127 centrals nuclears al món de més de trenta anys (la mitjana d'edat de les retirades fins ara ha estat de 25).
3. L'any 2009, el sistema nuclear proveïa el 13,7% de l'energia elèctrica mundial (o el 5,08% de l'energia primària). Els darrers vint anys, el sistema nuclear ha perdut pes (el 1996 proporcionava el 17,7% de l'energia elèctrica, equivalent al 5,33% de l'energia primària).
4. L'energia nuclear proveeix el primer món (el 95,1% dona servei a països desenvolupats i a Euràsia amb el 21,4% de la població mundial, i proporciona el 21,1% de l'electricitat que consumeixen), mentre que l'energia nuclear és residual en els països en desenvolupament (el 4,9% de l'electricitat nuclear generada per al 78,6% de la població mundial i proporciona tan sols el 1,7% de l'electricitat que consumeixen).
5. Les noves centrals nuclears en construcció (55 unitats, de les quals 20 a la Xina, 9 a Rússia, 6 a Corea del Sud i 5 a l'Índia) i les planificades (61, de les quals 38 a la Xina, 11 al Japó abans de l'accident de Fukushima i 5 a Rússia) anuncien una forta davallada de l'energia nuclear a Europa i a Amèrica del Nord, a causa del previsible futur tancament de centrals sense que se n'hagi planificat la reposició.
6. Les previsions de futur posen de manifest que l'energia nuclear continuarà pràcticament absent d'Àfrica, Amèrica del Sud i grans zones d'Àsia i Oceania.

8.3. Avaluació dels recursos d'urani

En aquesta anàlisi crítica, es parteix de les dades proporcionades per la publicació biennal de la IAEA (Agència Internacional de l'Energia Atòmica, dependent de les Nacions Unides) i la NEA (Agència de l'Energia Nuclear, de l'OCDE) titulada "Recursos d'urani, producció i demanda" (*Uranium Resources, Production and Demand*) també coneguda per Llibre Vermell (o *Red Book*), editada per primer cop el 1965 i reconeguda com la referència mundial de l'urani <<http://www.nea.fr/pub/ret.cgi?id=new>>.

Aquests documents oficials (en especial, les darreres edicions de 2007 i 2009) manifesten que hi ha recursos d'urani per a molts anys i que, per tant, no cal preocupar-se. El comunicat de premsa de la NEA de 3 de juny de 2008, a París, on es presentava el *Red Book 2007*, afirmava respecte a l'urani:

"Sobre la base de la generació d'energia elèctrica d'origen nuclear el 2006 i de l'estat actual de la tecnologia, els recursos identificats són suficients per a 100 anys."

El grup d'estudi d'origen alemany EWG (Energy Watch Group), format per un conjunt de científics i d'experts amb l'objectiu d'investigar els conceptes de sostenibilitat en el subministrament global d'energia, dedica el seu primer treball al tema nuclear [EWG-2006]. Als annexos 1 i 2, repassa les diverses definicions de la IAEA-NEA sobre reserves d'urani, i les avaluacions històriques que n'ha fet el *Red Book* des de 1965.

L'esquema més usat és el d'IAEA-NEA, que distingeix entre "recursos coneguts" i "recursos no descoberts". Divideix els primers en "recursos raonablement assegurats" (*RAR*, *reasonably assured resources*) i "recursos inferits" (*IR*, *inferred resources*, anteriorment *EAR*, *estimated additional resources*). I els segons en "recursos pronosticats (*prognosticated re-*

sources, anteriorment *estimated additional resources II*) i “recursos especulatiu” (*speculative resources*).

Al seu torn, classifica els recursos *RAR* i *IR*, segons els costos d'obtenció, en <40 \$/kg, <80 \$/kg i <130 \$/kg; els recursos *pronosticats* en <80 \$/kg i <130 \$/kg, i, finalment, els recursos *especulatiu* en <130 \$/kg i de cost no determinat. L'esquema general és:

Taula 8.2. Esquema de classificació dels recursos d'urani										
	Recursos coneguts						Recursos desconeguts			
IAEA-NEA 2004	RAR, recursos raonablement assegurats			EAR I, recursos addicionals estimats			EAR II, recursos addicio. estimats	recursos especulatiu		
IAEA-NEA 2006	RAR, recursos raonablement assegurats			IR, recursos inferits			Recursos pronosticats	Recursos especulatiu		
\$/kg	<40	<80	<130	<40	<80	<130	<80	<130	<130	?
Font: IAEA. Elaboració: Carles Riba Romeva										

L'informe de l'Energy Watch Group [EWG-2006] repassa les previsions de recursos d'urani de les 20 edicions del *Red Book* des de 1965 fins a 2005 i l'acompanya de la corba de les despeses anuals d'exploració d'urani a escala mundial (figura 8.5). Cal dir que, en les dues edicions posteriors del *Red Book* (2007 i 2009), els recursos coneguts d'urani s'han situat a 5.468,9 i 5.404 ktU (milers de tones d'urani natural), respectivament.

Amb relació a la figura 8.5, el treball de l'Energy Watch Group fa constar que no hi ha correlació entre les despeses anuals d'exploració en la mineria de l'urani (línia vermella) i els recursos coneguts estimats. En efecte, després de la màxima inversió en exploració vers el 1980, les reserves baixen significativament (un 30% en els anys 1980-1995), mentre que, en aquests darrers anys de baixa inversió en exploració, els recursos coneguts van augmentant any rere any. Els darrers anys sembla que l'exploració en mineria d'urani torna a créixer significativament.

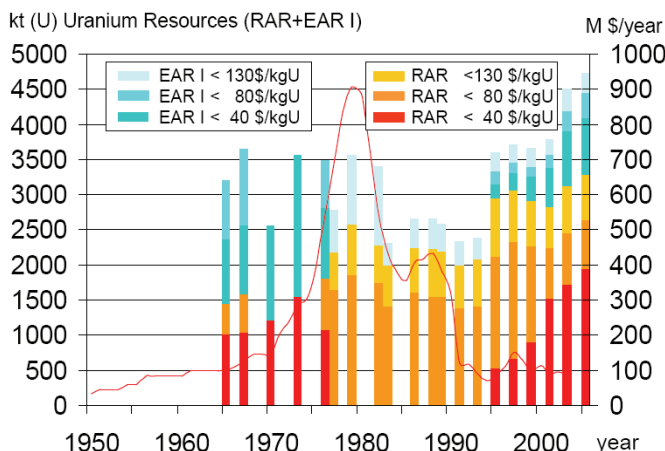


Figura 8.5. Avaluació històrica dels recursos coneguts d'urani (*RAR* i *EAR I*) entre 1965 i 2005, segons el *Red Book* (NEA-IAEA) i despeses estimades en exploració de nous recursos. Font: [EWG-2006]

Recursos i producció d'urani en el món

La figura 8.6 dóna una primera imatge de l'evolució dels recursos d'urani. A mà esquerra (barres en gris), s'indiquen les reserves ja extretes, mentre que a mà dreta (diferents colors segons categories) s'indiquen les reserves estimades segons el *Red Book* 2007:

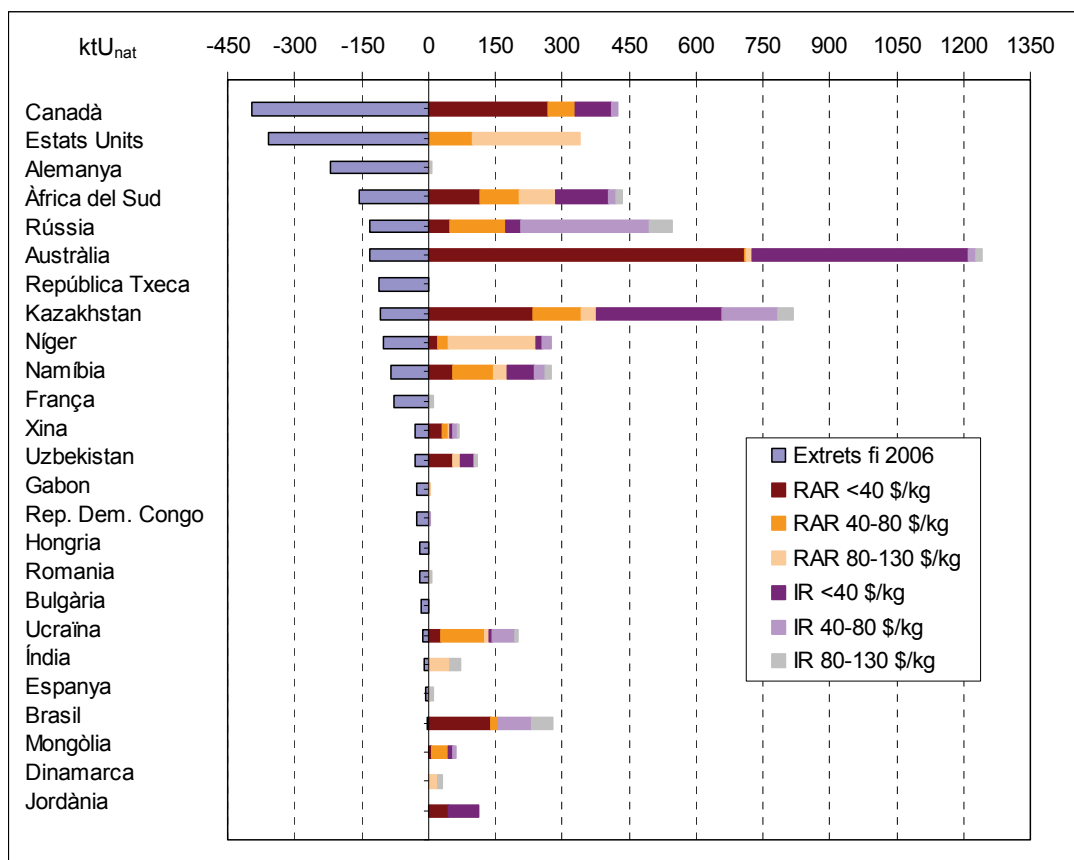


Figura 8.6. Representació de la producció acumulada (recursos extrets) a la fi de 2006 (esquerra) i dels diferents recursos *RAR* i *IR* per als principals països productors d'urani (del passat, present i futur). **Font:** *Red Book 2007*. **Elaboració:** Carles Riba Romeva.

La taula 8.3 dóna informació sobre recursos, producció, demanda i producció acumulada d'urani. Al *Red Book 2009* es constata una lleugera disminució dels “recursos coneguts” respecte al *Red Book 2007* així com algunes variacions sorprenents (amunt: Austràlia, Xina i Canadà; avall: Kazakhstan, Àfrica del Sud, EUA i Ucraïna).

Tant a la taula 8.3 com a la figura 8.6, es constata que diversos països han exhaurit les reserves d'urani sense disposar pràcticament de nous recursos (Alemanya, República Txeca, França, Gabon, República Democràtica del Congo, Hongria, Romania, Bulgària i Espanya). Els Estats Units estan en una situació de declivi de producció (1.453 tU_{nat}/any el 2009, quan havien arribat a 20.000 tU_{nat}/any) i sols els resten recursos de baixa qualitat.

La producció actual d'urani (2009) es basa fonamentalment en tres països de primer nivell (Kazakhstan, 14.020; Canadà, 10.173, i Austràlia, 7.982 tU_{nat}/any) i en quatre països de segon nivell (Namíbia, 4.626; Rússia, 3.564; Níger, 3.243, i Uzbekistan, 2.429 tU_{nat}/any). En funció dels recursos coneguts (*RAR*+*IR* <130 \$/kg), en el futur també podrien tenir importància Àfrica del Sud (295 ktU_{nat}), el Brasil (279 ktU_{nat}), la Xina (171 ktU_{nat}), Ucraïna (105 ktU_{nat}) i Jordània (112 ktU_{nat}).

Caldrà veure si, a mesura que l'urani s'extregui, els recursos assignats per la IAEA-NEA a cada país no s'aniran ajustant a la baixa, tal com ha passat amb França i els Estats Units (vegeu més endavant). En tot cas, sembla poc realista comptar amb l'urani dels “recursos no descoberts” (pronosticats i especulatius) que, segons el *Red Book 2007*, sumen 10.540,1 ktU_{nat}, quasi el doble dels “recursos coneguts”. IAEA-NEA no els consideren reserves.

Taula 8.3. Reserves, producció, consum i producció acumulada d'urani natural (tU _{nat}) ¹							
Països		RAR+IR <130 \$/kg, Red B. 2009	RAR+IR <130 \$/kg, Red B. 2007	Producció Red Book 2009	Producció Red Book 2007	Demanda Red Book 2007	Producció acumulada fi de 2006
Països ordenats per volum de reserves							
1	Austràlia	1.673.000	1.243.000	7.982	9.516	0	130.414
2	Kazakhstan	651.000	817.300	14.020	4.357	0	108.045
3	Canadà	485.000	423.200	10.173	11.628	1.900	396.597
4	Rússia	373.300	545.600	3.564	3.431	4.100	129.729
5	Àfrica del Sud	295.000	435.100	563	674	290	154.461
6	Namíbia	284.000	275.000	4.626	3.147	0	84.950
7	Brasil	279.000	278.400	345	110	450	1.899
8	Níger	272.000	274.000	3.243	3.093	0	100.664
9	Estats Units	207.000	339.000	1.453	1.039	22.825	359.193
10	Xina	171.000	67.900	750	750	1.500	29.189
11	Jordània	112.000	111.800	0	0	0	0
12	Uzbekistan	111.000	111.000	2.429	2.300	0	28.242
13	Ucraïna	105.000	199.500	840	800	2.480	11.500
14	Índia	80.000	72.900	290	230	445	8.370
15	Mongòlia	49.000	62.000	0	0	0	535
Resta de països ordenats per volum de demanda							
1	França	s.d. ²	11.700	8	7	9.000	75.977
2	Japó	s.d.	6.600	s.d.	0	8.790	84
3	Alemanya	s.d.	7.000	s.d.	94	3.490	219.399
4	Corea del Sud	s.d.	0	s.d.	0	3.200	0
5	Regne Unit	s.d.	0	s.d.	0	1.900	0
6	Suècia	s.d.	10.000	s.d.	0	1.600	200
7	Espanya	s.d.	11.300	s.d.	0	1.310	5.028
8	Bèlgica	s.d.	0	s.d.	0	1.065	686
9	Rep. Txeca	s.d.	700	s.d.	409	740	109.433
10	Bulgària	s.d.	s.d	s.d.	0	505	16.357
11	Hongria	s.d.	s.d	s.d.	3	380	21.048
12	Romania	s.d.	6.700	75	90	200	18.169
13	Gabon	s.d.	5.800	s.d.	0	0	25.403
14	Congo, R. D.	s.d.	2.700	s.d.	0	0	25.600
Món		5.404.000	5.468.900	50.772	41.719	69.110	2.193.512
Cobertura dels requeriments d'urani				73,5%	65%		
¹ tU _{nat} = tones d'urani natural (amb la composició d'isòtops de l'urani natural: 99,28% U238; 0,71% U235)							
² Sense dades							
Font: Red Book 2007 i Red Book 2009. Elaboració: Carles Riba Romeva							

Històries de les mineries d'urani francesa i americana

L'estudi de l'Energy Watch Group dóna unes claus interessants sobre l'evolució de la mineria d'urani a França i als Estats Units en relació als recursos estimats [EWG-2006, annexos 5 i 6].

Mineria francesa

La mineria de l'urani va començar molt aviat a França per cobrir tant les aplicacions militars com les de producció d'electricitat (segon país del món en energia nuclear, més del 15% mundial, i primer en la proporció d'electricitat nuclear, més del 75%). La producció va pujar gradualment fins a 3,3 ktU_{nat} l'any 1980 va decaure ràpidament fins a esdevenir residu-

al l'any 2001 (figura 8.7). Entre la producció acumulada i els recursos inferits (11,7 ktU_{nat}), els recursos d'urani (passats i presents) admesos a França són de 87,7 ktU_{nat}.

Tanmateix, entre 1970 i 1990, i en ple auge de la mineria francesa d'urani, les estimacions de diverses edicions del *Red Book* (IAEA-NEA) situaven els recursos francesos (RR+EAR <80 \$/kg) entre 120 i 130 ktU_{nat}, d'un 38 a un 48% per sobre de la realitat acceptada avui dia amb els recursos quasi exhaurits i la producció pràcticament aturada.

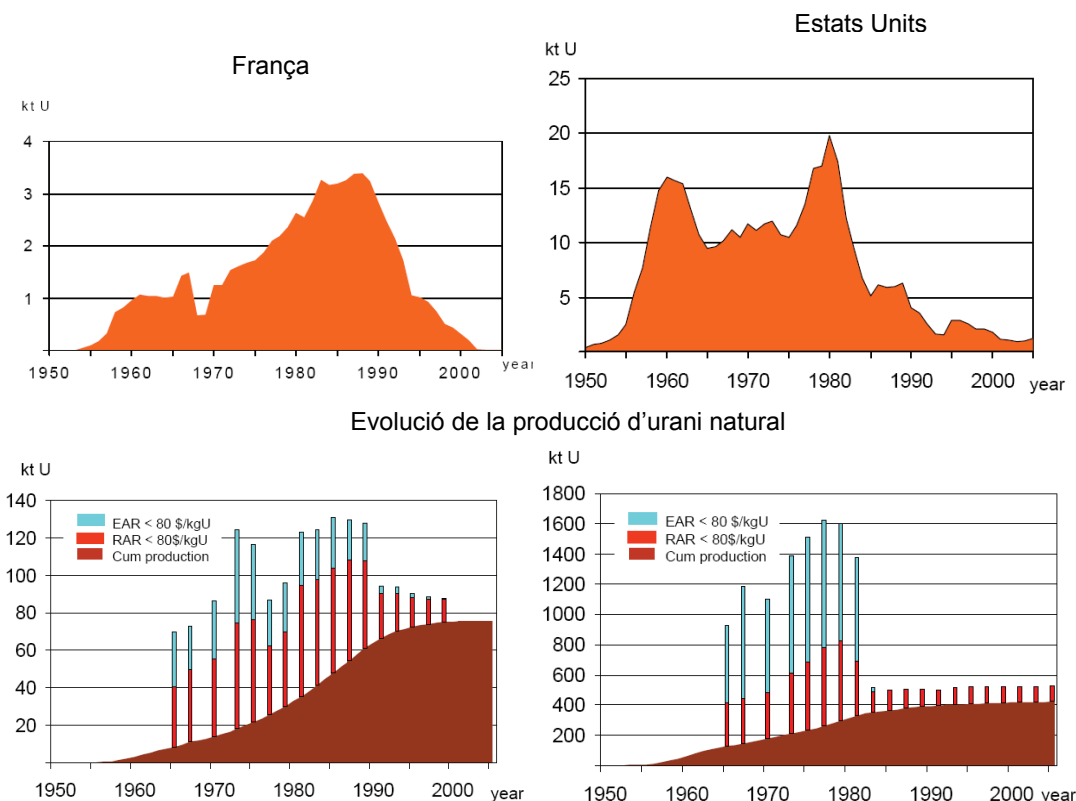


Figura 8.7. Evolució en el temps de les extraccions d'urani a França i els Estats Units i de les previsions de recursos d'urani de les successives edicions del *Red Book* de la IAEA-NEA. S'hi observa la forta correlació entre el declivi de la producció i la caiguda de les previsions. Font: [EWG-2006]

Mineria americana dels Estats Units

La producció comercial d'urani va començar el 1947 i va créixer ràpidament fins assolir un pic de 15 ktU_{nat}/any el 1960. En els anys posteriors (1960-1980), la producció d'urani pràcticament sempre superior a 10 ktU_{nat}/any, va arribar a un segon pic de 20 ktU_{nat}/any el 1980. A partir d'aleshores, comença un declivi pronunciat fins a xifres d'1 ktU_{nat}/any a partir de l'any 2000 (figura 8.7), tot i que darrerament s'insinua una petita repuntada.

Segons l'Energy Watch Group [EWG-2006], a final de 2005 els Estats Units havien extret unes 420 ktU_{nat} (el *Red Book 2007* n'assenyala unes 360 ktU_{nat}).

En ple auge productiu dels anys 1965-1980, la IAEA-NEA va sobrevalorar els recursos. El 1977, quan tot just s'havien extret 200 ktU_{nat} de les mines americanes d'urani, se n'estimaven uns recursos de 1.360 ktU_{nat} (RAR+EAR <80 \$/kg) o 1.800 ktU_{nat} (RAR+EAR <130\$/kg).

A partir del declivi de producció dels anys vuitanta, la IAEA-NEA rebaixa les expectatives dels Estats Units en més de 1.000 ktU_{nat}. El *Red Book 2007*, amb 361 ktU_{nat} ja extretes, situa els recursos RAR+IR <130 \$/kg dels Estats Units en 339 ktU_{nat}, i el *Red Book 2009* els rebaixa a 207 ktU_{nat}.

8.4. Consums i impactes de l'energia nuclear

El fisicoquímic holandès J.W. Storm van Leeuwen i el físic nuclear americà P.B. Smith van fer públic un estudi extens i documentat, titulat *Nuclear Power: the Energy Balance* [Sto-2007], que fa una anàlisi del cicle de vida de l'energia nuclear (que avui dia ha esdevingut una referència), on s'avaluen els costos energètics i les emissions de gasos d'efecte hivernacle del cicle complet de l'energia nuclear.

Taula 8.4. Energia invertida i emissions de CO₂ en una central nuclear tipus¹

Conceptes ²		Energia invertida		Emissions de CO ₂	
		PJ/vida	kJ/kW _e h	Tg/vida	g/kW _e h
1	Construcció de la central ³	80,00	371,25	5,00	23,20
2	Mineria + mòlta (G =0,15%, roca tova) ³	9,60	44,55	0,64	2,95
3	Preparació del combustible (<i>front-end</i>)	33,61	155,95	1,26	5,83
4	Operació + manteniment	84,60	392,59	5,25	24,37
	Operacions de producció (1+2+3+4)	207,81	964,34	12,14	56,34
5	Reclamació de mineria (restitució de l'entorn) ⁴	17,25	80,05	1,15	5,35
6	Residus de preparació combustible (<i>front-end</i>)	20,19	93,71	1,54	7,15
7	Tractament del combustible gastat (<i>back-end</i>)	13,93	64,65	1,05	4,85
8	Desmantellament de la central ³	120,00	556,87	7,50	34,80
	Operacions de restitució (5+6+7+8)	171,38	795,28	11,24	52,16
	Total	379,18	1.759,62	23,38	108,50

¹ Els paràmetres de la central tipus segons Storm & Smith són: potència, 1 GW_e; temps de funcionament a plena potència: 24,6 anys (la vida física de la central és més llarga); energia elèctrica total produïda: 215,5 TW_eh (o 775,8 PJ); urani consumit: 5.212 tU_{nat} (42,35 MW_eh/MgU_{nat})

² Els apartats sense anotació es consideren constants

³ Aquests valors presenten gran variabilitat. Storm i Smith en mostren el ventall següent: per a la construcció: 40-120 PJ/vida i 2,5-7,5 Tg/vida, i per al desmantellament: 80-140 PJ/vida i 7,5-17,5 Tg/vida.

⁴ L'energia consumida i les emissions de CO₂ depenen fortament del grau de la mena i del tipus de roca (tova, dura). En roques dures de grau G=0,013%, arribaria a ser en la mineria + mòlta de 519 PJ/vida i 13,6 Tg/vida, i en la restitució de l'entorn, de 349 PJ/vida i 26,2 Tg/vida.

Font: Storm & Smith [Sto-2007]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Certament, el treball de Storm & Smith és una anàlisi del cicle de vida amb un rigor que ja voldríem per a moltes altres fonts energètiques i activitats. Però, com els mateixos autors reconeixen, hi manquen moltes dades que hauria d'aportar el propi sistema nuclear.

En tot cas, se'n deriven les observacions següents:

1. L'energia nuclear no està exempta d'emissions de CO₂ (108,5 gCO₂/kW_eh), si bé són més baixes que en les centrals de gas (450 gCO₂/kW_eh) o en les de carbó (900 gCO₂/kW_eh).
2. Comptant tan sols l'energia de les *operacions de producció*, la taxa de retorn energètic TRE (o EROI) és de: 775,8/207,8 = **3,75** (força baixa).
3. Si també s'hi inclouen les *operacions de restitució*, l'energia invertida i les emissions de CO₂ pràcticament es dupliquen. El TRE baixa a 775,8/379,2 = **2,05** (al límit d'utilitat).
4. El grau de la mena d'urani i el tipus de roca poden ser decisius per a la viabilitat de les operacions de mineria, mòlta i restitució del medi, a mesura que s'exploten recursos d'urani cada vegada més pobres (vegeu el precipici d'energia a l'apartat següent).

Els límits de la mineria d'urani

L'urani natural es troba difós en moltes roques de l'escorça terrestre, com també en l'aigua de mar. Tot aquest urani proporcionaria recursos per a totes les centrals nuclears del món durant milers d'anys.

La taula 8.5 reproduïx les concentracions típiques d'urani en diversos medis, segons el document *Supply of Uranium 2010*, de la WNA <<http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>>. Nosaltres l'hem completada amb el càlcul de la massa de mineral que cal processar en cada cas per tal d'obtenir la càrrega anual d'un reactor nuclear d'1 GW_e (unes 180 tU_{nat} per any natural), suposant uns rendiments d'extracció decreixents a mesura que les menes (o medis) són menys concentrats.

Taula 8.5. Concentracions d'urani en diferents medis i material processat			
Tipus de medi	ppm ¹ d'U _{nat} de la mena	Rendiment de l'extracció	Tones de mena processada ²
Mena de grau molt elevat (Canadà), 20%	200.000	99%	910
Mena de grau elevat, 2%	20.000	98%	9.200
Mena de grau baix, 0,1%	1.000	91%	198.000
Mena de grau molt baix (Namíbia), 0,01%	100	50% ³	3.600.000
Granit	4 a 5	50% ³	80.000.000
Roques sedimentàries	2	50% ³	180.000.000
Escorça continental terrestre (mitjana)	2,8	50% ³	128.600.000
Aigua de mar	0,00334	50% ³	108.000.000.000
¹ ppm = parts per milió = 0,0001%. ² Per a l'obtenció de 180 tU, combustible per fer funcionar una central d'1GW _e durant un any. ³ Probablement, per a les concentracions indicades, els rendiments són menors que els consignats. Fonts: WNA [WNA-2010] i Storm & Smith [Sto-2007], part D. Elaboració: Carles Riba Romeva			

L'extracció de l'urani de l'escorça terrestre fins a obtenir el *yellow cake* (òxid d'urani U₃O₈ concentrat) requereix una seqüència de processos mecànics i químics que consumeixen quantitats importants d'energia i recursos, i emeten volums gens negligibles de gasos d'efecte hivernacle (taula 8.4). El *yellow cake* és la base per als processos posteriors d'enriquiment i de fabricació del combustible nuclear

En les mines de galeries subterrànies i a cel obert, cal excavar la roca que conté urani, i transportar-la fins al molí on és triturada i mòlta fins a convertir-la en pols. A partir d'aquí els compostos d'urani es dissolen amb àcid sulfúric i altres productes químics per separar-lo de la resta de materials no útils. Després, cal processar la solució per recuperar l'urani i eliminar els productes sobrants fins a obtenir finalment el *yellow cake*. En aquests processos, es produeix un gran volum de materials de rebuig (roques i terres sobrants, dissolvents, etc.), amb diversos graus de contaminació radioactiva que cal tractar.

En algunes mines de terrenys porosos, l'urani s'extreu per mitjà del procés de "dissolució *in situ*" (ISL, *in-situ leaching*; del 22% de la producció mundial el 1990, al 37% el 2009). Consisteix a injectar en el sòl determinats productes químics (àcid sulfúric diluït, peròxid d'hidrogen) i, després d'un temps de residència de diversos anys, es bomba la dissolució amb l'urani a través de pous de producció. A partir d'aquí, segueix un procés de concentració i precipitació que dona lloc al *yellow cake*. El procés ISL estalvia l'extracció i la mòlta de les roques, però té conseqüències ambientals molt greus en els sòls, les aigües subterrànies i els rius i llacs.

A diferència dels processos posteriors, la rendibilitat de la mineria d'urani depèn fortament del tipus i de la riquesa (o grau) de la mena que es parteix, especialment a causa dels volums de materials a processar i dels productes utilitzats.

No sense dificultats (a causa de la dispersió de les dades oficials), Storm i Smith estableixen una correlació entre el grau de les menes d'urani i el cost energètic i les emissions del seu cicle de vida ([Sto-2006]; [Sto-2007], part D), i mostren que, per sota d'un determinat llindar de riquesa, o grau (entre 0,015 o, al límit, 0,010%), de la mena d'urani, es produeix

una caiguda sobtada de l'energia neta ("precipici d'energia", *energy cliff*) per al conjunt del procés d'obtenció de l'electricitat nuclear, que pot arribar a zero.

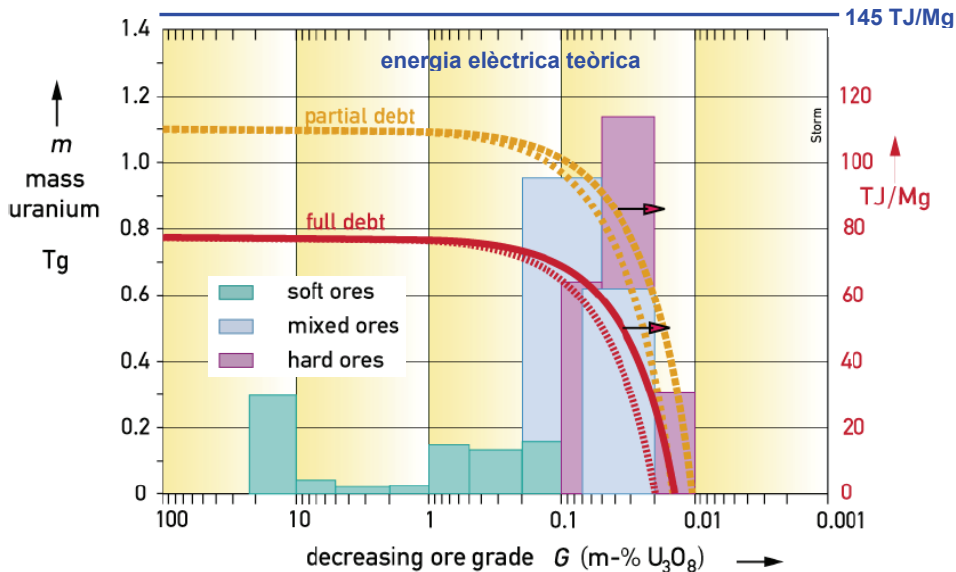


Figura 8.8. "Precipici d'energia" (*energy cliff*). El diagrama de barres mostra la distribució de recursos coneguts d'urani segons el grau (o riquesa) de la mena i el tipus de roca (tova, *soft*; mixta, *mixed*; dura, *hard*). L'amplada de cada barra és de l'interval de graus considerat i l'alçada, la quantitat de recurs conegut (escala de l'esquerra: 1 TgU_{nat} = 1.000 ktU_{nat}). A sobre s'hi han superposat les línies representatives del rendiment energètic (TJ/Mg = energia elèctrica obtinguda per massa d'U_{nat} utilitzada; escala de la dreta). Les línies grogues (superiors) indiquen el rendiment després de restar l'energia de les operacions de producció (deute parcial; *partial debt*); les línies vermelles (inferiors) detrauen, a més, l'energia de les operacions de restitució (deute total, *full debt*). El desdoblament d'aquestes línies respon a menes toves (la superior) i menes dures (la inferior). La línia recta blava superior correspon a l'energia elèctrica nominal que genera 1 Mg d'U_{nat} (sense deutes) **Font:** Storm & Smith [Sto-2006].

La figura 8.8 procedeix d'un treball-resum de Storm van Leeuwen publicat per l'Oxford Research Group [Sto-2006]. En aquesta figura, s'observa que la incidència de la riquesa (o grau) de la mena en el balanç d'energia (i també en les emissions de CO₂) és pràcticament constant per a valors superiors a 0,1%. Però, per a valors inferiors, la incidència de la mineria és cada cop més gran, fins al punt que el rendiment del sistema nuclear s'anul·la per a graus de la mena entre 0,02 i 0,01% (segons els casos), pràcticament amb independència de si es considera el deute parcial o total.

El *Red Book* classifica els diferents recursos d'urani segons els costos monetaris necessaris per a obtenir-los pressuposa que, amb increments successius de preu, es poden obtenir nous recursos, independentment del grau de la mena. Aquesta visió economicista obvia el fet que la *taxa de retorn energètic*, o TRE (en anglès EROI, *energy return over investment*) de qualsevol recurs energètic (no subvencionat) ha de ser superior a 1, és a dir, que l'energia que proporciona el recurs ha de ser clarament superior a l'energia que s'ha invertit per obtenir-lo.

Certament, un canvi favorable de tecnologia pot moure aquest límit i, sens dubte, això es donarà en el futur. Però el "precipici d'energia" és tan abrupte que difícilment el desplaçament serà molt significatiu. D'altra banda, Storm & Smith observen que el "precipici d'energia" marca, aproximadament, la frontera dels "recursos coneguts" pel *Red Book*.

Alguns exemples poden il·lustrar la visió anterior:

a) *Extracció d'urani del granit.* Com es mostra a la taula 8.5, pel cap baix cal remoure i processar uns 80 milions de tones de roca dura de granit per obtenir les 180 tones d'urani natural per fer funcionar una central nuclear d'1 GWe durant un any. Amb una densitat del granit de $2,7 \text{ Mg/m}^3$, i tal com indiquen Storm & Smith [Sto-2007], part D, això correspon a un volum de roca de 100×100 metres d'amplada i alçada per pràcticament 3 km de longitud.

b) *Extracció d'urani de l'aigua de mar.* La mateixa taula 8.5 mostra que, pel cap baix, caldria extreure l'urani de 108.000 Hm^3 d'aigua de mar per obtenir les 180 tones d'urani natural per fer funcionar una central nuclear d'1 GWe durant un any. Com a terme de comparació, el subministrament anual d'aigua d'una metròpoli com Barcelona és d'uns $400 \text{ Hm}^3/\text{any}$. Això sí, els $1.370.000.000 \text{ Hm}^3$ d'aigua marina dels oceans podrien proporcionar $4.575 \text{ ktU}_{\text{nat}}$, un valor proper als recursos *RAR + IR* consignats pel *Red Book*.

La mateixa energia s'obtidria amb 2,8 milions de tones de carbó!

Comentaris sobre els recursos d'urani i els seus impactes

1. Al ritme de consum actual (unes $65.000 \text{ tU}_{\text{nat}}/\text{any}$), els 5,47 milions de tones de “reserves conegudes” proporcionen combustible per a 84 anys, però només cobreixen el 5,08% de l'energia primària.
2. Històricament, el *Red Book* ajusta a la baixa les “reserves conegudes” dels països quan s'acosta l'exhauriment de les seves mines. Són els casos de França i els Estats Units.
3. Fora de les mines del Canadà (amb prop del 8% de les reserves mundials), pràcticament tots els “recursos coneguts” d'urani del món (*RAR+IR*) es troben en menes d'una riquesa inferior al 0,5%.
4. L'avaluació dels “recursos coneguts” d'urani segons paràmetres econòmics condueix a falses expectatives. Si el límit de les reserves es planteja en funció de la taxa de retorn energètic (*TRE* o *EROI*), aquest es troba en les menes de graus compresos entre 0,01 i 0,02%. És la conclusió que Storm & Smith presenten en forma del “precipici d'energia”.
5. L'anàlisi completa del cicle de vida mostra que l'energia nuclear no està exempta d'emissions de CO_2 (nominalment, uns $108 \text{ g/CO}_2/\text{kW}_e\text{h}$), si bé aquestes són clarament inferiors a les de les centrals tèrmiques de gas o de carbó. En tot cas, si s'exploten menes cada cop més pobres, en el límit del “precipici d'energia”, les emissions poden augmentar fins a equiparar-se a les d'una central elèctrica de gas.
6. Comptant tan sols les *operacions de producció* (deute parcial), la taxa de retorn energètic *TRE* (o *EROI*) és de 3,75 (molt baixa) i, si també s'hi inclouen les *operacions de restitució* (deute total), és de 2,05 (al límit de la utilitat).

8.5. Noves tecnologies nuclears

La tecnologia nuclear és molt complexa i poc compresa. Per tant, és bo descriure'n breument els principis i fenòmens abans de passar a valorar les afirmacions absolutament disparells dels defensors i dels detractors de les noves alternatives.

Transformacions nuclears

De forma general, els nuclis dels àtoms pesants (més enllà del plom, de nombre atòmic 82) són inestables i, a través de la *radioactivitat* o de la *fissió nuclear*, tendeixen a transformar-se progressivament en nuclis més petits i més estables. A l'altre extrem, els nuclis atòmics més petits (hidrogen, heli i liti) en condicions extremes d'excitació, s'uneixen entre sí i donen lloc a nuclis més grans (*fusió nuclear*). També hi ha altres transformacions nuclears induïdes per la col·lisió de partícules, especialment de neutrons.

Les transformacions més freqüents que tenen incidència en l'energia nuclear són:

Radioactivitat (o desintegració radioactiva)

Transformació espontània de determinades substàncies (*radioisòtops*) en nuclis atòmics més estables, desprenent energia i massa en forma de *partícules α* (nucli d'heli), *partícules β* (electrons o positrons) i *partícules γ* (radiacions electromagnètiques d'energia molt elevada).

Els efectes de la radioactivitat sobre els éssers vius són complexos i diversos, i es mesuren a través d'una unitat ponderada anomenada *sievert*. La radioactivitat decau exponencialment en el temps i la seva perduració es mesura a través del *període de semidesintegració*, és a dir, el temps que triga a desintegrar-se la meitat dels nuclis radioactius.

Les radiacions α i β són relativament poc perilloses fora dels cossos vius, però extraordinàriament perilloses quan s'inhalen en forma de partícules radioactives (per exemple, la ingestió d'un sol mil·lígram de plutoni resulta letal, i el temps de semidesintegració és de 24.220 anys). Les radiacions γ són difícils de neutralitzar i sempre són perniciososes.

Tant el combustible com els diferents residus del cicle nuclear són radioactius, classificats segons diverses categories:

1. *Residus d'alta activitat* (HLW, *high-level waste*): combustible gastat, residus de reprocessament, materials irradiats derivats de la fabricació de bombes. Contenen productes de fissió i transurànids, que acumulen el 95% de la radioactivitat del cicle nuclear, i són molt difícils d'eliminar. Tal com afirma l'estudi [MIT-2003], "avui, 40 anys després d'entrar en servei les primeres centrals nuclears, cap país no ha aconseguit eliminar els residus nuclears d'alta activitat".

2. *Residus d'activitat mitjana* (ILW, *intermediate-level waste*), i 3. *Residus de baixa activitat* (LLW, *low-level waste*). Aquestes dues categories, de perfils imprecisos, abasten el 95% del volum dels residus del cicle nuclear (rebuig de les mines, restes de la mòlta, urani empobrit de l'enriquiment, materials contaminats de la planta o del seu desmantellament) i també requereixen un tractament adequat.

Transmutació per absorció de neutrons

Determinats nuclis atòmics, bombardejats per un neutró, es transmuten en altres elements. Aquest és el cas d'alguns isòtops no fissibles (urani U238 i tori Th232, denominats fèrtils), que es transmuten en isòtops fissibles (plutoni Pu239 i urani U233, respectivament).

Aquestes reaccions tenen una controvertida incidència en el futur de l'energia nuclear a través de la tecnologia dels reactors reproductors.

Fissió nuclear

Reacció nuclear originada per la col·lisió d'un neutró sobre un nucli atòmic pesant inestable (fissible), el qual es divideix normalment en dos nuclis més lleugers tot emetent altres subproductes (normalment de 2 a 3 neutrons i radiació β i γ) i allibera una gran quantitat d'energia (de l'ordre de 200 MeV per àtom).

Les reaccions bàsiques dels reactors nuclears són la fissió de l'urani U235; en menor mesura la del plutoni Pu239, i eventualment, també la de l'urani U233.

Fusió nuclear

Reacció nuclear entre dos nuclis atòmics lleugers (per exemple, el deuteri i el triti) per formar un nucli més pesant i estable (l'heli, en l'exemple). La reacció de fusió s'acompanya de l'emissió de partícules (un neutró) i d'una quantitat ingent d'energia.

És la reacció nuclear pròpia de les estrelles i el sol i de la futura energia nuclear de fusió.

Reactors cremadors i reactors reproductors

L'objectiu dels reactors nuclears és efectuar una reacció controlada de fissió en cadena i aprofitar l'energia tèrmica per generar electricitat. Per aconseguir-ho, s'han plantejat els dos enfocaments que s'expliquen a continuació. Si bé pràcticament totes les centrals d'avui dia corresponen al primer enfocament, el segon s'ha postulat com una solució de futur.

Reactors cremadors. Utilitzen el combustible d'urani U235 (natural o lleugerament enriquit fins de 3 a 5%) un sol cop (*once through*), en cicle obert. Després d'un temps, és renovat per parts (les recàrregues). La immensa majoria dels reactors actuals són del tipus cremador i usen urani U235 com a combustible (PWR, BWR, PHWR, CGR i LWGR). Els neutrons lents (*neutrons tèrmics*) fan molt més eficient aquesta reacció de fissió. Cal, doncs, un element *moderador* per disminuir la velocitat dels neutrons ràpids provinents de les fissions. També poden cremar combustibles reciclats (MOX, vegeu més endavant).

Reactors reproductors. Reactors que, alhora que generen calor de la fissió d'isòtops fissibles (urani U235, plutoni Pu239, urani U233, o mesclades d'ells), utilitzen els neutrons de fissió sobrants per transformar part de l'abundant urani U238 fèrtil en plutoni Pu239 fissible (que així es transforma en nou combustible), o del tori natural Th232 fèrtil en urani U233 fissible. D'aquí ve el nom de *reproductors*. La transmutació d'U238 a Pu239 (el cas més freqüent) és més eficaç si s'utilitzen *neutrons ràpids* (provinents directament de la fissió, sense moderar). Són els *reactors reproductors ràpids* (FBR) i són defensats com una de les principals esperances de futur.

A fi d'evitar l'efecte de "massa crítica" (que podria desencadenar una reacció nuclear en cadena no controlada), el combustible (urani natural, urani enriquit o MOX) es disposa en el si del reactor en forma de múltiples barres paral·leles espaiades (en alguns casos, en forma d'amuntegament de boles), entre les quals se situen el *moderador* i les *barres de control*, alhora que s'hi fa circular el fluid de treball (el *refrigerador*). Els moderadors més usats són l'aigua lleugera, l'aigua pesada (deuteri D, enlloc d'hidrogen H) i el grafit; els fluids de treball solen ser la pròpia *aigua lleugera* o *aigua pesada* i, en altres casos, un *gas* (generalment, CO₂); en els reactors reproductors, s'usen certs metalls líquids (normalment, sodi líquid; més rarament, plom líquid) de bones propietats tèrmiques però que no tenen efecte moderador. Les barres de control solen ser de cadmi o d'acer borat.

En la tecnologia de reactors nuclears, se sol parlar de generacions. Els reactors de la *generació I*, construïts en les dècades de 1950 i 1960, eren prototipus de baixa potència. Els reactors de la *generació II*, construïts entre els anys 1970 i 1990, corresponen al gruix dels reactors comercials avui dia en funcionament (PWR i BWR, CANDU, LWGR). Els reactors de la *generació III* corresponen als reactors nuclears actuals i dels propers anys, amb dissenys millorats respecte a la generació II. Més endavant es parla de la *generació IV* i del grup promotor GIF.

Cicle obert del combustible nuclear. Reactors cremadors

Avui dia, la gran majoria de les centrals nuclears funcionen en *cicle obert*, és a dir, fan un sol ús del combustible nuclear (*once through*), de manera que, una vegada cremat, el combustible gastat es considera un residu.

Quan el combustible gastat s'extreu del reactor, s'introdueix en unes piscines annexes a la pròpia central, on es refreda i on la radioactivitat decau durant anys. Una part molt important del combustible gastat encara és a les piscines en espera d'un tractament adequat i d'una eliminació definitiva. Precisament, els problemes d'eliminació dels materials d'activitat radioactiva elevada del combustible gastat, junt amb les oportunitats de recuperar part del combustible romanent, són les motivacions principals de les estratègies de reprocessament.

Taula 8.6. Reactors nuclears, característiques i nombre

Característiques	Tipus de reactor nuclear					
	PWR ¹ (VVER)	BWR ² (ABWR)	PHWR ³ (Candu)	GCR/AGR ⁴ (Magnox)	LWGR ⁵ (RBMK)	FBR ⁶
Combustible	urani enriquit	urani enriquit	urani natural	urani natural o enriquit	urani enriquit	PuO ₂ /UO ₂
Refrigerant Generació de vapor	H ₂ O indirecte	H ₂ O directe	DO ₂ indirecte	CO ₂ indirecte	H ₂ O directe	Sodi líquid indirecte
Moderador	H ₂ O	H ₂ O	DO ₂	grafit	grafit	no
Parc mundial	IAEA, 2009: 437 en funcionament, 55 en construcció, 125 de retirats ¹					
En funcionament	265	92	45	18	15	2
En construcció	46	3	3	0	1	2
Retirats	34	23	5	42	9	7
Total	343	120	58	60	25	11
Principals països	EUA, França, Japó, Corea Sud, Rússia	EUA, Japó, Suècia	Canadà, Índia	Regne Unit	Rússia	Japó, Rússia

¹ Tipus de reactor d'origen americà. És el més freqüent: EUA (69), França (58), Japó (24), Corea del Sud (16), Rússia (15), Ucraïna (15), Alemanya (11), Xina (9), Bèlgica (7), Espanya (6), República Txeca (6). I, també, on se centren les noves construccions: Xina (20), Rússia (7), Corea del Sud (6).

² Segon el tipus de reactor més freqüent: EUA (35), Japó (30), Suècia (7) i Alemanya (6). Però s'inicien poques construccions noves (3).

³ Reactor de tecnologia canadenc. Es concentren al Canadà (22) i també a l'Índia (17).

⁴ Tipus de reactor que s'ha concentrat al Regne Unit (18). Se n'han retirat 42: Regne Unit (24), França (9).

⁵ Reactor de tecnologia russa (15). Els que van ser retirats de Txernòbil, Ucraïna (4) i Lituània (2) eren d'aquest tipus.

⁶ Reactor reproductor d'electrons ràpids. N'hi ha tan sols 2 d'actius (Beloyarski-3, a Rússia, en funcionament, i Monju, al Japó, en aturada de llarga durada); n'hi ha dos més en construcció (Beloyarski-4, a Rússia; PFBR a l'Índia) i set de retirats (1 a Alemanya, 1 als EUA, 2 a França, 1 al Kazakhstan i 2 al Regne Unit).

⁷ Entre els retirats, n'hi ha tres que no entren en les classificacions citades.

Font: IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World*, 2010. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Principals tipus de reactor nuclear cremador:

Reactors d'aigua lleugera (LWR, *light water reactor*). Reactors nuclears cremadors que usen aigua lleugera (H₂O) alhora com a moderador i com a refrigerant, i urani enriquit al 3 al 5% d'U235 com a combustible. N'hi ha dos tipus bàsics (PWR i BWR) i constitueixen la gran majoria dels reactors en funcionament i en construcció.

Reactors d'aigua lleugera a pressió (PWR, *pressurised water reactor*, VVER en la versió soviètica). Reactors d'aigua lleugera, on l'aigua es manté líquida en el vas a uns 325 °C gràcies a l'elevada pressió (més de 150 bar) creada per unes bombes. La calor del circuit primari (aigua contaminada provinent del vas del reactor) es transfereix a través d'un intercanviador a un circuit secundari, on es genera el vapor que mou les turbines. Comporten costos de construcció elevats, però el seu manteniment és senzill i segur. L'accident de Three Miles Island, als Estats Units el 1979, va fondre parcialment el nucli del reactor PWR, però sense greus conseqüències externes. Són els reactors nuclears més difosos.

Reactors d'aigua lleugera en ebullició (BWR, *boiling water reactor*). Reactors d'aigua lleugera a pressió més moderada (uns 75 bar). L'aigua del vas del reactor genera directament el vapor que mou les turbines. La construcció és més barata (pressió menor, un sol circuit d'aigua) i se n'obté més eficiència tèrmica, però la seguretat és menor i el manteniment és més delicat, ja que el vapor de la turbina està contaminat. És el segon tipus de reactor nuclear més difós. Els de Fukushima són del tipus BWR.

Reactors d'aigua pesada a pressió (PHWR, *pressurised heavy water reactor*, o CANDU, *Canadian-deuterium-uranium*). Reactors nuclears cremadors de tecnologia canadencs en què les barres de combustible estan disposades en tubs a pressió horitzontals i de doble paret, refrigerats individualment amb aigua pesada a pressió (D_2O , el deuteri substitueix l'hidrogen), disposats en el si d'un gran dipòsit anomenat *calàndria*, també amb aigua pesada. Atès que l'aigua pesant modera com la lleugera però absorbeix menys neutrons, aquests reactors poden cremar directament urani natural (eviten així el costós enriquiment, tot i que l'aigua pesant és més cara d'obtenir) i aprofiten millor el combustible. Tenen la particularitat que es poden recarregar sense aturar el reactor. Són els reactors nuclears que formen els parcs nuclears del Canadà i de l'Índia, entre altres.

Reactors refredats per gas (GCR, *gas cooled reactor*, i AGR, *advanced gas cooled reactor*). Aquests reactors nuclears cremadors usen CO_2 a 40 bars i $500^\circ C$ com a refrigerant, i grafit com a moderador. L'ús del grafit com a moderador (menys absorbent de neutrons que l'aigua lleugera) permet cremar urani natural (els GCR) i urani poc enriquit (els AGR), però és menys segur. El vas d'acer és molt gran ja que la densitat de potència del nucli és molt baixa i, està sotmès a una gran pressió. És una tecnologia usada fonamentalment al Regne Unit (per exemple, en els reactors Magnox).

Reactors d'aigua lleugera amb grafit (LWGR, *light water graphite reactor*, també coneguts per RBMK). Reactors cremadors soviètics de doble tecnologia militar i civil. El combustible d'urani enriquit es troba a l'interior de tubs a pressió verticals per on circula aigua lleugera en ebullició com a refrigerant en el si d'una massa de grafit que actua com a moderador. Aquesta disposició facilita l'accés sovintejat a cada barra de combustible sense aturar el reactor per extreure'n el plutoni abans que no es contaminin. Tenen els defectes dels reactors amb moderador de grafit i, a més, no disposen de contenció de formigó. És el tipus de reactor que va experimentar el gravíssim accident de Txernòbil l'any 1986, amb l'explosió del nucli (de naturalesa química, no nuclear) i l'expulsió descontrolada del material radioactiu, amb la conseqüència de nombroses morts per radiació i una greu contaminació ambiental que ha obligat a mantenir una gran superfície de territori desallotjada. Els reactors d'aquest tipus han estat retirats d'Ucraïna (4) i de Lituània (2), però no els 15 que encara operen a Rússia.

Tots els nuclis dels reactors es veuen sotmesos a un bombardeig intens de neutrons i a una radioactivitat extremament elevada durant anys, que dona lloc a fenòmens d'envelliment dels materials i de fragilització de l'acer dels vasos o dels tubs a pressió per on circula el refrigerant (aigua, aigua pesant o gas), sotmesos a pressions i temperatures elevades. Per això les centrals nuclears tenen data de caducitat. Amb els anys, les reparacions es fan cada cop més freqüents, el rendiment de les instal·lacions baixa i el risc d'accident per fugues o ruptures (fins i tot catastròfiques) augmenta.

D'altra banda, en les centrals nuclears on l'aigua, o l'aigua lleugera, fan alhora de moderador i de refrigerant, si el refrigerant falla (fugues, formació de bombolles, fallada de les bombes), la temperatura es pot elevar puntualment moltíssim i fins i tot fondre part del nucli, però la reacció nuclear decau immediatament ja que també falla el moderador, com va succeir en l'accident de Three Mile Island (reactor de tipus PWR).

No passa el mateix en els reactors en què el moderador és grafit ja que, en cas de fallada, aquest sol restar. Si el refrigerant que falla és aigua lleugera (absorbent de neutrons), fins i tot la reactivitat nuclear pot augmentar en romandre més neutrons. A més, la gran massa de grafit presenta un risc potencial d'incendi de grans dimensions, com va esdevenir en l'accident de Txernòbil (reactor de tipus LWGR).

Cicle tancat del combustible nuclear. Reprocessament i reproducció

Hi ha diversos motius que porten a plantejar estratègies de cicle tancat, és a dir, a considerar el tractament i/o la reutilització del combustible nuclear gastat, de l'urani empobrit (residu de l'enriquiment) o dels materials fissibles dels arsenals militars i civils.

A) Augmentar la rendibilitat dels recursos nuclears

1. Aprofitant l'urani U235 residual (< de 1%) i el plutoni Pu239 generat (lleugerament > 1%) presents en el combustible gastat (*estratègia del reprocessament*).
2. Donant sortida a les grans quantitats d'urani U238 fèril (actualment un residu), present tant en el combustible gastat com en l'urani empobrit, transmutant-lo en plutoni Pu239 fissible (*estratègia reproductora de neutrons ràpids*).
3. I donant utilitat al tori Th232 fèril, relativament abundant a la naturalesa, transmutant-lo en urani U233 fissible (*estratègia reproductora de neutrons lents*, o tèrmics).

B) Col·laborar en el tractament dels residus nuclears d'alta activitat

El combustible gastat de les centrals nuclears conté prop d'un 3% de productes de fissió (altament radioactius, però de vida mitjana no gaire llarga, de diversos centenars d'anys) i una petita fracció de transurànics (de radioactivitat lleugerament menor, però molt més persistents en el temps, desenes de milers d'anys).

Els futurs *reactors ràpids* (d'electrons ràpids) podrien "cremar", junt amb el combustible nuclear, una bona part dels transurànics més persistents.

C) Col·laborar a disminuir els arsenals militars i civils

Després de la desenfrenada carrera d'armaments durant els primers anys de la Guerra Freda, l'any 1987 els EUA i l'URSS van signar els primers tractats de desmantellament que es comprometien a reduir els arsenals militars en un 80%.

Partint de *Red Book 2007*, i encreuant dades de diverses fonts (entre elles, WNA), Dittmar [Dit-2009] fa el balanç següent sobre els recursos d'urani produïts i consumits des de l'inici i sobre els estocs civils i militars el 2008 (en tones equivalents d'urani natural):

Taula 8.7. Balanç global dels combustibles nuclears l'any 2008				
	Urani produït (fins al 2008)	Urani consumit (fins al 2008)	Estocs civils (2008)	Estocs militars i armes (2008)
	equiv. a tU _{nat}	equiv. a tU _{nat}	equiv. a tU _{nat}	equiv. a tU _{nat}
Món	2.410.000¹	1.820.000¹	50.000	540.000
Països de l'OCDE (EUA, Regne Unit, França)			27.000	230.000
Països de l'antiga URSS			23.000	310.000
¹ S'han arrodonit les xifres per tal que sumin. Font: M. Dittmar [Dit-2009]				

Com és sabut, les necessitats d'urani (de 65.000 a 70.000 tU_{nat}/any) per alimentar les centrals nuclears del món han provingut, els darrers anys, en 2/3 parts de la mineria i en 1/3 part dels estocs civils i militars, especialment de l'antiga URSS.

Reprocessament

En un reactor nuclear cal renovar periòdicament el combustible (les recàrregues) a causa de la presència creixent de productes de fissió que absorbeixen neutrons (entre ells, el xenon Xe135), que acabarien detenint la reacció en cadena fins i tot sense les barres de control. Però, a més de residus no desitjats, el combustible gastat encara conté urani U235 fissible (de 0,3 a 0,8%) i plutoni fruit de la transmutació de l'urani U238 (poc més de 1%).

El reprocessament té per objectiu primari aprofitar aquests materials fissibles, que poden proporcionar fins a un 25% d'energia suplementària. Entre les estratègies de reprocessament destaquen: PUREX (*plutonium uranium extraction*, la més utilitzada avui dia en les plantes de reprocessament), on l'urani i el plutoni de forma separada s'extreuen, o UREX (*uranium extraction*), on el plutoni que roman en el residu no és apte per a aplicacions militars.

La forma habitual d'utilitzar els materials reprocessats és transformar-los en MOX (*mixed oxids*, una mescla d'òxid d'urani i de plutoni). Uns 40 reactors al món (menys del 10%;

entre ells, el reactor 3 de Fukushima) tenen llicència per operar amb aquest combustible. La producció de MOX (escassament al 2% del combustible nuclear mundial) es concentra a França i el seu consum es localitza bàsicament a França i Alemanya (taula 8.8).

Taula 8.8. Producció i consum mundial de MOX		
Any	Producció	Consum
2004	1.211 ¹ tones equivalents d' U_{nat}	1.323 ² tones equivalents d' U_{nat}
2005	1.171 ¹ tones equivalents d' U_{nat}	620 ³ tones equivalents d' U_{nat}
2006	1.188 ¹ tones equivalents d' U_{nat}	513 ³ tones equivalents d' U_{nat}
2007 (prev.)	1.180 ¹ tones equivalents d' U_{nat}	269 ³ tones equivalents d' U_{nat}
¹ La producció de França oscil·la entre 1.110 i 1.160 tones equivalents d' U_{nat} . ² Els consums d'Alemanya i França són de 480 i 800 tones equivalents d' U_{nat} . ³ Falta el consum de França (el 2004 havia estat de 800 tones equivalents d' U_{nat}) Font: IAEA-NEA, <i>Red Book 2007</i> [IAEA-RB-2007]		

Reactors reproductors

L'objectiu dels reactors reproductors és, després d'un temps de funcionament, reproduir (per transmutació) el doble del combustible utilitzat (efecte reproductor), ja sigui a partir de l'urani U238 o del tori Th232 (no fissibles però abundants). D'aquesta manera, la disponibilitat mundial de combustible nuclear de fissió s'allargaria diversos milers d'anys.

El material fissible (U235, Pu239, U233, o combinacions, segons els casos) es disposa en el nucli (*core*) d'aquests reactors i irradia el mantell que l'envolta (*blanket*), format per material fèrtil (U238 en forma d'urani empobrit, o Th232). Cada cert temps cal extreure el mantell i reprocessar-lo en plantes especials per tal d'obtenir-ne el plutoni Pu239 o l'urani U233 que s'usarà com a nou combustible.

La funció reproductora es mesura pel *temps de duplicació* (temps de funcionament per duplicar el combustible inicial). Això permetria continuar el funcionament del reactor i engegar-ne un de nou. Doncs bé, la duplicació no s'ha aconseguit mai en cap reactor i, per extrapolar de dades experimentals, s'estimen temps entre 25 i 40 anys.

Cal tenir en compte que tots els reactors cremadors produeixen un cert "efecte reproductor" en transformar una petita quantitat d'urani U238 en Pu239 que, en part, es fissiona i proporciona fins a un 30% de l'energia tèrmica, que el reactor aprofita per generar electricitat. Alguns reactors reproductors (per exemple, el rus BN-600) funcionen cremant més combustible que no en generen, però milloren el seu rendiment.

Reactors reproductors ràpids (FBR, *fast breeder reactor*).

La transmutació de l'urani fèrtil U238 en plutoni Pu239 fissil és molt més eficient amb neutrons ràpids (no moderats), però la reacció de fissió resulta més difícil. A igual potència, té l'inconvenient que requereix una quantitat molt més gran de combustible adequat (plutoni Pu239 i/o urani U235 enriquit al 20%) i crea una densitat energètica elevada en el nucli que necessita un refrigerant molt eficient.

L'aigua s'exclou com a refrigerant (efecte moderador i baixa eficiència tèrmica). El més usat en aquests reactors és el sodi líquid, molt eficient tèrmicament (de 500 a 550°C operant a pressió molt baixa), però té el greu inconvenient que reacciona violentament amb l'aigua i s'incendia en contacte amb l'aire. De fet, la major part dels nombrosos accidents i la baixa disponibilitat d'aquests reactors es deu a problemes amb el sodi.

Els països capdavaners en tecnologia nuclear (EUA, Regne Unit, URSS, França, Alemanya) fa molt temps que dediquen importantíssims recursos econòmics a desenvolupar la tecnologia dels reactors reproductors ràpids [Dit-2009]. Tanmateix, s'han trobat amb considerables dificultats tècniques i econòmiques (accidents amb el sodi, corrosió en els materials, costos molt elevats, baixa disponibilitat, escassa generació de material fissible), tant en els reactors experimentals com en els comercials ressenyats a la taula 8.9. Això han fet que desistissin de continuar per aquest camí.

Taula 8.9. Història dels reactors reproductors ràpids FBR				
Reactor	País	Potència (MWe)	Connexió (anys de construcció)	Desconnexió (anys de funcion.)
Retirats				
Dounreay DFR	Regne Unit	11	1962 (7)	1977 (15)
Enrico Fermi I	EUA	61	1966 (10)	1972 (6)
BN-350	Kazakhstan (URSS)	52	1973 (9)	1999 (26)
Phénix	França	130	1973 (5)	2009 (36)
Dounreay PFR	Regne Unit	234	1975 (9)	1994 (19)
KNK II	Alemanya	17	1978 (5)	1991 (13)
Superphénix	França	1.200	1986 (10)	1998 (12)
Actius				
BN-600	Rússia	560	1980 (11)	(2010?)
Monju ¹	Japó	246	1986 (10)	
En construcció				
BN-800	Índia	470	20xx? (>6?)	(?)
BN-800	Rússia	804	2013? (5?)	(?)
¹ Reactor en aturada de llarga durada des de 1995, després d'un accident amb el sodi. Reconexió prevista per a final del 2009. Font: IAEA, <i>Nuclear Power Reactors in the World</i> , 2010. Elaboració: Carles Riba Romeva				

Reactors reproductors lents

La transmutació del tori Th232 fèrtil en urani U233 fissible té més bon rendiment amb neutrons lents (moderats), fet que facilita la utilització de reactors convencionals (amb algunes adaptacions) per tal d'assajar aquesta tecnologia.

A partir de l'any 1977, el reactor americà de Shippingport (del tipus PWR) va fer una experiència sobre el cicle del tori. Després de cinc anys, el combustible resultant s'havia incrementat per un factor d'1,013 (lluny de la reproducció).

L'Índia, que disposa de recursos escassos d'urani i abundants de tori, s'ha centrat en el desenvolupament del cicle del tori amb reactors d'aigua pesada del tipus PHWR (o CANDU) i un centre de reprocessament de combustible derivat del tori. Caldrà veure com evoluciona aquesta experiència.

GIF (Generation IV International Forum)

L'any 2000, es forma el grup promotor de la generació IV de reactors nuclears anomenat *Generation IV International Forum* (GIF), on participen deu països (Àfrica del Sud, Argentina, Brasil, Canadà, Corea del Sud, EUA, França, Japó, Regne Unit i Suïssa), a més de la Unió Europea. El seu objectiu és impulsar una nova generació de tecnologia nuclear i, en concret, desenvolupar els reactors nuclears dels anys 2010 a 2030.

El 2003, el GIF selecciona sis tipus de futurs reactors nuclears (molts d'ells encara no avalats per prototipus experimentals), amb uns objectius comuns: reutilitzar el combustible nuclear, generar menys residus nuclears d'alta activitat, augmentar la seguretat passiva i disminuir el temps de construcció. Aquests són: tres tipus de reactors ràpids, de sodi (*sodium-cooled fast reactor*, SFR), de plom (*lead-cooled fast reactor*, LFR) i de gas (*gas-cooled fast reactor*, GFR); el reactor supercrític d'aigua (*supercritical-water reactor*, SCWR); el reactor de sals foses (*molten salt reactor*, MSR), i el reactor de molt alta temperatura (*very-high-temperature reactor*, VHTR).

En el moment de la seva constitució formal (2002), i en l'escenari més optimista, el GIF preveia que cap d'aquestes tecnologies no seria operativa abans de l'any 2030. I, en els vuit anys que han transcorregut des d'aleshores, sembla que no s'ha produït cap avenç substancial.

L'esperança en la fusió nuclear

La gran esperança (o il·lusió) futura de l'energia nuclear és el desenvolupament de la *fusió nuclear*, és a dir, la unió de nuclis lleugers per formar un nucli més gran. En concret, la unió dels isòtops de l'hidrogen, *deuteri* i *triti*, per formar *heli* amb l'emissió d'un neutró i l'alliberament d'una quantitat ingent d'energia (17,5 eV per a una massa atòmica inicial de 5, unes quatre vegades més que la fissió). Fins ara, aquesta energia pròpia de les estrelles i del Sol, només s'havia utilitzat per fabricar la bomba H (o bomba termonuclear que combina la fissió amb la fusió), molt més potent que les bombes A de fissió.

El control de la fusió nuclear és molt més difícil que el de la fissió nuclear, ja que cal una temperatura d'uns 15 milions de °C per vèncer la repulsió electromagnètica entre els nuclis per desencadenar la reacció nuclear. Els problemes que la fusió nuclear ha de resoldre per esdevenir una energia comercial són enormes. Entre ells hi ha l'inici i el manteniment de la reacció de fusió, el confinament del medi reactiu a una temperatura elevadíssima, el desenvolupament de materials constructius adequats, l'extracció de la calor i el subministrament i la manipulació del triti. Tant és així que cada vegada més científics arriben a la conclusió que l'energia de fusió comercial no serà mai una realitat.

Tanmateix, i amb un esforç econòmic descomunal, el desenvolupament de l'energia de fusió nuclear es canalitza a través del projecte ITER (*International thermonuclear experimental reactor*, reactor experimental termonuclear internacional) en el que participen la Unió Europea, els Estats Units, la Xina, l'Índia, el Japó, Rússia i Corea del Sud, i que té per objectiu demostrar la factibilitat científica i tecnològica dels reactors de fusió nuclear a gran escala.

Després d'un disputat concurs internacional, s'està construint una planta pilot del tipus tokamak a Cadarache (França) i s'espera que els treballs s'acabin el 2017, però, com explica molt bé el propi Web de l'ITER (<http://www.iter.org/PROJ/Pages/ITERAndBeyond.aspx>), aquesta construcció no és un fi en si mateixa, sinó el pont vers una primera planta de demostració per assajar la generació a gran escala d'energia elèctrica i la producció de combustible de triti. El seu disseny conceptual finalitzaria el 2017 i la seva construcció conduiria a l'era industrial de la fusió nuclear cap a la dècada de 2030. En cas d'èxit, l'energia elèctrica procedent de la fusió podria ser una realitat a la xarxa en la dècada següent (2040).

Encara que fos així, massa tard! Molt abans haurà començat el declivi del petroli i caldrà canviar de paradigma energètic i de desenvolupament.

Comentaris sobre les tecnologies nuclears i l'explotació dels recursos

1. Els estocs civils i militars de combustible nuclear poden continuar cobrint una part del consum mundial (el darrer any ha disminuït al 25%). Tanmateix, són de l'ordre d'1/10 de les reserves d'urani natural i estan sotmesos a les incerteses de les relacions geopolítiques. Poden ser una solució transitòria, especialment per als dos països que en tenen la immensa majoria dels estocs: els Estats Units i Rússia.
2. La producció de combustible reprocessat és menys del 2% del consum mundial. El reprocessament resulta costós, requereix temps i també origina residus.
3. Ni l'urani U238 ni el tori Th232 són fissibles i, per tant, no poden posar en marxa una central nuclear: abans cal transmutar-los en plutoni Pu239 i urani U233, però l'estratègia dels reactors reproductors no ha funcionat fins ara. Els resultats obtinguts no en justifiquen els costos elevats, la manca de seguretat i un nivell de disponibilitat molt baix.
4. En cas d'èxit, els reactors de la generació IV no començaran a ser operatius fins d'aquí a dues dècades. I la fusió nuclear, si és viable, no veurà la llum, com a mínim, fins dintre de tres dècades. Massa enllà per cobrir el desabastiment energètic que el declivi del petroli pot causar.

9. Noves fonts d'energia renovable

9.1. Els recursos naturals renovables

Són aquells recursos primaris (obtinguts directament de la natura) subministrats de forma contínua o que poden ser reemplaçats ràpidament per processos naturals en un temps breu, en comparació de la vida humana. En el cas de l'energia renovable, són la radiació solar, la biomassa, la força animal (o humana), el vent, la pluja i els corrents d'aigua, les ones del mar, els corrents marins, l'energia geotèrmica i l'energia de les marees. Fora d'aquestes dues darreres, la resta provenen directament o indirectament del Sol.

Fins a final del segle XVIII, abans de l'explotació dels combustibles fòssils, les civilitzacions humanes s'havien basat necessàriament en les energies renovables. I, quan alguna d'elles consumia els recursos a ritme més ràpid que la seva regeneració (especialment pel que fa a la biomassa i els sòls), les civilitzacions desapareixien o emigraven cap a emplaçaments més favorables o no explotats.

La situació d'avui dia és nova. És el conjunt de la humanitat, amb una població que voreja els 7.000 milions d'habitants, que explota el conjunt dels recursos de la Terra (especialment, els energètics) a un ritme per damunt de la seva sostenibilitat i que ja no pot anar a cercar altres zones verges més favorables on instal·lar-se, que ja no té escapatòria perquè aquests nous recursos ja no hi són. En tot cas, només ho podran fer algunes petites comunitats privilegiades, però no tota la humanitat.

L'*empremta ecològica* (o *petjada ecològica*) és un índex per mesurar el nivell de sostenibilitat d'una societat. Compara la demanda humana de recursos naturals (superfície de terra productiva necessària per generar els recursos que la població humana consumeix i per absorbir i fer innocus els residus corresponents) amb la capacitat de la biosfera per regenerar-los, i es mesura en hectàrees de superfície per habitant (ha/hab). L'empremta ecològica varia enormement d'un país a un altre, però el més significatiu és que, a escala global, hem sobrepassat la càrrega de la Terra i el 2006 ja eren necessàries 1,4 Terres.

L'energia que rebem del Sol

La superfície de la Terra, on vivim, rep constantment energia, fonamentalment de tres fonts que, a efectes de la durada de les nostres civilitzacions humanes, són pràcticament inexhauribles i les considerem renovables. La font principal d'energia renovable procedeix de la radiació del Sol (només cal observar la diferència de calor i il·luminació que hi ha entre la nit i el dia), resultat de reaccions de fusió atòmica en el nucli de l'astre. Però en una proporció menor també rebem l'energia causada per reaccions de desintegració nuclear a l'interior de la Terra, en forma d'energia geotèrmica, i l'energia derivada dels efectes gravitatoris entre la Terra i la Lluna, que originen les marees i els corrents marins associats (figura 9.1).

La Terra varia contínuament la cara que ofereix al Sol, però la secció exposada (i, per tant, l'energia rebuda) és sempre la mateixa. Després d'una sèrie de reflexions, absorcions i emissions en diferents medis (atmosfera, núvols, terra ferma, boscos, oceans, gels permanents), la Terra emet energia a l'espai i el balanç acaba essent fonamentalment nul (la Terra rep tanta energia com n'emet).

Això no és exactament així. Hi ha (i ha hagut) petits desequilibris en el balanç d'energia, de manera que la Terra s'escalfa o es refreda, com ha succeït al llarg de les diferents eres geològiques. L'estudi del paleoclima (l'evolució del clima en èpoques geològiques anteriors) mostra una contínua variació de l'atmosfera de la Terra i del clima, sense la qual és difícil de comprendre l'evolució del nostre planeta. De fet, el canvi climàtic actual és conseqüència d'un desequilibri induït per l'home, que crea una absorció excessiva d'energia.

Una primera pregunta que ens podem formular és si la potència d'irradiació que la Terra rep del Sol és superior o inferior a la potència primària que consumim? La figura 9.1 ens ajuda a respondre aquesta qüestió.

El Sol irradia constantment $380 \cdot 10^{12}$ TW 174.400 TW dels quals incideixen sobre la Terra (2,2 mil milionèsimes parts). El consum humà d'energia primària l'any 2008 era de 17,9 TW (capítol 2), és a dir, unes 10.000 vegades inferior a la potència que la Terra rep del Sol (0,01%). Ni que hi incloguéssim també l'energia capturada del Sol pels productes agrícoles, ramaders, marins i forestals que usem (unes dues vegades més), tan sols arribaríem al 0,03%.

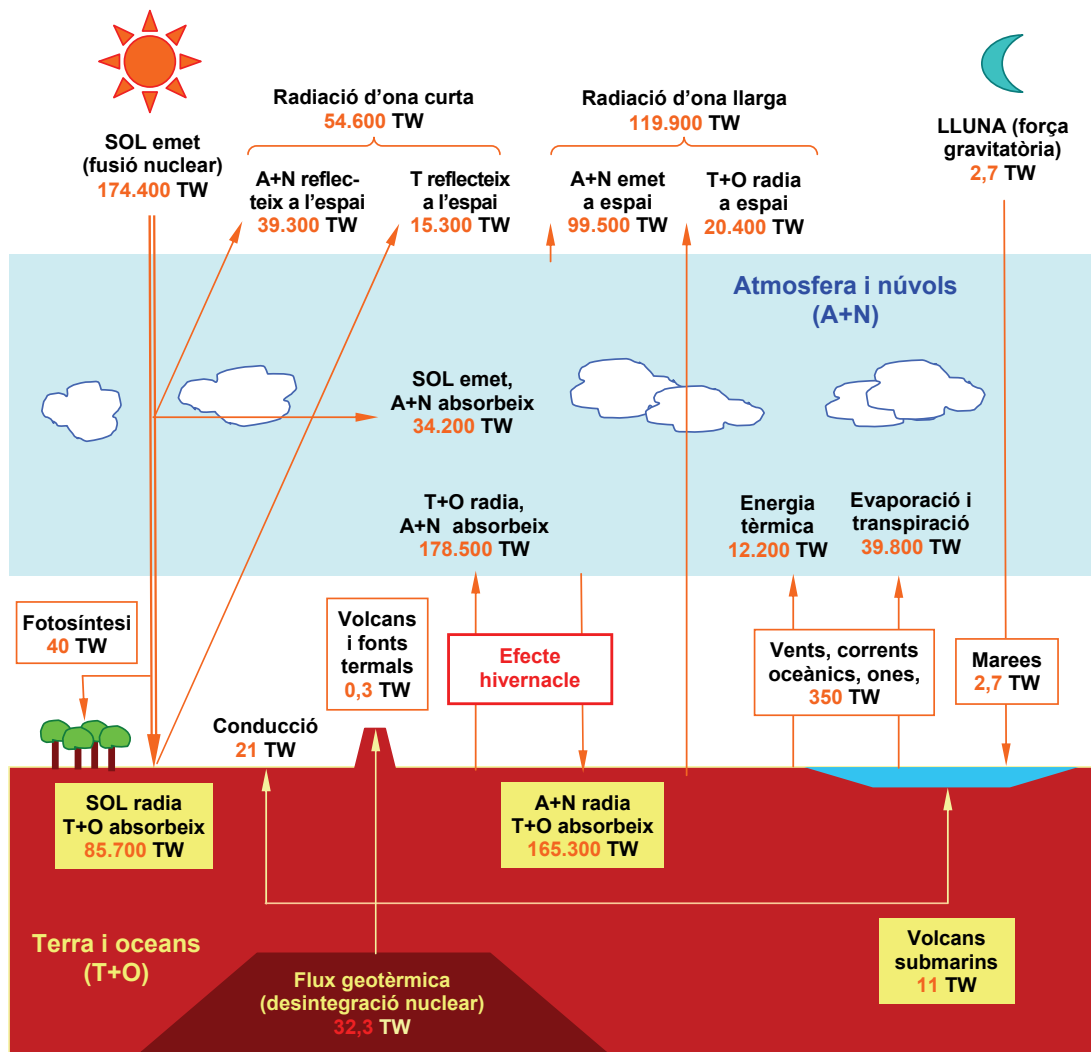


Figura 9.1. Balanç dels fluxos d'energia (en TW) que intervenen en la Terra, procedents de la radiació del Sol, de la interacció gravitatòria amb la Lluna i de les reaccions nuclears a l'interior del planeta, com també dels fluxos de reflexió, absorció i emissió entre els diferents medis i les emissions a l'espai. **Fons:** *Energy Resources*, informe elaborat pel Comitè de Recursos Naturals del Nacional Research Council – National Academy of Sciences, sota la direcció de M. K. Hubbert a requeriment del president dels Estats Units J. F. Kennedy [Hub-1962]; *Resources of the Earth: Origin, Use and Environmental Impact* [Cra-2001]; *Earth's Annual Global Mean Energy Budget*, treball publicat per Kiehl & Trenberth al *Bulletin of the American Meteorology Society* [Kie-1997]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

En principi, és una bona notícia.

Les altres dues fonts d'energia, tot i ser relativament importants a escala humana, són quasi insignificants en relació amb l'energia solar: la geotèrmica és de 32,3 TW i l'energia de les mareas i corrents marins associats, de 2,7 TW.

Abans, però, d'entrar a fer el balanç energètic de la Terra, convé aclarir alguns conceptes:

Potència d'irradiació. És l'energia d'irradiació que rep una superfície per unitat de temps. La Terra rep del Sol una potència d'irradiació de 174.400 TW (valor ja citat).

Irradiància és la potència d'irradiació per unitat de superfície. La irradiància que rep la Terra del Sol (sobre la seva secció diametral i abans de travessar l'atmosfera) és de 1.368 W/m^2 , que també pren el nom de *constant solar*. Si la irradiància es reparteix sobre tota la superfície del globus terrestre (quatre vegades la secció diametral), dóna 342 W/m^2 , que té en compte la mitjana entre dia i nit.

Irradiació. És l'energia d'irradiació total que rep una superfície durant un temps determinat. Per exemple, la irradiació solar sobre una placa fotovoltaica d' $1,5 \text{ m}^2$ situada a Barcelona, fixa a 30° de l'horitzontal i mirant a sud, durant mig any, és de 4.698 MJ (valor calculat amb el programa PVGIS; vegeu la figura 9.3)

Balanç energètic de la Terra

El balanç energètic de la Terra que es presenta a continuació (i il·lustrat a la figura 9.1) es basa en les dades proporcionades per Kiehl & Trenberth [Kie-1997] en base a una irradiància mitjana sobre tota la superfície de la Terra de 342 W/m^2 i que hem preferit traduir a potències d'irradiació globals sobre el planeta sobre la base de 174.400 TW incidents.

Una part significativa de l'energia incident del Sol sobre la Terra és reflectida per l'atmosfera i els núvols (39.300 TW, el 22,5%) i per la superfície dels continents i els oceans (15.300 TW, el 8,8%), i emesa a l'espai en forma de radiació d'ones curtes (en total, 54.500 TW, el 31,3%). Una altra part significativa és absorbida per l'atmosfera i els núvols (34.100 TW, el 19,6%), de manera que tan sols 85.700 TW (el 49,1% de la radiació solar) incideix i és absorbida per la superfície dels continents i els oceans. D'aquests, uns 40 TW ho fan en forma de fotosíntesi.

Entre la superfície terrestre i l'atmosfera es crea un bucle de radiació mútua de gran importància (efecte hivernacle): els continents i els oceans emeten 178.500 TW i el conjunt de l'atmosfera i núvols en retorna 165.300 TW, tots dos fluxos de l'ordre de la radiació incident del Sol sobre la Terra. Hi ha també un flux menor de radiació directa de la superfície de la Terra a l'espai (20.400 TW, el 11,7%).

Hi ha un altre flux important d'energia que va de la superfície de la Terra a l'atmosfera per via de la conducció tèrmica, l'evaporació d'aigua i la transpiració (formació dels núvols) que, en conjunt, comporta 52.000 TW (el 29,8% de l'energia incident). Aquests processos originen els vents, els corrents oceànics i les ones del mar, que, en conjunt, impliquen uns 350 TW.

L'altre gran balanç energètic és el que té lloc en el conjunt de l'atmosfera i els núvols. Aquest sistema rep els 34.200 TW per absorció directa del Sol i els 178.500 TW de radiació dels continents i els oceans; els 52.000 TW d'energia tèrmica de conducció, convecció, evaporació i transpiració. En total, 264.700 TW (el 151,7% de l'energia incident) que es reparteixen entre l'energia radiada cap a la superfície dels continents i els oceans (165.300 TW) i l'energia emesa a l'espai en forma de radiació d'ona curta (99.500 TW, el 57,0% de l'energia incident).

Finalment, la potència emesa a l'espai en forma de radiació d'ones llargues procedent dels continents i els oceans (20.400 TW) i de l'atmosfera i els núvols (99.500 TW) és de 119.900 TW. Sumada a la potència de la radiació del Sol reflectida en forma d'ones curtes per l'atmosfera i els núvols (39.300 TW) i pels continents i oceans (15.300 TW), dóna la potència de 174.400 TW, que és la que havia proporcionat el Sol. El balanç, doncs, és nul a curt termini.

Taula 9.1. Balanç de l'energia del Sol en els grans sistemes de la Terra (en TW)			
Procedent del Sol (174.300)		Emesa a l'espai (174.300)	
Radiació reflectida	54.600	Radiació reflectida (ona curta)	54.600
Per l'atmosfera i els núvols	39.300	De l'atmosfera i els núvols	39.300
Pels continents i els oceans	15.300	Dels continents i els oceans	15.300
Radiació absorbida	119.900	Radiació emesa (ona llarga)	119.900
Per l'atmosfera i els núvols	34.200	De l'atmosfera i els núvols	99.500
Pels continents i els oceans	85.700	Dels continents i els oceans	20.400
Continents i oceans		Atmosfera i núvols	
Radiació absorbida	251.000	Radiació i energia absorbida	264.700
Del Sol	85.700	Del Sol	34.200
De l'atmosfera i els núvols	165.300	Dels continents i els oceans	178.500
Energia radiada i transmesa¹	251.000	Per conducció i transmissió	12.200
Radiada vers l'espai	20.400	Per evaporació i transpiració	39.800
Radiada vers l'atmosfera i els núvols	178.500	Radiació emesa¹	264.700
Per conducció i convecció	12.200	Vers els continents i els oceans	165.300
Per evaporació i transpiració	39.800	Vers l'espai	99.500
¹ Les sumes no són exactes a causa dels arrodoniments			
Font: Kiehl & Trenberth [Kie-1997]. Elaboració: Carles Riba Romeva			

Les altres dues fonts d'energia (geotèrmica i gravitacional) no s'han tingut en compte en aquest balanç, ja que numèricament són de diversos ordres inferiors.

Energies de flux i energies d'estoc

La humanitat recull unes petites fraccions d'aquestes energies enormes, que la natura posa en joc. Fonamentalment, de la fotosíntesi (una petita part dels 40 TW) a través de la biomassa (cultius, prats, boscos, ramats, pesca, aquicultura, fusta, etc.); dels vents, les ones i els corrents d'aigua (una ínfima part dels 350 TW en forma d'energia eòlica, hidroelèctrica i de les ones); de l'energia geotèrmica (una petitíssima part dels 32 TW a través de fonts termals i centrals geotèrmiques), i de l'energia gravitacional del sistema Terra-Lluna (algunes instal·lacions maremotrius).

Probablement, el camí que la humanitat ha d'emprendre és reconciliar-se amb la natura i aprendre a cooperar per obtenir fraccions més grans d'aquestes energies de forma sostenible i respectuosa. En aquest capítol, s'analitzen les oportunitats que ofereixen les fonts d'energia renovable.

En les energies renovables, els límits es plantegen en termes diferents dels de les energies no renovables. El límit principal de les darreres és l'estoc disponible que podem consumir a ritmes més o menys ràpids. En canvi, el límit de molts recursos renovables és el flux màxim d'energia que ens proporciona la natura i, per contra, no hi ha limitació de temps. La biomassa està en el llindar entre els recursos renovables i els no renovables, ja que una mala gestió pot destruir el capital (la pròpia biomassa).

Fonamentalment, les energies no renovables són recursos d'estoc, amb una gran disponibilitat i fàcils d'administrar, ja que permeten modular-ne l'ús en funció de la demanda humana. Però són limitats en la quantitat total i, en definitiva, en el temps.

En canvi, les energies renovables són recursos de flux, en general més difícils d'administrar i no sempre adaptables a la demanda. A escala humana, però, no tenen limitacions per exhauriment, sempre que s'accepti l'energia que ofereix la natura.

Alguns recursos renovables són, alhora, de flux i d'estoc (energia hidroelèctrica amb embassaments, la biomassa dels boscos i cultius), fet que requereix una gestió de la demanda dintre dels límits establerts per la naturalesa.

Factor d'ús de les energies renovables

Una de les característiques de les energies renovables és la seva fluctuació en el temps. Tant l'energia del Sol com les pluges o el vent varien amb el temps i, normalment, són impredecibles. Per tant, l'energia que se n'obté és fluctuant.

El nivell d'implantació d'aquestes noves energies se sol mesurar a través de la *potència instal·lada*, és a dir, la potència nominal que poden proporcionar les instal·lacions. Però, en funció de la situació geogràfica i de les condicions climàtiques, proporcionen una energia útil sensiblement menor que la que donarien en les màximes condicions.

Al cap de l'any, un aerogenerador, una placa fotovoltaica o una central solar tèrmica generen una energia equivalent al funcionament a potència nominal d'una fracció de les hores de funcionament (denominat *factor d'ús*), normalment entre 0,20 i 0,30; l'energia hidroelèctrica proporciona factors d'ús del doble, i la geotèrmica, del triple. Per tant, cal corregir les avaluacions de la potència instal·lada pel *factor d'ús* a fi d'obtenir l'energia generada efectivament. Aquest paràmetre també és aplicable a les energies no renovables, però té una significació menor ja que el seu valor (almenys potencialment) és més pròxim a 1 (generalment entre 0,80 i 0,95).

Consums, emissions i inversió en nous equipaments

Les energies renovables es basen en fluxos continus i en cicles naturals. Per tant, solen acumular pocs residus i, sobretot, no generen gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera, com els combustibles fòssils. Els biocombustibles, tot i que generen emissions de CO₂ quan cremen, es compensen, en gran part per la fotosíntesi de les plantes que els han donat origen, sempre que el procés es gestioni bé i que es preservi la biomassa vegetal.

Però també cal dir que totes les nostres activitats, fins i tot les basades en recursos i processos renovables, estan contaminades pel sistema dominant, basat en energies no renovables, efecte que té una incidència especial en la inversió en nous equipaments. Per exemple, un aerogenerador està constituït per acer obtingut en alts forns (que consumeixen combustibles fòssils i emeten CO₂); s'ha fabricat en tallers convencionals que utilitzen electricitat (generada en un *mix* on els combustibles fòssils i les emissions de CO₂ hi són en gran proporció), i és transportat i instal·lat amb l'ajut de maquinària que consumeix productes derivats del petroli.

Malauradament, pràcticament totes les dades disponibles sobre inversions es donen en termes monetaris (normalment, en dòlars, més rarament en euros) i no en consum d'energia primària o en emissions de gasos d'efecte hivernacle. Això fa oblidar a molta gent els impactes de les inversions en termes físics. Tanmateix, fa un temps vaig constatar que, en les construccions i fabricacions que usen grans quantitats de materials (i cada cop menys mà d'obra), com ara la construcció, les obres públiques i la fabricació de maquinària i equip, la relació cost/consum d'energia primària és pràcticament constant i aproximadament de valor 0,033 \$/MJ o 0,025 €/MJ. En aquest resultat, hi incideix de forma destacada la relació molt coincident cost/energia (€/MJ) de l'acer i del ciment.

Aquest fet, junt amb les dades de l'EIA sobre emissions globals de CO₂ (30.314 Tg/any, o milions de tones/any el 2008) i el consum global d'energia primària (518,70 EJ/any, o 10¹⁸ J/any, o milions de milions de MJ/any), permet establir una relació mitjana entre el CO₂ emès i l'energia primària consumida en el món (de tots els tipus): 58,4 gCO₂/MJ.

Energia consumida	CO ₂ emès	Inversió monetària
1,00 MJ	58,4 gCO ₂ /MJ	0,033 € o 0,025 \$

Se sol pensar en termes de consum, però caldrà començar a avaluar les reserves en termes d'energia necessària per a les inversions en nou equipament.

Ús de les energies renovables

En primer lloc, ens sembla útil analitzar l'ús que avui dia es fa (any 2008) de les energies renovables, en el context del consum general (taula 9.2).

Taula 9.2. Energies renovables en el món (2008)								
Desglossament de les energies tèrmiques renovables (en GW _t) ¹								
	Biomassa tradicional.	Residus i biogàs	Biocar- burants	Geotèrmi- ca	Solar tèrmica	TOTAL tèrmica	Elèctric. no tèrmic.	TOTAL renovable
Subministr. primari	1.488,1	76,3	91,2	77,5	14,6	1.747,8	1.163,6 ²	2.911,4
Transform. i ús propi	189,1	51,0	2,6	72,3	0,3	315,3		
Electricitat GW _t	53,8	33,3	1,1	45,4	0,3	134,0		
Electricitat TW _e h	162,8	100,8	3,4	64,6	0,9	332,5	3.851,1	3.851,1
Altres transformacions	117,4	17,4	1,5	26,8	0,0	163,1		
Usos propis industria	17,9	0,3	0,0	0,0	0,0	18,2		
Consum final	1.299,0	25,3	88,5	5,3	14,4	1.432,5		
Agric., pesca, boscs	9,2	0,1	0,0	0,2	0,0	9,6		
Indústria	232,6	12,3	1,5	0,4	0,2	246,9		
Comerç i serv. Públics	17,5	3,0	0,0	1,2	0,4	22,1		
Transport	0,0	0,0	87,0	0,0	0,0	87,0		
Residencial	1.032,8	9,9	0,0	3,2	6,1	1.052,0		
Altres	6,8	0,0	0,0	0,3	7,8	14,8		
Desglossament de les anergies elèctriques renovables								
	Hidroelèc- trica	Eòlica	Solar fotovolt.	Marina	TOTAL elèctric.			
Primària equivalent	1.087,2	72,3	4,0	0,2	1.163,6	GW _t		
Electricitat	3.287,6	218,5	12,0	0,5	3.518,6	TW _e h		
Comparacions entre las diferents fonts d'energia								
	GW _t	% total			TW _e h	GW _t	% renov.	
Total	17.920	100,0	Total renovables			2.911,4	100,00	
Total no renovables	15.009	83,8	Total Elèctriques			3.851,2	1.297,7	44,57
Petroli	5.720	31,9	Hidroelèctrica			3.287,6	1.087,2	37,34
Gas natural	3.809	21,3	Eòlica			218,5	72,3	2,48
Carbó	4.572	25,5	Biomassa primària			162,8	53,8	1,85
Urani	908	5,1	Residus urbans i biogàs			100,8	33,3	1,14
Total Renovables	2.911	16,2	Geotèrmica			64,6	45,4	1,56
Renovables elèctriques	1.298	7,2	Solar fotovoltaica			12,0	4,0	0,14
Hidroelèctrica	1.087	6,1	Altres			4,9	1,6	0,06
Elèc. origen no tèrm. ³	76	0,4	Total Tèrmiques				1.613,7	55,43
Elèc. origen tèrmic	134	0,7	Biomassa tradicional				1.434,2	49,26
Renovables tèrmicas	1.614	9,0	Biocarburants				90,0	3,09
Biomassa tradicional	1.434	8,0	Residus urbans i biogàs				43,0	1,48
Otras tèrm. renovabl.	180	1,0	Geotèrmica				32,1	1,10
			Solar tèrmica				14,3	0,49

¹ Les dades procedeixen d'IEA-OCDE (donades en GW_eh/any i TJ/any), excepte per a les energies no renovables, que procedeixen d'EIA-gobEEUU. D'acord amb el plantejament general del text, los valors s'han traduït a potència (en GW_t; en lloc de TW_t, per ajustar-los a les dimensions de las energies renovables).

² Energia primària equivalent de les fonts d'energia elèctrica renovable d'origen no tèrmic (hidroelèctrica, eòlica, fotovoltaica, marina). Las traduccions d'energies elèctriques a primeries s'ha fet en base als factors de conversió que es dedueixen de les dades d'EIA-gobEEUU.

³ Fonts renovables d'energia elèctrica excepte la hidroelèctrica y les d'origen tèrmic.

Fonts: IEA-OCDE y EIA-gobEEUU. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 9.2:

1. En primer lloc, es constata de nou que les fonts renovables proporcionen de l'ordre del 16% de les anergies que consumim. Las petites diferències que s'observen respecte a

les dades del Capítol 2 (Part 1) es deuen a haver pogut precisar més els valors de les energies renovables (16,2% en lloc de 15,99%).

2. Hi ha dues fonts tradicionals que proporcionen la major part de l'energia renovable:
 - a) L'*energia hidroelèctrica* (avaluada com a energia primària), és el 6,1% de l'energia mundial i el 37,3% de les energies renovables.
 - b) La *biomassa tradicional* és un 8,0% de l'energia primària i el 49,3% de les energies renovables mundials. La major part (1.032,8 GW_t, consum residencial) és el mitjà bàsic per a la cocció dels aliments i la calefacció dels més pobres de la Terra (el 37% de la població mundial).
3. La resta d'energies renovables (avaluades com a energia primària) sumen tan sols el 2,1% de l'energia primària mundial. Les fonts renovables que proporcionen electricitat (excepte la hidroelèctrica) sumen l'1,1%, i les que proporcionen calor (excepte la biomassa tradicional), inclosos els biocarburants i els col·lectors solars tèrmics, un altre 1,0%.
4. Entre aquestes darreres, i comptant tant els usos elèctrics com els tèrmics, hi ha quasi un equilibri entre quatre fonts: los biocarburants (3,13% de les energies renovables), l'energia geotèrmica (2,66%), els residus urbans, industrials i el biogàs (2,62%) y l'energia eòlica (2,47%, només elèctrica).
5. Les energies solar tèrmica (0,49% de les energies renovables), la solar fotovoltaica (0,14%) i les diferents formes d'aprofitament de l'energia marina (ones, corrents, mares, 0,01%) pràcticament no incideixen en el còmput global.

L'ús futur de les energies renovables

Convé haver analitzat amb detall la contribució actual de cada una de les formes d'energia renovable. Com acabem de veure, el panorama no és engrescador i tan sols les energies renovables més tradicionals aporten quantitats substancials, però alhora són les que tenen un potencial d'increment més petit. L'energia hidroelèctrica, com a màxim, es duplicaria, i, en relació amb els boscos, més aviat caldria frenar-ne la sobreexplotació.

Treballar amb energies renovables no és fàcil. La producció del 3,13% de les energies renovables en forma de biocarburants (que corresponen tan sols a l'1,57% dels combustibles líquids que consumim) ja ha provocat desequilibris importants en els mercats alimentaris i ha accelerat processos de desforestació. I el gran desplegament de parc eòlics i hortes solars amb prou feines es deixa percebre en la comptabilització mundial de l'energia.

Tanmateix, les energies renovables (biomassa, solar tèrmica i fotovoltaica, hidràulica, eòlica, geotèrmica, marina) tenen un potencial suficient per cobrir teòricament les necessitats energètiques de la humanitat. Però aquesta energia ens arriba de manera difusa, de forma intermitent i no sempre amb la intensitat i la disponibilitat a què ens han acostumat els combustibles fòssils.

Les energies renovables són els recursos energètics bàsics gràcies als quals la humanitat podrà subsistir en el futur. A més, el retorn a les energies renovables es farà en condicions molt millors que en etapes històriques anteriors, gràcies al coneixement precís dels recursos, de les dinàmiques dels fenòmens naturals, de nous instruments per gestionar millor la demanda i de nous mitjans de comunicació.

Però el seu aprofitament demanarà un canvi radical de concepcions i de mentalitats, un canvi de paradigma energètic. Caldrà que ens acostem als sistemes naturals amb respecte i amb esperit de col·laboració, en lloc d'una actitud de dominació i d'explotació. Això comportarà una gestió molt més complexa dels recursos, no forçar els temps de la natura i a deixar d'abandonar-nos a la comoditat i a la despreocupació.

Al capítol darrer del llibre ens estendrem sobre aquestes consideracions.

9.2. Energia solar

L'energia obtinguda directament del Sol per procediments tècnics no és actualment la més gran de les energies renovables. Numèricament, tenen molta més importància l'energia hidroelèctrica, la procedent de la biomassa, l'eòlica o la geotèrmica. Però, l'energia solar no tan sols té un potencial enorme, sinó que la major part de les altres energies renovables en deriven, fet que justifica analitzar-la en primer terme.

Recursos de la radiació solar

Com ja s'ha vist, la *potència de radiació* del Sol sobre la Terra és de 174.400 TW. La *constant solar* (o irradiància sobre la secció diametral) és de 1.368 W/m^2 i la irradiància mitjana sobre la superfície de la Terra (quatre vegades superior a la secció diametral) és de 342 W/m^2 .

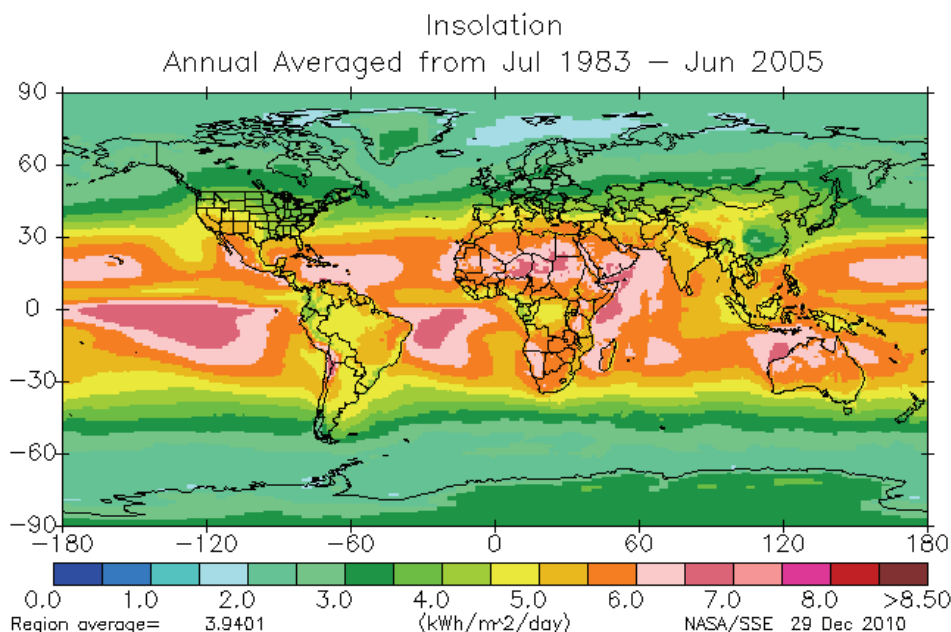


Figura 9.2. Mapa d'asselellaments (en anglès *insolation*; en $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$) per a les diferents zones de la Terra amitjanades en el període de juliol de 1983 a juny de 2005 (22 anys). La taula 9.3 dona les correspondències entre mesures en diferents unitats.

Font: Surface Meteorology and Solar Energy (NASA/SSE): Global/Regional Data.
<http://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/espas/world/ION/pwv.html>.

Taula 9.3. Correspondències entre diferents mesures d'asselellament								
$\text{kWh/m}^2/\text{dia}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
$\text{kWh/m}^2/\text{any}$	365	730	1.095	1.460	1.825	2.190	2.555	2.920
W/m^2	41,67	83,33	125,00	166,67	208,33	250,00	291,67	333,33

La *asselellament* és l'energia solar directa que intercepta una unitat d'àrea de la superfície de la Terra i per unitat de temps i depèn de factors com ara l'angle d'incidència dels raigs, el temps d'exposició i els fenòmens de reflexió i d'absorció previs (atmosfera, núvols) que disminueixen part de la irradiància solar. Això fa que, de mitjana, tan sols el 49,1% de l'energia solar incident arribi a la superfície de la Terra, és a dir, $167,9 \text{ W/m}^2$.

El mapa de la NASA/SSE mostra que els asselellaments van des de $8 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ (333 W/m^2) a les zones més assolellades fins a $2 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ (83 W/m^2) a les zones menys assolellades, essent el valor mitjà de $3,9401 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ ($1.438 \text{ kWh/m}^2/\text{any}$, o $164,2 \text{ W/m}^2$, lleugerament inferior al valor donat anteriorment) (figura 9.2).

L'energia solar està força repartida per tota la superfície de la Terra i la mitjana d'energia rebuda per 1 m^2 durant un any és de 5,3 GJ equivalents a 0,9 barrils de petroli, 180 kg de carbó o 150 m^3 de gas natural. Amb el consum humà mitjà, i aprofitant un 16% l'energia solar (cosa factible), cada habitant de la Terra necessitaria una superfície d'uns 100 m^2 .

S'analitzen tres formes d'utilització de l'energia del Sol: a) els sistemes fotovoltaics (PV, *photovoltaic*); b) les centrals solars tèrmiques (CSP, *concentrated solar power*); c) els sistemes d'aigua calenta i climatització (SHC, *solar heating and cooling*).

Energia fotovoltaica

És l'energia elèctrica obtinguda directament de l'energia solar per mitjà de dispositius semiconductors (cèl·lules fotovoltaïques) que, en excitar-se per la llum, donen lloc a una petita diferència de potencial entre els seus extrems. L'acoblament en sèrie de les cèl·lules fotovoltaïques que formen la placa fotovoltaica permet obtenir voltatges i corrents utilitzables.

L'aprofitament de l'energia fotovoltaica adopta dues estratègies: a) en indrets on hi ha xarxa elèctrica, se sol transformar l'energia fotovoltaica en corrent altern i s'introdueix a la xarxa; b) en entorns aïllats on la distància penalitza econòmicament l'accés a la xarxa (granges aïllades, refugis de muntanya, estacions meteorològiques o de comunicacions), les plaques fotovoltaïques es connecten a unes bateries que permeten regular-ne l'ús.

Les plaques fotovoltaïques es caracteritzen per la *potència de pic*, o potència elèctrica que genera en condicions estàndard (assolellament de 1.000 W/m^2 i temperatura de les cèl·lules de 25°C , no a la temperatura ambient).

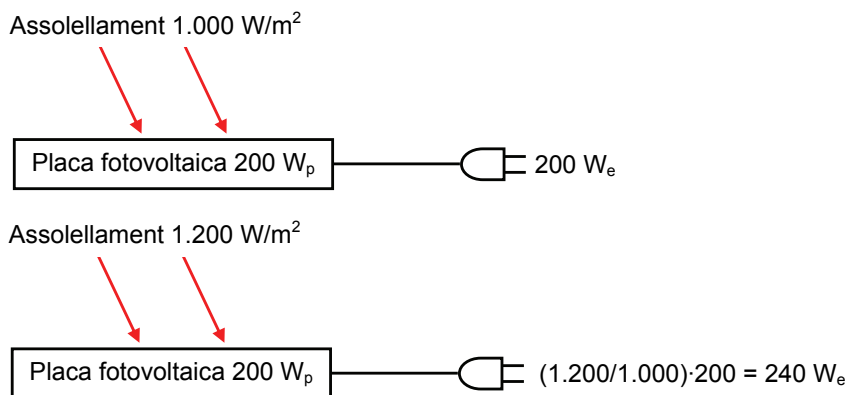


Figura 9.3. Relació entre l'assolellament, la potència pic de la placa fotovoltaica i la potència elèctrica obtinguda (si la temperatura de la placa es manté a 25°C)

Cèl·lules fotovoltaïques

Avui dia, més del 85% de les cèl·lules fotovoltaïques (els captadors d'energia de les plaques fotovoltaïques) es basen en làmines de silici cristal·lí (c-Si) i tot fa pensar que encara continuaran essent dominants durant la dècada que comencem. És una tecnologia madura i provada, que es basa en un recurs abundant, amb una durabilitat acceptable (pèrdua anual d'eficàcia de 1%) i un funcionament controlable (pèrdua d'eficiència amb la temperatura). Els costos han disminuït notablement els darrers anys.

Segons el procés de fabricació, les cèl·lules poden ser de silici monocristal·lí (sc-Si, *single*) o de silici multicristal·lí (mc-Si, *multi*). L'eficiència màxima (percentatge d'energia incident que es converteix en electricitat) de les cèl·lules monocristal·lines pot arribar fins al 25%, i a prop del 20% en les policristal·lines, valors que s'han duplicat des de 1990. Però, atès que el rendi-

ment global d'un mòdul fotovoltaic és d'un 75%, això es tradueix en una potència pic (o nominal) habitual de 135 a 185 W_p/m^2 en les primeres i de 120 a 150 W_p/m^2 en les segones.

Més recentment, s'han desenvolupat cèl·lules fotovoltaïques de pel·lícula prima (gruix de micres, μm), dipositades sobre un substrat (vidre, metall, plàstic rígid o flexible). Les primeres pel·lícules han utilitzat el silici amorf (a-Si), però també s'han desenvolupat altres materials com el tel·lur de cadmi (CdTe) o el diselenur de coure-indi-gal·li (CIGS).

Els avantatges principals de les cèl·lules fotovoltaïques de pel·lícula prima són el baix consum de materials i d'energia (i, per tant, de costos i d'impactes ambientals), la major facilitat de fabricació, la millor integració en edificis i la menor sensibilitat tèrmica. Però també redueixen l'eficiència de la cèl·lula fins a un màxim del 16%, que es tradueix en potències pic de 100 a 120 W_p/m^2 . Avui dia, la tecnologia CdTe ha esdevingut dominant en el camp de les pel·lícules primes.

S'ha dipositat moltes esperances en el desenvolupat de nous materials per a cèl·lules fotovoltaïques, basats tant en compostos inorgànics com orgànics. Algunes pel·lícules primes aplicades a sistemes aeroespacials tenen eficiències del 28 al 30%, però el seu cost és elevat i alguns desenvolupaments de laboratori han assolit rendiments de més del 40%. Segons el preu, l'aplicació ha d'anar associada a sistemes concentradors.

Taula 9.4. Principals paràmetres dels sistemes fotovoltaïcs

Tipus de cèl·lula fotovoltaïca	Eficiència pic ¹		Consums i emissions de fabricació				Cost ³	
	Rang ³ W_p/m^2	Típic ² W_p/m^2	Consum d'energia ²		Emissions de CO_2 ²		gCO_2/MJ ⁴	$€/W_p$
Si monocristal·lí	135 a 165	140	1.900	12.800	250	1.780	138,8	2,8 a 3,5
Si multicristal·lí	120 a 140	132	1.530	11.600	220	1.650	143,0	2,3 a 3,0
Si amorf	100 a 120	112	1.170	10.200	175	1.530	150,4	

¹ Denominem *eficiència pic* la potència pic per unitat de superfície (W_p/m^2).
² Valors donats o deduïts de les dades proporcionades per l'article [Als-2006].
³ Valors obtinguts per l'autor a partir de webs comercials (desembre de 2010).
⁴ Emissions de CO_2 deduïdes de les dades de [Als-2006]. Són 2,5 vegades més intenses que la mitjana mundial.
Font: [Als-2006] i dades comercials (desembre de 2010). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Les dades de la taula 9.4 posen de manifest que la fabricació de cèl·lules fotovoltaïques consumeix molta energia primària i emet molts gasos d'efecte hivernacle, unes 2,5 vegades més que la mitjana mundial.

Segons el treball d'Alsema i altres [Als-2006], els temps de retorn energètic (*energy pay-back time*, temps en què el dispositiu genera l'energia esmerçada) dels sistemes fotovoltaïcs de suport fix van d'1,6 anys (làmines de Si-amorf) a 2,1 anys (Si monocristal·lí) per a la irradiació solar del sud d'Europa, i entre 2,9 i 3,6 anys per a la irradiació solar de l'Europa central. Aquest estudi també pronostica una disminució del temps de retorn energètic i de les emissions gràcies a l'evolució tecnològica futura.

Avaluació de la generació elèctrica amb sistemes fotovoltaïcs

Amb el mapa interactiu PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System* del Joint Research Center, JRC–Comissió Europea, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>), s'ha analitzat en diverses latituds, i concretament a les ciutats de Tunis (Àfrica del Nord), Barcelona (Europa del Sud), París (Europa central) i Oslo (Europa del Nord), l'aprofitament fotovoltaic que es podria obtenir amb una placa fotovoltaïca de 125 W_p (watts pic) i una superfície d'1 m^2 .

S'ha considerat la placa muntada sobre un suport fix, amb la inclinació òptima en cada cas, o sobre un seguidor solar (*solar tracker*) de dos eixos. Els resultats es donen a la taula 9.5.

Taula 9.5. Aprofitament de l'energia solar per una placa fotovoltaica (125 W _p , 1 m ²) ¹								
(valors mensuals del suport fix)	Barcelona (fix a 36° i seguidor de 2 eixos)				París (fix a 34° i seguidor de 2 eixos)			
	Assolell. kWh/m ²	Generació kWh/m ²	Fact.d'ús %	Gen/Ins ² %	Assolell. kWh/m ²	Generació kWh/m ²	Fact.d'ús %	Gen/Ins ² %
Gener	99,5	9,9	10,66	9,96	38,3	3,9	4,19	10,18
Febrer	105,0	10,3	12,26	9,81	62,2	6,3	7,54	10,18
Març	153,0	14,6	15,70	9,54	103,0	10,1	10,86	9,81
Abril	158,0	14,9	16,56	9,43	134,0	12,7	14,11	9,48
Maig	175,0	16,2	17,42	9,26	148,0	13,8	14,84	9,32
Juny	181,0	16,4	18,22	9,06	153,0	13,9	15,44	9,08
Juliol	193,0	17,3	18,60	8,96	170,0	15,3	16,45	9,00
Agost	186,0	16,6	17,85	8,92	156,0	14,2	15,27	9,10
Setembre	163,0	14,9	16,56	9,14	122,0	11,4	12,67	9,34
Octubre	137,0	12,8	13,76	9,34	88,1	8,5	9,17	9,68
Novembre	98,4	9,6	10,66	9,75	52,2	5,3	5,89	10,15
Desembre	92,7	9,2	9,90	9,94	30,5	3,1	3,34	10,20
Anual (fix)	1.741,6	162,7	14,86	9,34	1.257,3	118,6	10,83	9,43
Anual (seguidor)	2.297,0	214,9	19,63	9,36	1.587,6	150,2	13,72	9,46
	Tunis (fix 30° i seguidor de 2 eixos)				Oslo (fix 40° i seguidor de 2 eixos)			
	Assolell. kWh/m ²	Generació kWh/m ²	Fact.d'ús %	Gen/Ins ² %	Assolell. kWh/m ²	Generació kWh/m ²	Fact.d'ús %	Gen/Ins ² %
Anual (fix)	1.897,0	173,9	15,88	9,17	1.003,0	97,4	8,89	9,71
Anual (seguidor)	2.508,0	229,9	21,00	9,17	1.321,6	129,8	11,85	9,82

¹ Per fer més visibles els resultats, s'ha partit d'una placa fotovoltaica d'1 m² amb la seva potència pic, que hem considerat de 125 W_p. Una placa més eficaç (per exemple, 150 W_p/m²) hauria generat sobre un seguidor de 2 eixos a Barcelona 258,0 kWh en un any, amb un factor d'ús de 23,56% i un rendiment sobre un assolellament de l'11,23%.

² Rendiment de l'energia generada sobre l'assolellament.

Font: Càlculs per mitjà del mapa interactiu de PVGIS (JRC-Unió Europea). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 9.5:

1. Tenint en compte la variabilitat de l'assolellament i utilitzant mòduls de 125 W_p/m², el factor d'ús mitjà (recordem-ho, sobre m² de placa instal·lada) se situa entre 8,89 i 15,88 (d'Oslo a Tunis) si la placa és fixa, i entre 11,85 i 21,00 si s'instal·la sobre un seguidor de dos eixos.
2. L'aprofitament de l'assolellament (percentatge que es transforma en electricitat) és entre 9,71 i 9,17% (d'Oslo a Tunis) si la placa és fixa, i entre 9,82 i 9,17% si s'instal·la sobre un seguidor de dos eixos (força semblants entre ells). La pèrdua d'aprofitament a Tunis es deu a l'efecte negatiu de l'augment de la temperatura de les cèl·lules fotovoltaïques. Les plaques adossades a edificis també tenen un rendiment menor perquè la refrigeració també és menor.
3. Les diferències de rendiment en les diferents latituds, tot i ser importants, permeten usar de l'energia solar fotovoltaica en quasi totes les latituds habitades. A Oslo, amb un seguidor solar de dos eixos i cèl·lules de 125 W_p/m², s'obtenen 129,8 kWh per any, i si les cèl·lules fotovoltaïques són de 150 W_p/m², s'obtenen 155,8 kWh, amb un factor d'ús de 14,23 i un aprofitament sobre l'assolellament de 11,79%.

Potència fotovoltaica instal·lada en el món

L'agència americana EIA dona valors conjunts per a l'energia solar (fotovoltaica i solar tèrmica), l'energia del mar i l'energia de les marees. Però ens ha semblat necessari des- triar-ne l'evolució i, dintre de l'energia solar, la de cada un dels components.

No és fàcil de trobar dades ben organitzades i públiques sobre l'evolució de l'energia foto- voltaica, ja que la majoria de les nombroses organitzacions i associacions mundials regio- nals o nacionals sobre el tema s'orienten vers la tecnologia, els negocis i els mercats.

La taula 9,5 es basa en un estudi de l'associació Observ'ER [Obs-2010] sobre la producció d'electricitat en el món a partir d'energies renovables i ens hem adaptat a les dates que ofereixen les seves taules. La potència instal·lada l'hem obtinguda de diverses fonts.

Taula 9.6. Producció (GW _e h/any) i potència instal·lada (MW _p) d'energia solar fotovoltaica									
Regions	Producció (GW _e h/any)						PI ¹ (MW _p)		FU ² %
	1999	2006	2007	2008	2009	% (2009)	2.008	2009	
Amèrica Nord	143	657	826	1.132	1.635	8,0	1.290	1.920	11,63
Amèrica Sud i C.	16	29	33	37	41	0,2	30	35	14,40
Europa	116	2.514	3.795	7.451	14.600	71,7	10.945	16.850	11,99
Euràsia	0	0	0	0	0	0,0	0	0	
Orient Mitjà	1	2	2	3	19	0,1	5	25	14,46
Àfrica	19	70	73	82	90	0,4	65	73	14,89
Àsia i Oceania	205	2.240	2.471	3.034	3.977	19,5	3.340	3.975	12,41
Món	500	1.478	5.512	7.200	11.739	100,0	15.675	22.878	12,06
Índex 2006=100	9,1	100,0	130,6	213,0	369,4				
Potència inst. MW _p	1.150	6.956	9.550	15.675	22.878				
1 Alemanya	60	2.220	3.075	4.420	6.200	30,4	6.019	9.830	8,93
2 Espanya ²	18	119	501	2.562	6.036	33,9	3.421	3.520	19,85
3 Japó	124	1.900	2.000	2.300	2.900	14,2	2.149	2.633	13,85
4 EUA	120	607	800	1.099	1.546	7,6	1.168	1.643	12,56
5 Itàlia	18	35	39	193	750	3,7	458	1.032	11,49
6 Corea del Sud	4	31	71	281	480	2,4	357	455	13,50
7 França	-	73	88	115	225	1,1	130	305	11,81
8 Xina	38	114	121	145	183	0,9	104	289	12,49
9 Bèlgica	-	2	6	42	164	0,8	71	363	8,63
11 Austràlia	33	105	123	156	152	0,7	105	187	11,88

¹ Potència fotovoltaica instal·lada (potència pic, o nominal en MW_p)

² Factor d'ús, o percentatge equivalent de funcionament a la potència pic, o nominal. Atès l'augment rapidíssim de la potència instal·lada en moltes regions i països, el factor d'ús s'ha calculat amb un valor de la potència pic mitjana (la semisuma de la potència a final d'any i la d'inici d'any –o la de final d'any anterior).

³ Sobre la base de les dades de la Comisión Nacional de Energía, la producció fotovoltaica espanyola per a 2009 dona un factor d'ús inusualment elevat (19,85). Els dos anys anteriors, 2007 i 2008, el factor d'ús resultava, aproximadament, de 14,4 i, de gener a setembre de 2010 (que inclou els mesos més càlids), havia tornat a baixar a 16,2.

Fonts: per a les produccions, [Obs-2010]; per a les potències instal·lades, [WEC-2010] i diverses fonts i articles de premsa. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 9.6:

1. La producció d'electricitat fotovoltaica s'ha disparat els darrers anys. En aquest aspecte, hi incideixen la baixada de preus de les cèl·lules fotovoltaïques i les polítiques de foment de molts països.
2. Tanmateix, continua representant una ínfima part de l'energia primària produïda i consumida en el món (0,023%) i també una part molt reduïda de l'energia elèctrica generada i produïda en el món (0,139%)
3. La producció fotovoltaica es concentra a Europa (més del 70%) i als països de l'OCDE d'Àsia. La Xina i, encara en proporció menor, l'Índia encara no han desenvolupat tot el seu potencial en aquest camp. La Xina ho ha fet amb els captadors d'aigua calenta.
4. Els factors d'ús de l'energia fotovoltaica són dels més baixos i se situen actualment entre 8,5% (països d'Europa central) i el 15% (Àfrica, Orient Mitjà). En aquest aspecte, hi intervé òbviament l'assolament, però un augment de l'eficiència de les cèl·lules fotovoltaïques tindrà un efecte de millora global que, sens dubte, farà més atractiva aquesta energia.

Formes d'utilització

Sistemes sense connexió a la xarxa (off-grid connected)

Com tots els sistemes d'energia solar, les plaques fotovoltaïques tan sols funcionen durant les hores de llum solar (directa o difusa), fet que dificulta la disponibilitat d'energia en les instal·lacions aïllades (sense connexió a la xarxa). En aquests casos, es pot optar per tres alternatives: a) limitar el consum només a les hores de llum solar; b) establir sistemes híbrids amb altres formes de generació (per exemple, amb un grup electrogen); c) implementar formes d'acumulació de l'electricitat (per exemple, amb bateries). Els sistemes sense connexió a la xarxa són més freqüents en països en via de desenvolupament i en zones aïllades.

Sistemes amb connexió a la xarxa (grid connected)

En els sistemes fotovoltaïcs amb connexió a la xarxa, el consum es distribueix entre múltiples usuaris i, en les hores en què no hi ha llum solar, altres fonts poden cobrir la demanda. Però cal implementar un sistema per transformar el corrent continu generat en corrent elèctric altern (*inverter*). Quan una unitat és alhora generadora i consumidora, se solen comptabilitzar les diferències entre l'energia emesa i l'energia absorbida de la xarxa. Els sistemes amb connexió a la xarxa són habituals en països industrialitzats i en zones densament poblades.

Energia solar tèrmica

L'aprofitament tèrmic de l'energia solar ha generat diverses estratègies i ha trobat nombrosos camps d'aplicació. En alguns casos, les aplicacions cerquen utilitzar directament l'energia tèrmica i, en d'altres, transformar-la en electricitat; en algunes d'elles, s'aprofita directament la radiació del Sol i, en d'altres, els raigs solars es concentren per aconseguir temperatures més elevades. La concentració es mesura amb el nombre de sols.

Àmbits principals d'aplicació:

Arquitectura

L'energia solar s'ha aprofitat des de sempre en l'edificació per aconseguir un ambient acollidor (orientació de les façanes, situació de les obertures, ventilació, gruixos de les parets, etc.). Avui dia, s'utilitza en la calefacció i, en menor grau, en la climatització (calefacció i aire condicionat), per tal d'obtenir aigua calenta sanitària, i també en la il·luminació.

Agricultura, ramaderia i aquicultura

En aquests camps, es pot aprofitar l'energia solar a baixa temperatura per a hivernacles, processos, l'escalfament de granges, el temperament de l'aigua de les piscifactories, assecatges i altres processos anàlegs.

Processos industrials

A més de la climatització d'edificis i instal·lacions industrials, hi ha molts processos que bé requereixen aigua calenta o energia tèrmica, en general (assecatge, destil·lació, etc.). Amb els sistemes concentradors, es poden aconseguir temperatures molt altes que pràcticament podrien cobrir tot tipus de procés industrial.

Generació d'electricitat

Finalment, com ja s'ha esmentat, una de les aplicacions de l'energia solar tèrmica que adquirirà cada vegada més importància és la generació d'electricitat, normalment en unitats d'una certa dimensió (per a petites potències, l'energia fotovoltaïca és més eficaç).

A continuació, ens centrem fonamentalment en dues aplicacions bàsiques de l'energia solar tèrmica i en les tecnologies respectives: a) els *captadors solars d'aigua calenta*, destinats a l'aprofitament tèrmic de l'energia solar, i b) les *centrals solars tèrmiques*, destinades a generar electricitat.

Captadors solars d'aigua calenta

S'anomenen *captadors solars tèrmics* tots aquells dispositius dissenyats per recollir l'energia solar incident per mitjà de l'absorció. Entre ells, hi ha tots els usats en les centrals solars tèrmiques amb sistemes de concentració (vegeu més endavant); ara ens volem centrar en els captadors solars simples, destinats a escalfar un fluid (normalment aigua).

Captadors solars plans

Els més senzills són els captadors solars plans que consten d'una caixa plana exposada a la radiació solar a través d'una cara coberta per un vidre, per l'interior de la qual circula un fluid canalitzat que s'escalfa al seu pas; generalment, el sistema es completa amb un acumulador exterior de l'aigua calenta.

Hi ha una variant més senzilla de captador solar pla, que és sense coberta de vidre, i s'utilitza en determinades aplicacions (per exemple, la calefacció de les piscines). Però també hi ha una variant més sofisticada en què la superfície del tub que capta l'energia solar està aïllada per un segon tub de vidre exterior que crea el buit (tubs de buit).

Eficàcia i rendiment

El rendiment d'un captador solar pot arribar al 75% de la radiació incident; per tant, amb la assoliment mitjà de la Terra ($3,94 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$; figura 9.2), i suposant un salt tèrmic de l'aigua de 40°C , cada metre quadrat de captador solar podria escalfar 350 litres d'aigua al dia. No està malament! Ateses les dimensions dels captadors solars, amb poques unitats es cobreixen les necessitats familiars. Després vénen els inconvenients dels dies excessivament freds o els dies sense Sol, però, en tot cas, l'estalvi d'altres fonts d'energia pot ser molt considerable (s'estima en un 70%).

Figura 9.4. Captadors solars per a aigua calenta a les teulades d'una ciutat xinesa



Potència instal·lada i evolució

Els captadors solars d'aigua calenta han tingut una gran expansió els darrers anys i contribueixen, de forma significativa, a la producció d'aigua calenta en determinats països.

Ens podríem preguntar si aquesta energia representa una quantitat important (per cert, no apareix a les estadístiques de l'EIA-govEUA, ja que no és una energia comercialitzada), atès que, dintre de la modèstia de les energies renovables, no és la més petita. En efecte, si es compara la potència tèrmica mitjana del conjunt dels captadors solars del món amb la potència primària mitjana d'una central nuclear d' 1 GW_e , se n'obté un resultat sorprenent.

Suposant un factor d'ús de 0,9 (el 90% del temps a potència nominal), la potència primària mitjana de la central nuclear és d' $1 \text{ GW}_e \times 3 \text{ GW}_t/\text{GW}_e \times 0,9 = 2,7 \text{ GW}_t$; doncs bé, la potència mitjana del conjunt de captadors solars d'aigua calenta del món era el 2008 de $26,2 \text{ GW}_t$ (taula 9.7), és a dir, un valor equivalent a 9,7 centrals nuclears, de les quals 6,8, a la Xina.

Taula 9.7. Superfície de captadors solars i equivalent energètic						
País o regió	2008				Increment 2008	
	Superfície instal·lada ¹		Potència produïda ²	Sobre consum ³	Nova superfície instal·lada ¹	
	Mm ²	%	GW _t	%	Mm ²	%
Món	212,9	100,0	26,21	0,16	40,0	100,0
1 Xina	150,1	70,5	18,48	0,65	31,0	77,5
2 Unió Europea	26,2	12,3	3,22	0,12	4,7	11,8
3 Turquia	10,6	5,0	1,31	0,91	1,0	2,5
4 Japó	6,0	2,8	0,73	0,10	0,3	0,7
5 Israel	3,6	1,7	0,45	1,55	0,3	0,7
6 Brasil	3,4	1,6	0,42	0,12	0,6	1,4
7 EUA	2,8	1,3	0,34	0,01	0,3	0,7
8 Índia	2,6	1,2	0,31	0,05	0,4	1,1
9 Austràlia	1,9	0,9	0,24	0,12	0,3	0,7
10 Corea del Sud	1,5	0,7	0,18	0,06		
Resta de països	4,3	2,0	0,52	0,01	0,7	1,8
¹ [REN21-2010] dona la capacitat instal·lada dels captadors solars en potència tèrmica (GW _t) i en superfície (m ²). Hem preferit donar aquestes darreres dades. Els valors absoluts s'han estimat a partir dels percentatges. ² Aquesta potència tèrmica produïda s'ha calculat suposant que els captadors aprofiten el 70% de l'assolellament mitjà sobre la Terra (figura 9.2). ³ Percentatge que representa la potència tèrmica produïda pels captadors solars sobre el consum de potència del país o regió. Font: [REN21-2010]. Elaboració: Carles Riba Romeva						

Comentaris a la taula 9.7:

1. Malgrat que tan sols a Israel representa més de l'1% de l'energia consumida, el volum de captadors solars existent (en m²) i la potència mitjana que proporcionen (en GW_t), obliguen a considerar-la una de les alternatives d'energies renovables del futur. Com a terme de comparació, generen unes 100 vegades més energia que el conjunt de centrals solars del món (taula 9.7).
2. La Xina és líder d'aquesta tecnologia i concentra més del 70% dels captadors solars d'aigua calenta del món. També n'és el principal fabricant. Malgrat tot, tan sols representa el 0,65% de l'energia consumida a la Xina.
3. Els augments en la difusió d'aquesta tecnologia són molt ràpids. L'increment del parc mundial de captadors solars durant l'any 2008 va ser del 18,8% i la Xina encara augmenta la quota de participació.

Com a comentari final, cal dir que és una energia que s'obté del propi entorn natural, sense intermediaris, i que contribueix a proporcionar benestar a les persones. A més, és d'una gran eficiència perquè escalfa directament els edificis o l'aigua sanitària que utilitzem sense pràcticament transformacions.

És una solució de baixa complexitat, cost baix i de rendiment elevat per la qual cosa caldria promoure la seva generalització arreu del món, especialment en les noves construccions.

Centrals solars tèrmiques

Són instal·lacions disposades sobre extensions importants del terreny per captar l'energia solar tèrmica, concentrar-la a temperatura elevada (normalment, entre uns 350 i 550°C) i transformar-la en energia elèctrica.

És una forma concentrada de generació d'energia que demana instal·lacions i recursos tècnics importants.



Figura 9.5. Centrals solars tèrmiques. Esquerra: parc termosolar Andasol I (Espanya), de col·lectors de cilindres parabòlics i un sistema d'acumulació tèrmica per sals foses. Dreta: plantes solars de torre, PS01, en primer terme, i PS02, en segon terme, amb els heliòstats respectius (Espanya)

Entre les diverses configuracions de central solar tèrmica, les més consolidades són:

Centrals de concentradors de cilindres parabòlics

Són les configuracions avui dia més utilitzades. Es basen en concentradors de forma cilíndricoparabòlica de gran longitud (generalment disposats en la direcció est-oest), que reflecteixen i concentren els raigs solars en uns captadors tubulars situats en els seus focus. D'aquesta manera, s'aconsegueix un seguiment del Sol amb un únic eix horitzontal i amb molt poques pèrdues d'energia reflectida als extrems. La calor solar escalfa líquid que flueix pel tub captador (en el cas de l'oli, la temperatura queda limitada a uns 400°C) i, per mitjà d'un bescanviador, produeix vapor que mou les turbines que generen l'electricitat. L'eficiència global del concentrador a la xarxa elèctrica és de l'ordre del 15% (semblant a l'energia fotovoltaica).

El projecte de referència de la tecnologia dels concentradors de cilindres parabòlics fou *Solar Energy Generating Systems* (SEGS) al desert de Mojave (EUA), que va desenvolupar nou fases durant els anys 1984 a 1990, que totalitzen 342 MW_e instal·lats.

Avui dia, Espanya ha assumit el lideratge d'aquesta tecnologia (pràcticament, el 70% mundial) amb 9 unitats construïdes i unes 32 més en construcció, cada una d'elles d'uns 50 MW_e de potència nominal, amb una superfície reflectant de 250.000 m² (les instal·lacions ocupen de 5 a 10 vegades més), previstes per produir 105 GW_eh/any, amb un factor d'ús de 0,24. El cost de les darreres instal·lacions és d'uns 200 M€, és a dir, uns 4 €/W_e de potència nominal.

El Banc Mundial posa l'èmfasi en la integració de centrals solars i de cicle combinat de gas (ISCC, *integrated solar combined cycle*) per cobrir alhora les fluctuacions de la demanda i una certa reducció de les emissions, mentre que la Comissió Europea és partidària de les centrals estrictament solars. Avui dia, països com Egipte, Algèria i el Marroc impulsen projectes de centrals ISCC. En el futur, caldrà seguir amb atenció la seva utilització efectiva.

En aquest sentit, la recent central solar espanyola Andasol disposa d'un sistema innovador d'acumulació d'energia tèrmica per 7,5 hores de funcionament a base de 28.500 tones de sals foses. El camp solar és més gran que els de les centrals solars sense acumulació, però permet regular la potència amb independència de la radiació solar (dia/nit, variacions de la demanda, etc.) i dóna lloc a un factor d'aprofitament superior a 0,40, tot i que el cost de produir l'energia és un 10% més elevat.

Centrals de torre i heliòstat

Consisteix en una torre al centre d'un camp d'heliòstats (centenars de miralls amb sistema de seguiment solar), a la part superior de la qual es concentra la llum solar sobre un re-

ceptor que escalfa sals foses a més de 550°C. Emmagatzemades en un dipòsit de gran eficiència tèrmica, s'utilitzen per generar vapor, que mou una turbina que, en darrera instància, produeix electricitat (aquestes darreres etapes són anàlogues a les d'una central de carbó convencional).

El sistema de torre presenta diversos avantatges en relació amb les centrals de concentradors de cilindres parabòlics: assoleix una temperatura més alta i, per tant, la conversió termodinàmica és més eficient; disposa intrínsecament d'un sistema d'emmagatzematge tèrmic que facilita la gestió de l'energia; té menys condicionaments d'un terreny pla. El desavantatge és la complexitat del sistema (control de dos eixos en cada heliòstat) i el cost associat.

La central pilot americana, *Solar One*, va funcionar amb èxit al desert de Mojave des de 1982 fins a 1988 amb aigua/vapor com a fluid tèrmic. Més endavant, reconvertida en *Solar Two* en incorporar un sistema d'acumulació d'energia per sals foses, va funcionar amb una potència de 10 MW_e de 1996 a 1999, quan va quedar fora de servei.

Actualment, els exemples més importants d'aquest tipus de centrals solars són la PS01 i la PS02 prop de Sevilla (Espanya), d'11 i 20 MW_e de potència, respectivament.

Cal mencionar, també, un magne projecte americà de torres i camps d'heliòstats múltiples, denominat *Ivanpah Solar Power Facility*, d'una potència total de 370 MW_e en tres localitzacions diferents de Califòrnia, que està previst que es construeixi entre 2009 i 2012. Té la particularitat que s'ajuda de calderes de gas per als moments en què no hi ha prou Sol.

Sistemes de disc parabòlic

Un reflector de discs parabòlic, muntat en un seguidor de dos eixos, concentra els raigs en el punt focal on se situa el captador i, sovint, també el sistema de conversió (molt freqüentment, un motor Stirling, però també altres sistemes, com les turbines d'aigua/vapor).

Les propietats de la geometria parabòlica i el seguiment en dos eixos li proporcionen unes prestacions excel·lents en capacitat de concentració i en rendiment (pot arribar al 30%). Tanmateix, la pròpia configuració en limita la potència màxima entre 10 a 25 kW_e.

És un sistema ideal per a sistemes aïllats (no connectats a la xarxa) de potència no gaire elevada (en algun cas, es disposen discs parabòlics en sèrie). En el cas energèticament més eficient de la integració del captador i el sistema de conversió no hi ha cap possibilitat d'emmagatzematge d'energia i, per tant, la gestió del sistema és molt poc flexible.

Taula 9.9. Principals centrals solars tèrmiques del món l'any 2010 (>10 MW_e)

Central solar	País	Pot. MW _e	Tipus	Unitats	Inici any	Àrea Mm ²	Prod. GW _e h	FU ¹
1. Solar Energy G.S.	EUA	354	Cil. parab.	9	1984-90	2,290	654,5	0,21
2. Solnova 1, 3 i 4	Espanya	150	Cil. parab.	3	2010			
3. Andasol 1 i 3	Espanya	100	Cil. parab.	2	2008-09	0,510	363,6	0,41
4. Nevada Solar One	EUA	64	Cil. parab.		2007		134,0	0,24
5. Ibersol Ciud. Real	Espanya	50	Cil. parab.	1	2009	0,288	103,0	0,23
6. Alvarado 1	Espanya	50	Cil. parab.	1	2009		105,2	0,24
7. Extresol 1	Espanya	50	Cil. parab.	1	2010	0,255		
8. La Florida	Espanya	50	Cil. parab.	1	2010			
9. PS20 solar p.t.	Espanya	20	Torre i hel.	1	2009	0,150		
10. Yzard (CC)	Iran	17	Cil. parab.	1				
11. PS10 solar p.t.	Espanya	11	Torre i hel.	1	2006	0,075		
Total		940						

¹ Factor d'ús, fracció del temps que hauria funcionat a la potència nominal

Font: List of solar thermal power stations – Wikipedia (04-11-2011). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Característiques de l'energia solar

Avantatges

En primer lloc, cal constatar que la radiació solar conté una quantitat enorme d'energia que es troba repartida arreu del món, malgrat que la intensitat disminueixi amb la latitud.

És inexhaurible, renovable i barata, i sempre ha estat l'energia dels pobres. En la seva forma directa és disponible per a tothom no calen permisos ni concessions.

També és enormement versàtil. En podem obtenir calor (calefaccions, escalfadors d'aigua solar, cuines solars) i, de forma més complexa, també refrigeració. Se'n pot obtenir electricitat, o bé de forma més centralitzada i eficient amb centrals solars tèrmiques, o bé amb sistemes fotovoltaics en instal·lacions més reduïdes i distribuïdes. Finalment, cal no oblidar que n'obtenim energia indirectament a través dels cultius i dels boscos.

A més, és neta i no produeix contaminació. En tot cas, els impactes poden venir arran de les inversions en equipament.

Desavantatges

El desavantatge més gran és que no en podem disposar sempre que en volem (com ens hem acostumat amb els combustibles fòssils). Hi ha el dia i la nit, el canvi continu de l'angle d'incidència, les estacions, els núvols i el clima. Això fa que els factors d'ús siguin, en general, molt baixos.

Un altre inconvenient del seu aprofitament és la dispersió. Cal recollir l'energia de grans superfícies (equipaments molt extensos) per obtenir una quantitat d'energia que satisfaci les nostres necessitats. L'ús de l'energia solar en el futur ens obligarà a buscar aplicacions menys intensives en consum d'energia.

I un darrer tema que hem de tenir en compte és la transformació del sistema actual, basat en combustibles fòssils, en els diversos sistemes d'energia renovable (la solar entre elles), i les inversions i el temps d'implantació que això comportarà.

9.3. Energia hidroelèctrica

L'energia hidroelèctrica és, avui dia, la més important de les energies renovables comercialitzades i, segons l'EIA, genera 3.119 TWh/any (2008), equivalent al 16,33% de l'electricitat mundial i al 5,76% de tota l'energia primària. Amb una potència instal·lada elèctrica de 857 GW_e (18,8% del total), les centrals hidroelèctriques proporcionen més del 50% de l'electricitat a 43 països (fonamentalment, a Amèrica del Sud i central, Àfrica, Àsia i Oceania).

Les centrals hidroelèctriques funcionen a partir de tres configuracions bàsiques: a) els salts d'aigua creats pels embassaments; b) l'aprofitament del corrent dels rius; c) els sistemes de doble embassament a diferent nivell amb sistema de bombament reversible (amb un rendiment global de l'ordre del 80%). Els salts d'aigua de gran cabal i poca altura utilitzen turbines hidràuliques Kaplan; els de gran altura i poc cabal (en zones muntanyoses) utilitzen turbines Pelton, mentre que les situacions intermèdies solen utilitzar turbines Francis.

Els embassaments hidràulics poden emmagatzemar grans quantitats d'energia: això facilita una gestió flexible de les fluctuacions de la demanda, com també l'optimització de la producció elèctrica i l'aprofitament d'energia d'altres fonts no acumulables (electricitat solar fotovoltaica, energia eòlica), que es perdrien si no fos pel sistema de doble embassament a diferent nivell amb sistema de bombament reversible.

A més, els embassaments proporcionen altres serveis clau per a la comunitat, com ara el control de les inundacions, aigua per al reg o reserves d'aigua potable.

Evolució de la producció hidroelèctrica

A la taula 9.9, es mostra l'evolució recent de la producció d'energia hidroelèctrica al món, les diferents regions i els principals països. Com en altres taules sobre energies renovables, també s'hi indica la potència instal·lada i el *factor d'ús*, és a dir, la proporció de temps equivalent que el sistema treballaria a la potència nominal.

Taula 9.9. Evolució de l'energia hidroelèctrica								
Regions	Producció d'energia hidroelèctrica (TW_eh/any)						PI¹ (GW_e)	FU²
	1990	1995	2000	2005	2008	% (2008)	2008	2008
Amèrica Nord	610,0	670,6	663,3	657,7	672,3	21,6	163,76	46,9
Amèrica Sud i C.	362,6	460,4	545,9	611,9	664,1	21,3	136,66	55,5
Europa	474,5	540,3	585,2	540,7	564,5	18,1	167,11	38,6
Euràsia	230,7	235,6	226,0	245,2	234,0	7,5	69,66	38,4
Orient Mitjà	9,6	11,0	7,9	20,9	8,5	0,3	11,99	8,1
Àfrica	54,9	59,1	74,5	89,3	94,5	3,0	22,11	48,8
Àsia i Oceania	402,3	475,8	516,7	728,3	881,1	28,2	285,96	35,2
Món	2.144,5	2.452,8	2.619,6	2.893,9	3.119,0	100,0	857,25	41,5
Índex 1990=100	100,0	114,4	122,2	134,9	145,4			
E_{q.} TW_t³	0,746	0,846	0,894	0,968	1,028			
1 Xina	125,1	184,9	220,2	393,0	522,4	16,7	171,50	34,8
2 Canadà	293,9	332,6	354,9	360,0	378,6	12,1	74,44	58,1
3 Brasil	204,6	251,4	301,4	334,1	365,9	11,7	78,29	53,3
4 EUA	292,9	310,8	275,6	270,3	254,8	8,2	77,93	37,3
5 Rússia	0,0	173,7	162,4	171,0	163,1	5,2	47,00	39,6
6 Noruega	119,9	120,1	137,5	134,3	138,2	4,4	28,25	55,8
7 Índia	70,9	71,9	73,7	100,7	113,2	3,6	39,31	32,9
8 Veneçuela	36,6	50,9	62,2	74,3	86,7	2,8	14,57	67,9
9 Japó	88,4	81,3	86,4	75,7	75,5	2,4	21,85	39,4
10 Suècia	71,8	67,4	77,8	72,1	68,4	2,2	16,35	47,7
11 França	52,8	72,2	66,5	51,2	63,1	2,0	20,87	34,5
12 Paraguai	27,2	41,7	53,0	50,7	54,9	1,8	8,13	77,1
13 Colòmbia	27,2	31,8	31,8	39,4	43,1	1,4	8,90	55,3
14 Itàlia	31,3	37,4	43,8	35,7	41,2	1,3	13,73	34,3
15 Mèxic	23,2	27,3	32,8	27,4	38,8	1,2	11,39	38,9
16 Àustria	31,2	36,7	41,4	35,9	37,6	1,2	8,22	52,2
17 Suïssa	29,5	34,8	36,5	30,9	35,7	1,1	13,48	30,2
18 Turquia	22,9	35,2	30,6	39,2	32,9	1,1	13,83	27,2
19 Argentina	17,7	26,6	28,5	33,7	30,0	1,0	9,02	37,9
20 Pakistan	16,8	23,0	17,0	30,6	27,5	0,9	6,46	48,6

¹ Potència hidroelèctrica nominal instal·lada.
² Factor d'ús, o percentatge equivalent de funcionament a la potència nominal.
³ Potència primària equivalent del flux d'energia.
Font: EIA-governEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 9.9:

1. L'energia hidroelèctrica mundial és, de molt, el sistema d'energia renovable més important (tret de la biomassa tradicional) i, els darrers 18 anys ha augmentat moderadament (45,4%).
2. Hi ha regions on aquesta energia ha evolucionat poc (Amèrica del Nord, amb un augment del 10,2%, i Europa, amb 19,0%) i altres on ha evolucionat molt (Amèrica del Sud i Central, amb un augment del 83,1%, i Àsia i Oceania, amb el 119,0%). Àfrica, amb un augment important (72,1%) està en valors absoluts molt baixos.

3. El factor d'ús global és intermedi (el 41,5%, pràcticament el doble de l'eòlica i la solar i la meitat que la geotèrmica). En això, hi incideixen dos aspectes diferents; d'una banda, les sequeres poden constituir un factor limitador, i, de l'altra, en ser una energia acumulable, s'utilitza per compensar els desequilibris del consum.

Característiques de l'energia hidroelèctrica

L'energia hidroelèctrica té actualment un gran potencial de generació, que cobreix el 5,76% de tota l'energia primària consumida en el món i continuarà essent important. Les seves característiques principals són:

Potencial de creixement

El potencial brut d'energia hidroelèctrica del planeta podria arribar a generar uns 40.000 $TW_e h/any$, dels quals 16.000 $TW_e h/any$ són tècnicament explotables [WEC-2010] i uns 6.000 $TW_e h/any$ són econòmicament viables [IEA-ETSAP-E12-2010], és a dir, el doble dels produïts avui dia. La major part dels nous recursos hidràulics que es poden desenvolupar es troben a Àfrica, Àsia i Amèrica Llatina. S'estima que les petites instal·lacions hidroelèctriques (d'1 a 10 MW_e) poden assolir una potència conjunta de 150 a 200 GW_e , de les quals només se n'explota un 20% [IEA-ETSAP-E12-2010].

Pocs residus

L'energia hidroelèctrica no genera CO_2 fruit de la combustió ni, en general, provoca un impacte ambiental important. En tot cas, les principals emissions deriven de la construcció dels embassaments i de les centrals, que presenten costos entre 2.800 i 3.800 €/MW_e. Les instal·lacions hidroelèctriques amb embassament poden tenir impactes territorials importants derivats de la pèrdua de terres de cultius o de boscos que queden sepultats.

Continuïtat en la generació

En els cursos estables d'aigua, el flux és constant i, en els embassaments, la capacitat es pot veure limitada per efectes climàtics. En tot cas, és una energia de flux bàsicament constant (hi ha països amb un factor d'ús de més del 75%), fàcilment controlable, que ofereix una gran capacitat per adaptar-se a la demanda o per compensar desequilibris creats per altres nodes de la xarxa.

Baix consum

L'energia hidroelèctrica té uns consums mínims de funcionament i un cost baix de manteniment. Si el canvi climàtic no produeix perturbacions importants en el règim de precipitacions, aquesta és una de les energies més sostenibles.

9.4. Energia eòlica

L'energia eòlica ha estat utilitzada per l'home des de fa milers d'anys a través de la navegació de vela i, més endavant, amb els molins de vent. Al principi, proporcionava directament energia mecànica, però els darrers trenta anys s'està utilitzant amb èxit per proveir electricitat.

Pràcticament a tot arreu hi ha vent (inclosos els mars), tot i que la seva intensitat varia enormement d'un indret a un altre. El potencial del recurs eòlic és enorme, i una estimació de Cole [WEC-2010] suggereix uns 1.000 TW per a tota la Terra. Només que se n'utilitzés un 1%, cobriria diverses vegades el consum actual d'electricitat.

Actualment, és una alternativa viable i madura per produir electricitat, però, com d'altres fonts d'energia renovable, està sotmesa als capricis de la natura i l'energia produïda (tot i ser molt valuosa) és molta menys que la que proporcionen els combustibles fòssils.

Opcions generals

Els sistemes eòlics han augmentat des dels primers models de 25 kW_e ara fa uns trenta anys, fins als aerogeneradors més grans existents avui dia, de 6 MW_e (equivalents a 18

MW_t), amb una torre de 120 metres d'alçada i un rotor de 126 metres de diàmetre. El seu factor d'ús és, aproximadament, del 25%.

Els motius fonamentals d'aquest augment de les dimensions són que la potència creix amb l'àrea escombrada per les pales i que els costos baixen amb el factor d'escala. Un altre factor que també col·labora en aquesta evolució és que la potència creix amb el cub de la velocitat del vent. Com més s'eleva l'altura del rotor, més elevada és la velocitat de l'aire (s'evita l'efecte terra) i, per tant, la potència creix molt ràpidament. Això s'aconsegueix fent torres més altes i instal·lant-les dalt de les muntanyes.

Una alternativa avantatjosa és situar els aerogeneradors al mar (*off-shore*) ja que, en no tenir obstacles, el vent és més fort i més constant que a terra ferma. Això, i evitar les afectacions creixents a terra ferma, pot compensar la major inversió que suposa construir el suport en el mar (ancorat en el fons o flotant) i els sobre costos de manteniment. En les instal·lacions marines, s'utilitzen les eòliques més grans disponibles.



Figura 9.6. Parc eòlic marí prop de Copenhaguen (Dinamarca).

Font: http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power

Parcs eòlics (connectats a la xarxa, on-grid)

És habitual de disposar un nombre determinat d'aerogeneradors en un mateix indret (o al mar) per formar un parc eòlic que comparteix elements del control i del sistema de transmissió de l'energia elèctrica. D'aquesta manera, els parcs eòlics prenen una dimensió més operativa. En aquest sentit, és interessant de comparar la dimensió energètica dels grans aerogeneradors amb la d'una central nuclear típica d'1 GW_e de potència. Tenint en compte els factors d'ús habituals (25% per a l'aerogenerador, més d'un 80% en les centrals nuclears), serien necessaris uns 640 grans aerogeneradors de 5 MW_e per substituir la instal·lació nuclear. A més, atès que la major part de les turbines eòliques instal·lades en el món són molt més petites, aquesta proporció encara seria més gran.

Eòliques aïllades (no connectades a la xarxa, off-grid)

Malgrat que les grans eòliques han atret més l'atenció, hi ha una extensa gamma d'aerogeneradors de dimensions menors (des de 25 kW_e fins a centenars de W_e), que sovint no funcionen connectats a la xarxa (*off-grid*). En combinació amb un conjunt de bateries, poden subministrar electricitat a un habitatge o a una granja, o bombar aigua.

L'energia eòlica, com la solar, està molt repartida en el món i a disposició de tothom (la pròpia residència, espais annexos), sense pràcticament grans inversions ni afectacions. En un futur d'energia escassa, l'aprofitament local de l'energia eòlica pot permetre a moltes famílies i comunitats assolir l'autonomia energètica. De fet, ja és una realitat als països desenvolupats, en cases de camp, granges o instal·lacions aïllades mentre que, als països en via de desenvolupament, comença a ser un suport per a les comunitats desateses.

Aspectes tecnològics

Característiques de l'energia eòlica

La velocitat nominal de l'aerogenerador s'elegeix per aprofitar els vents més freqüents, i com que sol ser molt inferior a la del generador elèctric, cal un multiplicador d'engrenatges. Si el vent és massa feble, el rotor no arrenca, però si és massa fort, hi ha perill de danys i cal aturar-lo. La forma més freqüent de controlar la velocitat i la potència del rotor és canviant la inclinació de les pales (que poden girar sobre si mateixes). En cas de vents excessius, de forma activa o passiva, les pales giren fins a posar-se perpendiculars al corrent.

Sincronització o acumulació

Els aerogeneradors connectats a la xarxa requereixen un sistema de control per sincronitzar el corrent generat amb la freqüència de la xarxa. Es pot optar per generadors síncrons o asíncrons, i amb connexió directa o indirecta a la xarxa. En la connexió indirecta, el corrent generat per l'eòlica passa a través de dispositius electrònics per tal d'ajustar la freqüència a la xarxa. Amb un generador asíncron, això té lloc de forma automàtica.

En els sistemes no connectats a la xarxa, cal transformar el corrent en continu i alimentar un sistema de bateries.

Evolució de la producció eòlica

L'aprofitament a gran escala de l'energia eòlica és un fet relativament recent. L'any 1990, les instal·lacions eòliques eren testimonials, mentre que el 2008 la producció elèctrica ja era quasi del 2,5% de les energies renovables i el 0,4% de totes les energies primàries. A més, el creixement és molt viu (el 31,0% l'any 2009) i ha totalitzat 157,9 GW_e instal·lats a finals d'aquest any.

Taula 9.10. Evolució de l'energia eòlica en el món, per regions i països principals								
Regions	Producció d'energia eòlica (TW _e h/any)						PI ¹ (GW _e)	FU ²
	1990	1995	2000	2005	2008	% (2008)	2008	2008
Amèrica del Nord	2,79	3,23	5,86	19,23	59,25	28,2	27,106	25,0
Amèrica del Sud i c.	0,00	0,00	0,20	0,46	0,90	0,4	0,628	16,3
Europa	0,67	3,88	21,20	67,40	114,22	54,4	65,026	20,1
Eurasia	0,00	0,00	0,01	0,14	0,36	0,2	0,259	15,8
Orient Mitjà	0,00	0,00	0,00	0,08	0,20	0,1	0,089	25,2
Àfrica	0,00	0,00	0,21	0,80	1,24	0,6	0,460	30,8
Àsia i Oceania	0,03	0,54	2,48	11,52	33,75	16,1	26,978	14,3
Món	3,50	7,64	29,97	99,62	209,92	100,0	120.547	19,9
Índex 1990=100	100,0	218,7	857,3	2.849,9	6.005,0			
Índex 2000=100			100,0	332,4	700,4			
Eq. TW_t³	0,0012	0,0026	0,0102	0,0333	0,0694			
1 EUA	2,79	3,16	5,59	17,81	55,36	26,4	24,651	25,6
2 Alemanya	0,03	1,63	8,88	25,87	38,55	18,4	23,895	18,4
3 Espanya	0,01	0,26	4,49	20,12	30,59	14,6	16,546	21,1
4 Índia	0,03	0,47	1,60	6,27	13,05	6,2	10,243	14,5
5 Xina	0,00	0,06	0,58	1,93	12,43	5,9	12,170	11,7
6 Regne Unit	0,01	0,37	0,90	2,76	6,74	3,2	3,406	22,6
7 Dinamarca	0,58	1,12	4,03	6,28	6,58	3,1	3,163	23,8
8 Portugal	0,00	0,02	0,16	1,68	5,47	2,6	2,857	21,9
9 França	0,00	0,01	0,07	0,91	5,40	2,6	3,422	18,0
10 Itàlia	0,00	0,01	0,54	2,23	4,62	2,2	3,525	15,0
¹ Potència eòlica nominal instal·lada.								
² Factor d'ús, o % equivalent de funcionament a la potència nominal.								
³ Potència primària equivalent del flux d'energia.								
Fonts: Energia produïda: EIA; potència instal·lada; World Wind Energy Association (WWEA), [WWEA-2009]. Elaboració: Carles Riba Romeva								

Comentaris a la taula 9.9:

1. La primera constatació és que l'energia eòlica evoluciona molt ràpidament en el món. Si es pren la referència de l'any 2000, en vuit anys s'ha multiplicat per 7 l'energia produïda i, de manera anàloga, la potència instal·lada.
2. Una segona constatació és que, de moment, està concentrada en pocs països (més del 70% en els cinc primers). I, sobretot, a les regions d'Europa i d'Amèrica del Nord. En tot cas, sembla que la Xina comença a escalar posicions i ha més que duplicat la potència instal·lada l'any 2009.
3. Tot i que no es reflecteix a la taula 9.10, comença a fer-se visible la potència instal·lada en el mar (*off-shore*), que l'octubre de 2010 ja era de 3,16 GW_e.

Característiques de l'energia eòlica

Avantatges

El vent és un recurs energètic renovable, inexhaustible i a l'abast de tothom (ningú no en pot tallar l'accés) i normalment pot conviure amb altres usos del sòl. Està molt distribuïda i acostuma a haver-hi emplaçaments adequats a prop dels usuaris.

La tecnologia eòlica és de fàcil accés (en comparació d'altres sistemes energètics) i permet modular la dimensió dels sistemes, alhora que proporciona noves activitats.

En les petites instal·lacions permet la implantació descentralitzada en unitats familiars o en petites comunitats, tant si és en règim autònom o d'intercanvi amb la xarxa. Pot constituir una eina d'educació interessantíssima per a la gestió i l'estalvi d'energia.

En les grans instal·lacions, tot i ser una tecnologia jove amb grans possibilitats d'innovació, l'energia eòlica és competitiva enfront d'altres fonts d'energia. La implantació no requereix molt de temps (entre 6 mesos i 1 any) i el retorn de la inversió és ràpid (segons Kubiszewski, la taxa de retorn energètic (TRE, o EROI) és aproximadament de 20 [Kub-2010]).

El funcionament dels aerogeneradors no produeix emissions de CO₂, ni residus contaminants. Pot presentar inconvenients menors, com l'impacte paisatgístic, la interferència amb les aus o alguns sorolls de funcionament.

Inconvenients

Com totes les alternatives renovables, la quantitat d'energia que se n'obté és molt limitada en comparació de la que proporcionen els combustibles fòssils.

L'energia eòlica no està disponible en tot moment, ni en la quantitat que desitgem. Per tant, o bé s'han de preveure sistemes d'acumulació, o bé s'ha de gestionar la demanda en funció de la disponibilitat (no a l'inrevés). Aquest és un inconvenient que troben les companyies elèctriques tradicionals, però que caldrà resoldre adequadament.

L'acumulació de l'energia eòlica dels sistemes connectats a la xarxa (*on-grid*) es podria combinar amb l'ús de centrals hidroelèctriques de doble embassament amb bombament reversible. Es tractaria d'aprofitar, en tot moment, l'energia que genera el vent quan n'hi ha, bombant l'aigua a l'embassament superior i després administrar aquesta energia a través de la turbina hidràulica segons la demanda. L'opció del doble embassament té un rendiment global del 80%.

Altres propostes preveuen l'acumulació de l'energia eòlica en les bateries del futur parc d'automòbils elèctrics. El següent exemple posa de manifest la dificultat per implementar aquesta solució: a) L'any 2009, Espanya va produir 36,99 TW_eh eòlics (13,2% de l'electricitat, segons REE, Red Eléctrica Española); b) Un automòbil elèctric estàndard que recorri 15.000 km/any, consumeix uns 3.375 kW_eh/any a la sortida de l'aerogenerador (equivalent a 180 W_eh/km a la bateria); c) Si es preveu que un 25% de l'energia eòlica generada s'acumuli en les bateries durant les nits, calen 2.740.000 vehicles elèctrics a Espanya (un 13% del parc actual). Però a penes s'estan venent alguns centenars de vehicles elèctrics per any.

9.5. Energia geotèrmica

L'energia geotèrmica prové de la calor produïda a l'interior de la Terra que resulta fonamentalment de la desintegració d'isòtops radioactius d'urani, tori i potassi (87%), com també de la calor originada en els primers moments de formació del planeta i de l'energia solar absorbida per la capa terrestre.

L'escorça terrestre és la fina capa externa de la Terra, de consistència sòlida (formada de granit i recoberta sovint d'estrats sedimentaris), amb un gruix de 20 a 60 km en les zones continentals (el radi mitjà de la Terra és de 6.371 km) i molt més prima en els fons dels oceans (de 5 a 15 km). Prop de la superfície, la temperatura de l'escorça terrestre és molt baixa (de 15 a 20 °C), però augmenta ràpidament amb la profunditat fins a situar-se entre els 500° i els 1.000° C en el seu contacte amb el mantell. Després, la temperatura de la Terra progressa més lentament vers l'interior fins a uns 5.000 °C en el nucli.

La gran energia interna del planeta (equivalent a 350.000.000 de vegades les reserves sumades dels recursos energètics no renovables) origina un flux d'energia vers la superfície de la Terra que, de mitjana, se situa entre els 0,063 W/m² [Cra-2001] i els 0,082 W/m² [WEC-2010] i representa globalment una potència entre els 32,1 i els 41,8 TW_t (de l'ordre del doble de la consumida per la humanitat).

Aquest flux es reflecteix a tota l'escorça terrestre a través d'un augment de la temperatura amb la profunditat d'uns 2 a 3°C per cada 100 metres (gradient geotèrmic). Però també existeixen localitzacions amb gradients molt més elevats (camps geotèrmics) a causa de singularitats geològiques com ara: a) la intrusió de roca fosa (magma) a l'escorça terrestre; b) l'aprimament de l'escorça terrestre; c) l'ascens d'aigües subterrànies que han estat en contacte amb roques molt més calentes a diversos quilòmetres de profunditat; d) l'aïllament tèrmic de les roques profundes per capes superiors (com pissarres) de conductivitat tèrmica baixa, i e) l'escalfament anòmal de roques poc profundes per la presència d'elements radioactius.

Aplicacions de l'energia geotèrmica d'alta i mitjana temperatura

Les aplicacions més atractives de l'energia geotèrmica són aquelles que aprofiten fonts geotèrmiques de temperatures elevades i mitjanes en localitzacions favorables, ja que permeten obtenir electricitat i realitzar processos de valor afegit més alt. S'usa, fonamentalment, per produir electricitat i calor industrial, com ara: calefacció i aigües sanitàries de grans edificis i de districtes urbans, determinats processos industrials, hivernacles, ramaderia, aquicultura.

Avui dia, la capacitat mundial en energia geotèrmica de temperatura elevada i mitjana és d'uns 9,3 GW_e en potència elèctrica instal·lada, que generen 60 TWh/any (el 0,32% de l'energia elèctrica mundial), i uns 18 GW_t en potència tèrmica instal·lada, que produeixen 63 TW_t/h/any de calor. Tanmateix, les localitzacions són limitades.

Segons el nivell de la temperatura, es distingeixen diversos tipus de recursos geotèrmics:

a) *Sistemes en què domina el vapor.* Són pocs en el món (guèisers del nord de Califòrnia, Larderello a Itàlia i Matsukawa al Japó) i permeten moure directament una turbina especial per produir electricitat; en alguns casos, cal un procés previ de separació per tal d'obtenir-ne el vapor mentre que el condensat es reinjecta al pou.

a) *Energia geotèrmica d'alta temperatura (>100 °C).* Opera en pous geotèrmics molt calents o molt profunds d'aigües termals on l'aigua s'injecta a pressió a la roca. Aquesta energia geotèrmica és útil sobretot per produir electricitat i se sol subdividir en dues subcategories:

- Energia geotèrmica d'alta temperatura (superior a 150°C). Permet la producció d'electricitat amb el vapor que flueix amb pressió suficient per alimentar una turbina.

- Energia geotèrmica de temperatura mitjana (100°C a 150 °C). Utilitza un medi fluid per produir l'electricitat.

a) *Energia geotèrmica de temperatura baixa (30°C a 100°C).* Jaciments geotèrmics d'aigua calenta que es troben a profunditats entre pocs centenars a diversos milers de metres. S'usa principalment per a xarxes col·lectives de calefacció.

a) *Energia geotèrmica de molt baixa temperatura (10°C a 30°C).* També coneguda com a *bomba de calor geotèrmica*, s'utilitza principalment per a sistemes de calefacció i aire condicionat. Requereix una alimentació elèctrica i proporciona una energia tèrmica diverses vegades superior.

Energia geotèrmica per produir electricitat

L'agència americana EIA-govEUA proporciona dades sobre l'evolució de l'electricitat produïda per mitjà d'energia geotèrmica (taula 9.11).

Taula 9.11. Evolució de la producció elèctrica amb energia geotèrmica								
Regions	Producció d'electricitat (TW _e h/any)						PI ¹ (GW _e)	FU ²
	1990	1995	2000	2005	2008	% (2008)	2008	2008
Amèrica del Nord	20,30	18,76	19,70	21,63	21,65	35,8	3,221	76,7
Amèrica del Sud i c.	0,77	1,16	1,80	2,35	2,82	4,7	0,467	69,1
Europa	3,43	3,66	5,87	6,76	10,09	16,7	1,309	88,0
Euràsia	0,03	0,03	0,06	0,39	0,44	0,7	0,082	61,6
Orient Mitjà	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,000	--
Àfrica ⁴	0,32	0,37	0,41	0,95	1,13	1,9	0,122	?
Àsia i Oceania	10,02	13,01	21,63	21,75	24,30	40,2	4,066	68,2
Món	34,86	36,99	49,47	53,82	60,44	100,0	9,267	74,4
Index 1990=100	100,0	106,1	141,9	154,4	173,4			
Eq. TW _t ³	0,0246	0,0259	0,0348	0,0378	0,0425			
1 EUA	15,43	13,38	14,09	14,69	14,95	24,7	2,256	75,6
2 Filipines	5,19	5,83	11,05	9,41	9,81	16,2	1,958	57,2
3 Indonèsia	1,07	2,10	4,63	6,27	7,88	13,0	0,933	96,5
4 Mèxic	4,87	5,39	5,61	6,93	6,70	11,1	0,965	79,3
5 Itàlia	3,06	3,26	4,47	5,06	5,24	8,7	0,671	89,2
6 Nova Zelanda	2,10	2,06	2,78	3,00	3,99	6,6	0,585	77,9
7 Islàndia	0,29	0,28	1,26	1,58	3,84	6,3	0,575	76,2
8 Japó	1,65	3,01	3,18	3,06	2,61	4,3	0,532	56,1
9 El Salvador	0,40	0,42	0,75	1,00	1,44	2,4	0,204	80,6
10 Kenya ⁴	0,32	0,37	0,41	0,95	1,12	1,9	0,115	?
¹ Potència geotèrmica nominal instal·lada. ² Factor d'ús, o percentatge equivalent de funcionament a la potència nominal. ³ Potència primària equivalent del flux d'energia. ⁴ A les dades d'EIA, hi ha una incongruència entre la potència generada i la instal·lada (factor d'ús > 1) Fonts: Energia produïda: EIA. Elaboració: Carles Riba Romeva								

Comentaris a la taula 9.11:

1. La potència elèctrica generada a partir d'energia geotèrmica és pràcticament insignificant en el context mundial (0,32% de l'energia elèctrica produïda, i 0,24% de l'energia primària); l'EIA indica que el rendiment termicoelèctric de les centrals geotèrmiques és més baix que el de les centrals tèrmiques convencionals: 6,16 TW_t/TW_e.
2. En canvi, el factor d'ús de l'energia geotèrmica és 74,4% a escala mundial, molt més favorable que per a d'altres energies renovables (solar tèrmica, fotovoltaica o eòlica). Això fa que una potència instal·lada reduïda de centrals geotèrmiques (9,27 GW_e) produeixi prop d'1/3 de l'energia elèctrica produïda per la potència eòlica instal·lada (121,05 GW_e).

3. Les localitzacions favorables per a l'energia geotèrmica són relativament escasses, fet que no permet ampliar a gran escala, en el futur, aquesta font d'energia.

Aplicacions de l'energia geotèrmica de baixa temperatura

En temps recents, cada cop tenen més difusió les tecnologies per aprofitar l'energia geotèrmica de molt baixa temperatura la qual, si bé queda limitada a aplicacions que requereixen temperatures molt baixes i intensitats energètiques reduïdes, en anar associada a tota la superfície de la Terra, la fa enormement atractiva i disponible per a tothom.

La capa més superficial de la Terra s'escalfa i es refreda amb l'atmosfera però, a una certa profunditat (pocs metres), la temperatura del subsòl es manté molt uniforme durant tot l'any, que es correspon, aproximadament, a la temperatura mitjana del lloc (de 10° a 15°C en la majoria de països temperats). Amb la profunditat, la temperatura augmenta.

Una de les aplicacions més interessants és la climatització geotèrmica (calefacció durant l'hivern i refrigeració durant l'estiu) i l'obtenció d'aigües sanitàries en edificis de zones poc denses. Es poden plantejar, fonamentalment, dos sistemes que comporten inversions i consums energètics diferents: a) sense bomba de calor; b) amb bomba de calor.

Climatització sense bomba de calor.

És un sistema senzill i de cost energètic baix quan funciona, però que comporta inversions relativament elevades. Cal perforar el terreny fins que la temperatura del subsòl sigui la desitjada (temperatura de confort, de 20 a 22°C; de 50 a 300 metres de profunditat). La calor o el fred s'obtenen simplement bombant a la superfície un líquid que adquireix la temperatura del subsòl, a l'hivern més calent que la temperatura ambient, i a l'estiu més fred. La solució de *terra radiant* en un edifici resulta molt eficaç i el consum de la bomba hidràulica és molt reduït en relació amb l'energia que seria necessària en una calefacció i refrigeració convencionals. Requereix poca extensió superficial.

Climatització amb bomba de calor

Ja a molt poca profunditat (de 50 cm a pocs metres), la temperatura del sòl és força constant en el temps i s'aproxima a la temperatura mitjana del lloc. Si aquesta és inferior a la temperatura de confort, fet freqüent en els països temperats (temperatures del subsòl immediat entre 8 i 15°C), aleshores cal un sistema per cobrir el salt tèrmic. S'utilitza la bomba de calor, que funciona de forma similar a un aire condicionat: a l'hivern, bomba calor del subsòl a l'edifici i, a l'estiu, bomba calor en sentit contrari. El balanç energètic de les calefaccions geotèrmiques amb bomba de calor és de l'ordre de 4 kW_th d'energia calorífica per 1 kW_eh d'energia elèctrica consumida i, aparentment, representa un estalvi del 75%; tanmateix, no es diu que, en el *mix* elèctric de la majoria de regions i països del món, generar 1 kW_eh comporta, aproximadament, el consum de 3 kW_th d'energia primària (i les emissions corresponents de CO₂ segons el *mix*), de manera que l'estalvi real probablement no supera el 25%. En la disposició de tubs horitzontals, es recomana una superfície de terreny d'entre una i dues vegades la superfície a climatitzar, mentre que, amb tubs verticals (de 50 a 70 metres de profunditat), el terreny necessari és molt inferior.

Característiques de l'energia geotèrmica

L'energia geotèrmica pot representar, alhora, limitacions o oportunitats. La seva constància en el temps n'és un dels avantatges principals. El seu repartiment territorial és més complex i depèn del nivell de temperatura de les fonts geotèrmiques.

Font d'energia local. L'emplaçament de les instal·lacions és necessàriament local. Si es genera electricitat, hi ha la possibilitat de transportar-la a distància, però si es produeix calor, aleshores la utilització també ha de ser local. Per tant, és una font energètica que no permet la deslocalització i que evita la dependència.

Pocs residus. En principi, no genera CO₂ i té impactes ambientals baixos. Tanmateix, determinats jaciments geotèrmics emeten àcid sulfhídric, que es detecta per una olor molt forta i que, en quantitats elevades, pot ser letal. En altres fonts geotèrmiques, el vapor surt barrejat amb CO₂ o contaminat amb substàncies com l'arsènic o l'amoníac. En determinades instal·lacions, es produeix contaminació tèrmica o degradació del paisatge

Producció constant. Ofereix un flux constant d'energia al llarg del temps, independent del dia o la nit, les estacions, les pluges, els vents, els cabals dels rius o altres factors climàtics. Això es reflecteix en un factor d'aprofitament elevat, generalment superior a 0,70. També evita alguns dels efectes destructius d'episodis climàtics extrems (vents huracanats, tempestes marines) a què es poden veure sotmesos altres sistemes energètics.

Baix consum. En sistemes d'alta temperatura, produeix energia neta amb un consum molt baix d'altres fonts d'energia. En sistemes geotèrmics de baixa temperatura per a la climatització d'edificis, la utilització de bombes de calor pot fer disminuir, de forma significativa, els beneficis energètics; en canvi, la utilització de pous més profunds amb simples bombes hidràuliques pot donar rendiments molt acceptables.

9.6. L'energia dels oceans

Com hem vist, l'energia que avui dia obtenim dels oceans és la més reduïda de totes (0,5 TW_eh l'any 2008, el 0,007% de les energies renovables i el 0,001% de totes les energies), tot i que el potencial teòric és enorme.

I, malgrat que hi ha instal·lacions en el mar des de fa molts anys (com la central maremotriu de La Rance, França, des de l'any 1967), les tecnologies per aprofitar l'energia dels oceans encara es troben en una fase experimental.

Els oceans poden proporcionar energia a través de diferents fonts i tecnologies: a) aprofitant l'energia de les ones; b) aprofitant els corrents marins; c) aprofitant les marees, ja sigui a través d'un barratge o dels corrents que generen; d) convertint el gradient tèrmic dels oceans en energia (OTEC, *Ocean Thermal Energy Conversion*), o e) explotant el gradient salí [IEA-OES-2009].

Si bé el potencial d'energia explotable de forma econòmica a partir dels oceans és molt gran en relació amb l'ús actual (uns 500 TW_eh/any a partir de les ones i uns 100 TW_eh/any a partir de les marees [IEA-ETSAP-E13-2010]), és molt moderat en relació amb els quasi 19.100 TW_eh que es van generar l'any 2008 en el món. Les altres formes d'obtenir energia de mar són difícils d'avaluar en el moment actual de desenvolupament tecnològic.

Efectes energètics dels oceans en el clima

De tota manera, els oceans ja ens aporten, indirectament, beneficis enormes en el camp de l'energia a través de la circulació marina.

En efecte, el Sol incideix en el mar de dues maneres: creant vents que mouen les capes superficials a través de la fricció (màxim, uns 100 metres de profunditat), i alterant la seva densitat per la temperatura i/o per modificacions de la salinitat. Les diferències de densitat, junt amb els efectes de la rotació de la Terra, originen la circulació termohalina (causada per efectes tèrmics i salins) que origina uns corrents superficials i profunds enllaçats entre si, que abasten tots els oceans i tenen gran incidència en la configuració dels diferents climes de la Terra i en la vida marina gràcies al proveïment d'oxigen i de nutrients.

El corrent del Golf és una part de la circulació termohalina superficial que mou grans masses d'aigua càlida des del golf de Mèxic fins a les costes de l'Europa del Nord. En aquell punt, sota els efectes de la rotació de la Terra, el corrent gira vers Groenlàndia i les aigües, salinitzades pel refredament i l'evaporació progressiva, s'enfonsen i retornen com un corrent fred profund (entre 2.000 i 4.000 metres) que es mou en direcció nord-sud. Aquest enfon-

sament davant de les costes de Grenlàndia (i, en menor intensitat, en el mar de Labrador) és precisament un dels motors principals de la circulació termohalina.

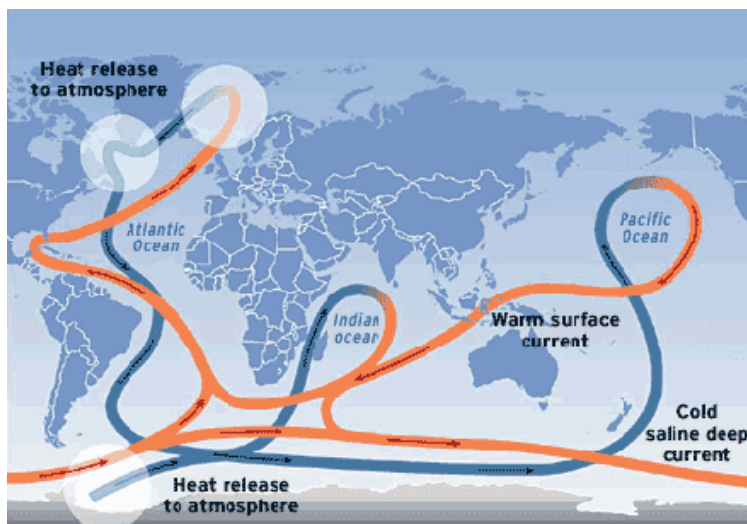


Figura 9.7. Circulació termohalina amb els corrents superficials calents assenyalats en taronja i els corrents freds profunds assenyalats en blau.
Font: IPCC, corregida per la Woods Hole Oceanographic Institution

La dimensió del corrent del Golf és enorme: té uns 100 km d'amplada i una profunditat entre 800 i 1.200 metres, amb una velocitat que arriba a 2,5 m/s a la superfície, i transporta una potència d'uns 1.400 TW_t en forma de calor (quasi 80 vegades el consum humà).

Doncs bé, el corrent del Golf és fort i, junt amb corrents d'aire del mateix signe, aporta una quantitat de calor ingent a Europa occidental que fa que tingui un clima molt més benigne del que li correspondria. En efecte, només cal constatar que la latitud de Barcelona (41,23° nord, una ciutat del sud d'Europa) és superior a la de Nova York (40,78°, una ciutat del nord dels estats Units) o la de Pequín (39,92°, una ciutat del nord de la Xina), i que la latitud de Copenhaguen (55,66°, una ciutat del nord d'Europa amb clima atemperat) tan sols es pot comparar amb la de Moscou (55,77°) i la del sud d'Alaska (54,66°).

Tot i que encara està en discussió, sembla que un dels efectes del canvi climàtic pot ser el desglaç de grans masses d'aigua dolça a les costes de Grenlàndia que pot alentir el corrent del Golf i produir un refredament d'Europa, en contra de l'escalfament global. Si es dona aquesta circumstància, a Europa haurem perdut molta més energia que la que podem guanyar amb grans esforços en altres camps.

9.7. Els biocarburants

En sentit ampli, els *biocombustibles* són matèries de naturalesa sòlida, líquida o gasosa destinades a obtenir energia per combustió (calor, electricitat i tracció de vehicles) derivades, directament o indirectament, de qualsevol tipus de biomassa, és a dir, de les plantes (cultivades o dels boscos), de residus animals i de microorganismes i també de deixalles orgàniques. En queden exclosos els hidrocarburs fòssils (petroli, gas natural) i els carbons fòssils (inclosa la torba).

Atès que aquestes matèries poden ser regenerades en períodes de temps comparables a la vida humana (i sovint bastant inferiors), entren dintre de la categoria de les energies renovables; però una mala gestió d'aquests recursos també pot conduir a consumir o a malbaratar el capital (desforestació de boscos, exhauriment dels sòls, extinció d'espècies) i donar

lloc a la pèrdua irreversible del recurs (almenys per a un període de temps molt llarg) semblant al que succeeix amb els combustibles fòssils.

Els biocombustibles inclouen, entre d'altres: a) la *biomassa tradicional* (llenya del bosc, carbó vegetal, residus vegetals i residus d'animals); b) els *biocarburants*, normalment líquids, caracteritzats perquè poden ser utilitzats en els motors de combustió interna (cicles Otto i dièsel), i c) el *biogàs*, obtingut de la descomposició de la matèria orgànica.

Evolució dels biocarburants

Com s'ha vist a la secció 5.3, per la seva densitat energètica elevada i la fàcil manipulació, els combustibles líquids són estratègics per a la majoria de sistemes de transport, raó per la qual s'estan fent grans esforços per obtenir-los de la biomassa (BTL, *biomass-to-liquid*). Els biocarburants més coneguts (i, alhora, més utilitzats) són el bioetanol i el biodièsel. Es distingeix entre diverses generacions de biocarburants:

Biocarburants de primera generació

S'anomenen així els que s'obtenen de llavors, grans o plantes completes de cultius inicialment destinats a aliment humà o a farratge. Per tant, la seva producció entra en col·lisió amb l'alimentació humana. Les transformacions d'aquests cultius donen lloc a dos productes energètics amb tecnologies madures: el *bioetanol*, basat en el sucre (actualment, el 80% de l'energia produïda de biocarburants), i el *biodièsel*, basat en olis (pràcticament la resta de producció). El *bioetanol* s'obté de plantes sucreres (canya de sucre, remolatxa) o de cereals (blat de moro o blat) i s'usa mesclat amb la gasolina en motors convencionals (del 5 al 10%) i en motors adaptats (en percentatges més alts), o bé prèviament convertit en ETBE (etil ter butil èter) i barrejat amb la gasolina (del 5 al 15%) per augmentar-ne l'índex d'octà i eliminar-ne l'ús d'additius amb plom. El *biodièsel* s'obté de la transformació d'olis vegetals (soja, palma, colza, gira-sol) i s'utilitza o bé directament en motors adaptats o bé, mesclat en proporcions relativament baixes amb el gasoil, en els motors dièsel convencionals.

Biocarburants de segona generació

La segona generació de biocarburants s'orienta a utilitzar i a posar en valor altres formes de biomassa que no entrin en col·lisió amb l'alimentació humana, com ara plantes no alimentàries (per exemple, la *jatropha*), restes de cultius (palla, rostoll) o la biomassa dels boscos. Per transformar la biomassa que conté cel·lulosa (fusta, residus agrícoles), cal un procés complex que encara no té una traducció industrial econòmicament viable: se separa la lignina de la cel·lulosa amb enzims, després es trenquen les molècules de cel·lulosa per mitjà d'hidròlisi i se n'obtenen carbohidrats que, fermentats i destil·lats, es converteixen en bioetanol. Si bé aquestes noves perspectives amplien enormement el volum de la biomassa i dels residus utilitzables, la major part de les tecnologies per produir biocarburants de segona generació estan encara en fase de desenvolupament.

Noves generacions de biocarburants

Es parla d'una tercera generació de biocarburants basada en cultius d'algues com a matèria primera per obtenir-ne biodièsel. Concretament, els cultius d'algues microscòpiques presenten teòricament nombrosos avantatges (creixement molt ràpid en localitzacions i condicions inhòspites, funcionament com a important embornal de CO₂, generació de múltiples subproductes que poden rendibilitzar el procés), però aquesta tecnologia encara ha de superar molts esculls abans d'esdevenir econòmicament viable a gran escala.

I també ja es pensa en noves generacions de biocarburants creats a partir de processos bioquímics avançats o en tecnologies *solar-a-combustible*. Però cap d'aquestes solucions no es preveu que pugui arribar al mercat abans de dues o tres dècades, i caldrà veure si podran produir biocarburants en quantitats significatives.

Producció de biocarburants

Si bé la producció de biocarburants de segona i tercera generació pot obrir una finestra a l'esperança, és bo tenir present quina és la producció actual de biocarburants i la seva evolució en el temps (taula 9.12).

Com altres fonts renovables, han tingut un augment espectacular, però la seva producció continua essent testimonial a escala mundial.

Taula 9.12. Evolució de la producció de biocarburants							
Producció de bioetanol (kb/d) ¹							
Regions i països	2000	2005	2006	2007	2008	2009	% (2009)
Amèrica del Nord	109,24	259,09	323,01	439,18	621,87	732,19	55,2
Amèrica del S. i c.	184,99	284,63	328,32	414,62	500,74	476,44	35,9
Europa	2,00	14,06	27,84	31,11	47,16	62,03	4,7
Euràsia	0,00	0,30	0,50	0,60	0,70	1,30	0,1
Orient Mitjà	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Àfrica	0,20	0,20	0,30	0,20	0,30	0,42	0,0
Àsia i Oceania	2,90	26,00	32,60	38,40	48,01	54,94	4,1
Món	299,33	584,28	712,57	924,11	1.218,78	1.327,33	100,0
Índex 1990=100	100,0	195,2	238,1	308,7	407,2	443,4	
Eq. TW _t ¹	0,0212	0,0414	0,0505	0,0655	0,0863	0,0940	
1 EUA	105,54	254,69	318,61	425,38	605,57	713,49	53,8
2 Brasil	183,89	276,41	306,12	388,71	466,29	449,82	33,9
3 Xina	0,00	20,70	24,10	28,70	34,30	37,00	2,8
4 França	2,00	2,50	5,00	9,30	17,00	21,50	1,6
5 Canadà	3,70	4,40	4,40	13,80	16,30	18,70	1,4
6 Alemanya	0,00	2,80	7,40	6,80	10,00	13,00	1,0
7 Espanya	0,00	5,20	6,90	6,20	5,90	8,00	0,6
8 Jamaica	--	2,20	5,20	4,85	6,42	6,90	0,5
Producció de biodièsel (kb/d) ¹							
Regions i països	2000	2005	2006	2007	2008	2009	% (2009)
Amèrica del Nord	0,00	6,12	17,14	33,65	45,91	35,23	11,4
Amèrica del S. i c.	0,10	0,54	2,25	15,25	38,63	57,93	18,8
Europa	15,70	68,06	113,22	137,50	155,04	172,61	56,0
Euràsia	0,00	0,30	0,32	0,72	2,50	3,80	1,2
Orient Mitjà	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Àfrica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,09	0,0
Àsia i Oceania	0,00	2,20	9,10	15,80	28,82	38,52	12,5
Món	15,80	77,23	142,03	202,92	270,95	308,19	100,0
Índex 1990=100	100,0	488,8	898,9	1.284,3	1.714,9	1.950,6	
Eq. TW _t ²	0,0011	0,0055	0,0101	0,0144	0,0192	0,0218	
1 Alemanya	4,90	39,00	70,40	78,30	61,70	51,20	16,6
2 França	5,90	8,40	11,60	18,70	34,40	41,10	13,3
3 EUA	--	5,92	16,34	31,95	44,11	32,93	10,7
4 Brasil	0,00	0,01	1,19	6,97	20,06	27,71	9,0
5 Argentina	0,10	0,20	0,60	7,50	15,30	23,10	7,5
6 Itàlia	1,60	7,70	11,60	9,20	13,10	13,10	4,3
7 Espanya	1,60	3,20	1,20	3,30	4,30	11,00	3,6
8 Tailàndia	0,00	0,40	0,40	1,20	7,70	10,50	3,4
¹ kb/d = milers de barrils per dia.							
² Potència primària equivalent del flux d'energia.							
Font: biocarburants produïts: EIA-govEUA. Elaboració: Carles Riba Romeva							

Comentaris a la taula 9.11:

1. La producció de biocarburants creix molt ràpidament, més el biodièsel que el bioetanol, fonamentalment perquè partia de quotes molt baixes. El Brasil i els Estats Units ja produïen bioetanol en quantitats importants a l'inici d'aquest curt període.
2. Les quantitats sumades dels dos biocarburants (1,64 Mb/d, milions de barrils per dia) representen, escassament, un 2% de la producció i del consum de petroli i combustibles líquids mundials en els darrers anys (aproximadament, uns 85 Mb/d).
3. La taula anterior (obtinguda a partir de les dades de l'EIA-govEUA) determina com a productors dels biocarburants els països que els transformen, i no els que produeixen els cultius de base. Aquest fet oculta alguns desajustos greus com el conflicte de les Tortillas a Mèxic, les desforestacions al sud-est Asiàtic (especialment a Malàisia i Indonèsia) o la substitució de cultius tradicionals alimentaris per monocultius energètics a Àfrica i a Amèrica del Sud (especialment a l'Argentina i al Brasil).

Límits dels biocarburants de primera generació

Els biocarburants (fonamentalment l'*etanol* i el *biodièsel*), obtinguts de diferents cultius, sembla que són l'esperança més directa per substituir el petroli. Tanmateix, se n'haurien d'analitzar dos aspectes fonamentals: la taxa de retorn energètic (TRE, o EROI) i la incidència sobre l'agricultura i l'alimentació.

Capacitat substitutiva dels biocombustibles

Un aspecte clau és analitzar la capacitat dels cultius de la Terra per produir biocombustibles en substitució del petroli. A aquest efecte, s'ha avaluat la producció d'etanol que es podria obtenir si s'hi destinessin els principals cultius del món (fonamentalment, els cereals i els cultius sucres). Els resultats es donen a la taula 9.13.

Taula 9.13. Agricultura i biocarburants (rendiments dels cultius per a l'etanol)						
Any 2007	Superfície cultivada Mha	Producció de cultius Tg/any	Rendiment de l'etanol litres/ha	Total etanol Glitres/any ¹	Petroli equivalent Glitres/any ¹	Petroli equivalent Mb/dia ¹
Blat	222,8	683,4	952	212,1	142,1	2,45
Arròs	159,3	685,9	1.806	287,7	192,8	3,32
Blat de moro	161,1	826,2	1.960	315,8	211,6	3,65
Sorgo	44,9	65,5	494	22,2	14,9	0,26
Canya de sucre	24,3	1.736,3	4.550	110,6	74,1	1,28
Remolatxa sucraera	4,3	222,0	5.060	21,8	14,6	0,25
Total al món	617,7	4.219,3		970,1	649,9	11,20
Total món (tots cultius)	1.447,9	10.249,0		Total món (petroli)		85,00
% món	42,6% ²	41,2% ²		% món		13,2% ³

¹ Glitres/any = milers de milions de litres por any; Mb/dia = milions de barrils per dia.

² Percentatge respecte a la superfície i a la producció mundials de tots els cultius, inclosos els farratgers.

³ Percentatge respecte a la producció mundial de petroli dels darrers anys, aproximadament 85 Mb/dia.

Fons: superfícies cultivades i produccions agrícoles: [FAOSTAT-2011]; rendiments dels diferents cultius per produir etanol (litres/ha) i equivalència: 0,67 litres de petroli equivalent per litre d'etanol: [FAO-2008], pàg. 21. **Elaboració:** Carles Riba Romeva.

En definitiva, dedicant íntegrament més d'un 42,6 % de les terres de cultiu del món (una superfície quasi doble que la d'Índia) i el 41,2% de les produccions en tonatge, s'obtidrien 11,2 Mb/dia (milions de barrils per dia) de petroli, que representarien tan sols el 13,2% de la producció actual de combustibles líquids (uns 85 Mb/dia).

Per tant, els biocarburants de primera generació no constitueixen ni de lluny una font substitutòria del petroli i, en canvi, sí una col·lisió frontal amb la producció alimentària.

Rendiment i emissions

Respecte a aquest aspecte, hi ha una gran controvèrsia sobre si produeixen més energia que la que consumeixen i en quina proporció. Diverses avaluacions situen el rendiment dels biocarburants, mesurat com a TRE (taxa de retorn energètic = energia utilitzada, dividida per energia consumida per obtenir-lo), entre 0,7 i 1,8 (taula 1.4). Això vol dir que, depenent del tipus de cultius i del grau de mecanització, pot arribar el cas que alguns biocarburants consumeixin més energia (a través de la maquinària, els fertilitzants, els pesticides, els transports i la transformació) que la que després proporcionen (TRE inferior a 1). Aleshores, no té sentit fabricar-los, per més que se'n subvencioni la producció.

Quan el TRE és sensiblement superior a 1, la seva producció ja té sentit, però, segons la procedència de l'energia per produir-lo, no està lliure d'emissions de CO₂; en general, però, són inferiors a les que tindria el petroli (per exemple, el 60%).

Desforestació

En tot cas, a més de posar en perill l'alimentació de la població mundial (ja han originat nombrosos conflictes), en alguns casos serveix d'excusa per a una desforestació que, en primer lloc, busca la fusta i que, alhora, és una font d'emissions de CO₂ molt gran, que no es recuperarà amb els biocombustibles fins al cap de molts anys (si és que finalment es planten els cultius). Al Gore [Gor-2009] ressalta que, "irònicament, una taxa nord-americana pensada per promoure els biocombustibles ha estat un factor significatiu d'eliminació de les selves verges per plantar-hi oli de palma".

Biocarburants basats en algues

Els defensors dels cultius d'algues per fabricar-ne biocarburants argumenten, entre d'altres, els avantatges següents: Constitueixen una biomassa que es reproduïx cada pocs dies i permeten nombroses collites l'any. Produeixen una biomassa per unitat de superfície d'un ordre superior a la dels cultius tradicionals. Permeten utilitzar terres marginals i estèrils, així com també aigües residuals i aigua salada. Consumeixen CO₂ i, per tant, són un embornal de gasos d'efecte hivernacle. Un cop extret l'oli, resten subproductes útils com a aliment per al bestiar i l'aquicultura, o com a matèria primera per a diversos processos industrials (pigments, cosmètics, fibres per a paper, etc.). Les algues també es poden utilitzar per netejar basses de decantació o aigües residuals.



Figura 9.8. Plantes pilot de cultiu d'algues microscòpiques. **Fonts:** Esquerra: sistema d'estanys oberts artificials, <<http://www.makebiofuel.co.uk/biofuel-from-algae>>. Dreta: sistema de fotobio-reactors, <<http://www.enn.com/energy/article/37961>>

Les dues tecnologies més assajades avui dia són la de l'estany obert i la dels fotobioreactors en circuit tancat (figura 9.8). La primera solució presenta l'avantatge d'uns costos d'explotació relativament menors, però la productivitat és relativament baixa i l'evaporació comporta consums d'aigua elevats. La segona solució, més productiva, té tanmateix uns costos de procés molt més elevats (circulació dels nutrients, injecció del CO₂, etc.) que, a més de fer-la econòmicament poc viable, pot arribar a consumir més CO₂ del que absorbeix.

Malgrat el gran potencial teòric dels biocarburants d'algues, avui dia no són una solució madura que pugui desplaçar el petroli ni competir amb altres fonts energètiques renovables (eòlica, solar tèrmica, geotèrmica o biocarburants de primera generació). Tot i que diversos sectors econòmics (entre ells, algunes petrolieres i companyies d'aviació) han dipositat grans esperances en els biocarburants d'algues com a única alternativa viable per substituir els combustibles fòssils, cal fer importants esforços en recerca i innovació els propers anys per convertir aquests conceptes en realitats operatives.

Alguns científics mostren confiança en la capacitat dels cultius d'algues per contribuir, de forma significativa, a cobrir les demandes futures de combustibles líquids, però d'altres se'n manifesten escèptics. En tot cas, caldrà considerar de forma equilibrada els avantatges i els inconvenients tenint en compte tant els aspectes energètics i ambientals com la rendibilitat derivada dels eventuais subproductes.

Part 4

Els recursos de la Terra

En aquesta quarta part, vull fer un repàs breu dels recursos de la Terra, que són els que sempre ens han sustentat i que encara ens sustenten com a animals vius que som.

Hem titulat aquest llibre *Recursos energètics i crisi, la fi de 200 anys irrepitibles*. Evidentment, ens referim a la crisi provocada pel declivi dels recursos energètics fòssils, d'estoc finit en el temps de la nostra civilització humana. Però no és una crisi per l'exhauriment de les grans fonts energètiques que han sustentat la vida des de fa 3.500 milions d'anys i l'home fins fa prop de 150 anys. Continuem tenint el Sol, que és pràcticament la font originària de totes les energies de què gaudim, l'energia geotèrmica i l'energia de les mareas.

En canvi, sí que podem exhaurir o malmetre el capital natural que són els boscos, la biodiversitat, els sòls agrícoles, l'aigua o l'atmosfera. En aquesta darrera part del llibre, volem repassar com estem tractant aquests recursos els humans i, sobretot, aquesta civilització de final anunciat, basada en els combustibles fòssils. L'energia no és un component de la naturalesa o de la nostra activitat humana: l'energia ho travessa tot; és allò que fa moure totes les coses, ja siguin (biològicament) vives o inerts. Els animals i les plantes se sustenten en l'energia. El clima és energia; els lentíssims moviments de la Terra són energia, i la radiació solar és l'energia principal que fa funcionar tot el planeta.

El capítol 10 tracta dels recursos de la biosfera; concretament de l'agricultura, la ramaderia, la pesca i l'aqüicultura, i dels recursos forestals. En una de les seves seccions, s'analitza el punt de vista de la petjada ecològica.

El capítol 11 tracta de l'atmosfera i el canvi climàtic: la primera secció analitza l'evolució de les emissions de CO₂; la segona estudia el cicle de carboni amb els seus dipòsits i fluxos, i la tercera secció fa un recorregut pel carboni, l'oxigen i la vida. En aquesta darrera part, s'analitzen els informes d'avaluació del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC) per anticipar les conseqüències del canvi climàtic.

El darrer capítol 12 del llibre és el de conclusions. S'inicia amb una secció resum de les principals tendències analitzades, continua amb una reflexió sobre el necessari canvi de paradigma de desenvolupament, i alguns dels elements que el faran possible, i finalment proposa una estratègia per a Europa.

10. Els recursos de la biosfera

10.1. Agricultura, ramaderia, pesca i boscos

L'energia és present a tots els processos biològics i l'home, que no n'és absent, es troba al capdamunt de tota la cadena de la vida. És, sens dubte, l'ésser més complex i interessant, però també el més dependent dels altres.

Segons la hipòtesi de Gaia de James Lovelock [Lov-1988], des que hi ha vida a la Terra (ara fa uns 3.500 milions d'anys), aquesta interacciona amb l'atmosfera, els oceans i la litosfera, de manera que el conjunt es comporta com un sistema complex autoregulat, que manté la Terra en l'estat més favorable per a la pròpia vida. Però, l'home de les societats post-industrials, amb la seva obsessió per fer créixer l'economia, sembla que ho hagi oblidat.

En aquesta secció, s'analitza l'evolució de diversos aspectes relacionats amb els recursos de la biosfera, que són el nostre sosteniment material principal com a éssers vius.

En primer lloc, s'estudien els diferents tipus de superfícies del planeta i els usos principals que en fa l'home. Després, s'analitza l'evolució de les produccions agrícoles, ramaderes i de pesca i aquicultura, cada una per separat. Més endavant, es tracta breument de l'evolució dels boscos i dels productes que se n'extreuen. Finalment, es fa un balanç global dels productes que la biosfera proporciona.

Ús de la Terra

Una primera qüestió d'interès és conèixer l'ús que l'home fa de la superfície de la Terra, que, tot i ser canviant en el temps, es tracta d'una variació relativament lenta. Hem utilitzat les dades que proporciona la FAO sobre la matèria.

La superfície de l'esfera terrestre és de 510,07 Mkm² (10⁶ km², milions de quilòmetres quadrats), dels quals tan sols 149,90 (un 29,1%, o sigui, menys de la tercera part) són terra ferma i la resta són mars i oceans.

La terres emergides presenten una consideració diferent per a l'home i la FAO en fa la classificació següent: a) *superfície agrícola*, que al seu torn es reparteix entre *terres llaurables*, *cultius permanents* i *prades*; b) *superfície forestal*; c) *altres terres* (inclouen els deserts, les neus permanents i altres superfícies improductives; d) *aigües interiors* (que comprenen els rius i els llacs). Vegeu la taula 10.1.

Deixant a part la superfície minúscula de les aigües interiors, a grans trets la superfície dels continents es reparteix en tres parts relativament semblants entre superfície agrícola (la més extensa, 49,32 Mkm², que inclou els prats de pastura), les terres improductives (43,15 Mkm²; si s'hi inclou l'Antàrtida, passa a ser la més gran de les tres, amb 56,88 Mkm²) i la superfície forestal (39,37 Mkm², la menys extensa).

Però, quan analitzem els components de la superfície agrícola, veiem que la major part correspon a prats (33,78 Mkm², una superfície lleugerament superior a Àfrica), mentre que les terres de cultiu (terres llaurables i cultius permanents) ocupen tan sols 15,54 Mkm² (el 10,4% de la superfície emergida).

Tot i que aquestes superfícies experimenten pocs canvis amb el temps, algunes variacions són significatives. Així, doncs, del 1990 al 2007 les aigües interiors han augmentat en +0,37 Mkm² (probablement, nous embassaments); les terres de cultiu, en +0,67 Mkm²; les prades ho fan de forma quasi testimonial (+0,07 Mkm²), i també han crescut les terres improductives (+0,25 Mkm²). Al costat negatiu, cal lamentar la disminució de -1,40 Mkm² de bosc (una superfície de 82.000 km² anuals, equivalent a 2,5 vegades la superfície de Catalunya o quasi la de Portugal), que alimenta els increments de les altres superfícies.

La FAO (FAOSTAT, <<http://faostat.fao.org/site/377/default.aspx#ancor>>) proporciona dades sobre la superfície i els usos de la terra, que es resumeixen a la taula 10.1.

Taula 10.1. Superfície i usos de la terra, per regions (2007)

Regions	Superfície agrícola A=B+C+D	Terres llaurables B	Cultius perman. C	Prats D	Superfície forestal E	Altres terres F	Aigües interiors G	Superfície de la regió A+E+F+G
Valors absoluts de superfície (en Mkm ²)								
Amèrica del N.	5,858	2,400	0,122	3,336	6,773	9,735	1,382	23,747
Amèrica del S. i c.	6,115	1,243	0,169	4,702	8,509	3,711	0,259	18,593
Europa	2,404	1,345	0,158	0,901	1,793	1,294	0,182	5,673
Euràsia	5,649	1,985	0,042	3,621	8,499	7,320	0,840	22,307
Orient Mitjà	2,738	0,324	0,040	2,374	0,164	2,575	0,120	5,597
Àfrica	11,575	2,192	0,273	9,110	6,273	11,796	0,671	30,315
Àsia	10,581	4,165	0,607	5,809	5,308	4,688	0,809	21,386
Oceania	4,400	0,456	0,014	3,930	2,055	2,036	0,070	8,561
Món	49,319	14,111	1,426	33,782	39,373	43,155	4,334	136,180
Antàrtida	0	0	0	0	0	13,720	0	13,720
Terra emerg. %	49,319 32,9	14,111 (9,4)	1,426 (1,0)	33,782 (22,5)	39,373 26,3	56,875 37,9	4,334 2,9	149,900 100,0
Valors de superfície per habitant (ha/hab)								
Amèrica del N.	1,32	0,54	0,03	0,75	1,53	2,20	0,31	5,36
Amèrica del S. i c.	1,32	0,27	0,04	1,01	1,84	0,80	0,06	4,01
Europa	0,41	0,23	0,03	0,15	0,31	0,22	0,03	0,97
Euràsia	1,99	0,70	0,01	1,27	2,99	2,58	0,30	7,85
Orient Mitjà	1,40	0,17	0,02	1,22	0,08	1,32	0,06	2,87
Àfrica	1,22	0,23	0,03	0,96	0,66	1,25	0,07	3,20
Àsia	0,29	0,11	0,02	0,16	0,15	0,13	0,02	0,59
Oceania	12,57	1,30	0,04	11,23	5,87	5,82	0,20	24,47
Món	0,75	0,21	0,02	0,51	0,60	0,86	0,07	2,27
Repartiment dels usos de la terra en cada regió (sumes horitzontals = 100%)								Densitat (hab/km²)
Amèrica del N.	24,7	10,1	0,5	14,0	28,5	41,0	5,8	18,7
Amèrica del S. i c.	32,9	6,7	0,9	25,3	45,8	20,0	1,4	24,9
Europa	42,4	23,7	2,8	15,9	31,6	22,8	3,2	103,2
Euràsia	25,3	8,9	0,2	16,2	38,1	32,8	3,8	12,7
Orient Mitjà	48,9	5,8	0,7	42,4	2,9	46,0	2,1	34,8
Àfrica	38,2	7,2	0,9	30,0	20,7	38,9	2,2	31,2
Àsia	49,5	19,5	2,8	27,2	24,8	21,9	3,8	170,8
Oceania	51,4	5,3	0,2	45,9	24,0	23,8	0,8	4,1
Món	32,9	9,4	1,0	22,5	26,3	37,9	2,9	49,1

Font: FAOSTAT, <<http://faostat.fao.org/site/377/default.aspx#ancor>> (FAO, Nacions Unides). Elaboració: Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 10.1:

1. Àfrica és la regió més extensa del món (30 Mkm²), quatre regions tenen poc més de 20 Mkm² (Amèrica del Nord, Euràsia, Àsia i Amèrica del Sud), una altra (Oceania considerada a part) té uns 8,5 Mkm² i dues més (Europa i Orient Mitjà) tenen una extensió quasi quatre vegades inferior (sobre els 5,5 Mkm²).
2. Europa i Àsia, més densament poblades (103,2 i 170,8 hab/km²), destinen més superfície a terres llaurades i a cultius permanents (el 26,5% i el 22,3%, respectivament), mentre que les regions restants (densitats <35 hab/km²) hi destinen proporcions molt menors.
3. En superfície llaurada per habitant, destaquen les grans regions excedentàries d'Oceania, Euràsia i Amèrica del Nord (1,30, 0,70 i 0,54 ha/hab, respectivament).

4. Els prats són menys productius que els cultius (segons la *Global Footprint Network*, 2,51 hectàrees de cultius equivalen a 0,46 hectàrees de prat [GFN-2010]). En superfície, destaquen Àfrica (9,11 Mkm²) i, a alguna distància, Àsia i Amèrica del Sud (5,81 i 4,70 Mkm², respectivament). En percentatge, destaquen Oceania i l'Orient Mitjà (el 45,9 i el 42,4%).
5. Les principals regions boscoses són Amèrica del Sud i Euràsia (el 45% i el 38% de la seva superfície), amb uns 8,5 Mkm² cada una, seguides d'Amèrica del Nord i Àfrica, amb 6,77 i 6,27 Mkm². Europa, d'extensió molt menor, se situa en tercer lloc quant a proporció de superfície boscosa (31,6%), i Àsia i Oceania en tenen prop d'un 25%. En darrer lloc se situa l'Orient Mitjà, sense pràcticament cap superfície boscosa (2,9%).
6. Finalment, les altres terres (fonamentalment improductives) ocupen la superfície més important, 43,2 Mkm² (56,9 Mkm² amb l'Antàrtida, el 37,9%). Les regions amb més quantitat de terres improductives són (a part de l'Antàrtida) Àfrica i Amèrica del Nord (11,8 i 9,7 Mkm², respectivament), i les de major proporció, l'Orient Mitjà (el 46,0%), Amèrica del Nord (el 41,0%) i Euràsia (el 38,9%).

És un patrimoni que hem de gestionar amb coneixement i saviesa (preservant els sòls i els recursos hídrics, protegint els boscos i la biodiversitat), ja que és i serà el nostre sosteniment principal.

L'agricultura

En temps remots, l'alimentació humana es basava en la recol·lecció, la caça i la pesca; més endavant (fa uns 10.000 anys), s'hi afegixen l'agricultura i la ramaderia i, des de fa poc, també l'aqüicultura. Els processos biològics naturals han imposat una evolució lenta en aquestes activitats (amb algunes regressions, per l'exhauriment dels sòls i/o modificacions climàtiques locals), fins que l'ús progressiu de combustibles fòssils (maquinària, fertilitzants, plaguicides, pinsos) han accelerat els rendiments. Els podem sostenir?

El llibre titulat *Energy Flow in Agriculture*, editat per la FAO el 1979 [Stou-1979], aporta dades i reflexions interessants sobre agricultura i energia. A continuació, se'n destaquen alguns dels resultats (taula 10.2):

Taula 10.2. Energia comercial i rendiments a l'agricultura¹				
Conceptes	Unitats	Tradicional (Filipines)	De transició (Filipines)	Industrial (EUA)
Energia invertida	MJ/ha	173	6.386	64.885
Maquinària	MJ/ha	173	335	4.200
Combustibles	MJ/ha	--	1.600	8.988
Fertilitzants	MJ/ha	--	2.520	11.357
Llavors	MJ/ha	--	1.650	3.360
Irrigació	MJ/ha	--	--	27.336
Plaguicides	MJ/ha	--	0.250	1.120
Assecatge	MJ/ha	--	--	4.600
Electricitat	MJ/ha	--	--	3.200
Transport	MJ/ha	--	31	724
Producció	kg/ha	1.250	2.700	5.800
Inversió. energ. arròs	MJ/kg	0,138	2,365	11,187
Conting. energ. arròs	MJ/kg	14,600	14,600	14,600
TRE	(--)	105,8	6,2	1,3

¹ Aquestes dades procedeixen de [Stou-1979], que alhora cita l'informe *The State of Food and Agriculture 1976* (Roma: FAO); per tant, han de correspondre als primers anys setanta.
Font: energia invertida i producció [Stou-1979]; contingut energètic, altres fonts. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Malgrat el temps que fa que va ser escrit (més de 30 anys), aquest llibre continua essent una obra de referència que permet reflexionar sobre l'abast i les conseqüències del pas de l'agricultura tradicional a l'agricultura industrial (el text la qualifica de "moderna"), en un moment en què s'estaven gestant moltes d'aquestes transformacions.

Les dades de la taula 10.2 porten a fer les reflexions següents:

1. Com el text original (i la taula) molt bé indica, es tracta d'energia comercial, no d'energia total. Amb tota seguretat, si es comptabilitzés l'energia solar que fa créixer les plantes, els balanços serien més igualats.
2. Tanmateix, les energies comercials utilitzades per l'agricultura industrial són quasi exclusivament energies no renovables que produeixen gasos d'efecte hivernacle. Per tant, l'agricultura industrial s'allunya de la sostenibilitat.
3. Atès que el valor energètic de l'arròs és de 14,6 MJ/kg, l'agricultura tradicional té una taxa de retorn energètic (TRE o EROI) respecte a les energies no renovables de 105,8, mentre que, a l'agricultura industrial, el valor del TRE baixa fins a 1,3 (valor ja inadmissible com a matèria primera per produir energia).

Com a mínim, cal parlar de tres rendiments diferents: a) *producció per hectàrea* (Mg/ha); b) *producció per agricultor* (Mg/agricultor); c) *rendiment energètic*, és a dir, energia continguda en el producte agrícola o ramader en relació amb l'energia esmerçada en la seva producció ($\text{MJ}_{\text{prod}}/\text{MJ}_{\text{cons}}$).

Els darrers cent anys de tecnificació de l'agricultura, els èxits en els dos primers rendiments han estat espectaculars (augment de 2 a 4 vegades en el rendiment per hectàrea, i de 5 a 20 en el rendiment per agricultor). En canvi, el rendiment energètic ha experimentat una regressió espectacular, que ha passat desapercebuda fins a l'arribada dels biocarburants, que només tenen sentit amb una taxa de retorn energètic mínima (TRE o EROI > 4).

Cultius, produccions i rendiments

Les taules 10.3 i 10.4 contenen dades sobre cultius, produccions i rendiments agrícoles, i han estat obtingudes de FAOSTAT (<<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#anchor>>, FAO, Nacions Unides). Proporcionen els valors de les superfícies cultivades, les produccions i els rendiments dels principals grups de productes agrícoles des de 1961 fins a 2008. La taula 10.3 agrupa les dades en funció dels diferents tipus de cultius, mentre que la taula 10.4 agrupa les dades per regions.

Des del punt de vista global, l'anàlisi de les dades suggereix els comentaris següents:

1. L'ús de terra de conreu en el món ha passat de 970,9 Mha l'any 1961 (una superfície equivalent al territori dels EUA) a 1.291 Mha el 2008, amb un creixement relativament moderat del 33,0%. La gran majoria de les terres més aptes per al cultiu en el món ja estan en explotació i les noves terres que s'han posat en explotació requereixen costos energètics i de treball creixents per a la seva preparació i manteniment [Stou-1979].
2. La terra cultivada ha crescut molt menys que la població mundial, la qual, en aquest mateix període, ha passat de 3.072,8 Mhab l'any 1961 a 6.750,1 Mhab el 2008, cosa que equival a un increment del 119,7% (s'ha més que duplicat). Per tant, això vol dir que la superfície conreada per habitant ha disminuït un 38% en aquest període, en passar de 0,345 ha/hab el 1961 a 0,214 ha/hab el 2008 (taula 10.5). Aquest és un dels components decisius de la *petjada ecològica* (secció 10.2).
3. En canvi, el conjunt de les produccions dels cultius pràcticament s'ha triplicat, atès que ha passat de 3.453 Tg (milions de tones) el 1961 a 10.249 Tg el 2008 (increment de 196,8%). Així, doncs, la part més substancial d'aquest augment només es pot atribuir a la millora de la rendibilitat per superfície cultivada.

Taula 10.3. Agricultura. Superfície cultivada, producció i rendiment (per cultius)

Superfícies cultivades (Mha, milions d'hectàrees)									
Cultius	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ¹
Cereals	648,0	60,9	675,5	717,2	708,5	672,7	712,2	49,2	109,9
Hortalisses	21,1	2,0	20,3	23,1	28,2	40,7	48,7	3,4	231,2
Fruïtes	24,6	2,3	28,9	32,9	41,1	49,1	55,0	3,8	223,3
Arrels i tuberculs	47,6	4,5	48,2	45,9	46,0	53,2	52,9	3,7	111,1
Llegums secs	64,0	6,0	64,4	61,3	68,8	64,9	71,8	5,0	112,2
Cultius oleaginosos	81,6	7,7	97,7	127,5	151,3	189,7	228,1	15,8	279,6
Cultius sucres	16,0	1,5	18,9	22,3	25,9	25,5	28,7	2,0	179,6
Cultius farratgers	92,5	8,7	91,5	96,8	205,8	169,4	161,7	11,2	174,8
Cultius fibra primària	38,6	3,6	40,7	40,5	37,6	35,0	34,1	2,4	88,4
Altres cultius	27,0	2,5	28,9	33,3	40,8	46,1	49,7	3,4	183,8
Total al món	1.063,6	100,0	1.117,1	1.203,3	1.356,9	1.350,4	1.447,9	100,0	136,1
Produccions (Tg/any, milions de tones per any)									
Cultius	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ¹
Cereals	877	25,4	1.193	1.550	1.952	2.060	2.521	24,6	287,5
Hortalisses	197	5,7	224	289	415	651	806	7,9	409,2
Fruïtes	200	5,8	266	339	402	569	706	6,9	353,2
Arrels i tuberculs	455	13,2	560	523	574	699	738	7,2	162,1
Llegums secs	41	1,2	44	41	59	55	61	0,6	150,8
Cultius oleaginosos	105	3,0	138	204	302	460	661	6,4	631,8
Cultius sucres	609	17,6	834	1.003	1.363	1.508	1.959	19,1	321,6
Cultius farratgers	919	26,6	1.073	1.389	3.672	2.809	2.671	26,1	290,7
Cultius fibra primària	33	1,0	41	47	59	58	70	0,7	213,6
Altres cultius	18	0,5	21	25	34	44	56	0,5	313,3
Total al món	3.453	100,0	4.393	5.410	8.832	8.914	10.249	100,0	296,8
1 Blat de moro	205	5,9	266	397	483	593	826	8,1	403,0
2 Arròs (clofolla)	216	6,2	316	397	519	599	686	6,7	318,1
3 Blat	222	6,4	311	440	592	586	683	6,7	307,3
4 Patates, papes	271	7,8	298	241	267	327	326	3,2	120,3
5 Luca	71	2,1	99	124	153	177	233	2,3	326,2
1 Canya de sucre	448	13,0	609	735	1.053	1.258	1.736	16,9	387,6
2 Soja	267	0,8	44	81	109	161	231	2,3	857,7
3 Remolatxa sucr.	161	4,7	224	268	309	250	222	2,2	138,3
4 Nou de palma	14	0,4	15	30	61	120	207	2,0	1.517,9
Rendiments per unitat de superfície (Mg/ha, tones per hectàrea)									
Cultius	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ¹
Cereals	1,35	41,7	1,77	2,16	2,76	3,06	3,54	50,0	261,5
Hortalisses	9,34	287,7	11,05	12,54	14,70	16,00	16,53	233,6	177,0
Fruïtes	7,34	226,2	8,54	9,56	9,10	10,70	11,77	166,3	160,3
Arrels i tuberculs	9,57	294,7	11,62	11,39	12,47	13,14	13,96	197,3	145,9
Llegums secs	0,64	19,6	0,68	0,67	0,86	0,86	0,86	12,1	134,4
Cultius oleaginosos	1,28	39,5	1,41	1,60	2,00	2,42	2,90	40,9	226,0
Cultius sucres	38,16	1.175,3	44,19	45,07	52,70	59,06	68,35	965,6	179,1
Cultius farratgers	9,93	306,0	11,72	14,35	17,84	16,59	16,52	233,3	166,3
Cultius fibra primària	0,85	26,3	1,00	1,15	1,58	1,64	2,06	29,1	241,8
Altres cultius	0,66	20,4	0,72	0,75	0,83	0,95	1,13	16,0	170,4
Total al món	3,25	100,0	3,93	4,50	6,51	6,60	7,08	100,0	218,0

¹ Increment 1961-2008 (1961=100)Font: FAOSTAT (FAO, Nations Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Taula 10.4. Agricultura. Superfície cultivada, producció i rendiment (per regions)

Superfícies cultivades (Mha, milions d'hectàrees)									
Regions	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ¹
Amèrica del Nord	155,4	14,6	154,3	184,6	184,9	187,8	192,1	13,3	123,6
Amèrica del Sud i c.	71,6	6,7	84,6	99,4	108,3	112,2	136,1	9,4	190,2
Europa	140,9	13,3	136,7	142,7	155,2	148,2	143,9	9,9	102,1
Euràsia	173,8	16,3	167,8	172,9	209,7	148,9	147,8	10,2	85,1
Orient Mitjà	14,8	1,4	18,0	19,9	26,2	23,3	24,1	1,7	162,8
Àfrica	105,1	9,9	130,1	126,5	154,2	183,2	218,6	15,1	207,9
Àsia i Oceania	402,1	37,8	425,6	457,4	518,3	546,7	585,3	40,4	145,6
Món	1.063,6	100,0	1.117,1	1.203,3	1.356,9	1.350,4	1.447,9	100,0	136,1
Produccions (Tg/any, milions de tones per any)									
Regions	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ¹
Amèrica del Nord	542	15,7	678	855	1.577	1.702	1.695	16,5	312,5
Amèrica del Sud i c.	410	11,9	532	646	911	1.033	1.493	14,6	364,3
Europa	697	20,2	873	1.148	1.534	1.522	1.503	14,7	215,5
Euràsia	623	18,1	648	693	1.522	660	677	6,6	108,7
Orient Mitjà	27	0,8	38	57	101	119	131	1,3	486,1
Àfrica	204	5,9	334	396	490	613	761	7,4	373,8
Àsia i Oceania	950	27,5	1.290	1.614	2.696	3.265	3.988	38,9	420,0
Món	3.453	100,0	4.393	5.410	8.832	8.914	10.249	100,0	296,8
Rendiments per unitat de superfície (Mg/(ha·any), tones per hectàrea i any)									
Regions	1961	Món=100	1970	1980	1990	2000	2008	Món=100	Incr. ¹
Amèrica del Nord	3,49	107,5	4,39	4,63	8,53	9,06	8,82	124,6	252,8
Amèrica del Sud i c.	5,73	176,4	6,28	6,51	8,41	9,20	10,97	155,0	191,5
Europa	4,95	152,4	6,38	8,05	9,89	10,27	10,45	147,6	211,1
Euràsia	3,59	110,5	3,86	4,01	7,26	4,43	4,58	64,7	127,7
Orient Mitjà	1,83	56,2	2,12	2,88	3,84	5,11	5,45	77,0	298,5
Àfrica	1,94	59,7	2,57	3,13	3,18	3,35	3,48	49,2	179,8
Àsia i Oceania	2,36	72,7	3,03	3,53	5,20	5,97	6,81	96,3	288,5
Món	3,25	100,0	3,93	4,50	6,51	6,60	7,08	100,0	218,0

¹ Increment 1961-2008 (1961=100)Font: FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

- En efecte, la rendibilitat mitjana dels cultius mundials ha passat de 3,25 Mg/ha (tones per hectàrea) el 1961 a 7,08 Mg/ha el 2008, amb un increment del 117,8%. Aquesta millora difícilment s'hauria aconseguit sense la tecnificació de l'agricultura i, sobretot, sense la inversió de quantitats creixents en maquinària, fertilitzants i plaguicides, grans consumidors de recursos energètics fòssils.
- La producció en tones dels cultius en el món es reparteix en quatre parts relativament equilibrades: cereals, 2.521 Tg (milions de tones); HFTL (hortalisses, fruites, tuberculs i llegums), 2.311 Tg; cultius per a biocarburants, 2.396 Tg, i cultius per a farratges (aliment per a animals), 2.671 Tg. Resten una sèrie de cultius amb produccions menors (els oleaginosos per al consum humà, els fruits secs, les espècies, les fibres primàries, el cautxú i el tabac), que sumen uns 340 Tg.
- Els rendiments per hectàrea dels cultius són molt diferents. Cal tenir en compte que en la canya de sucre i en la major part dels farratges es recol·lecta tota la planta. Entre els cultius alimentaris, els cereals tenen rendiments per hectàrea relativament baixos (tot i que són els que han millorat més), i les hortalisses, les verdures i les patates, més alts.

Taula 10.5. Agricultura. Produccions per càpita (per regions)									
Població (Mhab, milions d'habitants) ¹									
Regions	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ²
Amèrica del Nord	247	8,0	283	323	366	418	454	6,7	183,9
Amèrica del Sud i c.	187	6,1	235	294	359	422	468	6,9	250,4
Europa	458	14,9	496	530	556	577	599	8,9	130,8
Euràsia	218	7,1	243	265	289	288	284	4,2	130,2
Orient Mitjà	52	1,7	68	95	136	174	207	3,1	399,6
Àfrica	292	9,5	367	482	639	819	987	14,6	338,0
Àsia i Oceania	1.628	52,8	1.995	2.448	2.947	3.417	3.753	55,6	230,5
Món	3.081	100,0	3.686	4.438	5.290	6.115	6.750	100,0	219,1
Superfície per habitant (ha/hab, hectàrees per habitant)									
Regions	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ²
Amèrica del Nord	0,630	182,4	0,545	0,572	0,505	0,449	0,423	197,4	67,2
Amèrica del Sud i c.	0,383	111,0	0,361	0,338	0,302	0,266	0,291	135,7	76,0
Europa	0,308	89,2	0,276	0,269	0,279	0,257	0,240	112,0	78,1
Euràsia	0,798	231,0	0,691	0,651	0,726	0,517	0,521	242,9	65,3
Orient Mitjà	0,286	82,9	0,266	0,210	0,193	0,134	0,117	54,4	40,7
Àfrica	0,360	104,3	0,355	0,262	0,241	0,224	0,221	103,2	61,5
Àsia i Oceania	0,247	71,5	0,213	0,187	0,176	0,160	0,156	72,7	63,2
Món	0,345	100,0	0,303	0,271	0,256	0,221	0,214	100,0	62,1
Rendiments per habitant i any (Mg/(hab·any), tones per habitant i any)									
Regions	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Incr. ²
Amèrica del Nord	2,20	67,7	2,39	2,65	4,31	4,07	3,74	52,8	170,0
Amèrica del Sud i c.	2,20	67,6	2,27	2,20	2,54	2,45	3,19	45,1	145,5
Europa	1,52	46,9	1,76	2,17	2,76	2,64	2,51	35,5	164,8
Euràsia	2,86	88,1	2,67	2,61	5,27	2,29	2,39	33,7	83,4
Orient Mitjà	0,52	16,1	0,56	0,60	0,74	0,69	0,64	9,0	121,6
Àfrica	0,70	21,5	0,91	0,82	0,77	0,75	0,77	10,9	110,6
Àsia i Oceania	0,58	18,0	0,65	0,66	0,91	0,96	1,06	15,0	182,2
Món	1,12	34,5	1,19	1,22	1,67	1,46	1,52	21,4	135,5

¹ Població segons dades de la FAO; ² Increment entre 1961 i 2008 (1961=100)

Font: FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Cultius i consum d'energia

El pròleg de l'estudi ja esmentat de la FAO, *Energy for World Agriculture* [Stou-1979], afirma (des de la perspectiva del moment en què fou escrit) que l'agricultura consumeix, aproximadament, el 3,5% de l'energia mundial, el 2,9% de la qual correspon als països desenvolupats i el 0,6%, als països en via de desenvolupament.

També assenyalava que l'increment del rendiment que s'espera de l'aplicació de les tecnologies de la "revolució verda" en els països en via de desenvolupament depèn, en gran manera, d'entrades molt intensives en energia, com ara fertilitzants, maquinària i pesticides.

I al capítol 2 del mateix treball, que tracta sobre el "flux d'energia en l'agricultura", insisteix a dir que, encara que molts països en via de desenvolupament tenen reserves de terres no utilitzades potencialment productives, no podran atendre les demandes creixents d'aliments si no és amb increments de productivitat, és a dir, d'aportacions d'energia fòssil.

Vistos des d'avui, aquests augments de la productivitat que requereixen l'ús massiu de recursos basats en els combustibles fòssils (fertilitzants, maquinària i plaguicides) poden tenir un efecte contrari quan s'iniciï el seu declivi. És un element més de reflexió.

Anàlisi dels principals països productors

De forma simplista, a continuació considerem entre els productes alimentaris els cereals, les hortalisses, les fruites, les arrels i tubèrculs i els llegums. Certament, són la base de l'alimentació humana. Però alguns cereals també serveixen per alimentar animals o fabricar biocarburants. I, viceversa, alguns dels cultius sucres o oleaginosos també s'usen per a l'alimentació humana. Tanmateix, a grans números, aquesta simplificació no altera l'escenari global.

Des del punt de vista dels *cultius* (taula 10.3), sorgeixen els comentaris següents:

1. Els cereals ocupen el 49,2% de les terres conreades del món (el 1961, la proporció era encara més alta, el 60,9%), i la superfície absoluta ha augmentat lleugerament fins a 712,2 Mha. La producció quasi s'ha triplicat (de 877 Tg/any, o milions de tones per any, a 2.525 Tg/any). El rendiment per hectàrea és dels més baixos, però ha pujat des de 1,35 Mg/ha (tones per hectàrea) el 1961 a 3,54 Mg/ha el 2008 (increment del 161,5%).
2. La producció de cereals és pràcticament 1/4 de totes les produccions agrícoles mundials i una de les bases fonamentals de l'alimentació humana. Es reparteix en tres parts relativament igualades dels grans cereals: blat de moro, 826 Tg/any el 2008; arròs, 686 Tg/any, i blat, 683 Tg/any; la resta de cereals sumats dóna 325 Tg/any.
3. Les hortalisses i les fruites dupliquen l'extensió cultivada (131,2% i 123,3% d'augment, respectivament) i quadrupliquen les produccions (309,2% i 253,2% d'augment). Aquests cultius, molt intensius en mà d'obra, tenen rendiments força elevats (16,5 i 11,8 Mg/ha, respectivament) i, junt amb les arrels i els tubèrculs (de rendiments també elevats, 13,96 Mg/ha) i els llegums, sumen quasi tant com els cereals (2.311 Tg/any) i constitueixen quasi l'altra meitat de la dieta humana.
4. Els principals cultius energètics són la canya de sucre (1.736 Tg/any el 2008, en planta sencera) i després, pràcticament a parts iguals, la soja (231 Tg/any, oleaginós), la remolatxa sucrera (222 Tg/any) i la palma (207 Tg/any, oleaginós). La resta són cultius oleaginosos que sumen 224 Tg/any: principalment, el coco, 61 Tg/any; la colza, 58 Tg/any; el cacauet, 38 Tg/any, i el gira-sol, 35 Tg/any.
5. Finalment, hi ha els cultius farratgers, en què destaquen les gramínies i les lleguminoses (1.264 Tg/any el 2008, el segon cultiu en producció); la userda (462 Tg/any); el blat de moro farratger (374 Tg/any); els productes farratgers no especificats (256 Tg/any) i el trèvol (90 Tg/any).
6. La resta de cultius alimentaris i no alimentaris són molt més minoritaris. Tan sols en destaquem (en Tg/any) el cotó (65,4), els fruits secs (12,2), el caixú (10,6), el cafè (8,2), el tabac (6,7) i el te (3,9).

En definitiva, avui dia pràcticament la meitat dels cultius estan dedicats a l'alimentació humana i, de l'altra meitat, aproximadament una quarta part a alimentar animals (productes farratgers) i l'altra quarta part a alimentar motors tèrmics (biocarburants).

I l'anàlisi dels *països productors* (taules 10.6 i 10.7) motiva els comentaris següents:

1. Es constata el pes de la població en la producció dels cultius alimentaris, malgrat que s'hi observen grans diferències (per exemple, entre la Xina i l'Índia).
2. També es constata als països en via de desenvolupament el pes relatiu més gran de les hortalisses, les fruites, les arrels i tubèrculs i els llegums en relació amb els cereals.
3. Els majors exportadors nets en el mercat mundial de cereals el 2008 són (no hi ha taula) els Estats Units, +89,6 Tg; l'Argentina, 28,1 Tg; França, 26,8 Tg, el Canadà, 18,2 Tg; Ucraïna, 16,4 Tg; Rússia, 13,1 Tg, i Austràlia, 12,2 Tg. I els majors països importadors nets són el Japó, -25,2 Tg; Mèxic, -13,3 Tg; Corea del Sud, -12,2 Tg; Egipte, -12,1 Tg; Espanya, -11,2 Tg; Àrabia Saudita, -10,9 Tg, i l'Iran, -10,6 Tg. Es constata que els dos països més poblats del món quasi s'autoabasteixen: la Xina, -5,1 Tg, i l'Índia, +6,5 Tg (passant més gana).

Taula 10.6. Principals països productors de cultius alimentaris el 2008

Principals països productors de cereals											
Països		Cereals		Blat de moro		Arròs		Blat		Ordi	
		Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món
	Món	2.520,7	100,0	826,2	100,0	685,9	100,0	683,4	100,0	155,1	100,0
1	Xina	480,1	19,0	166,0	20,1	193,4	28,2	112,5	16,5	3,1	2,0
2	EUA	403,5	16,0	307,1	37,2	9,2	1,3	68,0	10,0	5,2	3,4
3	Índia	267,0	10,6	19,7	2,4	148,3	21,6	78,6	11,5	1,2	0,8
4	Rússia	106,4	4,2	6,7	0,8	0,7	0,1	63,8	9,3	23,1	14,9
5	Brasil	79,7	3,2	58,9	7,1	12,1	1,8	6,0	0,9	0,2	0,2
6	Indonèsia	76,6	3,0	16,3	2,0	60,3	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0
7	França	70,1	2,8	15,8	1,9	0,1	0,0	39,0	5,7	12,2	7,8
8	Canadà	56,0	2,2	10,6	1,3	0,0	0,0	28,6	4,2	11,8	7,6
9	Ucraïna	52,7	2,1	11,4	1,4	0,1	0,0	25,9	3,8	12,6	8,1
10	Alemanya	50,1	2,0	5,1	0,6	0,0	0,0	26,0	3,8	12,0	7,7
11	Bangla Desh	49,1	1,9	1,3	0,2	46,9	6,8	0,8	0,1	0,0	0,0
12	Vietnam	43,3	1,7	4,5	0,5	38,7	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0
13	Argentina	36,8	1,5	22,0	2,7	1,2	0,2	8,5	1,2	1,7	1,1
14	Mèxic	36,1	1,4	24,3	2,9	0,2	0,0	4,0	0,6	0,8	0,5
15	Tailàndia	36,1	1,4	4,2	0,5	31,7	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0
16	Pakistan	35,5	1,4	3,6	0,4	10,4	1,5	21,0	3,1	0,1	0,1
17	Austràlia	35,4	1,4	0,4	0,0	0,2	0,0	21,4	3,1	8,0	5,2
18	Myanmar	32,0	1,3	1,1	0,1	30,5	4,4	0,2	0,0	0,0	0,0
19	Nigèria	30,2	1,2	7,5	0,9	4,2	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0
20	Turquia	29,3	1,2	4,3	0,5	0,8	0,1	17,8	2,6	5,9	3,8
Principals països productors d'hortalisses, fruites, arrels i tuberculs i llegums (HFTL)											
Països		HFTL		Hortalisses		Fruïtes		Arrels/tuberculs		Llegums	
		Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món
	Món	2.311,4	100,0	805,8	100,0	706,0	100,0	738,1	100,0	61,5	100,0
1	Xina	727,7	31,5	376,3	46,7	191,1	27,1	155,3	21,0	4,9	8,0
2	Índia	216,4	9,4	89,2	11,1	68,1	9,6	44,8	6,1	14,2	23,2
3	Nigèria	112,7	4,9	10,8	1,3	9,5	1,3	89,4	12,1	3,0	4,8
4	EUA	86,6	3,7	34,4	4,3	30,6	4,3	19,7	2,7	1,9	3,1
5	Brasil	83,4	3,6	7,7	1,0	41,0	5,8	31,2	4,2	3,5	5,7
6	Indonèsia	50,0	2,2	8,4	1,0	16,4	2,3	24,9	3,4	0,3	0,5
7	Rússia	47,8	2,1	13,0	1,6	4,2	0,6	28,9	3,9	1,8	2,9
8	Turquia	45,2	2,0	21,4	2,7	18,6	2,6	4,2	0,6	1,0	1,6
9	Tailàndia	37,9	1,6	3,3	0,4	9,1	1,3	25,4	3,4	0,2	0,3
10	Iran	33,3	1,4	11,2	1,4	17,0	2,4	4,7	0,6	0,4	0,6
11	Egipte	33,1	1,4	16,9	2,1	11,8	1,7	4,0	0,5	0,4	0,6
12	Itàlia	33,1	1,4	12,6	1,6	18,7	2,7	1,6	0,2	0,2	0,3
13	Espanya	31,6	1,4	10,9	1,4	18,0	2,6	2,4	0,3	0,3	0,4
14	Mèxic	31,6	1,4	10,3	1,3	17,9	2,5	1,9	0,3	1,4	2,3
15	Ucraïna	30,5	1,3	8,0	1,0	2,4	0,3	19,5	2,6	0,6	0,9
16	Vietnam	25,1	1,1	7,6	0,9	6,1	0,9	11,1	1,5	0,3	0,4
17	Filipines	23,9	1,0	5,2	0,6	15,7	2,2	2,8	0,4	0,1	0,1
18	Ghana	22,7	1,0	0,6	0,1	4,0	0,6	18,0	2,4	0,0	0,0
19	França	21,3	0,9	5,0	0,6	8,8	1,2	6,8	0,9	0,8	1,3
20	Polònia	20,0	0,9	5,4	0,7	3,9	0,5	10,5	1,4	0,2	0,4
Font: FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). Elaboració: Carles Riba Romeva											

Taula 10.7. Principals països productors de productes farratgers i per a biocarburants

Principals països productors de productes farratgers											
Països		Cultius farratgers		Gramínies i lleguminoses		Userda		Blat de moro farratger		Productes farratgers ¹	
		Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món
	Món	2.670,7	100,0	1.264,6	100,0	462,8	100,0	374,5	100,0	256,0	100,0
1	EUA	697,8	26,1	311,1	24,6	263,5	56,9	101,3	27,0	0,0	0,0
2	Austràlia	312,0	11,7	307,0	24,3	5,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Alemanya	165,9	6,2	0,0	0,0	1,0	0,2	71,0	18,9	8,2	3,2
4	Rússia	133,6	5,0	91,0	7,2	0,0	0,0	23,5	6,3	17,0	6,6
5	França	120,2	4,5	67,4	5,3	13,5	2,9	13,8	3,7	0,0	0,0
6	Argentina	118,4	4,4	48,0	3,8	39,0	8,4	17,2	4,6	0,0	0,0
7	Canadà	102,8	3,9	94,0	7,4	0,0	0,0	8,8	2,4	0,0	0,0
8	Índia	94,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,0	36,7
9	Itàlia	71,1	2,7	17,0	1,3	24,5	5,3	14,0	3,7	10,0	3,9
10	Regne Unit	60,6	2,3	55,0	4,3	0,0	0,0	3,8	1,0	0,0	0,0
11	Xina	58,5	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,5	22,8
12	Egipte	52,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	Mèxic	51,3	1,9	2,9	0,2	28,9	6,2	12,8	3,4	0,5	0,2
14	Ucraïna	37,6	1,4	20,0	1,6	0,0	0,0	9,2	2,4	0,4	0,2
15	Japó	37,3	1,4	31,0	2,5	0,0	0,0	4,9	1,3	0,0	0,0
16	Paraguai	35,8	1,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	35,7	14,0
17	Polònia	35,6	1,3	0,0	0,0	0,9	0,2	17,1	4,6	0,0	0,0
18	Espanya	34,7	1,3	15,2	1,2	12,4	2,7	3,9	1,0	0,4	0,1
19	Suècia	30,5	1,1	30,5	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	Romania	25,6	1,0	7,8	0,6	5,5	1,2	0,8	0,2	0,0	0,0
Principals països productors de cultius per a biocarburants ²											
Països		Cultius bio-carburants		Canya de sucre		Remolatxa sucraera		Soja		Palma	
		Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món
	Món	2.395,9	100,0	1.736,3	100,0	222,0	100,0	230,6	100,0	207,0	100,0
1	Brasil	705,2	28,5	645,3	37,2	0,0	0,0	59,2	25,7	0,7	0,3
2	Índia	358,1	14,2	348,2	20,1	0,0	0,0	9,9	4,3	0,0	0,0
3	Xina	151,2	6,1	124,9	7,2	10,0	4,5	15,5	6,7	0,7	0,3
4	EUA	130,2	6,2	25,0	1,4	24,4	11,0	80,7	35,0	0,0	0,0
5	Indonèsia	111,8	5,7	26,0	1,5	0,0	0,0	0,8	0,3	85,0	41,1
6	Malàisia	83,7	4,6	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	83,0	40,1
7	Tailàndia	83,0	3,4	73,5	4,2	0,0	0,0	0,2	0,1	9,3	4,5
8	Argentina	76,2	3,6	30,0	1,7	0,0	0,0	46,2	20,1	0,0	0,0
9	Pakistan	64,0	2,5	63,9	3,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	Mèxic	51,6	2,0	51,1	2,9	0,0	0,0	0,2	0,1	0,3	0,1
11	Colòmbia	41,8	1,7	38,5	2,2	0,0	0,0	0,1	0,0	3,2	1,5
12	Austràlia	32,7	1,3	32,6	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	França	30,4	1,1	0,0	0,0	30,3	13,7	0,1	0,0	0,0	0,0
14	Rússia	29,7	1,1	0,0	0,0	29,0	13,1	0,7	0,3	0,0	0,0
15	Filipines	26,9	1,1	26,6	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1
16	Guatemala	26,7	1,1	25,4	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,6
17	Alemanya	23,0	0,9	0,0	0,0	23,0	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0
18	Egipte	21,6	0,8	16,5	0,9	5,1	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0
19	Sud-àfrica	20,8	0,8	20,5	1,2	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0
20	Vietnam	16,4	0,6	16,1	0,9	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0

¹ Productes farratgers no especificats² Se n'han separat els productes oleaginosos per a consum humà.**Font:** FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

A partir de la informació de la Viquipèdia (<<http://en.wikipedia.org/wiki/Maize>>, 2011), basada en dades de l'USDA (Departament d'Agricultura dels EUA), es poden desglossar les destinacions de la immensa producció de blat de moro dels Estats Units (307,1 Tg l'any 2008, el 37,2% mundial). Concretament, el 43,4% (133,2 Tg) va a alimentació animal; el 30,2%, (92,6 Tg) a fabricar bioetanol; el 15,3% (47,0 Tg), a l'exportació, encara un 7,8% (23,9 Tg) a fabricar midó i altres productes, i tan sols el 2,7% (8,3 Tg), al consum humà.

El país veí, Mèxic, que té com a producte alimentari bàsic el blat de moro (i les "tortas"), tan sols en produeix 24,3 Tg/any (tres vegades més que el consum humà dels EUA, però 5,5 vegades menys que el que aquest país destina a l'alimentació animal, 3,8 vegades menys que el que es transforma en bioetanol i 1,9 vegades inferior al que es destina a l'exportació). Això explica, en gran manera, el gran augment del preu del blat de moro els anys 2006 a 2008 (el 120%, segons el Banc Mundial), que es posa de manifest a partir de 2007 a través del conflicte de la "tortilla" (Mèxic importava 9,1 Tg de blat de moro l'any 2008).

Produccions ramaderes

La FAO també proporciona dades de gran interès sobre la ramaderia i les produccions associades en els diferents països i regions del món, que resumim tot seguit.

D'una banda, es donen les xifres de caps de bestiar en producció o sacrificats i, a continuació, les produccions anuals en Tg/any (o milions de tones per any). El nombre de caps en producció correspon a aus que produeixen ous o a mamífers que produeixen llet; el nombre de caps sacrificats fa referència als animals que han estat sacrificats per donar carn.

En algunes espècies, el nombre de caps que hi ha en un moment determinat és inferior al de caps sacrificats (se'n sacrifiquen diverses generacions en un any). És el cas de les gallines: el 2008 n'hi havia 18.139 milions, dels quals 6.385 milions eren gallines ponedores, i alhora es van sacrificar 52.887 milions de pollastres. En altres espècies, és dóna la situació inversa. És el cas de la ramaderia vacuna: el 2008 hi havia 1.373 milions de caps, dels quals 247 milions eren vaques lleteres, i els animals sacrificats van ser 298 milions.

La taula 10.8 sobre la ramaderia invita a fer les reflexions següents:

1. En aquests darrers quasi cinquanta anys (1961-2008), la ramaderia mundial i els principals productes que se'n deriven han crescut de forma molt intensa, quasi sempre bastant més que el creixement de la població, que s'ha multiplicat per 2,19 en el mateix període.
2. La producció de carn d'aus i de rosegadors s'ha multiplicat per 9,77 (els pollastres, per 10,34) i la de mamífers s'ha multiplicat per 3,02. La producció d'ous s'ha multiplicat per 4,33 i tan sols la producció de llet ha crescut una mica per sota de la població (s'ha multiplicat per 2,01).
3. La producció de carn d'aus i rosegadors és de 91,53 Tg/any (milions de tones per any) l'any 2008. Els pollastres proporcionen el 85,7% de la carn, els segueixen els galls d'indi amb el 6,1% i els ànecs amb el 4,0%, mentre que els conills i els rosegadors tan sols representen el 1,61% de la producció. El rendiment per animal ha augmentat des de 1,271 kg/cap el 1961 fins a 1,628 kg/cap el 2008.
4. La producció de carn dels grans mamífers és més del doble, 184,60 Tg/any el 2008, però el seu augment ha estat molt inferior. Destaca la carn de porc (56,3%), amb un increment per damunt de la mitjana, i la de vaca (33,4%), amb un augment més moderat. Les altres carns d'aquest grup tenen participacions més moderades. El rendiment per animal també ha augmentat de 61,5 kg/cap el 1961 a 72,0 kg/cap el 2008.

Taula 10.8. La ramaderia al món. Caps de bestiar, producció i rendiments

Animals	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Aug. ¹
Bestiar destinat a carn (milions de caps/any en producció o sacrificats)									
Pollastres	6.584	89,3	11.054	18.382	27.013	40.890	51.171	91,0	777
Galls d'indi	142	1,9	194	350	562	667	663	1,2	467
Ànecs	227	3,1	337	479	803	1.946	2.534	4,5	1.118
Conills i rosegadors	350	4,8	413	578	712	957	1.183	2,1	337
Altres aus	68	0,9	88	98	227	537	658	1,2	963
Aus i rosegadors	7.372	100,0	12.086	19.888	29.317	44.997	56.208	100,0	763
Porcs	376	37,8	537	756	922	1.156	1.321	51,5	351
Vaques	173	17,4	211	235	254	275	294	11,5	170
Ovelles	331	33,2	368	384	465	487	523	20,4	158
Cabres	103	10,3	119	156	228	315	392	15,3	381
Altres ¹	13	1,3	15	17	22	30	34	1,3	271
Grans mamífers	996	100,0	1.249	1.549	1.892	2.262	2.565	100,0	258
Bestiar destinat a ous i llet (milions de caps)									
Aus (ponedores)²	1.955	100,0	2.544	3.013	3.706	5.120	6.384	100,0	326
Vaques	177	45,6	185	210	223	222	246	35,5	139
Ovelles	116	29,9	126	150	171	191	205	29,6	177
Cabres	74	19,0	76	93	125	152	179	25,8	243
Altres (búfals, camells)	21	5,5	24	31	43	51	64	9,2	300
Mamífers lleterers	389	100,0	411	484	563	616	694	100,0	179
Producció i rendiments de la carn (Tg/any, milions de tones per any)									
Pollastres	7,56	80,6	13,14	22,90	35,35	58,31	78,16	85,4	1.034
Galls d'indi	0,90	9,6	1,22	2,05	3,72	5,07	5,60	6,1	622
Ànecs	0,34	3,6	0,50	0,71	1,23	2,87	3,71	4,0	1.103
Conills i rosegadors	0,42	4,5	0,51	0,75	0,96	1,31	1,61	1,8	386
Altres aus	0,16	1,7	0,24	0,29	0,64	1,95	2,45	2,7	1.533
Aus i rosegadors	9,37	100,0	15,61	26,70	41,89	69,51	91,53	100,0	977
Kg/cap	1,271		1,292	1,342	1,429	1,545	1,628		
Carn de porc	24,80	40,5	35,84	52,70	69,92	89,79	103,98	56,3	419
Carn de vaca	27,68	45,2	38,35	45,57	53,05	56,27	61,67	33,4	223
Carn d'ovella	4,93	8,1	5,54	5,65	7,03	7,66	8,25	4,5	167
Carn de cabra	1,10	1,8	1,29	1,69	2,66	3,77	4,87	2,6	442
Altres carns ¹	2,68	4,4	3,08	3,32	3,97	4,85	5,83	3,2	217
Grans mamífers	61,20	100,0	84,10	108,93	136,63	162,34	184,60	100,0	302
Kg/cap	61,5		67,4	70,3	72,2	71,8	72,0		
Producció i rendiments d'ous i llet (Tg/any, milions de tones per any)									
Ous (milions tones)	15,13	100,0	20,41	27,42	37,55	55,17	66,10	100,0	437
Kg/cap·any	7,74		8,02	9,10	10,13	10,78	10,35		
Llet de vaca	313,63	91,1	359,28	422,35	479,03	490,13	578,70	83,4	185
Llet d'ovella	5,10	1,5	5,50	6,82	7,98	8,03	9,07	1,3	178
Llet de cabra	6,97	2,0	6,49	7,74	9,98	12,65	15,24	2,2	219
Altres llets	18,49	5,4	20,56	28,75	45,43	67,94	91,23	13,1	494
Total llet	344,18	100,0	391,82	465,66	542,42	578,76	694,24	100,0	202
Kg/cap·any	885,9		953,7	961,1	963,9	940,0	1.000,3		

¹ Búfals, cavalls, camells, ases mules i altres. ² Gallines > 97%.

Font: FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). Elaboració: Carles Riba Romeva

Taula 10.9. Principals països productors de carn, ous i llet

Principals països productors de carn d'aus, de rosegadors i ous											
Països		Carn d'aus i rosegadors		Carn de pollastre		Carn d'altres aus		Carn de rosegadors		Ous	
		Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món
	Món	91,529	100,0	78,155	100,0	11,759	100,0	1,614	100,0	66,103	100,0
1	EUA	19,881	21,7	16,994	21,7	2,886	24,5	0,000	0,0	5,339	8,1
2	Xina	16,475	18,0	11,055	14,1	4,760	40,5	0,660	40,9	26,734	40,4
3	Brasil	10,663	11,6	10,216	13,1	0,446	3,8	0,002	0,1	1,939	2,9
4	Mèxic	2,629	2,9	2,581	3,3	0,044	0,4	0,004	0,3	2,337	3,5
5	Rússia	2,055	2,2	2,001	2,6	0,043	0,4	0,011	0,7	2,135	3,2
6	França	1,662	1,8	0,932	1,2	0,678	5,8	0,051	3,2	0,947	1,4
7	Iran	1,578	1,7	1,566	2,0	0,012	0,1	0,000	0,0	0,727	1,1
8	Regne Unit	1,430	1,6	1,259	1,6	0,170	1,4	0,000	0,0	0,613	0,9
9	Indonèsia	1,381	1,5	1,350	1,7	0,031	0,3	0,000	0,0	1,324	2,0
10	Japó	1,369	1,5	1,369	1,8	0,000	0,0	0,000	0,0	2,554	3,9
11	Itàlia	1,358	1,5	0,790	1,0	0,327	2,8	0,240	14,9	0,724	1,1
12	Alemanya	1,308	1,4	0,764	1,0	0,510	4,3	0,034	2,1	0,790	1,2
13	Canadà	1,230	1,3	1,041	1,3	0,188	1,6	0,000	0,0	0,419	0,6
14	Argentina	1,211	1,3	1,160	1,5	0,044	0,4	0,007	0,4	0,480	0,7
15	Espanya	1,176	1,3	1,082	1,4	0,025	0,2	0,069	4,3	0,802	1,2
16	Tailàndia	1,105	1,2	1,019	1,3	0,086	0,7	0,000	0,0	0,872	1,3
17	Turquia	1,102	1,2	1,088	1,4	0,015	0,1	0,000	0,0	0,824	1,2
18	Veneçuela	1,046	1,1	0,802	1,0	0,000	0,0	0,244	15,1	0,158	0,2
19	Malàisia	1,042	1,1	0,931	1,2	0,111	0,9	0,000	0,0	0,476	0,7
20	Colòmbia	1,015	1,1	1,011	1,3	0,000	0,0	0,004	0,2	0,542	0,8
30	Índia	0,695	0,8	0,649	0,8	0,046	0,4	0,000	0,0	3,060	4,6
Principals països productors de carn de grans mamífers i llet											
Països		Carn de grans mamífers		Carn de porc		Carn bovina		Carn de cabra i ovella		Llet	
		Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món	Tg	% món
	Món	184,597	100,0	103,983	100,0	61,670	100,0	13,119	100,0	694,235	100,0
1	Xina	58,029	31,4	47,190	45,4	5,841	9,5	3,806	29,0	40,180	5,8
2	EUA	22,569	12,2	10,599	10,2	11,839	19,2	0,104	0,8	86,160	12,4
3	Brasil	12,169	6,6	3,015	2,9	9,024	14,6	0,109	0,8	27,716	4,0
4	Alemanya	6,349	3,4	5,111	4,9	1,210	2,0	0,025	0,2	28,691	4,1
5	Espanya	4,316	2,3	3,484	3,4	0,658	1,1	0,166	1,3	7,374	1,1
6	Rússia	4,081	2,2	2,042	2,0	1,769	2,9	0,174	1,3	32,346	4,7
7	França	3,849	2,1	2,029	2,0	1,518	2,5	0,097	0,7	25,348	3,7
8	Índia	3,658	2,0	0,479	0,5	0,896	1,5	0,715	5,4	109,000	15,7
9	Austràlia	3,268	1,8	0,377	0,4	2,155	3,5	0,710	5,4	9,223	1,3
10	Canadà	3,265	1,8	1,941	1,9	1,288	2,1	0,016	0,1	8,140	1,2
11	Argentina	3,179	1,7	0,230	0,2	2,830	4,6	0,062	0,5	10,325	1,5
12	Mèxic	3,002	1,6	1,161	1,1	1,667	2,7	0,094	0,7	10,931	1,6
13	Vietnam	2,800	1,5	2,470	2,4	0,194	0,3	0,011	0,1	0,294	0,0
14	Itàlia	2,777	1,5	1,606	1,5	1,057	1,7	0,060	0,5	12,116	1,7
15	Polònia	2,317	1,3	1,920	1,8	0,393	0,6	0,001	0,0	12,445	1,8
16	Filipines	1,952	1,1	1,606	1,5	0,180	0,3	0,053	0,4	0,014	0,0
17	Regne Unit	1,932	1,0	0,740	0,7	0,862	1,4	0,326	2,5	13,719	2,0
18	Dinamarca	1,838	1,0	1,707	1,6	0,129	0,2	0,002	0,0	4,720	0,7
19	Pakistan	1,819	1,0	0,000	0,0	0,680	1,1	0,415	3,2	33,270	4,8
20	Japó	1,779	1,0	1,249	1,2	0,520	0,8	0,000	0,0	7,982	1,1

Font: FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

5. La producció d'ous (més del 92% de gallina) és important. En pes, és 2/3 de la carn d'aus i rosegadors (66,10 Tg/any). Aquí també el rendiment per gallina ponedora ha augmentat de 7,74 kg/(cap·any) el 1961 a 10,35 kg/(cap·any) el 2008.
6. Finalment, la llet, que és, amb diferència, la producció de més tonatge (694,24 Tg/any el 2008, el 67,0% de tots els productes animals), tot i que el seu augment ha estat més moderat (s'ha multiplicat per 2,02) i ha perdut pes des de 1961, en què representava el 80,1% de tots els productes animals.

Amb relació als països productors (taula 10.9), fem els comentaris següents:

1. Els Estats Units són el primer país productor d'aus i rosegadors (el 21,7% mundial), fins i tot per damunt de la Xina, que n'és el segon país productor (18,0%), i el Brasil (11,6%), que n'és el tercer. Cal ressenyar que l'Índia es troba al lloc 30, amb un consum del 0,8% mundial, malgrat que té 1/6 de la població.
2. En canvi, en ous, la Xina té el 40,4% de la producció mundial, pràcticament el doble del pes de seva població. Aquí, l'Índia ocupa el tercer lloc mundial (després dels EUA), amb el 4,6% de la producció (de tota manera, és menys d'1/3 del seu pes poblacional).
3. En la producció de carn de grans mamífers, la Xina se situa en la primera posició, amb el 31,4% de la producció mundial i el 45,5% de la producció de carn de porc. Els EUA i el Brasil se situen en segona i en tercera posició (12,2% i 6,6%, respectivament), amb una forta producció de carn bovina (el 19,2% i el 14,6%). Hi destaquen alguns països europeus (la 4a posició d'Alemanya, la 5a d'Espanya i la 7a de França) i Rússia (6a). Aquí, l'Índia té una posició més avançada (la 8a), tot i que no representa ni tan sols el 2,0% mundial.
4. Finalment, en l'apartat de la producció de llet, l'Índia encapçala la llista, amb el 15,7% de la producció mundial (gairebé el seu pes poblacional), seguida de prop pels Estats Units (12,4%) i, a més distància, per la Xina (5,8%), el Pakistan (4,8%) i Rússia (4,7%).

Cal fer constatar que la ramaderia no és un actor secundari pel que fa als consums de recursos i energia del món. En efecte:

- a) Utilitza 33,78 Mkm² en forma de prats, més del doble de la superfície cultivada (concretament, 2,17 vegades els 15,54 Mkm² de terres llaurades i cultius permanents).
- b) Consumeix el 26,1% de la producció agrícola com a farratge (tot i que la superfície cultivada és tan sols de l'11,2%).
- c) Transforma una proporció cada vegada més gran de cereals i altres productes d'alimentació humana per fabricar pinso. Com ja hem vist, tan sols a pinso els Estats Units van destinar 133,2 Tg de blat de moro l'any 2008 (16,1% mundial), on els cereals ocupen quasi la meitat de la superfície cultivada de món, el 49,2%.

Així, doncs, la intensificació de les dietes humanes en carn i altres productes derivats de la ramaderia té unes conseqüències directes en els consums d'energia i en els impactes ambientals.

La taula 10.10 mostra les produccions per càpita de carn, d'ous, de llet i del conjunt de productes de la ramaderia, en Tg/(hab·any), per al conjunt del món i per als països més poblats de la Terra. Si bé la suma global d'aquestes produccions passa de ser de 429,9 Tg/any el 1961 a 1.036,5 Tg/any el 2008, la producció (i el consum) mundial per càpita ha progressat molt més lentament: de 139,5 kg/(hab·any) el 1961 a 153,5 kg/(hab·any) el 2008.

Dit això, les diferències entre els països més poblats són abismals. Des de França, Alemanya o els Estats Units, amb 512,7, 451,4 i 429,8 kg/(hab·any) de productes ramaders, respectivament, fins a Bangla Desh, Indonèsia, Nigèria o la República Democràtica del Congo, amb 24,5, 21,5, 14,5 o 2,2 kg/(hab·any), respectivament. Les diferències són de vint vegades i més.

Taula 10.10. Producció per càpita de productes derivats de la ramaderia

		Pobl.	Carn AR ¹		Ous		Carn GM ²		Llet		Total	
		2008 Mhab	1961	2008	1961	2008	1961	2008	1961	2008	2008	
			Kg/(hab·any)		Kg/(hab·any)		Kg/(hab·any)		Kg/(hab·any)		³	⁴
	Món	6.750	3,0	13,6	4,9	9,8	19,9	27,3	111,7	102,8	153,5	100,0
1	Xina	1.345	1,1	12,2	2,3	19,9	2,8	43,1	2,8	29,9	105,1	68,5
2	Índia	1.181	0,2	0,6	0,4	2,6	3,5	3,1	44,5	92,3	98,5	64,2
3	EUA	312	17,5	63,8	19,5	17,1	68,7	72,4	301,4	276,4	429,8	279,9
4	Indonèsia	227	0,6	6,1	0,6	5,8	3,0	5,2	2,1	4,4	21,5	14,0
5	Brasil	192	1,8	55,5	2,9	10,1	26,5	63,4	70,6	144,4	273,4	178,1
6	Pakistan	177	0,2	3,4	0,2	2,9	7,2	10,3	120,6	188,0	204,6	133,3
7	Bangla Desh	160	0,3	1,1	0,4	1,7	2,7	2,6	16,5	19,1	24,5	15,9
8	Nigèria	151	0,7	1,6	1,6	3,7	4,1	6,1	3,1	3,1	14,5	9,4
9	Rússia	141		14,5		15,1		28,9		228,8	287,3	187,1
10	Japó	127	1,4	10,8	9,5	20,1	5,9	14,0	22,5	62,7	107,5	70,0
11	Mèxic	109	3,5	24,2	3,6	21,5	22,2	27,7	63,9	100,7	174,1	113,4
12	Filipines	90	2,2	8,4	3,0	6,9	9,7	21,6	0,7	0,2	37,0	24,1
13	Vietnam	87	1,6	6,1	1,6	2,8	9,3	32,1	0,5	3,4	44,4	28,9
14	Alemanya	82	2,5	15,9	9,2	9,6	55,0	77,2	343,9	348,8	451,4	294,0
15	Egipte	82	2,9	9,8	1,2	3,6	7,5	8,9	40,5	73,1	95,5	62,2
16	Etiòpia	81	1,7	0,6	2,3	0,5	16,2	6,7	26,0	20,3	28,1	18,3
17	Turquia	74	2,3	14,9	2,3	11,2	14,2	9,4	224,6	165,6	201,1	131,0
18	Iran	73	1,9	21,5	2,7	9,9	11,9	11,9	70,9	104,2	147,5	96,1
19	Tailàndia	67	3,3	16,4	10,4	12,9	11,4	17,3	0,1	11,7	58,3	38,0
20	R.D. Congo	64	0,3	0,2	0,3	0,1	5,2	1,8	0,4	0,1	2,2	1,4
21	França	62	15,3	26,8	11,2	15,3	64,5	62,0	419,4	408,6	512,7	333,9
22	Regne Unit	61	6,1	23,3	14,3	10,0	35,4	31,4	227,0	223,2	287,9	187,5
23	Itàlia	60	6,3	22,8	7,7	12,1	23,3	46,6	212,9	203,3	284,8	185,5
24	Àfrica Sud	50	2,0	19,7	3,6	9,5	32,1	24,3	143,3	64,4	118,0	76,8
25	Myanmar	50	0,9	16,2	0,7	5,0	4,0	13,4	5,4	24,5	59,1	38,5
26	Corea Sud	48	0,8	11,3	1,5	12,3	3,3	27,1	0,2	45,8	96,6	62,9
27	Ucraïna	46		17,5		18,9		23,9		255,7	316,1	205,8
28	Colòmbia	45	1,9	22,5	4,0	12,0	24,9	24,6	106,9	165,1	224,3	146,1
29	Espanya	44	3,3	26,4	8,3	18,0	17,8	97,0	115,5	165,8	307,2	200,1
30	Tanzània	42	0,6	1,1	1,1	0,9	9,8	7,1	27,0	22,5	31,5	20,5

¹ Carn d'aus i rosegadors. ² Carn de grans mamífers³ kg/(hab·any). ⁴ 2008=100 per al valor mitjà de kg/(hab·any) al món**Font:** FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

És interessant fer alguns comentaris sobre les dades de la taula 10.10 (països >42 Mhab):

1. La Xina, que el 2008 té una producció de productes de ramaderia intermèdia (el 68,5 de la mitjana mundial), ha fet una progressió espectacular en aquest període: de 9,0 kg/(hab·any) el 1961 ha passat a 105,1 kg/(hab·any) el 2008 (l'ha multiplicat quasi per 12). Hi destaquen la carn de porc i els ous (el 45% i 40,4% mundial, respectivament).
2. L'Índia, que el 2008 té una producció per càpita lleugerament més baixa (el 64,2% de la mitjana mundial) i no ha fet una progressió tan espectacular: de 48,6 kg/(hab·any) el 1961 ha passat a 96,5 kg/(hab·any) el 2008. La seva dieta quasi no inclou carn ni ous i es basa fonamentalment en la llet (el 15,7%; n'és el primer productor mundial).
3. Els Estats Units i el Brasil destaquen per una producció elevada d'aus i rosegadors (fonamentalment, pollastres: el 63,8 i el 55,5 kg/(hab·any) el 2008), a molta distància dels països que els segueixen. Alguns dels principals països europeus, juntament amb els Estats Units i el Brasil, tenen produccions per càpita importants de carn de grans mamífers. Espanya destaca en la carn de porc i, la resta, en la carn vacuna.

Taula 10.11. Pesca i aqüicultura en el món. Producció

	1961	%	1970	1980	1990	2000	2007	%
Producció en el món (Tg/any, milions de tones per any)								
Total	37,170	100,0	59,753	65,636	102,311	136,165	159,090	100,0
índex 1961=100	100,0		160,8	176,6	275,2	366,3	428,0	
Aigües continentals	3,480	9,4	5,181	6,883	14,514	27,883	43,175	27,1
Aigües marítimes	33,691	90,6	54,572	58,753	87,796	108,282	115,915	72,9
Captures	35,285	94,9	56,306	58,447	85,485	94,493	90,741	57,0
índex 1961=100	100,0		159,6	165,6	242,3	267,8	257,2	
Aigües continentals	2,699	7,3	3,851	4,461	6,441	8,578	10,221	6,4
Aigües marítimes	32,586	87,7	52,455	53,986	79,044	85,915	80,520	50,6
Aqüicultura	1,886	5,1	3,447	7,189	16,826	41,673	68,349	43,0
índex 1961=100	100,0		182,8	381,2	892,3	2209,9	3624,6	
Aigües continentals	0,781	2,1	1,331	2,422	8,073	19,305	32,954	20,7
Aigües marítimes	1,105	3,0	2,117	4,767	8,752	22,367	35,395	22,2
Producció per regions (C = captures; A = aqüicultura) (Tg/any, milions de tones per any)								
Amèrica del Nord (C)	4,167	11,2	4,618	6,470	8,898	7,309	7,140	4,5
(A)	0,106	0,3	0,173	0,181	0,379	0,638	0,795	0,5
Amèrica del Sud i Central (C)	6,326	17,0	15,064	8,382	14,771	18,766	14,752	9,3
(A)	0,000	0,0	0,001	0,020	0,207	0,819	1,638	1,0
Europa (C)	8,217	22,1	11,901	12,640	10,992	12,384	9,530	6,0
(A)	0,297	0,8	0,498	0,760	1,245	2,019	2,353	1,5
Euràsia (C)	--	--	--	--	9,688	4,823	4,142	2,6
(A)	--	--	--	--	0,420	0,126	0,151	0,1
Orient Mitjà (C)	0,168	0,5	0,268	0,400	0,629	0,840	0,911	0,6
(A)	0,010	0,0	0,013	0,028	0,050	0,075	0,241	0,2
Àfrica (C)	2,464	6,6	3,742	3,667	5,104	6,815	7,268	4,6
(A)	0,008	0,0	0,010	0,026	0,082	0,406	0,955	0,6
Àsia i Oceania (C)	13,944	37,5	20,712	26,889	35,402	43,557	46,997	29,5
(A)	1,465	3,9	2,752	6,174	14,443	37,591	62,216	39,1
Països amb majors produccions pesqueres (Tg/any, tones per any)								
1 Xina	3,086	8,30	3,784	5,807	14,667	43,284	57,827	36,35
2 Indonèsia	0,915	2,46	1,257	1,878	3,243	5,118	8,815	5,54
3 Índia	0,961	2,59	1,759	2,445	3,880	5,669	7,584	4,77
4 Perú	5,217	14,03	12,484	2,710	6,874	10,665	7,420	4,66
5 Japó	6,687	17,99	9,333	11,133	11,136	6,467	5,542	3,48
6 Filipines	0,477	1,28	1,104	1,716	2,504	3,000	4,972	3,13
7 EUA	2,955	7,95	2,963	3,872	5,936	5,216	4,857	3,05
8 Xile	0,441	1,19	1,231	2,893	5,424	4,973	4,810	3,02
9 Vietnam	0,474	1,28	0,618	0,560	0,941	2,137	4,585	2,88
10 Tailàndia	0,316	0,85	1,438	1,800	2,790	3,735	3,831	2,41
11 Rússia	0,000	0,00	0,000	0,000	7,659	4,105	3,510	2,21
12 Corea del Sud	0,425	1,14	0,876	2,408	3,285	2,506	3,353	2,11
13 Noruega	1,527	4,11	2,983	2,536	1,951	3,383	3,275	2,06
14 Myanmar	0,360	0,97	0,432	0,580	0,744	1,192	3,169	1,99
15 Bangla Desh	0,451	1,21	0,690	0,647	0,846	1,661	2,563	1,61
16 Malàisia	0,168	0,45	0,343	0,740	1,010	1,461	1,754	1,10
17 Mèxic	0,225	0,61	0,385	1,285	1,447	1,404	1,745	1,10
18 Taiwan	0,315	0,85	0,613	0,935	1,455	1,350	1,347	0,85
19 Islàndia	0,734	1,97	0,749	1,525	1,524	2,004	1,312	0,82
20 Espanya	0,979	2,63	1,562	1,376	1,335	1,381	1,166	0,73

Font: FisheriesSTAT (FAO, Nacions Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Pesca i aquicultura

Una altra de les activitats ancestrals de l'home és la pesca. La història de les activitats de la humanitat destinades a obtenir productes de la biosfera (vegetals i animals) ha passat per dues etapes fonamentals: a) la primera és la recol·lecció dels fruits dels boscos i la caça o pesca d'animals; b) la segona és el cultiu dels vegetals i la cria d'animals per obtenir-ne els productes que necessitem.

Sorprèn constatar que la pesca (encara majoritària en l'obtenció d'animals aquàtics) correspon a l'etapa de recol·lecció, mentre que la caça pràcticament s'ha extingit amb efectes comercials i ha sorgit l'actitud contrària, a favor de la preservació de les espècies. Probablement, això es deu a la immensitat del mar i a la dificultat més gran de percebre les conseqüències de les males pràctiques o de la sobreexplotació. Tanmateix, això està canviant significativament, no tant per un canvi d'actitud respecte del conservacionisme sinó mes aviat pel creixement rapidíssim de l'aquicultura.

A continuació, s'analitza l'evolució d'aquestes activitats relacionades amb els productes de la biota aquàtica sobre la base de l'evolució assenyalada a la taula 10.11. Les dades d'aquesta taula condueixen a fer els comentaris i les reflexions següents:

1. Una primera constatació és que la producció de pesca i aquicultura ha augmentat de forma molt intensa en el període analitzat (de 1961 a 2008): ha passat de 37,2 Tg/any (milions de tones per any) a 159,9 Tg/any. Per tant, els darrers 47 anys s'ha més que quadruplicat, amb un augment del 328%, mentre que la població humana poc més que s'ha duplicat en el mateix període (de 3.081 a 6.750 Mhab, amb un creixement del 119,1%). En conseqüència, el consum de productes de pesca i aquicultura ha passat de 12,1 kg/(hab·any), a l'inici del període, a 23,7 kg/(hab·any), al final.
2. Una segona constatació és que l'aquicultura creix molt més intensament que la pesca: de 1,9 Tg/any l'any 1961 a 68,3 Tg/any el 2008, un increment del 3.525% (es multiplica per 36), mentre que la pesca passa de 35,3 Tg a 90,7 Tg (s'incrementa el 157%). Cada cop més, les produccions d'aquicultura (pràcticament repartida entre les aigües marines i les aigües continentals) i pesca (majoritàriament marina) tendeixen a igualar-se. Si bé la sobrepesca pot exhaurir uns recursos biològics naturals que haurien de ser renovables, l'aquicultura ha d'alimentar els animals, i aquesta activitat és altament consumidora d'energia i de recursos, com la ramaderia.
3. I una tercera constatació és que la producció de pesca i aquicultura es concentra a Àsia i Oceania (109,2 Tg/any, el 68,3% mundial), tant en captures com en aquicultura. I, a Àsia, destaca la Xina (57,8 Tg/any, el 36,1% mundial), seguida per Indonèsia, l'Índia, el Japó (disminuint), les Filipines, el Vietnam i Tailàndia, entre els deu primers llocs. D'altres països destacats són el Perú (oscil·lant), Xile, els Estats Units i Rússia.

En definitiva, els productes aquàtics tenen un creixement molt elevat, induït majoritàriament per l'aquicultura, una de les activitats primàries més consumidores d'energia.

Els recursos dels boscos

Els boscos són un dels recursos de la biosfera que ens proporcionen beneficis més importants per a la vida humana, malgrat que sovint semblen oblidar-ho.

Sens dubte, la funció més determinant de les masses boscoses és la transformació del CO₂ de l'atmosfera en matèria orgànica a través de la funció clorofil·lica (uns 120 Pg/any de carboni, o 440 Pg/any de CO₂, la meitat dels quals retorna per la respiració de les pròpies plantes, vegeu la secció 11.3). Sense aquest procés, el cicle del carboni no seria possible i la matèria viva s'aniria consumint (a través de la respiració) fins a la seva degradació total.

Taula 10.12. Boscos i productes forestals en el món

Evolució de la superfície de bosc (ResourceSTAT)								
Regions i països	1990 Mkm ²	1995 Mkm ²	2000 Mkm ²	2005 Mkm ²	2008 Mkm ²	%	1990-00 km ² /any	2000-08 km ² /any
Amèrica del Nord	6,768	6,769	6,771	6,778	6,785	16,8	320	1.778
Amèrica del Sud i C.	9,775	9,548	9,321	9,091	8,984	22,2	-45.337	-42.222
Europa	1,658	1,697	1,737	1,772	1,795	4,4	7.896	7.242
Euràsia	8,494	8,501	8,509	8,508	8,513	21,0	1.428	16
Orient Mitjà	0,134	0,135	0,136	0,136	0,136	0,3	162	84
Àfrica	7,492	7,289	7,086	6,915	6,812	16,8	-40.674	-34.157
Àsia i Oceania	7,357	7,322	7,287	7,402	7,417	18,3	-7.025	16.320
Món¹ índex 1961=100	41,678 100,0	41,262 99,0	40,846 98,0	40,604 97,4	40,442 97,0	100,0	-83.231	-50.439
1 Rússia	--	8,091	8,093	8,088	8,090	20,00	²	-373
2 Brasil	5,748	5,604	5,459	5,305	5,239	12,95	-28.896	-27.540
3 Canadà	3,101	3,101	3,101	3,101	3,101	7,67	0	0
4 EUA	2,963	2,983	3,002	3,021	3,033	7,50	3.860	3.827
5 Xina	1,603	1,671	1,770	1,930	2,013	4,98	19.860	30.417
6 R.D. Congo	1,571	1,588	1,572	1,557	1,548	3,83	-3.114	-3.114
7 Austràlia	1,545	1,547	1,549	1,539	1,511	3,74	420	-4.715
8 Indonèsia	1,185	1,090	994	979	958	2,37	-19.136	-4.509
9 Sudan	763	734	705	702	701	1,73	-5.890	-542
10 Perú	701	697	692	687	683	1,69	-943	-1.151
11 Índia	639	647	654	677	681	1,68	1.451	3.443
12 Mèxic	702	685	668	656	651	1,61	-3.540	-2.048
13 Colòmbia	625	620	615	610	607	1,50	-1.010	-1.010
14 Angola	609	604	597	591	587	1,45	-1.248	-1.248
15 Bolívia	628	614	601	587	578	1,43	-2.704	-2.850
16 Zàmbia	528	520	511	503	498	1,23	-1.666	-1.666
17 Veneçuela	520	506	492	477	469	1,16	-2.875	-2.876
18 Moçambic	433	423	412	401	394	0,98	-2.190	-2.179
19 Tanzània	415	395	375	354	342	0,85	-4.033	-4.034
20 Myanmar	392	370	349	333	324	0,80	-4.350	-3.095
Producció de fusta en rotlle (milions de m ³) (ForesSTAT)								
Regions	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%
Amèrica del Nord	409,6	16,3	501,7	589,7	713,4	714,1	560,6	16,4
Amèrica del Sud i C.	176,5	7,0	197,7	267,4	314,6	379,3	437,6	12,8
Europa	317,0	12,6	334,5	332,0	411,6	417,1	433,0	12,7
Euràsia	351,0	14,0	385,0	356,6	386,4	200,6	225,4	6,6
Orient Mitjà	6,6	0,3	6,3	5,2	1,7	1,6	1,5	0,0
Àfrica	276,9	11,0	338,9	404,1	495,5	594,9	687,8	20,2
Àsia i Oceania	978,2	38,9	1.050,9	1.168,1	1.180,1	1.122,6	1.064,6	31,2
Món	2.515,8 100,0	100,0	2.814,9 111,9	3.123,1 124,1	3.503,2 139,2	3.430,1 136,3	3.410,5 135,6	100,0
Destinació de la fusta en rotlle (milions de m ³) (ForesSTAT)								
Llenya, carbó vegetal ³	1.498,0 100,0	59,5	1.538,5 102,7	1.677,0 111,9	1.810,5 120,9	1.825,9 121,9	1.868,1 124,7	54,8
Fusta, rotlle industrial	1.017,8 100,0	40,5	1.276,4 125,4	1.446,1 142,1	1.692,7 166,3	1.604,2 157,6	1.542,4 151,5	45,2
Usos de la fusteria ⁴	636,7	25,3	759,7	874,0	1043,5	972,1	883,1	25,9
Fusta polpa, particul.	213,7	8,5	314,3	370,3	422,2	489,0	515,2	15,1
Altres usos industr.	167,5	6,7	202,4	201,9	227,1	143,0	144,1	4,2

¹ Les dades de la FAO difereixen quan tracten dels tipus d'usos del sòl o quan tracten dels boscos. ² Estava integrada a la l'URSS. ³ 6 m³ de llenya per tona de carbó. ⁴ Trosses, fusta serrada i xapes de fusta.

Font: ResourceSTAT i ForesSTAT (FAO, Nacions Unides). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Però, per desgràcia, sovint els boscos només són considerats des del punt de vista dels seus valors comercials (la seva faceta més visible), en forma de troncs tallats i desbrossats (fusta en rotlle, mesurat en m³), que poden tenir dues aplicacions principals:

a) *Combustibles*. Majoritàriament llenya, però també fusta transformada en carbó vegetal en una relació aproximada d'1 Tg (tona) de carbó vegetal per 6 m³ de fusta en rotlle. La llenya i, en menor proporció, el carbó vegetal han estat històricament els combustibles principals de la civilització humana, i avui dia continuen essent-ho per a uns 2.600 milions d'habitants de la Terra (parts molt importants de l'Àfrica subsahariana, d'Àsia del Sud i de l'Est i d'Amèrica del Sud i Central). També s'utilitza per produir electricitat i en processos industrials.

b) *Usos industrials*. L'ús més directe és produir fusta (taulons, bigues, llistons, laminats, conglomerats), destinada fonamentalment a la construcció i a la indústria del moble, però també produir polpa per fabricar paper, cartró i els seus derivats. La fusta en rotlle també s'utilitza, en menor proporció, en altres processos industrials.

Essent tan importants les funcions i els productes que s'obtenen dels boscos, cal tractar correctament aquest recurs, tot i que la gestió real i efectiva de les grans masses forestals sol estar molt lluny d'aquest propòsit.

Les dades de la taula 10.12 sobre els recursos boscosos del món i les activitats que s'hi relacionen suggereixen els comentaris i les reflexions següents:

1. La superfície boscosa del planeta encara és molt important, 40,44 Mkm² (milions de quilòmetres quadrats), superior a la superfície de prats i més del doble de la cultivada. Amèrica del Sud, Euràsia, Àsia i Oceania, Amèrica del Nord i Àfrica tenen superfícies boscoses (en ordre decreixent) de 9,0 Mkm² a 6,8 Mkm². Europa, de superfície molt menor, tan sols en té 1,8 Mkm² i, a l'Orient Mitjà, és pràcticament residual (0,13 Mkm²).
2. La gestió dels boscos difereix molt segons les regions. Hi ha països en què la superfície boscosa augmenta (amb creixements cada cop menors, a la Xina, l'Índia, el Vietnam, els EUA, Turquia, Espanya i Suècia), mentre que en altres zones es destrueix superfície boscosa. Lamentablement, però, el balanç global és altament negatiu i preocupant: el decenni 1991-2000, el món va perdre 83.200 km²/any de superfície boscosa (més gran que el Benelux), xifra que el decenni posterior ha disminuït fins als 50.400 km²/any de pèrdues.
3. Hi ha tres zones en el món on es destrueix molt bosc: Amèrica del Sud (especialment, la zona de l'Amazònia), l'Àfrica subsahariana i el sud-est asiàtic. El país amb més responsabilitats és el Brasil, amb més de 27.000 km²/any de pèrdua de bosc (quasi la superfície de Catalunya); Indonèsia, el segon país més destructor de boscos, darrerament ha moderat aquesta tendència (a 4.500 km²/any de pèrdua), i el Sudan, que era el tercer, ha moderat les pèrdues fins a 540 km²/any; per contra, Austràlia, que conservava els seus boscos, ha iniciat una tendència molt negativa de pèrdues (4.700 km²/any).
4. Hi ha nombrosos països on disminueix significativament el bosc, alguns dels quals no figuren a la taula 10.12, amb superfícies boscoses de menys de 320.000 km². Per ordre decreixent de pèrdues (2000-2008), destaquen: Nigèria, 4.100 km²/any; Tanzània, 4.000 km²/any; Zimbabwe, 3.300 km²/any; la República Democràtica del Congo, 3.100 km²/any; Myanmar, 3.100 km²/any (baixant); Veneçuela, 2.900 km²/any; Bolívia, 2.800 km²/any; l'Argentina, 2.500 km²/any; el Camerun, 2.200 km²/any; Moçambic, 2.180 km²/any; Mèxic, 2.000 km²/any (baixant) i l'Equador, 2.000 km²/any. Cal tenir en compte que 2.000 km² és més de quatre vegades Andorra.
5. Més que les pèrdues absolutes (un 3% els darrers 17 anys), el més preocupant és la qualitat dels boscos que es destrueixen, fonamentalment tropicals, amb una gran biodiversitat però, alhora, amb una estructura molt fràgil, sovint irrecuperable.
6. La superfície boscosa es perd per diverses causes: a) tals d'arbres per obtenir-ne fusta en rotlle; b) llenya o carbó vegetal (en zones de forta pressió demogràfica); c) noves ter-

res de cultiu (ídem); d) cultius per a biocarburants (especialment, la palma al sud-est asiàtic); e) incendis (molts d'ells provocats per fer efectiu el canvi d'ús).

Malgrat que la pèrdua de bosc és relativament petita, comparada amb el bosc existent (al ritme actual, s'exhauriria en uns 800 anys), en general representa una transferència important de carboni a l'atmosfera i una pèrdua de la capacitat de regenerar CO₂ a través de la funció clorofil·lica. Per tant, estem perdent un patrimoni fonamental dels cicles vitals, que, si arribat a un determinat punt, pot originar un desequilibri difícil de revertir.

Productes forestals

La taula 10.12 mostra que, malgrat la pèrdua de superfície forestal (un 3%, segons les dades de ResourceSTAT per al període 1990-2008), la pressió per extreure recursos del bosc ha augmentat un 35,6% els darrers 47 anys (ForesSTAT, 1961-2008)

L'augment de la llenya i dels combustibles (que avui dia són encara el recurs més explotat) ha estat més moderat (un 24,7% d'augment), mentre que la pressió per explotar la fusta en rotlle dels boscos ha augmentat de forma molt més important (el 51,5%).

La destinació industrial dels productes del bosc (fusta en rotlle) s'ha reforçat amb el temps i ha passat del 40,5% l'any 1961 al 45,2% l'any 2008. En aquesta darrera data, el 25,9% es destinava a fusteria, el 15,1% a fabricar polpa de paper i el 4,2%, a d'altres usos industrials.

Resum: usos dels recursos de la Terra

En aquest darrer apartat, volem fer un resum de tots els apartats anteriors sobre els recursos de la biosfera i els productes que n'obtenim. Concretament, l'agricultura, la ramaderia, la pesca i aquicultura, i els recursos forestals.

Evidentment, són productes diferents, tant pel seu valor com pels consums i les emissions que originen (per exemple, no és el mateix 1 kg de carn vacuna que 1 kg de llenya). Però és interessant de posar-los de costat per establir relacions generals i ordres de magnitud, i constatar la seva evolució en el temps. Alhora, s'han reproduït els recursos de la Terra (en superfície disponible, excepte per al mar) i les poblacions mundials de cada moment, per tal d'establir relacions producte/superfície i producte/habitant.

Una primera dificultat que ha sorgit en establir aquestes comparacions ha estat relacionar els productes forestals amb la resta; en efecte, la llenya i la fusta en rotlle es donen en m³ (metres cúbics), en lloc de Mg (tones). Cal saber la densitat mitjana de la fusta i FAOSTAT no dóna cap indicació en aquest sentit. Aquí (a risc d'equivocar-nos) hem considerat una densitat mitjana de 0,5 kg/m³, i volem deixar clar que la comparació que fem a continuació té un valor tan sols a efectes d'ordre de magnitud.

Les dades de la taula 10.13 per a l'evolució dels recursos de la biosfera i els productes derivats inviten a fer les reflexions següents:

1. La producció en Tg/any (milions de tones per any) més important és, sens dubte, l'agricultura, que quasi ha triplicat la producció en el període analitzat. De 3.453 Tg/any l'any 1961, ha passat a 10.249 Tg/any l'any 2008.
2. La segona producció més important en Tg/any són els productes forestals, que progressen més lentament i han augmentat tan sols el 35,6% en el període analitzat.
3. Tanmateix, de ben segur que la ramaderia els sobrepassa en valor del producte: de 429 Tg/any el 1961, ha passat a 1.038 Tg/any el 2008, amb un augment del 141,9%. Probablement, d'aquestes activitats és la que genera més consums i impactes ambientals.
4. Finalment, la pesca i l'aquicultura (sobretot aquesta darrera), l'explotació més petita, són les que han augmentat més: de 37 Tg/any el 1961 a 159 Tg/any el 2008, amb un increment de 328,0%.

Taula 10.13. Productes de la biosfera en el món (Tg/any)									
	1961	%	1970	1980	1990	2000	2008	%	Índex ¹
Produccions (Tg/any, milions de tones per any)									
Agricultura	3.453	66,7	4.393	5.410	8.832	8.914	10.249	77,9	296,8
Ramaderia	429	8,3	512	629	759	867	1.038	7,9	241,9
Pesca i aquicultura	37	0,7	60	66	102	136	159	1,2	428,0
Bosc ²	1.258	24,3	1.408	1.562	1.752	1.715	1.706	13,0	135,6
Total	5.177	100,0	6.373	7.667	11.445	11.632	13.152	100,0	254,0
Superfícies (Mha, milions d'hectàrees)									
Terres cultivades	1.368		1.422	1.450	1.520	1.514	1.527	17,1	111,6
Prats	3.087		3.139	3.213	3.335	3.427	3.357	37,6	108,7
Bosc ²					4.168	4.085	4.044	45,3	97,0
Total					9.022	9.026	8.928	100,0	99,0
Rendiments per superfície (Mg/ha, tones per hectàrea)									
Agricultura	2,52		3,09	3,73	5,81	5,89	6,71		265,9
Ramaderia	0,14		0,16	0,20	0,23	0,25	0,31		222,5
Bosc ²					0,42	0,42	0,42		
Total					1,27	1,29	1,47		
Població (Mhab, milions d'habitants)									
Població	3.072,8		3.677,1	4.428,1	5.280,3	6.115,4	6.750,1		219,7
Produccions per càpita (kg/(hab·any), quilograms per habitant i any)									
Agricultura	1.123,7	66,7	1.194,7	1.221,7	1.672,6	1.457,6	1.518,4	77,9	135,1
Ramaderia	139,6	8,3	139,2	142,0	143,7	141,8	153,8	7,9	110,1
Pesca i aquicultura	12,0	0,7	16,3	14,9	19,3	22,2	23,6	1,2	195,6
Bosc ²	818,8	48,6	765,6	705,3	663,4	560,9	505,3	25,9	61,7
Total	1.684,8	100,0	1.733,0	1.731,3	2.167,4	1.902,1	1.948,4	100,0	115,6
¹ Increment en el període 1961-2008. S'ha pres com a referència 1961=100. ² FAOSTAT dóna el valor en Mm ³ /any (milions de metres cúbics per any, taula 10.11). Per facilitar-ne la comparació, en aquesta taula s'han traduït les dades a Tg/any (milions de tones per any), considerant una densitat mitjana de la fusta de 0,5 Mg/m ³ . Font: Dades de FAOSTAT (FAO, Nacions Unides). Elaboració: Carles Riba Romeva									

Finalment, amb relació als rendiments producte/superfície i producte/habitant, cal comentar el següent:

5. Els recursos de superfície destinats a aquestes activitats s'han mantingut pràcticament constants a causa de la disminució dels boscos (un 3% en el període 1990-2008). Des de 1961 fins a 2008, la superfície de cultius ha augmentat un 11,6% i la de prats, un 8,7%.
6. Les produccions agrícoles per hectàrea han passat de 2,52 Tg/ha l'any 1961 a 6,71 Tg/ha l'any 2008, amb un creixement de rendiment del 165,7%. Això no hauria estat possible sense l'ús creixent de recursos de maquinària, fertilitzants i plaguicides molt intensius en consum de combustibles fòssils.
7. La comparació amb les produccions ramaderes no és tan immediata, ja que també consumeixen farratges i pinso provinents de l'agricultura. Tanmateix, referida als prats, s'ha passat de 0,14 Tg/any el 1961 a 0,31 Tg/any el 2008 (112,5% d'augment).
8. Una reflexió interessant apareix en analitzar les evolucions de les produccions per càpita, molt influïdes pel creixement de la població, que en conjunt augmenten el 15,6% en el període 1961-2008. Els productes agrícoles per càpita augmenten el 35,1%, mentre que els productes ramaders per càpita ho fan el 10,1%, i tan sols augmenten significativament la pesca i l'aquicultura per càpita (sobretot aquesta darrera) en un 95,6%. En canvi, els productes forestals per càpita disminueixen el 39,3% (índex de la pressió sobre els boscos).

10.2. Petjada ecològica i energia

La *petjada ecològica* (o *empremta ecològica*) és una altra manera d'analitzar la insostenibilitat de la forma de vida actual, basada en els combustibles fòssils, en termes de biocapacitat dels sistemes naturals de la Terra per sostenir les activitats humanes.

Aquest concepte s'inscriu en la dinàmica iniciada pel Club de Roma (*Els límits del creixement*, o Informe Meadows, publicat el 1972), però no és fins a la Conferència de Rio de 1992 (la "Cimera de la Terra") que W. E. Rees, professor d'Economia de la Universitat de la Colúmbia Britànica (Canadà), el formula en un treball titulat *Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out* [Ree-1992]. Entre els anys 1990 i 1994, el suís Mathis Wackernagel en desenvolupa el concepte i el càlcul en la seva tesi doctoral, dirigida per Rees, i, més tard, Wackernagel i Rees en publiquen els resultats al llibre *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth* [Wac-1996].

L'any 2003, Mathis Wackernagel i Susan Burns van fundar la Global Footprint Network, una organització independent amb seu als Estats Units, Bèlgica i Suïssa, que té com a objectiu crear un futur on tots els éssers humans puguin viure bé amb els recursos de la Terra. La xarxa inclou més de 200 organitzacions associades, entre les quals el WWF i la New Economics Foundation. La Global Footprint Network publica cada any un atlas detallat de la petjada ecològica de cada país (*Ecological Footprint Atlas 2010* [GFN-2010a]).



Global Footprint Network
Advancing the Science of Sustainability



El concepte de petjada ecològica ha anat adquirint un reconeixement general, especialment gràcies a la Fundació WWF (World Wide Fund for Nature, important organització conservacionista mundial independent, creada el 1961), que hi veu un potent mitjà de comunicació amb al gran públic. Entre les publicacions de WWF, hi ha l'informe biennal *Living Planet Report*, que, entre altres aspectes, divulga les dades de la petjada ecològica [WWF-2010].

D'altra banda, la recollida i la integració de les dades oficials necessàries per establir la *petjada ecològica* no ha estat una tasca fàcil, en un context on l'economia preval sobre el medi ambient. Ja el 1993, les Nacions Unides (NU) van publicar el *Manual de Comptabilitat Nacional: Comptabilitat Integrada Ambiental i Econòmica* (SEEA, en anglès), resultat del debat entre el PNUMA (UNEP en anglès, Programa de les Nacions Unides per al Medi Ambient) i el Banc Mundial en una trobada internacional. Després de diverses vicissituds, la creació del Comitè d'Experts en Comptabilitat Ambiental i Econòmica de les Nacions Unides (UNCEEA) ha estat una fita important per implementar aquests nous criteris i establir una norma estadística internacional a fi d'harmonitzar les comptabilitats nacionals de la petjada dels diferents països. En aquestes tasques, hi intervé de forma activa l'organització Global Footprint Network.

Concepte i definicions

La *petjada ecològica* és una mesura de la quantitat de terra i d'aigua biològicament productives que una persona o una comunitat determinada necessiten per produir els recursos que consumeixen i per absorbir els residus que generen, usant les tecnologies i pràctiques habituals.

Aquesta metodologia calcula i compara dos indicadors: a) la *petjada ecològica*, que mesura la demanda de recursos dels éssers humans a la biosfera (indicador de demanda), i b) la *biocapacitat*, que mesura la capacitat dels ecosistemes per produir materials biològics útils i per absorbir els residus generats pels éssers humans, tant a escala local com global.

El límit de la sostenibilitat es dona quan la petjada ecològica supera la biocapacitat; aleshores, es parla de *sobrepassament*.

Petjada ecològica, EF (ecological footprint)

Per a un territori determinat, es calcula sobre la base del requeriment humà de sis tipus d'àrees, expressades en unitats de superfície d'eficàcia amitjanada (gha, hectàrees globals): a) *de cultius* (aliments vegetals i altres recursos, com ara fibres o biocombustibles); b) *de pastures* (aliments per al bestiar); c) *de pesqueries* (peix); d) *forestals* (fusta, paper, entre d'altres); e) *construïdes* (habitatges, centres de treball, infraestructures); f) *de petjada de carboni* (fonamentalment els boscos i el mar, per absorbir les emissions del consum energètic).

Interessa la *petjada ecològica de consum*, EF_C , per tal d'evitar imputar en un país els impactes dels recursos o les produccions consumits en un altre. A aquest efecte, cal sumar, a la *petjada ecològica de producció*, EF_P , la *petjada ecològica de les importacions*, EF_I , i restar-ne la *petjada ecològica de les exportacions*, EF_E : ($EF_C = EF_P + EF_I - EF_E$). En el conjunt del món, les petjades ecològiques de producció i de consum coincideixen: $EF_C = EF_P$.

Biocapacitat, BC (biocapacity)

Per a un territori determinat, es calcula com la suma d'àrees (A) d'eficàcia amitjanada de diferents tipus (de cultius, de pastures, de pesqueries, forestals i construïdes) de què disposa, multiplicades pel *factor de rendiment*, YF (*yield factor*) i el *factor d'equivalència*, EQF (*equivalence factor*), segons l'expressió: $BC = A \cdot YF \cdot EQF$.

Sobrepassament

Si a escala local la *petjada ecològica* supera la *biocapacitat* (sobrepassament), és que el país o la regió importen biocapacitat o compten amb recursos naturals que no són propis. Però el *sobrepassament* en el conjunt de la Terra és molt més greu, ja que no hi ha la possibilitat d'importar biocapacitat. Aquest fet es pot mostrar de forma punyent per mitjà del *dia del sobrepassament de la Terra* (*Earth Overshoot Day*), que és el dia d'un any determinat en què la humanitat ha consumit ja tots els recursos que la naturalesa pot proporcionar durant aquell any. El primer *dia de sobrepassament de la Terra* va tenir lloc l'any 1977.

Evolució de la petjada ecològica

El web de la Global Footprint Network proporciona una informació i unes dades interessants per analitzar l'evolució de la petjada ecològica i la biocapacitat de la Terra durant els darrers anys i distribuir-la en regions i països. S'ha partit de dades de 2007, contingudes als documents *Ecological Footprint Atlas 2010* i *2010_NFA_data_tables.xls*:

<http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/ecological_footprint_atlas_2008/> i <http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/2010_NFA_data_tables.xls>.

Atenció! Hi ha discrepàncies entre les dades per al conjunt del món i la suma de les dades dels països i les regions, com s'il·lustra a continuació:

Ggha (bilions gha)		TOTAL	Cultius	Pastures	Boscos	Pesquer.	Construït	Petjada C
Petjada ecològica	Món	17.995,6	3.903,3	1.394,9	1.909,9	725,8	426,3	9.634,4
	Suma països	16.314,9	3.975,2	1.040,6	1.898,4	828,2	511,1	8.061,3
Biocapacitat	Món	11.894,6	3.904,9	1.551,8	4.962,5	1.049,3	426,3	
	Suma països	12.012,2	3.906,2	1.516,9	4.934,4	1.143,8	511,1	

La Global Footprint Network hauria d'explicar aquesta discrepància i/o resoldre l'error. Tanmateix, hem utilitzat les seves dades, per la significació i importància que tenen. La sèrie de dades globals del món (de 1961 a 2007) ha permès estudiar l'evolució de la petjada global de la humanitat (taula 10.14 i figures 10.1, 10.2 i 10.3), mentre que les dades per països (reagrupades en les regions de l'EIA-govEUA que s'han utilitzat en la resta del llibre) han permès analitzar la distribució geogràfica de les petjades ecològiques i de les biocapacitats.

Petjada ecològica mundial i sobrepassament

La figura 10.1 mostra la petjada ecològica global de la humanitat en funció dels diferents components (cultius, pastures, boscos, pesqueries, àrea construïda i petjada de carboni), prenent com a unitat la biocapacitat de la Terra.

Taula 10.14. Evolució de petjada ecològica i la biocapacitat mundials (gha/hab) ¹											
	1961	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2007
Població (Ghab)	3,07	3,32	3,68	4,05	4,43	4,84	5,28	5,71	6,12	6,51	6,67
1961=100	100,0	108,2	119,7	131,9	144,1	157,4	171,8	185,9	199,0	211,9	217,1
Petjada ecològica i biocapacitats mundials (Ggha, milions d'hectàrees globals)											
Petjada ecològ. (EF)	7,24	8,38	10,14	11,22	12,33	12,57	14,02	14,85	15,49	17,29	17,99
1961=100	100,0	115,8	140,1	155,0	170,3	173,7	193,7	205,1	213,9	238,9	248,6
Cultius	3,49	3,54	3,65	3,69	3,75	3,84	3,90	3,85	3,87	3,91	3,90
Pastures	1,20	1,29	1,28	1,38	1,32	1,11	1,27	1,40	1,38	1,40	1,39
Pesqueries	1,23	1,32	1,41	1,44	1,59	1,68	1,81	1,73	1,82	1,90	1,91
Boscos	0,28	0,32	0,37	0,39	0,41	0,46	0,53	0,65	0,67	0,72	0,73
Construcció	0,20	0,22	0,24	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,43
Petjada carboni	0,84	1,70	3,19	4,05	4,97	5,17	6,17	6,85	7,36	8,94	9,63
Biocapacitat (BC)²	11,48	11,51	11,56	11,60	11,65	11,74	11,89	11,97	11,96	11,92	11,89
1961=100	100,0	100,3	100,7	101,1	101,5	102,3	103,6	104,3	104,2	103,9	103,6
Petjada ecològica i biocapacitats per càpita mundials (gha/hab)											
EF per càpita	2,36	2,52	2,76	2,77	2,78	2,60	2,65	2,60	2,53	2,66	2,70
1961=100	100,0	107,1	117,1	117,5	118,2	110,3	112,7	110,3	107,5	112,7	114,5
Cultius	1,13	1,07	0,99	0,91	0,85	0,79	0,74	0,67	0,63	0,60	0,59
Pastures	0,39	0,39	0,35	0,34	0,30	0,23	0,24	0,24	0,22	0,22	0,22
Pesqueries	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11
Boscos	0,40	0,40	0,38	0,36	0,36	0,35	0,34	0,30	0,30	0,29	0,29
Construcció	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
Petjada del carboni	0,27	0,51	0,87	1,00	1,12	1,07	1,17	1,20	1,20	1,37	1,44
BC per càpita²	3,73	3,46	3,14	2,86	2,63	2,43	2,25	2,09	1,96	1,83	1,78
1961=100	100,0	92,7	84,2	76,7	70,5	65,0	60,3	56,1	52,4	49,0	47,7
EF/BC³	0,631	0,728	0,877	0,967	1,058	1,071	1,179	1,241	1,295	1,451	1,513
Dia sobrepassament	No	No	No	No	11 De	6 De	5 No	21 Oc	8 Oc	8 Se	29 Ag
¹ Hectàrea global (normalitzada) per habitant (hi ha una indicació errònia a l'original). ² La biocapacitat per càpita (en gha/hab) disminueix amb els anys a causa de l'augment de la població. ³ Quan el quocient entre la petjada ecològica i la biocapacitat és inferior a la unitat (PE/BC < 1, color verd), la situació és sostenible; en cas contrari (color vermell), hi ha sobrepassament. A causa de la discrepància entre les dades de la Global Footprint Network per al conjunt del món i per països, el sobrepassament per a l'any 2007 és superior en aquesta taula (1,513) que a la taula 10.7 (1,358). Font: Global Footprint Network. Elaboració: Carles Riba Romeva http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/2010_NFA_data_tables.xls											

La taula 10.14 es representa gràficament a les figures 10.1, 10.2 i 10.3 i les seves dades suggereixen els comentaris següents:

1. El component determinant de la petjada ecològica és la petjada de carboni. Si bé l'era dels combustibles fòssils va començar a les darreries del segle XVIII, és els darrers cinquanta anys que els efectes ecològics han resultat determinants.
2. La taula 10.1 i la figura 10.1 mostren que l'augment de la petjada ecològica recau fonamentalment sobre la de carboni (de 0,84 Ggha el 1961 a 9,63 Ggha el 2005, amb un increment del 1.044%); la resta de petjades sumades passa de 6,40 Ggha el 1961 (aleshores, el gruix de la petjada) a unes minoritàries 8,36 Ggha el 2005 (augment del 31%).

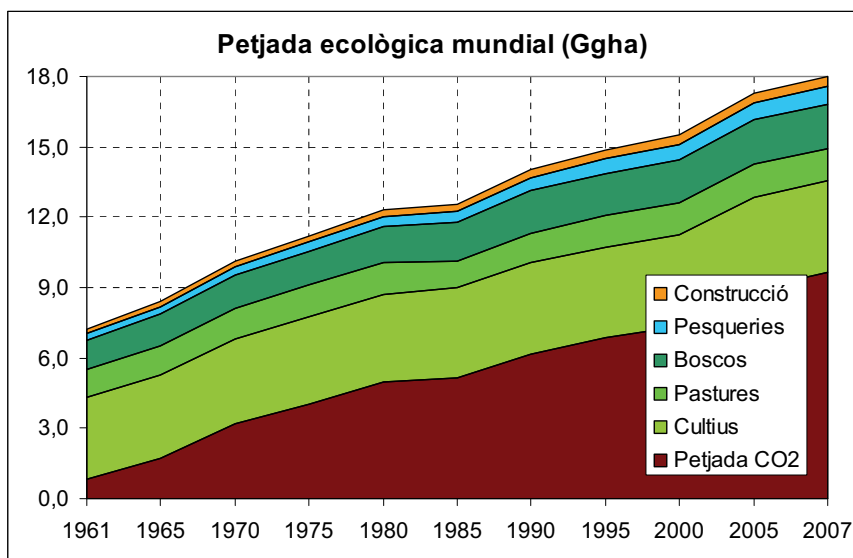


Figura 10.1. Evolució de la petjada ecològica (EF) de la humanitat (requeriments de recursos naturals) en Ggha (bilions d'hectàrees globals). **Font:** Global Footprint Network [GFN-2010]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

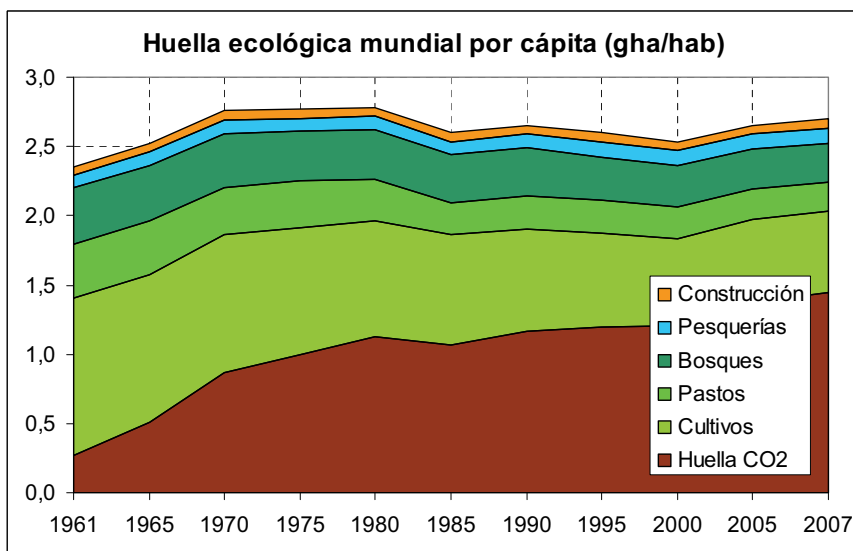


Figura 10.2. Evolució de la petjada ecològica (EF) mundial per càpita (en gha/hab). **Font:** Global Footprint Network [GFN-2010]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

- En conseqüència, l'àrea de la petjada de carboni passa de ser poc més del 10% de la petjada ecològica el 1961 a més del 50% el 2005. I, mesurada en biocapacitat de la Terra, passa del 7,3% el 1961 a més del 80% el 2005.
- Com a corol·lari del punt anterior, es pot dir que, sense l'impacte ambiental dels combustibles fòssils, la petjada ecològica de la humanitat seria encara sostenible ambientalment (no hi hauria sobrepassament). Això sí, les societats desenvolupades (o en via de desenvolupament), tal com les coneixem avui dia, no serien viables econòmicament.
- En termes de petjada per càpita (gha/hab, taula 10.1 i figura 10.2), fora d'un petit augment a l'inici del període, els valors totals es mantenen pràcticament constants. L'aug-

ment relatiu de la petjada de carboni (de 0,27 gha/hab el 1961 a 1,44 gha/hab el 2005) es veu compensat per la disminució de la resta de petjades (de 2,09 gha/hab el 1961 a 1,26 gha/hab el 2005). La petjada biològica s'ha substituït per la petjada fòssil.

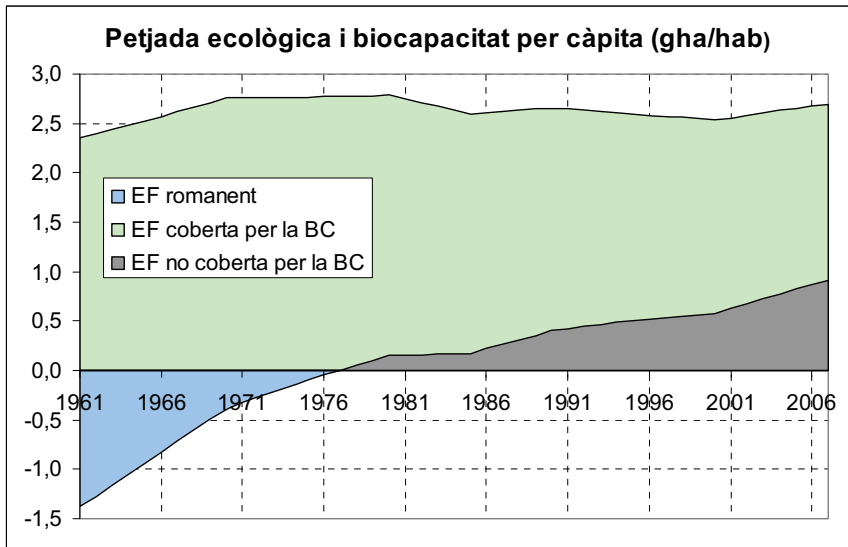


Figura 10.3. Evolució de la petjada ecològica (EF) menys la biocapacitat (BC) mundials per càpita (en gha/hab). La part més fosca marca el sobrepassament. **Font:** Global Footprint Network [GFN-2010]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

- La biocapacitat de la Terra s'ha mantingut pràcticament constant en termes absoluts durant tot el període (d'11,48 Ggha el 1961 a 11,89 Ggha el 2007), però l'augment de població durant aquest període ha fet disminuir la biocapacitat per càpita a menys de la meitat: de 3,73 gha/hab el 1961 a 1,78 gha/hab el 2005.
- La petjada ecològica per càpita (taula 10.14) creix durant els primers anys des de 2,36 gha/hab fins a 2,78 gha/hab el 1980, després decreix fins a 2,60 gha/hab el 1995 i tornar a créixer fins a 2,70 gha/hab el 2007. Durant els darrers 27 anys, doncs, ha disminuït lleugerament.
- La biocapacitat per càpita, però, ha disminuït constantment, ja que els recursos de la Terra pràcticament són els mateixos mentre que, en el període considerat (1961-2007), la població s'ha més que duplicat (increment del 117,1%) i aquesta tendència continuarà mentre la població mundial vagi creixent.
- Com a conseqüència de les tendències anteriors (manteniment de la petjada ecològica per càpita, disminució contínua de la biocapacitat per càpita), l'any 1977 es va sobrepassar per primer cop la biocapacitat de la Terra. Des d'aleshores, el sobrepassament ha continuat augmentant i, en funció de les dades globals, el 2007 ja havia arribat a 1,51 vegades la Terra.

Així, doncs, l'anàlisi mundial de la petjada ecològica i de la biocapacitat ofereixen la imatge d'una civilització que consumeix el capital sobre el qual se sustenta. De forma general, estem substituint la biocapacitat associada a la Terra per l'energia procedent dels combustibles fòssils (pesticides maquinària, adobs), fet que millora la rendibilitat aparent dels sistemes biològics (fonamentalment, els cultius).

Tanmateix, quan aquesta aportació (regal de la natura) escassegi, serà difícil pensar que la biocapacitat de la Terra pugui sostenir les funcions més vitals d'una humanitat que ha crescut en consum i població més enllà de la sostenibilitat.

Hi ha diverses tipologies de països pel que fa a l'evolució de la *petjada ecològica* i a la *biocapacitat*. La figura 10.4 en mostra alguns dels perfils característics:

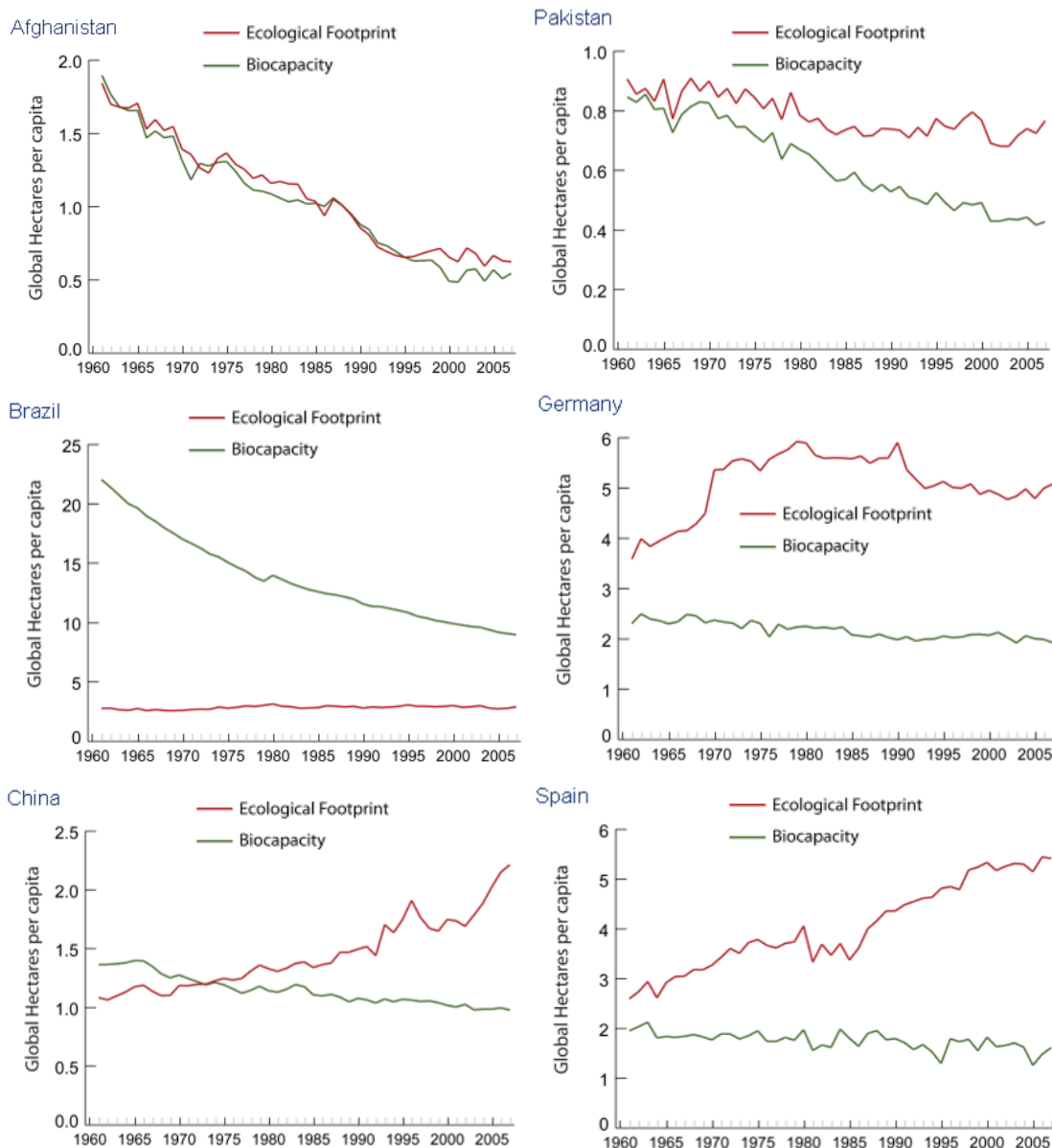


Figura 10.4. Evolució (1961-2007) de la *petjada ecològica* i de la *biocapacitat* (gha/hab) en diversos tipus de país (cada gràfica té la seva escala): a) *Afganistan*: viu de la pròpia biocapacitat (també a Cambodja); b) *Pakistan*: la biocapacitat disminueix més que la petjada ecològica (també a l'Índia, Bangla Desh, Nigèria, el Marroc); c) *Brasil*: la gran biocapacitat hi va perdent pes (també al Canadà, la República Democràtica del Congo, Indonèsia, Myanmar, els països andins); d) *Alemanya*: petjada ecològica molt superior a la biocapacitat però no n'incrementa la distància (també al Regne Unit, Etiòpia, Cuba); e) *Xina*: petjada ecològica creixent, que sobrepassa la biocapacitat (també als EUA, Mèxic, Algèria, Aràbia Saudita, Iran, Tailàndia); f) *Espanya*: país amb una petjada ecològica superior a la biocapacitat i que continua creixent (també a França, Itàlia, Egipte, el Japó, Corea del Sud).

Font: Global Footprint Network; **Elaboració:** Carles Riba Romeva

<http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/afghanistan/>

Petjada ecològica de les regions

Si bé és decisiva la confrontació entre petjada ecològica i la biocapacitat a escala mundial, també cal conèixer aquest balanç per regions, com s'il·lustra a les taules 10.14 i 10.16 i a les figures 10.5 i 10.6 corresponents:

Taula 10.15. Petjada ecològica i biocapacitat per regions. Valors absoluts (2007)								
Regions	Població (Mhab)	Petjada ecològica de consum (Mgha, milions de gha)						
		TOTAL	Cultius	Pastures	Boscos	Pesquer.	Construït	Petjada C
Amèrica del Nord	449,1	3.021,2	452,8	87,0	407,3	44,8	30,8	1.998,6
Amèrica del S i c.	462,0	1.145,7	278,3	322,1	186,5	54,5	40,6	263,7
Europa	595,3	2.775,6	662,3	132,3	322,7	131,3	83,1	1.443,9
Euràsia	284,0	1.020,5	230,7	28,7	104,6	33,8	14,4	608,3
Orient Mitjà	204,2	591,6	129,2	28,2	21,0	18,3	13,3	381,6
Àfrica	963,9	1.356,0	487,2	198,7	292,8	67,6	58,8	251,0
Àsia i Oceania	3.713,1	6.404,2	1.734,7	243,6	563,6	478,0	270,0	3.114,2
Món	6.671,6	16.314,9	3.975,2	1.040,6	1.898,4	828,2	511,1	8.061,3
Regions	Població (Mhab)	Biocapacitat (Mgha, milions de gha)						
		TOTAL	Cultius	Pastures	Boscos	Pesquer.	Construït	Dèficit o reserva
Amèrica del Nord	449,1	1.843,4	626,0	116,0	809,4	261,3	30,8	-1.177,8
Amèrica del S i c.	462,0	2.956,5	412,6	436,9	1.909,3	157,0	40,6	1.810,7
Europa	595,3	1.232,1	505,9	76,2	426,5	140,4	83,1	-1.543,5
Euràsia	284,0	1.104,7	253,2	118,8	671,5	46,8	14,4	84,3
Orient Mitjà	204,2	138,4	66,3	15,3	14,6	28,8	13,3	-453,2
Àfrica	963,9	1.423,2	427,7	397,0	435,4	104,4	58,8	67,2
Àsia i Oceania	3.713,1	3.313,8	1.614,4	356,5	667,8	405,2	270,0	-3.090,3
Món	6.671,6	12.012,2	3.906,2	1.516,9	4.934,4	1.143,8	511,1	-4.302,6

Font: Global Footprint Network
http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/2010_NFA_data_tables.xls.
 Elaboració: Carles Riba Romeva

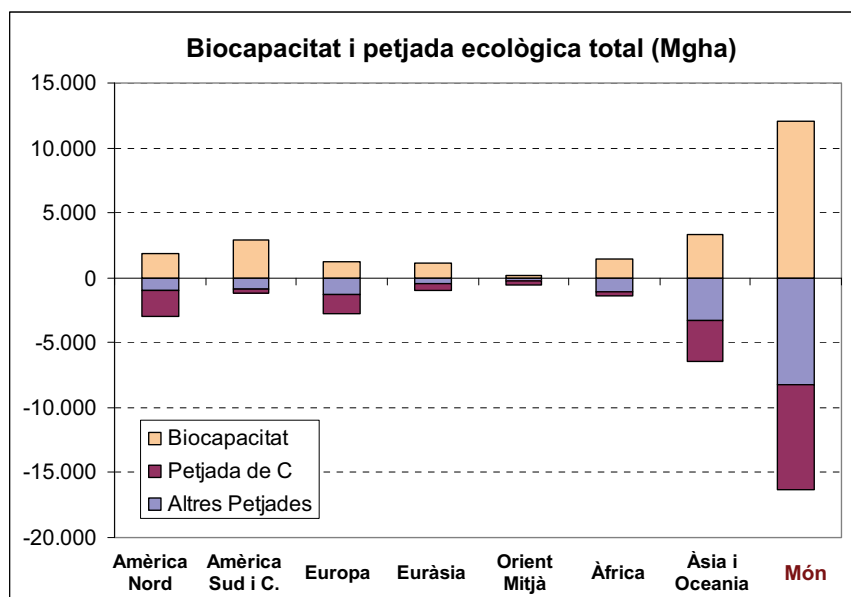


Figura 10.5. Biocapacitat (BC) i petjada ecològica (EF) total (en Mgha, milions d'hectàrees globals) per a cada una de les regions i per al món sencer (2007).

Font: Global Footprint Network. Elaboració: Carles Riba Romeva

Taula 10.16. Petjada ecològica i biocapacitat per regions. Valors per càpita (2007)

Regions	Població (Mhab)	Petjada ecològica de consum (gha/hab)						
		TOTAL	Cultius	Pastures	Bosc	Pesquer.	Construït	Petjada C
Amèrica del Nord	449,1	6,73	1,01	0,19	0,91	0,10	0,07	4,45
Amèrica del S i c.	462,0	2,48	0,60	0,70	0,40	0,12	0,09	0,57
Europa	595,3	4,66	1,11	0,22	0,54	0,22	0,14	2,43
Euràsia	284,0	3,59	0,81	0,10	0,37	0,12	0,05	2,14
Orient Mitjà	204,2	2,90	0,63	0,14	0,10	0,09	0,07	1,87
Àfrica	963,9	1,41	0,51	0,21	0,30	0,07	0,06	0,26
Àsia i Oceania	3.713,1	1,72	0,47	0,07	0,15	0,13	0,07	0,84
Món	6.671,6	2,45	0,60	0,16	0,28	0,12	0,08	1,21
Regions	Població (Mhab)	Biocapacitat (gha/hab)						
		TOTAL	Cultius	Pastures	Bosc	Pesquer.	Construït	Dèficit o reserva
Amèrica del Nord	449,1	4,10	1,39	0,26	1,80	0,58	0,07	-2,63
Amèrica del S i c.	462,0	6,40	0,89	0,95	4,13	0,34	0,09	3,92
Europa	595,3	2,07	0,85	0,13	0,72	0,24	0,14	-2,59
Euràsia	284,0	3,89	0,89	0,42	2,36	0,16	0,05	0,30
Orient Mitjà	204,2	0,68	0,32	0,08	0,07	0,14	0,07	-2,22
Àfrica	963,9	1,48	0,44	0,41	0,45	0,11	0,06	0,07
Àsia i Oceania	3.713,1	0,89	0,43	0,10	0,18	0,11	0,07	-0,83
Món	6.671,6	1,80	0,59	0,23	0,74	0,17	0,08	-0,64

Font: Global Footprint Network

<http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/2010_NFA_data_tables.xls>.

Elaboració: Carles Riba Romeva

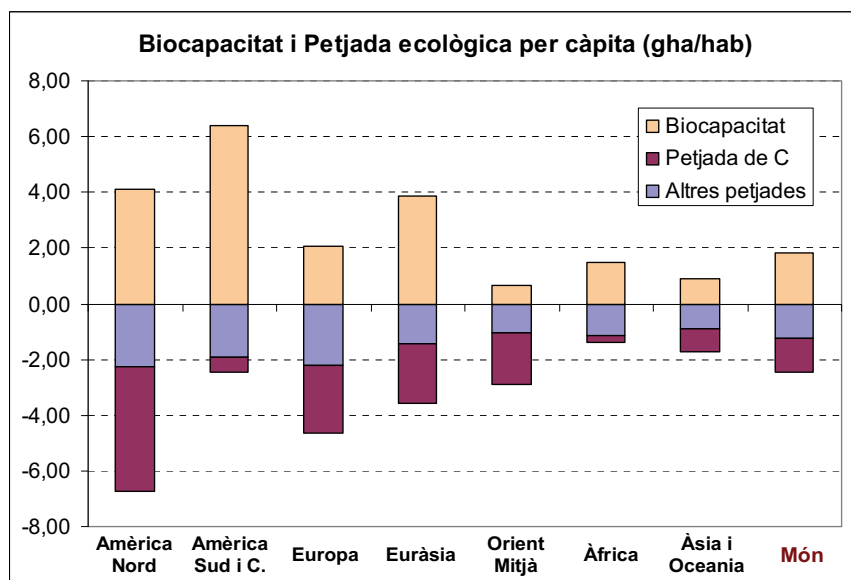


Figura 10.6. Biocapacitat (BC) i petjada ecològica (EF) per càpita (en gha/hab, hectàrees global per habitant) per a cada una de les regions i per al món sencer (2007).

Font: Global Footprint Network. Elaboració: Carles Riba Romeva

Les diferents regions del món són molt desiguals quant a població i recursos i, per tant, el joc de les importacions i les exportacions de la petjada ecològica i de les biocapacitats formarà part (directament o indirectament) cada vegada més del joc geoestratègic mundial.

Comentaris:

1. La qüestió més destacada és que la petjada ecològica (EF) mundial és més gran que la biocapacitat (BC) de la Terra (16.314,9, contra 12.012,2 Mgha; un sobrepassament del 35,8%). Com ja s'ha comentat, les xifres més elevades que la Global Footprint Network pren per al conjunt de la Terra (17.995,6 i 11.894,6 Mgha, amb un sobrepassament del 51,3%) no són coherents amb la suma de les dades per països.
2. El segon aspecte destacable és la importància de la *petjada de carboni* (EFC), que es relaciona amb l'ús dels combustibles fòssils: 8.061,3 Mgha, el 49,4% de la petjada ecològica global. El resultat és encara punyent si la petjada de carboni es compara amb la biocapacitat de la Terra, ja que n'absorbeix el 67,1% (8.061,2, contra 12.012,2 Mgha). Com ja s'ha comentat, si aquesta petjada s'eliminés, la humanitat encara seria sostenible.
4. Tres regions en el món que tenen un balanç positiu entre biocapacitat i petjada ecològica, però tan sols el balanç d'Amèrica del Sud i central té un valor significatiu (1.810,7 Ggha), mentre que el de les altres dues és testimonial (Euràsia, 84,3 Mgha, i Àfrica 67,2 Mgha).
5. La resta de regions tenen un balanç fortament negatiu. El pitjor de tots és el d'Àsia i Oceania (-4.302,6 Mgha, en gran part a causa de la seva gran població); després vénen Europa (-1.543,2 Mgha), Amèrica del Nord (-1.177,8 Mgha) i l'Orient Mitjà (-453,2 Mgha).

Petjada ecològica dels països

La taula 10.17 ofereix tres llistes de països, totes referides als de més de 20 Mhab: a) els 8 amb major petjada ecològica (de fet, s'hi sumen els països amb més població i amb més consum); b) els 8 països amb més biocapacitat (fonamentalment, els països amb més superfície i els que tenen territoris més productius); c) finalment, hi ha una llista de 19 països amb els valors extrems de petjada ecològica (es pren com a unitat la biocapacitat per càpita mitjana mundial BCm = 100) i alguns països intermedis significatius.

Es poden fer les observacions següents:

1. Els 8 països amb la petjada ecològica més elevada sumen el 51,8% de la població i el 55,2% de la petjada ecològica, mentre que els 8 països amb més biocapacitat sumen el 51,3% de la població però tan sols el 41,2% de la biocapacitat. Per tant, la petjada ecològica està més concentrada que la biocapacitat.
2. Hi ha grans diferències entre la petjada ecològica dels països. El valor per càpita referit a la biocapacitat per càpita mitjana mundial (BCm = 1) és, en un extrem, de EF/BCm = 4,44 (3,44 vegades insostenible) als Estats Units i, en l'altre extrem, de 0,35 (amb un marge de 0,65 respecte a la sostenibilitat) a Bangla Desh. Predominen, però, els països insostenibles i sorpren la quarta posició d'Espanya.
3. La petjada de carboni per càpita en relació amb la biocapacitat per càpita mitjana mundial va des de EFC/BCm = 3,09 als Estats Units fins a valors de pràcticament zero a Afganistan, Moçambic, R. D. Congo, Etiòpia o Tanzània. Però la petjada ecològica, descomptada la petjada de carboni (EF-EFC)/BCm, té valors molt menys extrems (des de 2,07 a Austràlia fins a 0,27 a Bangla Desh).
4. La participació de la petjada de carboni (EFC) en la petjada ecològica (EF) és molt important. En els 14 països de petjada ecològica més alta (els sis primers es presenten a la taula 10.17) la *petjada de carboni* és superior a 1,2 vegades la biocapacitat mitjana de la Terra (BCm), mentre que en els 14 països de menor petjada ecològica (els sis darrers, a la taula 10.17), la petjada de carboni és inferior a 0,2 vegades la BCm.

En resum, la petjada ecològica de consum dels països està molt relacionada amb la seva riquesa. I, com més alta és, més participació hi sol tenir la petjada de carboni. Amb el declivi dels combustibles fòssils, s'endevina un gran trastocament geopolític que afectarà fonamentalment els països més desenvolupats.

Taula 10.17. Petjada ecològica (EF) i biocapacitat (BC) per regions i països (2007)

Petjada ecològica i biocapacitat de les regions ¹								
Regions	Població (Mhab)	EF total Mgha	BC total Mgha	BC-EF total Mgha	EF/hab gha/hab	BC/hab gha/hab	EF/BCm --	EFC/BCm --
Amèrica del Nord	449,1	3.021,2	1.843,4	-1.177,8	6,73	4,10	3,74	2,47
Amèrica del S i c.	462,0	1.145,7	2.956,5	1.810,7	2,48	6,40	1,38	0,32
Europa	595,3	2.775,6	1.232,1	-1.543,5	4,66	2,07	2,59	1,35
Euràsia	284,0	1.020,5	1.104,7	84,3	3,59	3,89	2,00	1,19
Orient Mitjà	204,2	591,6	138,4	-453,2	2,90	0,68	1,61	1,04
Àfrica	963,9	1.356,0	1.423,2	67,2	1,41	1,48	0,78	0,14
Àsia i Oceania	3.713,1	6.404,2	3.313,8	-3.090,3	1,72	0,89	0,96	0,47
Món	6.671,6	16.314,9	12.012,2	-4.302,6	2,45	1,80	1,36	0,67
Països amb major petjada ecològica total ²								
1 Xina	1.336,6	2.959,2	1.307,2	-1.652,0	2,21	0,98	1,23	0,67
2 EUA	308,7	2.468,1	1.193,9	-1.274,1	8,00	3,87	4,44	3,09
3 Índia	1.164,7	1.063,4	594,3	-469,0	0,91	0,51	0,51	0,18
4 Rússia	141,9	625,8	815,8	190,1	4,41	5,75	2,45	1,51
5 Japó	127,4	602,4	76,3	-526,1	4,73	0,60	2,63	1,74
6 Brasil	190,1	552,4	1.707,7	1.155,2	2,91	8,98	1,61	0,24
7 Alemanya	82,3	418,5	158,5	-260,0	5,08	1,92	2,82	1,50
8 Mèxic	107,5	322,1	158,0	-164,1	3,00	1,47	1,66	0,76
Països amb major biocapacitat ²								
1 Brasil	190,1	552,4	1.707,7	1.155,2	2,91	8,98	1,61	0,24
2 Xina	1.336,6	2.959,2	1.307,2	-1.652,0	2,21	0,98	1,23	0,67
3 EUA	308,7	2.468,1	1.193,9	-1.274,1	8,00	3,87	4,44	3,09
4 Rússia	141,9	625,8	815,8	190,1	4,41	5,75	2,45	1,51
5 Índia	1.164,7	1.063,4	594,3	-469,0	0,91	0,51	0,51	0,18
6 Canadà	32,9	231,1	491,5	260,5	7,01	14,92	3,90	2,24
7 Austràlia	20,9	142,6	306,8	164,2	6,84	14,71	3,80	1,73
8 Indonèsia	224,7	272,6	303,9	31,3	1,21	1,35	0,67	0,19
Països amb major i menor petjada ecològica en relació amb la biocapacitat mitjana (BCm = 1) ²								
1 EUA	308,7	2.468,1	1.193,9	-1.274,1	8,00	3,87	4,44	3,09
2 Canadà	32,9	231,1	491,5	260,5	7,01	14,92	3,90	2,24
3 Austràlia	20,9	142,6	306,8	164,2	6,84	14,71	3,80	1,73
4 Espanya	44,1	238,8	71,1	-167,7	5,42	1,61	3,01	1,52
5 Aràbia Saud.	24,7	126,7	20,7	-106,0	5,13	0,84	2,85	1,94
6 Alemanya	82,3	418,5	158,5	-260,0	5,08	1,92	2,82	1,50
13 Rússia	141,9	625,8	815,8	190,1	4,41	5,75	2,45	1,51
17 Brasil	190,1	552,4	1.707,7	1.155,2	2,91	8,98	1,61	0,24
26 Xina	1.336,6	2.959,2	1.307,2	-1.652,0	2,21	0,98	1,23	0,67
37 Nigèria	147,7	212,2	165,0	-47,2	1,44	1,12	0,80	0,09
44 Indonèsia	224,7	272,6	303,9	31,3	1,21	1,35	0,67	0,19
50 Índia	1.164,7	1.063,4	594,3	-469,0	0,91	0,51	0,51	0,18
51 Moçambic	21,9	16,9	41,4	24,5	0,77	1,89	0,43	0,02
52 Pakistan	173,2	132,8	74,1	-58,7	0,77	0,43	0,43	0,14
53 R. D. Congo	62,5	47,1	172,7	125,6	0,75	2,76	0,42	0,02
54 Afganistan	26,3	16,4	14,3	-2,1	0,62	0,54	0,35	0,02
55 Bangla Desh	157,8	98,0	59,2	-38,8	0,62	0,38	0,35	0,07

¹ Els símbols utilitzats en aquesta taula són: EF=petjada ecològica (de consum); EFC=petjada de carboni; BC=biocapacitat; BCm=biocapacitat mitjana del món. Les unitats són: gha=hectàrea global; Mgha = milions d'hectàrees globals; hab=habitants; Mhab= milions d'habitants

² Entre els 55 països del món amb més de 20 milions d'habitants

Font: Global Footprint Network. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

11. L'atmosfera i el canvi climàtic

11.1. Emissions de CO₂

Introducció

Al principi, dèiem que, en aquest text, ens centràriem més en l'exhauriment de les fonts d'energia no renovable que en les emissions de CO₂ i en el canvi climàtic. Ho argumentàvem basant-nos en el fet que, probablement, primer arribaran les conseqüències del declivi dels recursos energètics fòssils en les nostres vides quotidianes i, també, en el potencial més gran que aquest fet pot tenir per moure les consciències i les voluntats.

Però, en un termini més llunyà, el problema més greu i determinant que la humanitat afrontarà (i que pot arribar a fer perillar la nostra pròpia pervivència) és un canvi climàtic desfavorable, que, en darrera instància, ha estat també la causa de les cinc extincions massives en les èpoques geològiques.

El canvi climàtic no és un element accessori de les nostres vides, sinó un fet de gran transcendència que pot condicionar, de forma determinant, les civilitzacions humanes futures i la mateixa existència de la vida. Tanmateix, el món d'avui dia, marcat per les preocupacions econòmiques immediates, entén molt millor tot allò que té preu (és a dir, que ha estat monetaritzat), com també l'impacte sobre les nostres economies, que els complexos equilibris i les dinàmiques dels processos i els recursos de la natura.

En posar preu "econòmic" a les emissions de CO₂, el protocol de Kyoto ens invita a comptabilitzar-les i a tenir-les en compte en els nostres balanços. Malgrat que, vist des d'aquesta perspectiva, no ataca el problema de fons, té l'avantatge que ha esdevingut un tema "mediàtic" que ens ajuda a prendre consciència de les limitacions dels recursos naturals i dels impactes que es deriven del seu ús.

Percebudes la dimensió i l'evolució recent de les emissions de CO₂ (i d'altres gasos d'efecte hivernacle), i conscients dels efectes climàtics que avui dia generen, ens preguntem sobre el balanç del cicle de carboni actual, per comparació de la situació preindustrial:

- Quins són els diferents dipòsits de carboni que hi ha a la natura i les seves magnituds?
- Quins són els fluxos de carboni i les seves intensitats, i entre quins dipòsits tenen lloc?

Finalment, n'analitzem l'aspecte més important i, probablement, també el que coneixem menys. Fa referència a la nostra relació amb la natura i a l'intent de predir les conseqüències futures de les emissions de CO₂ i del canvi climàtic.

En aquest context, fem algunes pinzellades sobre el passat (el paleoclima) i, alhora, llegim amb atenció les grans conclusions del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC) i el seu darrer informe d'avaluació (AR4, 2007) sobre les perspectives i projeccions de futur.

Així doncs, les seccions d'aquest capítol faran un recorregut des de les emissions actuals de CO₂ fins a les projeccions del futur canvi climàtic:

- Emissions de CO₂ (secció 11.1)
- Cicle del carboni (secció 11.2)
- El carboni, l'oxigen i la vida (secció 11.3)

Així com hem d'estar atents al dia a dia del nostre desenvolupament en relació amb l'ús dels recursos energètics i les emissions que se'n deriven, cal seguir amb molta atenció les indicacions dels experts en canvi climàtic per conèixer-ne les prediccions. Sabrem corregir el nostre comportament col·lectiu?

Emissions de CO₂ els darrers anys

Els darrers 150 anys (i, de forma molt especial, els darrers 50), l'ús de combustibles fòssils ha produït un augment important de CO₂ i altres gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera, els quals han esdevingut la causa principal del canvi climàtic (secció 11.3).

Dintre d'aquest període (llarg des d'una perspectiva econòmica, però molt curt a escala geològica), a continuació s'analitzen les dades sobre emissions de CO₂ que ofereix l'Energy Information Administration (EIA) del Govern dels Estats Units.

Taula 11.1. Evolució de les emissions per combustibles (TgCO ₂ /any) ¹									
	1980	%	1985	1990	1995	2000	2005	2008	%
Petrolí	8.825,2	47,9	8.333,0	9.118,0	9.421,7	10.174,2	11.125,7	11.170,8	36,6
Gas natural	3.086,3	16,7	3.507,0	4.147,2	4.488,1	4.974,3	5.748,3	6.273,4	20,6
Carbó	6.522,4	35,4	7.702,1	8.350,8	8.240,3	8.655,2	11.492,2	13.049,0	42,8
Món	18.433,9	100,0	19.542,1	21.616,0	22.150,1	23.803,6	28.366,2	30.493,2	100,0
Petrolí	100,0		94,4	103,3	106,8	115,3	126,1	126,6	
Gas natural	100,0		113,6	134,4	145,4	161,2	186,2	203,3	
Carbó	100,0		118,1	128,0	126,3	132,7	176,2	200,1	
Món	100,0		106,0	117,3	120,2	129,1	153,9	165,4	

¹ Tg (teragrams = 10¹² grams = milions de tones).
Font: EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

És interessant reproduir gràficament l'evolució d'aquestes emissions (vegeu la figura 11.1, on també hi hem inclòs les dades de l'any 2009, incorporades recentment per l'EIA).

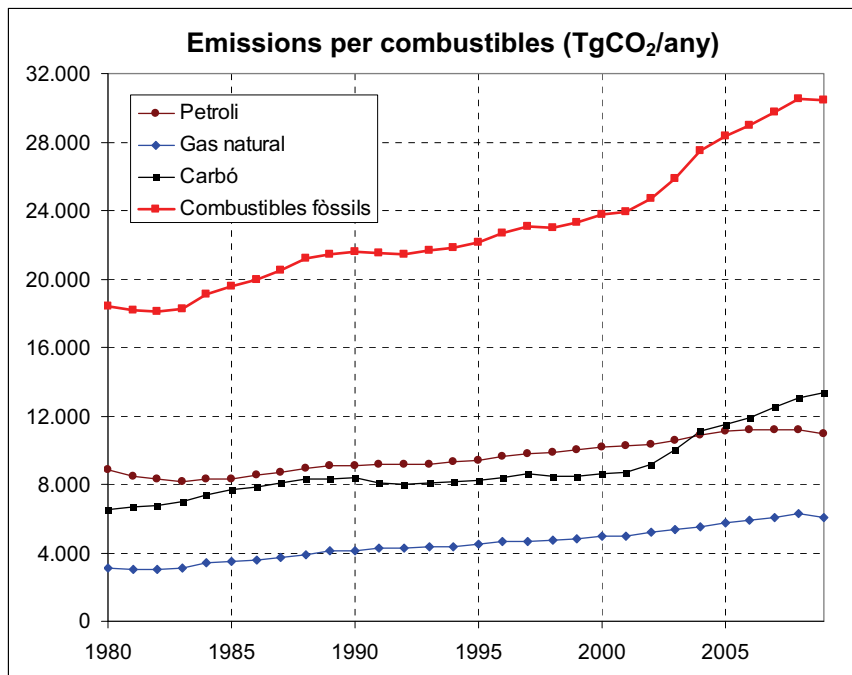


Figura 11.1. Evolució de les emissions mundials de CO₂ en el període 1980-2009, segons els combustibles que originen l'emissió. S'observa que les emissions globals es frenen, per primer cop, l'any 2009 (30.451,6 TgCO₂/any), a costa d'una disminució de les emissions procedents del petrolí (per segon any consecutiu) i del gas natural (per primer cop), mentre que continuen creixent les procedents del carbó. **Font:** EIA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

També és interessant veure l'evolució de les emissions de CO₂ per regions i països:

Taula 11.2. Evolució de les emissions per regions (TgCO ₂ /any)									
	1980	%	1985	1990	1995	2000	2005	2009	%
Amèrica del Nord	5.475,0	29,7	5.329,8	5.814,7	6.151,1	6.819,3	7.014,0	6.410,5	21,1
Amèrica del S i c.	627,4	3,4	624,6	716,3	857,6	991,8	1.104,0	1.273,0	4,2
Europa	4.680,3	25,4	4.553,8	4.545,7	4.309,0	4.457,8	4.676,7	4.310,3	14,2
Euràsia	3.081,9	16,7	3.535,7	3.820,8	2.467,5	2.327,5	2.519,2	2.358,0	7,7
Orient Mitjà	490,7	2,7	579,2	729,9	901,3	1.093,9	1.449,2	1.714,1	5,6
Àfrica	537,1	2,9	640,9	725,7	825,7	887,3	1.056,9	1.121,6	3,7
Àsia i Oceania	3.541,5	19,2	4.278,0	5.262,9	6.637,8	7.226,1	10.546,1	13.264,1	43,6
Món	18.433,9	100,00	19.542,1	21.616,0	22.150,1	23.803,6	28.366,2	30.451,6	100,00
Amèrica del Nord	100,0		97,3	106,2	112,3	124,6	128,1	117,1	
Amèrica del S i c.	100,0		99,6	114,2	136,7	158,1	176,0	202,9	
Europa	100,0		97,3	97,1	92,1	95,2	99,9	92,1	
Euràsia	100,0		114,7	124,0	80,1	75,5	81,7	76,5	
Orient Mitjà	100,0		118,0	148,7	183,7	222,9	295,3	349,3	
Àfrica	100,0		119,3	135,1	153,7	165,2	196,8	208,8	
Àsia i Oceania	100,0		120,8	148,6	187,4	204,0	297,8	374,5	
Món	100,0		106,0	117,3	120,2	129,1	153,9	165,2	

Evolució de les emissions per països										
1	Xina	1.448,5	7,86	1.857,8	2.269,7	2.861,7	2.849,7	5.512,7	7.710,5	25,32
2	EUA	4.776,6	25,91	4.604,8	5.041,0	5.319,9	5.861,8	5.991,5	5.424,5	17,81
3	Índia	291,2	1,58	447,4	578,6	870,2	1.003,0	1.183,3	1.602,1	5,26
4	Rússia	-		-	-	1.603,1	1.556,1	1.652,7	1.572,1	5,16
5	Japó	947,0	5,14	926,2	1.047,0	1.116,2	1.201,4	1.241,3	1.098,0	3,61
6	Alemanya	1.056,0	5,73	1.014,2	990,6	890,8	854,7	847,4	765,6	2,51
7	Canadà	457,4	2,48	443,7	470,6	508,7	573,3	623,4	541,0	1,78
8	Corea Sud	131,7	0,71	172,3	242,1	381,4	438,8	493,8	528,1	1,73
9	Iran	116,8	0,63	159,9	202,1	262,2	320,6	449,2	527,2	1,73
10	Regne Unit	613,6	3,33	589,3	601,8	560,1	560,3	583,1	519,9	1,71
11	Aràbia Sd.	235,0	0,96	302,0	298,0	347,5	386,0	432,5	470,0	1,54
12	Àfrica Sud	240,3	1,27	280,7	302,2	321,4	383,0	397,8	450,4	1,48
13	Mèxic	371,8	1,30	365,7	415,4	431,4	447,7	471,9	443,6	1,46
14	Brasil	185,7	1,01	192,7	237,3	289,1	344,4	369,7	420,2	1,38
15	Austràlia	488,9	1,08	396,8	367,7	372,5	401,7	414,0	417,7	1,37
16	Indonèsia	198,8	0,47	237,7	267,6	289,1	356,3	397,2	413,3	1,36
17	Itàlia	176,9	2,02	179,2	208,0	235,3	290,5	405,5	407,9	1,34
18	França	85,8	2,65	101,4	156,0	214,8	266,3	330,6	396,7	1,30
19	Espanya	195,0	1,06	205,0	224,1	243,4	317,5	382,9	329,9	1,08
20	Taiwan	70,6	0,38	81,6	118,3	181,4	256,1	288,8	290,9	0,96

Nota: Les dades de l'EIA només inclouen els gasos d'efecte hivernacle provinents dels combustibles fòssils (petroli, gas natural i carbó), però no inclouen altres emissions (per exemple, el metà) o altres fonts (per exemple, la indústria del ciment, la combustió de residus, o els cultius i les explotacions ramaderes)

Font: EIA-govEUA. Elaboració: Carles Riba Romeva

De forma anàloga a la taula 11.1, l'evolució de les emissions per regions i països es percep molt millor si es mostra en forma gràfica (figura 11.2, per a les regions; figures 11.3 i 11.4, per als països). La figura 11.4 reproduïx la part inferior de la figura 11.3 (escala limitada a 2.000 TgCO₂/any) per mostrar millor l'evolució dels països que segueixen la Xina i els Estats Units.

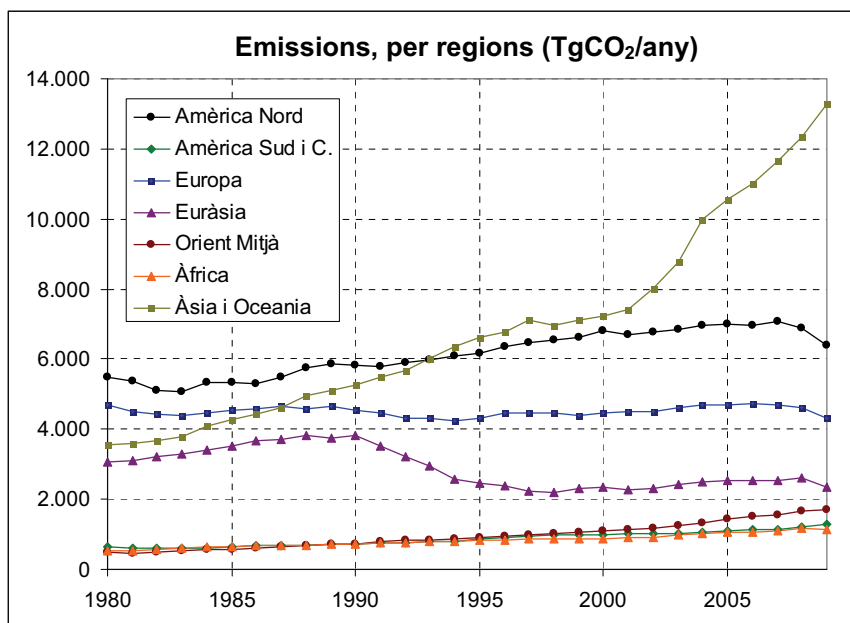


Figura 11.2. Evolució de les emissions de CO₂ en el període 1980-2009, per regions. Així com Amèrica del Nord, Europa i Euràsia frenen les emissions en els darrers anys de crisi, les altres quatre regions continuen augmentant. Destaca l'augment espectacular de les emissions a Àsia i Oceania. **Font:** EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

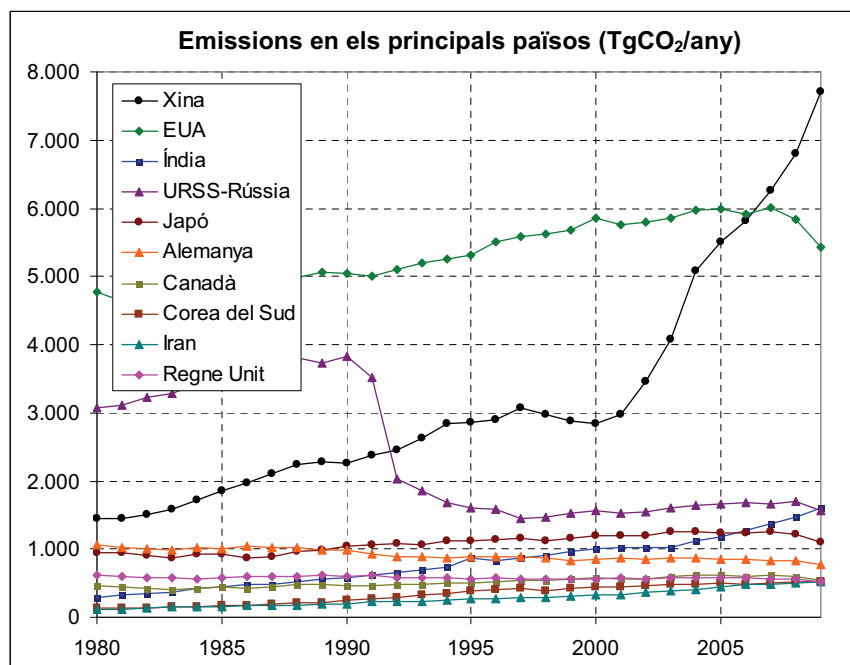


Figura 11.3. Evolució de les emissions de CO₂ en el període 1980-2009, per països (l'escala és el doble de la figura 11.1). Destaquen el creixement de la Xina i l'inici del decreixement dels Estats Units. Les emissions del bloc URSS-Rússia corresponen a l'URSS fins a l'any 1992 i a Rússia a partir d'aquest moment. **Font:** EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

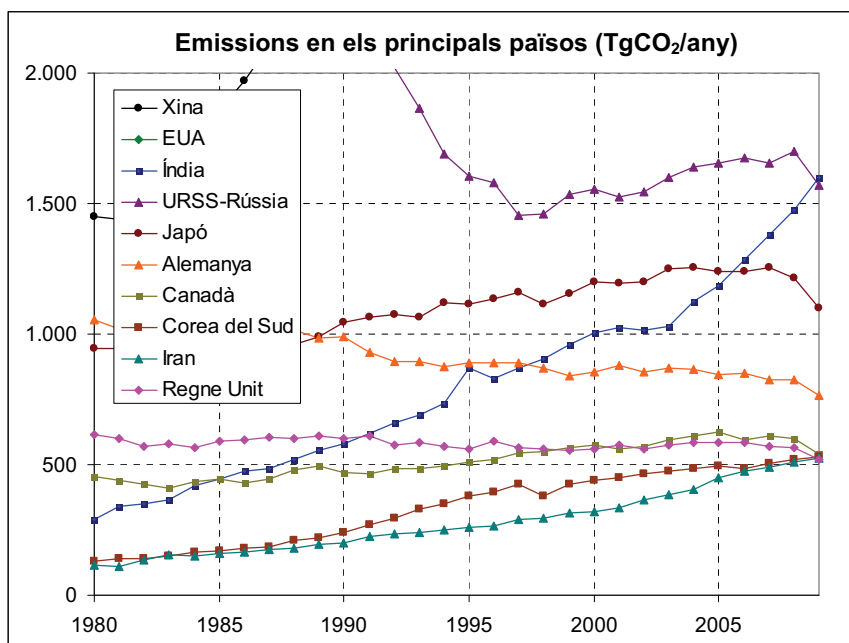


Figura 11.4. Es veu l'inici de la Xina, la caiguda de l'URSS-Rússia els darrers anys, mentre que els Estats Units en queden fora per dalt. En canvi, destaquen els forts ascensos de l'Índia i l'Iran, els ascensos moderats del Japó i Corea del Sud i els descensos moderats d'Alemanya i el Regne Unit. **Font:** EIA-govEUA.
Elaboració: Carles Riba Romeva

L'anàlisi de les taules 11.1 i 11.2 i de les figures 11.1, 11.2, 11.3 i 11.4 condueixen a fer les reflexions i els comentaris següents:

Generals

1. No és cert, com de vegades sembla que indiquen algunes informacions periodístiques, que s'està posant fre a les emissions de CO₂. A escala mundial, entre els anys 1980 i 2008 han crescut de 18.434 a 30.493 TgCO₂/any, amb un augment del 65,4%.
2. Com il·lustra molt bé la figura 11.1, hi ha un canvi en la composició de les emissions. Així com a l'inici del període dominaven les emissions derivades de la combustió del petroli (47,9%), al final del període el pes s'ha desplaçat a les derivades del carbó (42,8%). Això significa que, en el zenit del petroli, pren el relleu el carbó, el menys eficaç dels combustibles, des del punt de vista de les emissions.

Per regions

3. Destaca el gran augment d'emissions d'Àsia i Oceania (de 3.541 a 12.338 TgCO₂/any entre 1980 i 2008, amb un increment del 248,4%), que passen del 19,2% al 40,5% de les emissions mundials. Destaca també l'increment de l'Orient Mitjà (238,0%). Dues regions més gairebé dupliquen les emissions en el període: Àfrica, amb un increment del 115,5%, i Amèrica del Sud i central, amb un 95,8%.
4. Amèrica del Nord augmenta en un 25,8% (primer creix en emissions absolutes fins al 2007 i després decreix lleugerament) i passa de ser el primer emissor de CO₂ el 1980 a un segon lloc distanciat el 2008. Europa comença essent el segon emissor de CO₂ el 1980 i acaba essent-ne el tercer el 2008, sense variar gaire en termes absoluts, alhora que disminueix en un 10% la participació en les emissions mundials. Finalment, Euràsia, en quart lloc, assoleix el seu màxim el 1990, amb 3.821 TgCO₂/any, i té una caiguda de fins a un mínim de 2.328 TgCO₂/any el 2000.

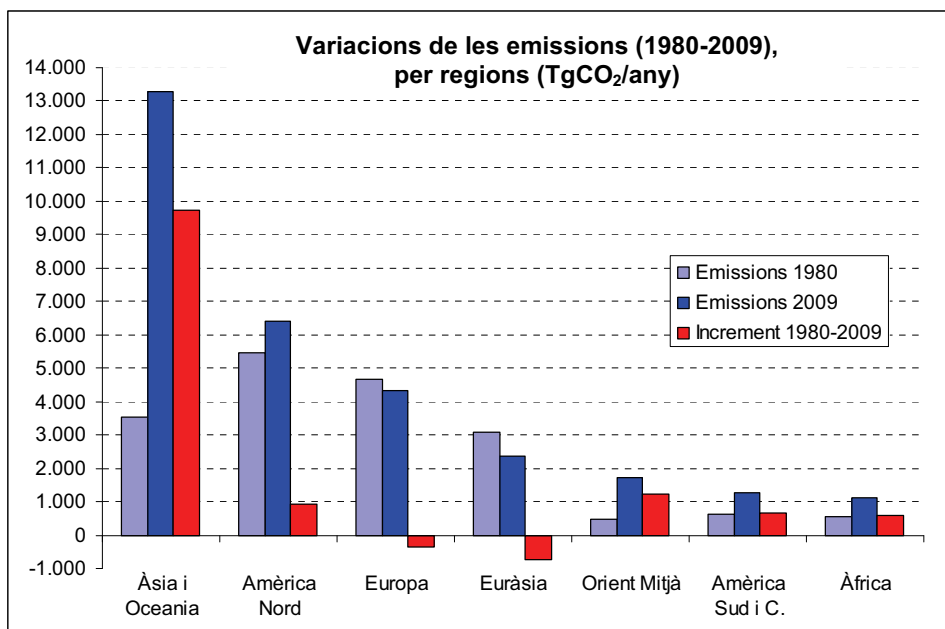


Figura 11.5. Evolució de les emissions de CO₂ en el període 1980-2009, per regions disposades en ordre decreixent per a 2009. Les dues úniques regions que experimenten un descens són Europa i Euràsia. **Font:** EIA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Per països

- Per països, destaca la Xina: el 1980 emetia 1.448 TgCO₂/any, el 2007 sobrepassa els Estats Units i el 2008 se situa a 6.804 TgCO₂/any; sense moderar el creixement amb la crisi, salta a 7.710 TgCO₂/any el 2009 (increment de 906 TgCO₂ en un any, xifra superior a les emissions actuals d'Alemanya, la quarta economia del món). L'augment global al període 1980-2009 és de 6.262 TgCO₂/any, +432% (figura 11.3). L'any 2009, la Xina emetia el 25,3% del CO₂ mundial, per sobre del pes de la seva població (el 19,9%).
- En xifres de creixement absolut, la segueix l'Índia: el 1980 emetia 291,2 TgCO₂ i el 2009 passa al tercer lloc, amb 1.602,1 TgCO₂ (increment de 1.310 TgCO₂/any, +450,1%); però la seva participació en les emissions mundials (el 5,3%) encara és lluny del seu pes demogràfic (el 17,1%).
- Els Estats Units, primer emissor mundial de CO₂ el 1980 (el 25,9%), acaben essent el segon (el 19,1% el 2009). Això no obstant, les emissions augmenten (tercer major increment absolut, +648,0 TgCO₂/any, el 13,6%), si bé amb la crisi inicien una petita davallada.
- Excepte en alguns països europeus i d'Euràsia (com es comenta més endavant), pràcticament la resta de països augmenten les emissions de CO₂ en aquest període, alguns d'ells amb increments molt elevats (vegeu la taula 11.3). Molts dels increments absoluts més importants se situen en països del sud-est asiàtic i de l'Orient Mitjà.
- A Europa, les emissions pràcticament no varien en aquest període. Però, mentre alguns països occidentals i de l'Europa de l'Est redueixen les emissions pel menor ús del carbó o pels efectes de la caiguda del mur de Berlín (Alemanya, Polònia, Regne Unit, França, Romania), els països mediterranis i alguns altres compensen aquestes disminucions amb augments (Turquia, Espanya, Grècia, Portugal, Irlanda).
- L'evolució d'Euràsia (per als primers anys no hi ha el desglossament en els països actuals) és molt complexa. A la primera dècada (1980-1990), les emissions augmenten +738,9 TgCO₂/any; amb la desfeta de l'URSS (1990-1998), aquests països disminueixen les emissions en -1.609,3 TgCO₂/any; amb el nou segle (1998-2008), es recupera en part amb +384,4 TgCO₂/any. I, en aquest darrer any, s'inicia una nova disminució.

Taula 11.3. Increments i tendències en les emissions de CO₂

Regions: increments d'emissions i tendències									
Regions	Emissions (TgCO ₂ /any)				Increments (TgCO ₂ /any)				T ¹
	1980	2000	2008	2009	80-09	% (80-09)	00-09	08-09	
Amèrica del Nord	5.475	6.819	6.885	6.411	936	17,1	-409	-475	↓↓
Amèrica del Sud i c.	627	992	1.229	1.273	646	102,9	281	44	↑
Europa	4.680	4.458	4.629	4.310	-370	-7,9	-147	-319	↓↓
Euràsia	3.082	2.327	2.596	2.358	-724	-23,5	31	-238	↓↓
Orient Mitjà	491	1.094	1.659	1.714	1.223	249,3	620	56	↑
Àfrica	537	887	1.158	1.122	584	108,8	234	-36	↓
Àsia i Oceania	3.541	7.226	12.338	13.264	9.723	274,5	6.038	926	↑↑
Món	18.434	23.804	30.493	30.452	12.018	65,2	6.648	-42	=
Països: increments absoluts d'emissions (en ordre decreixent) i tendències									
Països	Emissions (TgCO ₂ /any)				Increments (TgCO ₂ /any)				T ¹
	1980	2000	2008	2009	80-09	% (80-09)	00-09	08-09	
1 Xina	1.448	2.850	6.804	7.711	6.262	432,3	4.861	906,6	↑↑
2 Índia	291	1.003	1.474	1.602	1.311	450,1	599	128,4	↑↑
3 EUA	4.777	5.862	5.833	5.425	648	13,6	-437	-408,6	↓
4 Iran	117	321	511	527	410	351,2	207	16,6	↑
5 Corea del Sud	132	439	522	528	396	300,9	89	6,4	=
6 Indonèsia	86	266	404	413	327	381,7	147	9,6	↑
7 Aràbia Saudita	177	291	456	470	293	165,7	179	14,4	↑
8 Brasil	186	344	422	420	234	126,3	76	-1,4	=
9 Taiwan	71	256	302	291	220	311,8	35	-11,1	↓
10 Tailàndia	34	162	254	253	220	654,9	92	-0,2	=
11 Austràlia	199	356	425	418	219	110,1	61	-7,7	=
12 Àfrica del Sud	235	386	483	450	215	91,7	64	-32,4	↓↓
13 Mèxic	240	383	452	444	203	84,6	61	-8,4	=
14 Turquia	69	202	273	253	184	268,9	51	-19,8	↓↓
15 Emir. Àrabs U.	30	116	196	193	163	538,1	78	-2,4	=
16 Egipte	41	120	186	192	151	370,2	72	6,5	↑
17 Japó	947	1.201	1.215	1.098	151	15,9	-103	-117,5	↓↓
18 Espanya	195	317	360	330	135	69,2	12	-30,3	↓↓
19 Singapur	29	108	161	161	132	447,8	53	-0,1	=
20 Malàisia	26	117	148	148	122	462,1	31	-0,3	=
21 Pakistan	34	109	140	140	107	316,6	31	0,6	=
22 Xile	24	55	68	119	95	398,5	64	50,6	↑↑
23 Vietnam	13	46	104	99	85	637,1	53	-5,1	↓
24 Canadà	457	573	598	541	84	18,3	-32	-57,5	↓↓
25 Argentina	93	138	172	167	74	79,8	29	-5,6	↓
26 Hong Kong	18	56	78	86	68	373,2	30	8,1	↑↑
27 Veneçuela	94	134	164	162	68	71,8	28	-2,4	=
28 Kuwait	31	59	80	85	53	170,2	25	5,0	↑↑
29 Qatar	14	35	63	67	53	379,8	32	3,1	↑
30 Iraq	52	74	100	104	52	100,7	30	3,7	↑
31 Grècia	52	101	106	100	48	93,1	-1	-5,7	↓
32 Holanda	201	246	249	249	48	23,8	3	-0,6	=
33 Bangla Desh	8	29	50	55	47	621,8	26	4,7	↑↑
34 Israel	23	60	67	70	47	200,0	10	3,2	↑
35 Algèria	67	84	107	114	47	70,1	30	6,6	↑↑
45 Filipines	34	71	75	72	39	113,8	2	-2,2	↓
74 Nigèria	69	81	100	78	9	12,5	-3	-22,4	↓↓
92 Etiòpia	1,7	3,5	6,4	6,9	5,2	304,9	3	0,5	↑↑
198 Congo (Kinsh.)	3,4	2,7	2,7	2,7	-0,7	-22,0	0,0	-0,1	↓

Països: decrements absoluts d'emissions (en ordre decreixent) i tendències										
Països		Emissions (TgCO ₂ /any)				Decrements (TgCO ₂ /any)				
		1980	2000	2008	2009	80-09	% (80-09)	00-09	08-09	T ¹
208	Dinamarca	65	54	54	50	-15	-23,7	-5	-4,7	↓↓
209	Corea del Nord	111	69	70	80	-31	-28,0	10	10,0	↑↑
210	Suècia	82	61	55	51	-32	-38,6	-10	-4,2	↓↓
211	Hongria	84	55	56	50	-34	-40,3	-5	-6,0	↓↓
212	Bulgària	89	49	50	44	-44	-49,8	-5	-6,0	↓↓
213	Romania	171	93	97	81	-90	-52,9	-13	-16,0	↓↓
214	França	489	402	429	397	-92	-18,9	-5	-31,9	↓↓
215	Regne Unit	614	560	564	520	-94	-15,3	-40	-43,9	↓↓
216	Polònia	429	293	295	286	-143	-33,4	-7	-9,0	↓
217	Alemanya	1.056	855	823	766	-290	-27,5	-89	-57,5	↓↓
Països d'Euràsia		3.082	2.327	2.596	2.358	-724	-23,5	31	-238	↓↓

¹ Tendència de 2008 a 2009: = (entre +2 i -2%); ↑ (entre +2 i +6%); ↑↑ (> 6%); ↓ (entre -2 i -6%); ↓↓ (< -6%).
Font: EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

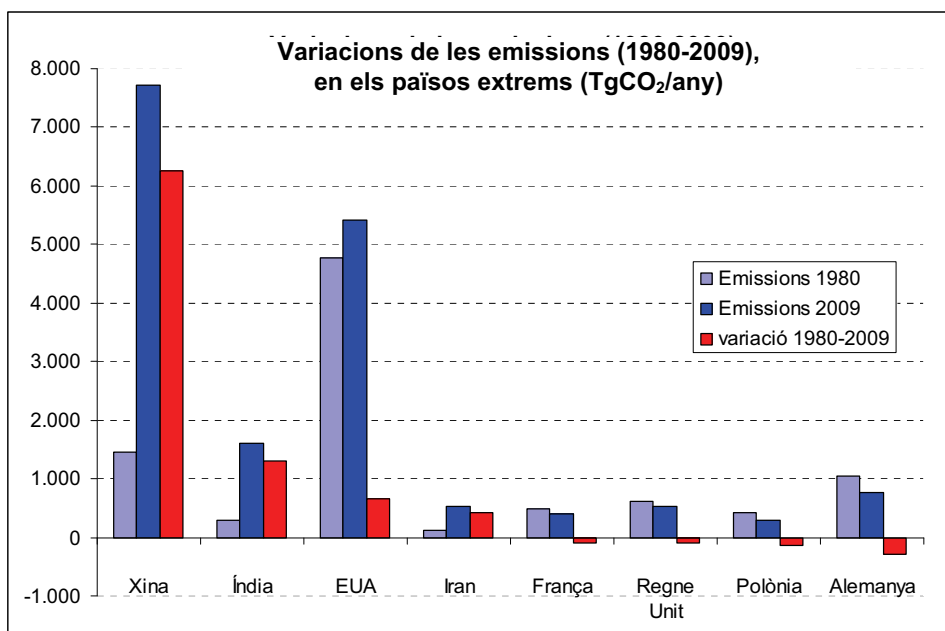


Figura 11.6. Evolució de les emissions de CO₂ en el període 1980-2009, per països: els quatre en què han crescut més i els quatre en què han disminuït més (variacions en vermell). **Font:** EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Com es comprova a les taules i a les figures anteriors, el tema de posar fre a les emissions de gasos d'efecte hivernacle (i, en concret, de CO₂) i als efectes del canvi climàtic ha pres un dimensió mundial i ja no es pot resoldre sense implicar-hi les grans potències emergents i, de forma especial, la Xina i l'Índia, sobretot per les tendències que insinuen.

Les emissions de CO₂ formen part de la mateixa equació que l'energia basada en combustibles fòssils. En el paradigma econòmic dominant, desenvolupament és sinònim de consum d'energia fòssil, i això es tradueix directament en emissions de CO₂ a l'atmosfera.

L'anàlisi de les emissions dels diferents països proporciona una radiografia del seu estat de desenvolupament. En la crisi actual de base energètica, interpretar les fluctuacions de les emissions i saber-ne veure les tendències ha esdevingut un aspecte essencial.

En efecte, Europa inicia el declivi amb l'estancament de les emissions. La Xina, l'Índia i d'altres països del sud-est asiàtic i de l'Orient Mitjà acompanyen els seus creixements econòmics espectaculars amb emissions del mateix ordre. L'economia d'Euràsia ha fluctuat segons les seves emissions. Els Estats Units assoleixen el cim de la seva hegemonia i, alhora, el cim del seu consum d'energia i d'emissions. Amèrica del Sud progressa de forma moderada, com les seves emissions, i els països de l'Àfrica subsahariana pràcticament no apareixen en el mapa d'emissions (fora d'Àfrica del Sud, amb grans recursos de carbó).

Per tant, no té sentit tractar del tema de les emissions CO₂ i el canvi climàtic sense tractar, simultàniament, del tema de l'energia i del desenvolupament.

Emissions de CO₂ per càpita

Als apartats anteriors, hem estat més atents als increments i als decrements globals d'emissions de CO₂ que al seu repartiment en funció de la població. De fet, en el balanç mundial, importen els valors absoluts.

Però, per completar la visió sobre les emissions, també convé analitzar l'evolució de les emissions de CO₂ per habitant (o per càpita) de les diferents regions i països al llarg del temps (taula 11.4). Certament, no són desitjables unes emissions per càpita elevades, però unes grans diferències en aquest paràmetre signifiquen una molt mala distribució dels recursos de la Terra entre els diferents pobles.

L'anàlisi de la taula 11.4 invita a fer els comentaris següents:

Generals

1. En primer lloc, cal assenyalar que, a escala mundial, les emissions per càpita no experimenten grans modificacions amb els anys. El 1980 eren de 4,14 MgCO₂/(hab·any) (tona per habitant i any), després disminueixen fins a 3,88 (de 1994 a 2001) i l'any 2008 remunten fins a 4,55, però insinuen un declivi l'any següent. Per tant, el gran augment d'emissions d'aquests darrers anys queda compensat, en gran part, pel creixement de la població mundial.

Per regions

2. Es percep una certa tendència de les regions a igualar-se en aquest aspecte (figura 11.7). Les tres regions que presentaven unes emissions per càpita més altes el 1980 les han reduïdes (Amèrica del Nord, de 17,09 a 14,19, un -17,0%; Euràsia, de 11,59 a 8,32, un -28,2%, i Europa, de 8,84 a 7,14, un -19,3%). Dues regions amb emissions per càpita inferiors a la mitjana mundial han crescut (Àsia i Oceania espectacularment, de 1,43 a 3,53, un +145,9%, i Amèrica del Sud i central, de forma moderada, de 2,14 a 2,68, un 25,3%). L'Orient Mitjà, si bé el 1980 ja estava per damunt de la mitjana mundial, augmenta un 57,2% i el 2009 pràcticament se situa al segon lloc, empatat amb Euràsia.
3. Àfrica és manté lluny en el darrer lloc i gairebé no augmenta (de 1,12 a 1,13). Només Àfrica del Sud, que no té encara el 5% de la població del continent, genera més del 40% de les emissions de CO₂. La resta d'Àfrica, doncs, en genera tan sols el 0,71 MgCO₂/(hab·any).
4. Una cosa semblant s'esdevé amb Àsia. Si es compten a part quatre països de dinàmica econòmica singular (Xina, Japó, Corea del Sud i Austràlia), el 59,6% de la població restant (2.241,7 Mhab) emet, de mitjana, tan sols l'1,57 MgCO₂/(hab·any).

Per països

5. Entre els països de més de 20 milions d'habitants (taula 11.5), els més emissors són Austràlia i Aràbia Saudita, amb valors propers als 20 MgCO₂/(hab·any) i augments importants durant el període analitzat (1980-2009). En canvi, els països que els segueixen, els Estats Units i el Canadà, n'han disminuït lleugerament les emissions per càpita.

6. Entre els primers emissors de CO₂ per càpita (>8,8 MgCO₂/(hab·any), el doble de la mitjana mundial), s'hi troben, a més de molts dels països de l'OCDE (Amèrica, Europa i Àsia), països amb grans recursos energètics, ja sigui de petroli (entre ells, Aràbia Saudita), de carbó (Kazakhstan, Turkmenistan, Àfrica del Sud) o de recursos combinats (Rússia).
7. En una posició intermèdia, destaca la Xina, amb 5,8 MgCO₂/(hab·any), lleugerament superior a la mitjana mundial i amb un augment espectacular en el període considerat. La resta de països amb poblacions superiors als 80 milions d'habitants (Mèxic, Egipte, Brasil, Indonèsia, Índia, Vietnam, Pakistan, Filipines, Nigèria, Bangla Desh i Etiòpia) tenen unes emissions per sota de la mitjana mundial, i les dels sis darrers és inferior al 25% d'aquest valor. Etiòpia, com molts altres països africans, quasi no emet CO₂.

Taula 11.4. Emissions per càpita, per regions i països (TgCO₂/(hab·any))										
Evolució de les emissions per càpita, per regions										
	1980	Món=100	1985	1990	1995	2000	2005	2009	Món=100	1980=100
Amèrica del N.	17,09	412,8	15,64	16,04	15,81	16,50	16,14	14,19	315,7	83,0
Amèrica d. S. i c.	2,14	51,7	1,92	2,00	2,19	2,35	2,45	2,68	59,7	125,3
Europa	8,84	213,4	8,40	8,17	7,57	7,69	7,88	7,14	158,8	80,7
Euràsia	11,59	279,9	12,73	13,25	8,48	8,06	8,84	8,32	185,2	71,8
Orient Mitjà	5,23	126,3	5,09	5,40	5,92	6,32	7,59	8,22	183,0	157,2
Àfrica	1,12	27,1	1,16	1,15	1,16	1,10	1,17	1,13	25,1	100,8
Àsia i Oceania	1,43	34,6	1,58	1,78	2,08	2,12	2,92	3,53	78,5	245,9
Món	4,14	100,00	4,02	4,09	3,89	3,91	4,38	4,49	100,0	108,5
Evolució de les emissions per càpita, per països ¹										
	1980	Món=100	1985	1990	1995	2000	2005	2009	Món=100	1980=100
1 Austràlia	13,60	328,5	15,14	15,78	16,08	18,70	19,63	19,64	437,2	144,4
2 Aràbia Sau.	17,65	426,3	13,44	12,95	12,55	13,63	17,15	18,56	413,0	105,1
3 EUA	21,02	507,6	19,35	20,19	19,98	20,77	20,26	17,67	393,2	84,1
4 Canadà	18,60	449,2	17,10	16,93	17,13	18,43	19,25	16,15	359,5	86,8
5 Taiwan	3,96	95,6	4,22	5,83	8,57	11,55	12,72	12,66	281,8	319,9
6 Rússia	--	--	--	--	10,80	10,61	11,58	11,23	249,8	--
7 Corea Sud	3,46	83,4	4,22	5,65	8,46	9,37	10,29	10,89	242,3	315,1
8 Alemanya	13,49	325,8	13,06	12,48	10,91	10,40	10,28	9,30	206,9	74,1
9 Àfrica Sud	7,75	187,2	8,52	7,74	8,23	8,57	9,11	9,18	204,4	118,4
10 Japó	8,11	195,8	7,67	8,48	8,91	9,48	9,73	8,64	192,3	106,6
11 Regne Unit	10,86	262,1	10,37	10,44	9,59	9,44	9,60	8,35	185,9	76,9
12 Polònia	12,06	291,1	11,34	8,76	7,98	7,57	7,46	7,43	165,3	61,6
13 Espanya	5,70	125,6	6,12	7,82	8,76	7,84	6,12	7,13	158,6	137,0
18 Xina	1,47	35,5	1,76	1,98	2,35	2,26	4,25	5,83	129,6	396,0
23 Mèxic	3,52	84,9	3,66	3,56	3,46	3,83	3,75	3,99	88,8	113,4
31 Egipte	0,96	23,2	1,51	1,69	1,68	1,84	2,22	2,44	54,2	254,2
32 Brasil	1,51	36,4	1,40	1,57	1,77	1,95	1,96	2,11	47,1	140,1
33 Indonèsia	0,57	13,7	0,61	0,85	1,08	1,24	1,44	1,72	38,3	302,8
35 Índia	0,43	10,3	0,59	0,69	0,95	1,00	1,08	1,38	30,8	325,7
38 Vietnam	0,25	6,0	0,28	0,25	0,41	0,58	0,90	1,12	24,8	447,0
40 Pakistan	0,40	9,5	0,46	0,56	0,65	0,72	0,69	0,77	17,2	195,7
41 Filipines	0,66	16,1	0,47	0,64	0,80	0,87	0,84	0,74	16,4	111,1
43 Nigèria	0,92	22,3	0,72	0,85	0,91	0,66	0,78	0,52	11,6	56,4
44 Bangla Desh	0,09	2,1	0,10	0,13	0,19	0,22	0,28	0,36	8,0	413,0
54 Etiòpia	0,04	1,1	0,06	0,06	0,04	0,05	0,06	0,08	1,8	183,4

¹ El número d'ordre del país està relacionat amb els 57 que el 2009 tenien una població de més de 20 Mhab.
Font: EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

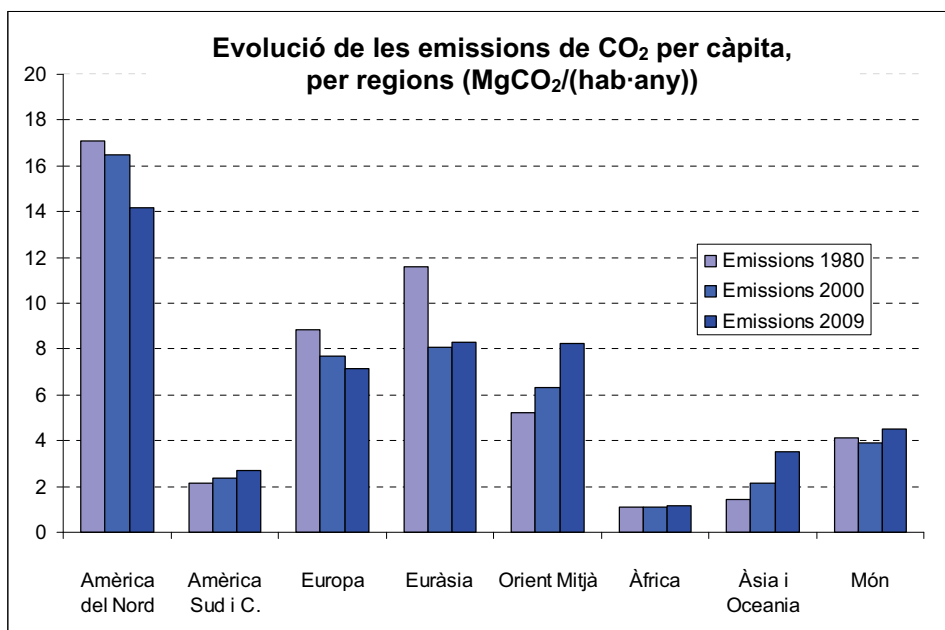


Figura 11.7. Evolució de les emissions de CO₂ (1980, 2000 i 2009), per regions i al món. **Font:** EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

8. Els països d'Europa tendeixen a confluïr en les emissions de CO₂. Els de l'Europa occidental del nord (Alemanya, Regne Unit, França, països nòrdics) i de l'Europa oriental (Polònia, Romania, Hongria, República Txeca) parteixen d'emissions per càpita relativament altes el 1980, normalment entre 7 i 15 MgCO₂/(hab·any), i tendeixen a disminuir-les fins a un interval entre 5 i 10 el 2009. Per contra, els països de l'Europa mediterrània (Espanya, Itàlia, Grècia, Portugal) parteixen de valors menors el 1980, normalment entre 3 i 7, i tendeixen a augmentar-les fins entre 5 i 9 el 2009. Cal destacar diversos casos particulars: Holanda i Bèlgica mantenen les emissions entre 13 i 15 MgCO₂/(hab·any) sense pràcticament variació; Islàndia i Irlanda tenen un comportament semblant al dels països mediterranis que, partint de valors moderats, augmenten les emissions; Turquia puja d'1,5 a 3,3, i Albània recorre el camí invers i baixa de 3,3 a 1,5.

Emissions acumulades

Les dades de l'EIA només inclouen el CO₂ emès a l'atmosfera procedent dels combustibles fòssils: el petroli i altres combustibles líquids; el gas natural, inclòs el que es crema (*flaring*) per evitar l'emissió de metà d'efecte hivernacle més pronunciat, i els carbons. No inclou altres gasos d'efecte hivernacle (com, per exemple, el metà) o altres fonts de gasos d'efecte hivernacle, com ara la indústria del ciment, o determinats cultius o explotacions ramaderes.

A més, les emissions de gasos d'efecte hivernacle han originat altres discussions (jo crec que pertinents) entre països desenvolupats i països en via de desenvolupament sobre si cal prendre com a referència les emissions actuals o les emissions acumulades des de l'inici de l'ús dels combustibles fòssils i altres activitats que hi incideixen. I també el debat sobre transferències ocultes d'emissions a través de les exportacions de productes fabricats en uns països i consumits en altres.

Aquest és un aspecte que modifica la visió del tema. Quan, en alguns països que avui dia tenen unes emissions relativament reduïdes i minvants en el context mundial (per exemple, Alemanya, Regne Unit o França, en procés d'exhaurir les pròpies reserves, especial-

ment les de carbó), es comptabilitzen les emissions acumulades en el passat, apareix amb tota netedat la seva responsabilitat històrica. Però, per fer aquesta anàlisi, són necessàries dades que, en alguns casos, cal remuntar fins al segle XVIII.

Doncs bé, el CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, TE, EUA) és un centre americà que proporciona dades sobre els gasos d'efecte hivernacle i el canvi climàtic al Departament d'Energia (DOE) del Govern nord-americà. Com altres institucions americanes d'aquest tipus, fa pública una part substancial de la seva informació.

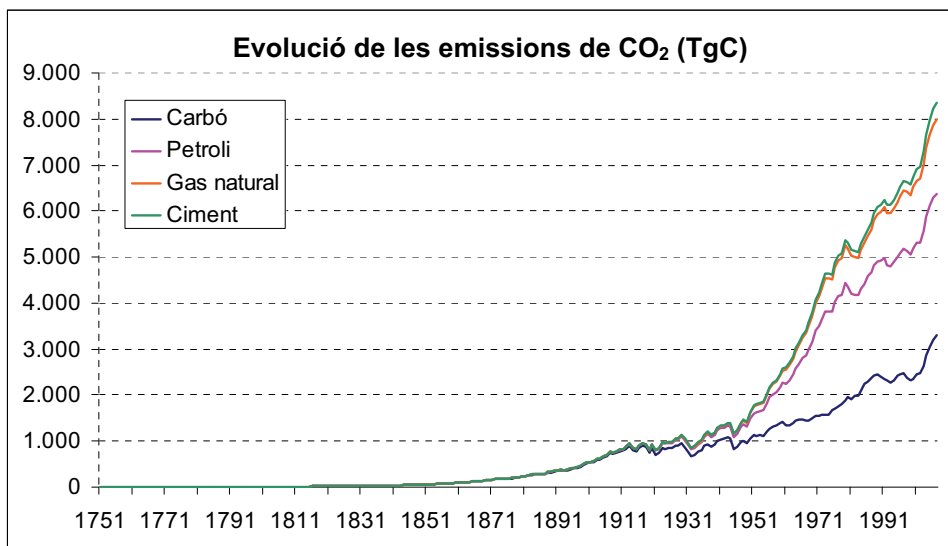


Figura 11.8. Evolució de les emissions mundials de CO₂ (en milions de tones de C) causades pels diferents combustibles fòssils i el ciment des de 1751 fins a 2007 (valors dels components acumulats). **Font:** CDIAC. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

La figura 11.8 mostra (a partir de les dades del CDIAC) les emissions històriques de CO₂ en el món associades al consum de combustibles fòssils i també a la fabricació de ciment. S'hi observa que, pràcticament fins després de la Segona Guerra Mundial, les emissions de CO₂ (i el consum de combustibles fòssils) van ser relativament petites. Després d'un gran creixement els anys 1945-1975 (fonamentalment, associades al petroli) i una certa moderació els anys següents (1975-2000, especialment, als països europeus), les emissions associades al carbó registren un fort repunt els darrers anys (2000-2008) com a conseqüència del consum massiu d'aquest combustible a la Xina i, en menor proporció, a l'Índia.

La taula 11.5, amb les emissions de CO₂ acumulades segons la procedència, les dates i la localització a partir de dades del CDIAC, suggereix els comentaris següents:

1. La primera part de la taula mostra numèricament les emissions mundials de CO₂ en diverses dates. Per a 2007 (darrera data del CDIAC), és de 330.092 TgC (tan sols la massa de l'element carboni). Per traduir-ho a TgCO₂, cal multiplicar per la relació estequiomètrica (C=12; O=16; CO₂/C = 44/12 = 3,667), que dona 1.210.336 TgCO₂ emeses a l'atmosfera. Això equival pràcticament a quaranta anys de les emissions actuals (30.493 TgCO₂/any el 2008, quasi iguals a les de 2009).
2. La segona part de la taula mostra el repartiment de les emissions acumulades el 2007 en les diferents regions. Hi destaquen Amèrica del Nord i Europa, amb el 31,7% i el 27,2% d'aquestes emissions, respectivament. El tercer lloc, l'ocupa Àsia i Oceania (el 21,1%, amb emissions acumulades per càpita molt inferiors) i, el quart lloc, Euràsia (el 12,5%).

Taula 11.5. Emissions de CO₂ acumulades per dates, procedència i localització

	Carbó	Petroli	GN	Flama GN	Ciment	Total	Índex ¹
Emissions acumulades en el món al llarg del temps (en TgC, milions de tones de carboni) ²							
1900	11.972	221	40	0	0	12.234	3,7
1950	53.942	6.857	1.322	20	231	62.371	19,9
1980	97.772	46.411	13.019	1.689	2.175	161.066	49,0
2000	143.967	93.597	33.194	2.586	5.497	278.841	84,5
2007	164.104	112.206	43.213	2.957	7.611	330.092	100,0
Emissions acumulades al món i per regions fins al 2007 (en TgC, milions de tones de carboni) ²							
Amèrica del N.	44.320	39.787	18.001	434	830	103.372	31,3
Amèrica del S. i c.	934	6.043	1.371	452	372	9.172	2,8
Europa	56.153	24.394	7.451	91	1.836	89.926	27,2
Euràsia	17.868	12.568	9.960	194	646	41.236	12,5
Orient Mitjà	174	4.940	2.191	1.019	269	8.592	2,6
Àfrica	3.921	2.730	685	465	280	8.081	2,4
Àsia i Oceania	40.734	21.744	3.554	303	3.378	69.714	21,1
Món	164.104	112.206	43.213	2.957	7.611	330.092	100,0
El mateix enunciat (en TgCO ₂ , milions de tones de diòxid de carboni) ²							
Amèrica del N.	162.506	145.886	66.005	1.590	3.044	379.030	31,3
Amèrica del S. i c.	3.423	22.158	5.026	1.658	1.364	33.630	2,8
Europa	205.895	89.443	27.321	335	6.734	329.729	27,2
Euràsia	65.514	46.084	36.520	710	2.369	151.198	12,5
Orient Mitjà	638	18.112	8.032	3.736	985	31.503	2,6
Àfrica	14.378	10.011	2.510	1.703	1.027	29.630	2,4
Àsia i Oceania	149.358	79.728	13.033	1.110	12.387	255.616	21,1
Món	601.713	411.423	158.449	10.843	27.908	1.210.336	100,0
El mateix enunciat (en TW ⁴ A, milions de milions de watts tèrmics per any) ³							
	2.817,7 ³	1.987,8 ³	1.579,3 ³	1.579,3 ³			
Amèrica del N.	57,673	73,392	41,793	1,007		173,865	32,9
Amèrica del S. i c.	1,215	11,147	3,183	1,050		16,595	3,1
Europa	73,072	44,997	17,299	0,212		135,580	25,7
Euràsia	23,251	23,184	23,124	0,450		70,009	13,3
Orient Mitjà	0,227	9,112	5,086	2,366		16,790	3,2
Àfrica	5,103	5,036	1,589	1,078		12,807	2,4
Àsia i Oceania	53,007	40,110	8,252	0,703		102,072	19,3
Món	213,547	206,979	100,326	6,866		527,718	100,0
Països amb majors emissions acumulades el 2007 (en TgC, milions de tones de carboni) ¹							
1 EUA	42.842	35.432	16.529	272	650	95.724	29,0 (29,0)
2 URSS-Rússia	16.830	11.922	8.825	191	610	38.378	11,6 (40,6)
3 Xina	25.664	5.112	515	8	2.223	33.521	10,2 (50,8)
4 Alemanya	16.381	4.576	1.410	13	313	22.692	6,9 (57,7)
5 Regne Unit	15.228	3.367	1.394	54	130	20.173	6,1 (63,8)
6 Japó	5.103	7.861	1.043	0	493	14.500	4,4 (68,2)
7 Índia	6.928	2.098	261	40	367	9.694	2,9 (71,1)
8 França	4.994	3.472	707	13	186	9.373	2,8 (73,9)
9 Canadà	2.390	3.149	1.579	60	79	7.257	2,2 (76,1)
10 Polònia	5.634	573	230	0	104	6.542	2,0 (78,1)
11 Itàlia	1.084	3.175	1.017	0	263	5.539	1,7 (79,8)
12 Àfrica del Sud	3.742	517	22	0	56	4.337	1,3 (81,2)

¹ 1a part: 2007=100; 2a, 3a i 4a: % del món; 5a: % del món (acumulat). ² CDIAC dona les emissions en gC (carboni); a la 2a part, s'ha traduït a gCO₂ (C=12; O=16; CO₂/C=44/12). ³ Per passar d'emissions de CO₂ a energia (TW_A), s'han utilitzat els valors mitjans obtinguts de l'EIA (energia i emissions per a cada combustible).

Fonts: CDIAC i EIA-govEUA. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

11.2. Cicle del carboni

Aquest cicle estudia l'intercanvi de l'element carboni (C) entre compostos presents en els diferents medis de la Terra. Els dipòsits de carboni es mesuren en Pg (petagrams = 10^{15} g; equivalents a Gt = 1 gigatona = 10^9 tones) i els fluxos, en Pg/A (o peta grams per any).

És un dels cicles més complexos de la natura i intervé de forma decisiva en tres aspectes determinants per a l'home: la *vida*, el *clima* i l'*energia*.

La complexitat del cicle del carboni és deguda, entre d'altres, als aspectes següents:

1. Els compostos del carboni són presents a les quatre esferes superficials de la Terra:
 - la biosfera (ahora dividida en la biosfera terrestre i la biosfera marina)
 - l'atmosfera (CO_2 i metà)
 - la hidrosfera (CO_2 dissolt, matèria orgànica dissolta i matèria orgànica particulada)
 - la litosfera (roques carbonatades, carbons i hidrocarburs, querogen)Cada una d'elles conté un dipòsit o més de carboni de diferent naturalesa, i entre ells s'estableixen fluxos de diferent intensitat.
2. El cicle del carboni és de naturalesa biogeoquímica, amb reaccions biològiques, químiques i físiques de gran complexitat i criticitat que tenen lloc en tots els medis de la Terra. El carboni hi és present en dos tipus de compostos:
 - Compostos orgànics, caracteritzats pels enllaços C-C i C-H, que són la base dels éssers vius, dels éssers morts, descompostos, i també dels hidrocarburs.
 - Compostos inorgànics, fonamentalment el CO_2 a l'atmosfera i dissolt en els oceans i el carbonat càlcic CaCO_3 de les roques carbonatades.
3. Els fluxos són molt diferents en intensitat i en temps de permanència del carboni en els diferents medis. Cal distingir dos tipus de subcicles:

Cicles curts, on els fluxos s'estableixen entre l'atmosfera i la biota terrestre (uns 120 Pg/any en els dos sentits), i entre l'atmosfera i els oceans superficials (uns 90 Pg/any en els dos sentits). Atesos els valors dels fluxos i la dimensió dels dipòsits (820 Pg a l'atmosfera), el temps de permanència del carboni en els diferents medis és de pocs anys.

Cicles llargs, on els fluxos són molt més petits (inferiors a 1 Pg/any) i intervenen dipòsits molt més grans (la litosfera i el CO_2 dissolt en els oceans); per tant, el temps de permanència del carboni és molt més llarg (entre 10^4 i milions d'anys).
4. El carboni (C) és l'element essencial de la producció biològica i no es coneixen formes de vida sense compostos de carboni.

Des de l'aparició de la vida sobre la Terra, ara fa uns 3.500 milions d'anys, el cicle del carboni intervé de forma essencial en els processos biològics a través de la fotosíntesi per tal d'obtenir-ne matèria orgànica, i a través de la respiració per tal d'obtenir-ne energia.
5. El carboni intervé en la regulació del clima a través de dos dels principals gasos d'efecte hivernacle: el diòxid de carboni (CO_2) i el metà (CH_4).

La interacció entre els éssers vius i l'atmosfera ha fet que la seva composició passés de ser majoritàriament de CO_2 , ara fa uns 3.500 MA, a la composició actual.

En tot cas, les variacions de percentatges d'aquests gasos a l'atmosfera poden ser la causa de canvis climàtics, com és el cas dels increments actual d'aquests gasos.
6. Finalment, el carboni (C) és l'element fonamental dels combustibles fòssils (carbons i hidrocarburs), que constitueixen la base energètica de la nostra civilització humana.

Amb la crema accelerada dels combustibles fòssils, s'ha introduït un nou flux de carboni de la litosfera a l'atmosfera, que tot fa pensar que alterarà el clima de forma substancial.

Aquest fet, combinat amb l'exhauriment dels combustibles fòssils, són els dos reptes principals que la humanitat té plantejats avui dia.

Dipòsits i fluxos del cicle del carboni (taula 11.6 i figura 11.10)

El que regula la vida i el clima a curt termini són els anomenats *cicles curts del carboni* entre la biosfera, l'atmosfera i la hidrosfera, on els dipòsits són petits i els fluxos grans, mentre que el que regula les condicions climàtiques a llarg termini són els anomenats *cicles llargs del carboni*, on també intervé la litosfera i els dipòsits són molt grans i els fluxos molt petits.

La crema dels *combustibles fòssils* desequilibra precisament els cicles llargs del carboni.

La matèria orgànica se sol dividir en *biota* (o matèria viva), composta per microorganismes, animals i plantes vius, i *necrosfera* (o matèria orgànica morta), desfetes de matèria orgànica procedents dels éssers vius, que es troba en els sòls terrestres, en la matèria orgànica dissolta en els oceans i en els sediments marins.

Alhora, es pot distingir entre la *biota terrestre* (microorganismes, plantes, fongs i animals terrestres) i la *biota marina* (microorganismes, algues i animals marins). Cada una d'elles té la seva pròpia dinàmica i els seus fluxos.

Dipòsits a l'atmosfera

Fonamentalment, són dos gasos d'efecte hivernacle:

Diòxid de carboni (CO₂)

És un dipòsit relativament petit però de gran importància per a la vida i per al control del clima a través de l'efecte hivernacle. A l'època preindustrial, el seu volum era d'uns 595 PgC (corresponents a unes 280 ppm, parts per milió). Aquest ha anat creixent amb la crema dels combustibles fòssils fins a uns 750 PgC (355 ppm) cap a l'any 1990 (valor que registren la major part d'esquemes sobre el cicle del carboni) i avui dia (any 2010) és d'uns 820 PgC (390 ppm).

Els fluxos de carboni entre l'atmosfera i la biota terrestre (de l'ordre d'uns 120 PgC/A, 10¹⁵ grams de carboni per any), d'una banda, i entre l'atmosfera i els oceans (de l'ordre de 90 PgC/A), de l'altra, corresponents als cicles curts del carboni, són dels més intensos i fan que el temps de permanència del carboni a l'atmosfera sigui d'uns quatre anys.

Metà (CH₄)

El metà, amb un efecte hivernacle unes 25 vegades més potent que el CO₂, és inestable a l'atmosfera i s'oxida al cap d'uns deu anys, transformant-se en CO₂ i aigua. Per tant, la seva presència denota una emissió contínua, fonamentalment d'origen antropogènic (cultius, ramaderia, escapaments de gas natural). L'any 1990, aquest dipòsit era de l'ordre de 10 PgC.

Dipòsits a la hidrosfera

La hidrosfera conté tres tipus de dipòsit de carboni:

Carboni inorgànic dissolt (DIC)

Tercer dipòsit de carboni més abundant a la natura, que es troba fonamentalment en els oceans en forma de CO₂ i també de ions carbonats. A les aigües superficials (fins a 100 metres, on es desenvolupa la major part de la vida marina), hi ha 918 PgC inorgànic, mentre que a les aigües profundes hi ha uns 37.350 PgC, amb un temps de permanència d'uns 2.000 anys. És un dipòsit molt superior al carboni dels éssers vius i al de l'atmosfera. Els fluxos de la superfície del mar amb l'atmosfera són importants (de l'ordre de 90 Pg/A en cada sentit).

Carboni orgànic dissolt (DOC)

És matèria orgànica en estat pràcticament col·loïdal, que no permet identificar les estructures dels éssers vius d'on procedeix. En els oceans, és d'uns 40 PgC a les aigües superficials i de 700 PgC en aigües profundes, amb un temps de permanència d'uns 5.000 anys.

Carboni orgànic particulat (POC)

Matèria orgànica morta (o *necrosfera*) on encara es poden reconèixer les estructures dels éssers vius d'on procedeixen. En aigües superficials, hi ha una massa de 5 PgC, amb un temps de permanència relativament breu i, en aigües profundes, hi ha de 20 a 30 PgC, amb un temps de permanència d'entre 10 i 100 anys.

Dipòsits a la litosfera

Roques sedimentàries carbonatades

El dipòsit més gran de carboni de la Terra el constitueixen les roques sedimentàries carbonatades (fonamentalment, carbonats), que formen part dels dipòsits geològics i constitueixen prop del 80% del carboni de l'escorça terrestre. Les estimacions són les menys precises (entre 20.000.000 i 100.000.000 PgC) i a la figura 11.10 hem adoptat el valor de 60.000.000 PgC [Reeb-1997]. Els fluxos que es relacionen amb aquest dipòsit són molt petits ($<0,2$ Pg/A) i els temps de permanència del carboni, molt llargs (>100 Ma, milions d'anys).

Matèria orgànica fòssil

El segon dipòsit més gran de carboni de la natura està constituït per matèria orgànica fòssil (anomenada també *querogen*), sobre la qual també hi ha grans discrepàncies en les estimacions (de 5.000.000 a 15.000.000 PgC). A l'esquema, s'ha adoptat un valor mitjà de 10.000.000 PgC. Els fluxos que es relacionen amb aquests dipòsits també són molt petits i els temps de permanència, molt llargs.

La transformació d'una fracció del querogen ha donat lloc als combustibles fòssils (carbó, petroli i gas natural, uns 3.500 PgC) dels quals tan sols una petita part constitueixen les reserves (675 PgC en conjunt).

Hidrats de metà

Els hidrats (o clatrats) de metà es troben als marges continentals dels oceans, en sediments a profunditats de més de 300 metres i a les àrees de permagel. Les avaluacions més recents (a la baixa) estan entre 500 i 2.500 PgC, d'1 a 4 vegades les reserves del conjunt de combustibles fòssils, i entre 4 i 20 vegades les reserves de gas natural.

S'ha pensat a utilitzar-los com a font energètica, però la seva dispersió i inestabilitat no ho han permès fins ara. El perill més greu, però, seria la desestabilització d'aquests dipòsits per causes climàtiques i l'alliberament massiu de metà a l'atmosfera.

Dipòsits a la biosfera i la necrosfera

Distingirem entre biosfera terrestre i biosfera marina. Alhora, als dos dipòsits de matèria orgànica viva (biota terrestre i biota marina), els associem dos dipòsits de matèria orgànica morta (necrosfera), enterrada o en fase de descomposició: els sòls a la biota terrestre i els sediments marins a la biota marina.

Biota terrestre

És la biota més important en volum, amb estimacions que van de 520 a 680 PgC. D'acord amb [SCOPE13-1979], és de 519,3 PgC, dels quals 515,0 PgC corresponen als arbres i a les plantes; 3,1 PgC, als bacteris i als fongs, i poc més d'1,16 PgC, als animals. Aquesta darrera xifra es reparteix entre 1,02 PgC d'animals invertebrats i 0,14 PgC d'animals vertebrats, on la biomassa humana (0,045 PgC) i la dels animals domèstics ja és majoritària avui dia.

Els fluxos de carboni on intervé la biota terrestre són la fotosíntesi de les plantes, que transforma 120 PgC/A de CO_2 de l'atmosfera en matèria orgànica, i la respiració de les plantes i els animals, que retornen uns 60 PgC/A en forma de CO_2 . Aquest desequilibri es compensa amb la matèria morta (fonamentalment vegetal, fullaraca, detritus), que passa als sòls (uns 60 PgC/A), i la descomposició d'una quantitat equivalent, que retorna a l'atmosfera en forma de CO_2 i metà. El temps de permanència del carboni a la biota terrestre és d'uns 50 anys.

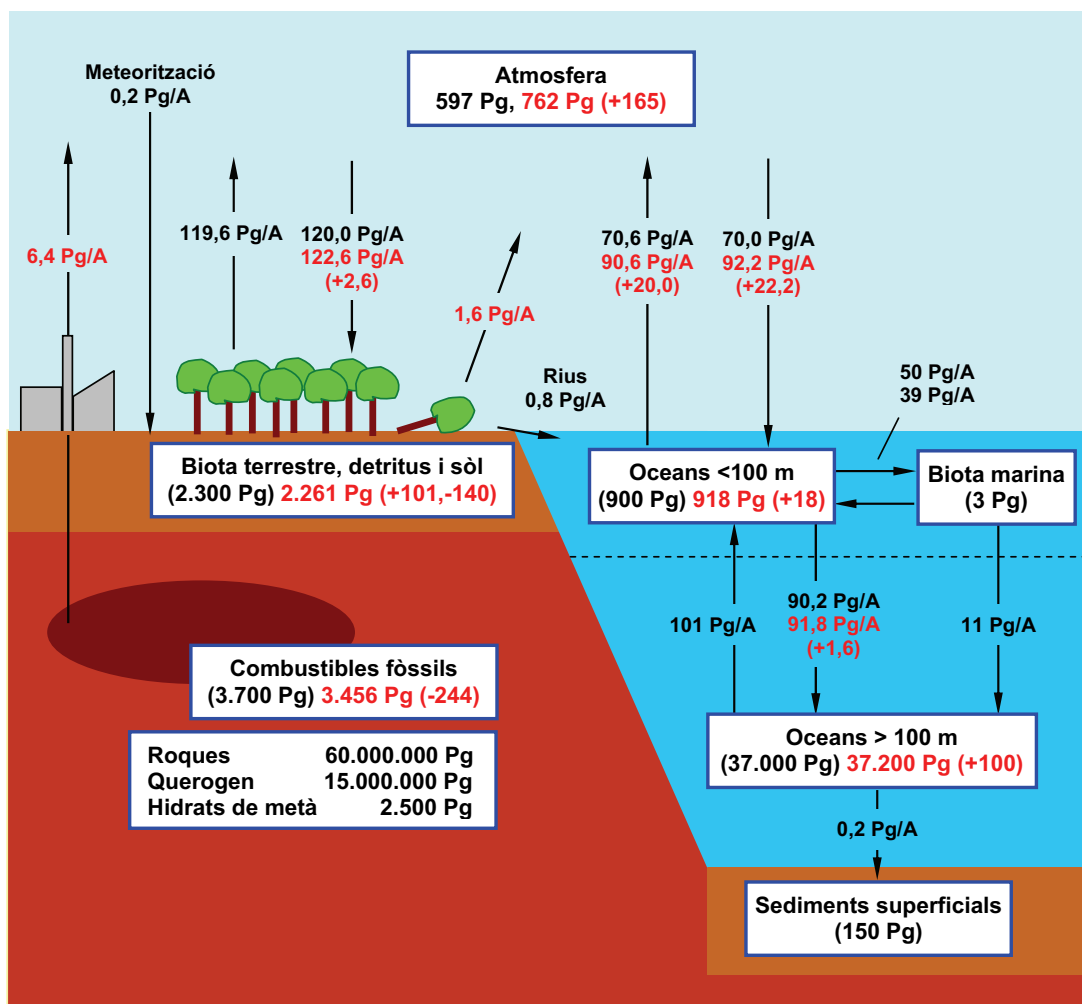


Figura 11.10. Cicle del carboni segons el Panell Internacional per al Canvi Climàtic. Els requadres amb marc blau corresponen a dipòsits (PgC) i els requadres sense marc, a fluxos PgC/any). Els números en negre corresponen a dipòsits o fluxos preindustrials, mentre que els números en vermell corresponen a dipòsits i fluxos de 1990 (al text es comenten alguns aspectes de l'evolució posterior); entre parèntesis i en color, els increments des de l'època preindustrial fins a 1990. **Font:** IPPC [IPCC-AR4-GWI-C7-2007]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Sòls

Contràriament al que molta gent pensa, als sòls es diposita una gran quantitat de carboni (uns 1.780 PgC), que pràcticament triplica el de la matèria viva aèria. Entre aquesta matèria orgànica, hi ha uns 360 PgC de torba, amb un temps de permanència superior als 1.000 anys, i de 250 a 500 PgC de matèria orgànica particulada (POC), amb un temps de permanència superior als 10 anys. La resta té temps de permanència superiors.

Amb aquesta quantitat ingent de matèria orgànica morta conviuen uns 3,1 PgC de descomponedors (bacteris i fongs), que, com hem vist, originen un flux de carboni d'uns 60 PgC cap a l'atmosfera en forma de CO₂ i de metà que equilibra la fotosíntesi i la respiració.

Biota marina

La biomassa de les algues (que realitzen la fotosíntesi), els bacteris i la resta de plàncton és de 2,8 PgC, mentre que els altres animals invertebrats i vertebrats sumen 0,47 PgC. La biota marina és relativament semblant a la dels animals terrestres, però hi manca la vegetació.

Una característica de la biota marina és que es reproduïx a una velocitat molt elevada (diverses vegades per any). Això fa que la producció fotosintètica sigui elevada (taula 11.8), malgrat que la biomassa sigui relativament reduïda. En conseqüència, el temps mitjà de permanència del carboni en la biota marina és molt baix (molt inferior a l'any).

Sediments marins

Al fons dels mars i dels oceans hi ha acumulats sediments marins de matèria orgànica (uns 150 PgC), dels quals 120 PgC corresponen a les plataformes continentals i uns 30 PgC, als fons marins. Els fluxos de sedimentació són molt petits (aproximadament, 0,2 PgC/A) i els temps de permanència del carboni en aquests dipòsits, entre pocs i 1.000 anys.

Taula 11.6. Massa de carboni en els diferents dipòsits (PgC)				
Àmbits de la Terra	Total	< 100 m	> 100 m	%
Atmosfera	760			0,01
Diòxid de carboni, CO ₂	750			
Metà, CH ₄	10			
Sistemes terrestres	2.300			0,003
Biota terrestre	520			
<i>Plantes terrestres (productors primaris)</i>	518,8			
<i>Animals terrestres</i>	1,2			
Sòls i detritus	1.780			
<i>Matèria orgànica morta</i>	1.776,9			
<i>Descomponedors</i>	3,1			
Sistemes marins	38.268	918	37.350	0,051
Carboni inorgànic dissolt (DIC)	37.343	870	36.473	
Carboni orgànic dissolt (DOC)	740	40	700	
Carboni orgànic particulat (POC)	32	5	27	
Éssers vius	3	3		
Sediments marins	150		150	
Litosfera	75.000.000			99,945
Roques que contenen carboni	60.000.000			79,956
Querogen i derivats	15.000.000			19,989
<i>Combustibles fòssils</i>	3.456			
<i>Reserves (extraïbles)</i>	675			
<i>Hidrats de metà</i>	~2.500			
Fonts: Les dades globals dels dipòsits de l'atmosfera, dels sistemes terrestres i marítims i dels combustibles fòssils s'han obtingut del cicle del carboni d'IPCC [IPCC-AR4-WGI-C7-2007]; per determinar la resta de dades, s'han tingut en compte els documents [SCOPE13-1979], [SCOPE21-1983] i [Reeb-1997], entre d'altres. L'autor ha ajustat els valors perquè siguin coherents. Elaboració: Carles Riba Romeva				

És interessant analitzar les variacions que s'han produït en els dipòsits i els fluxos de carboni entre l'època preindustrial i els temps recents (1990) per causes antropogèniques.

En primer lloc, ha augmentat molt sensiblement el carboni a l'atmosfera (+165 PgC el 1990); a dia d'avui, ja supera els 820 PgC, amb un increment de més de +220 PgC.

També han incrementat el carboni als oceans (+118 PgC), fet que comporta una acidificació que comença a tenir conseqüències en alguns sistemes. El conjunt de la vegetació terrestre i dels sòls han experimentat un doble efecte: d'una banda, una reacció positiva de la fotosíntesi per la major concentració de CO₂ a l'atmosfera (+101 PgC) i, de l'altra, una disminució per canvis d'ús dels sòls (-140 PgC, a causa de la desforestació i dels incendis), amb un resultat total negatiu de -39 PgC.

Els fluxos s'han desequilibrat en el sentit que tant la vegetació terrestre com els oceans actuen com a embornals. A part, cal destacar l'increment dels fluxos atmosfera-oceans.

Distribució de la biomassa

La taula 11.7, basada en dades del document SCOPE 13 i de FAOSTAT, mostra la distribució de la biomassa entre els diferents tipus d'éssers vius:

Taula 11.7. Massa de carboni en els éssers vius (Pg)¹				
	Terrestres	Marítims	Total	%
Moneres, protozous i fongs	3,07	2,80	5,87	1,12
Plàncton ²		1,08	1,08	0,21
Bacteris	2,17	0,35	2,52	0,48
Algues		1,37	1,37	0,26
Fongs	0,90		0,90	0,17
Plantes	515,00		515,00	98,57
Animals invertebrats	1,02	0,15	1,16	0,22
Anèl·lids	0,41	0,09	0,50	0,10
Artròpodes	0,38	0,0004	0,38	0,07
Altres invertebrats	0,23	0,06	0,29	0,06
Animals vertebrats salvatges	0,004	0,318	0,322	0,06
Peixos		0,293	0,293	0,06
Aus	0,00007		0,00007	0,00
Mamífers	0,004	0,025	0,029	0,01
Home i vertebrats domèstics	0,137		0,137	0,03
Aus domèstiques	0,002		0,002	0,00
Mamífers domèstics	0,090		0,090	0,02
Home	0,045		0,045	0,01
Total	519,231	3,268	522,489	100,00
¹ Les dades generals s'han obtingut de la taula 5.10 del document [SCOPE13-1979], a partir dels valors estimats per Bower el 1966 i amb atribució de l'hàbitat (terrestre, marí, sòl). La transformació de valors de DM (<i>dry matter</i>) a PgC l'ha realitzada l'autor d'acord amb la relació 1 gDM = 0,45 gC. Els valors de l'home i els animals domèstics s'han avaluat a partir de les dades donades per la FAO per a l'any 2007. ² El plàncton no és una espècie, sinó un conjunt d'éssers vius de petites dimensions que inclouen bacteris, algues i diversos animals invertebrats. La taula 10.5 del document [SCOPE13-1979], a més d'especificar els bacteris, les algues i els animals invertebrats, mostra el plàncton com a grup separat i li atribueix un valor de biomassa que suma amb les altres. Fons: dades generals: [SCOPE13-1979]; home i animals domèstics: FAOSTAT. Elaboració: Carles Riba Romeva				

Comentaris a la taula 11.7:

1. Cal constatar, en primer lloc, el pes determinant de la vegetació terrestre en la biomassa de la Terra (515 PgC, més del 98,5%), mentre que la resta d'éssers vius (tant els regnes més simples com els animals) es reparteixen un escàs 1,5%.
2. El segon grup en importància són les moneres (éssers vius amb cèl·lules sense nucli diferenciat), els protozous i els fongs (en conjunt, 5,87 PgC, l'1,12%), on predominen els bacteris (2,52 PgC). Aquests grups formen una part molt important del plàncton marí i dels descomponedors dels sòls.
3. Els animals conformen una biomassa molt menor (1,62 PgC). En primer lloc, hi ha els animals invertebrats (1,16 PgC, encapçalats pels anèl·lids, 0,50 PgC, i els artròpodes 0,38 PgC), i, després, els vertebrats (0,47 PgC, on dominen els peixos, 0,293 PgC).
4. Entre els vertebrats terrestres (aus i mamífers, 0,141 PgC), l'home i els animals domèstics constitueixen ja el gruix de la biomassa (0,137 PgC), mentre que la biomassa dels animals salvatges és quasi residual.

Producció primària neta

Un aspecte especialment rellevant del cicle del carboni és l'anomenada *producció primària*, base de la cadena alimentària de tots els éssers vius. Consisteix en la producció de compostos orgànics a partir del CO₂ de l'atmosfera o dissolt en aigua, normalment a través de la fotosíntesi. Els organismes responsables d'aquesta funció (anomenats *productors primaris*, o *autòtrofs*) són principalment les plantes en els ecosistemes terrestres, i les algues i els cianobacteris en els ecosistemes aquàtics.

Es denomina *producció primària neta* (NPP, en les sigles angleses) el carboni generat per un ecosistema, després de descomptar-ne el consumit en la pròpia respiració (PgC/A). És, doncs, la matèria orgànica (o l'energia) útil romanent que es destina a la pròpia reproducció o al creixement dels sistemes autòtrofs, i a alimentar tota la cadena tròfica dels éssers heteròtrofs fins a l'home. Les mateixes sigles NPP també s'utilitzen per designar la productivitat primària neta (o producció primària neta per unitat de superfície, PgC/m²/A).

L'avaluació de la producció primària neta és molt complexa i està sotmesa encara a noves consideracions i càlculs. Les estimacions situen la NPP dels ecosistemes terrestres en uns 60 PgC/A i la dels ecosistemes marins, en uns 20 PgC/A (taula 11.8).

Taula 11.8. Recursos de carboni en la biosfera i producció primària neta¹

	Àrea Mkm ²	Autòtrofs (plantes, algues)					Heteròtrofs (animals) ²		
		Biomass. PgC	NPP PgC/any	Fullaraca PgC/any	Detritus PgC/any	Sòl PgC	Biomass. PgC	Consum PgC/any	Producció PgC/any
Bosc	31,3	443,93	23,26	17,40	34,40	329,9	0,300	2,106	0,215
Tropicals	14,5	239,62	13,59	10,90	5,30	122,9	0,185	1,494	0,149
Temperats	6,0	78,30	3,78	2,30	9,00	72,0	0,072	0,306	0,036
Boreals	9,0	92,25	3,22	2,40	15,89	135,0	0,026	0,171	0,017
Plantacions	1,5	13,50	1,18	0,60	0,40				
Altres	2,3	20,25	1,49	1,20	4,00		0,018	0,135	0,014
Bosc baix, garriga	2,5	7,88	0,90	1,10	0,60	72,0			
Sabana	22,5	65,56	17,71	14,10	3,90	264,0	0,099	0,900	0,135
Prats	12,5	9,11	4,39	3,90	2,50	295,0	0,027	0,243	0,036
Tundra	9,5	5,87	0,95	0,64	11,93	121,2	0,002	0,015	0,001
Semideserts	21,0	7,42	1,35	1,20	1,10	168,0	0,004	0,022	0,003
Deserts	9,0	0,35	0,06	0,06	0,07	22,5	10 ⁻⁵	0,0001	10 ⁻⁵
Gels perpetus	15,5	0,00	0,00	0,00	0,00	?			
Llacs i rius	2,0	0,02	0,36	0,95	4,40	?	0,010	0,100	0,010
Aiguamolls, torberes	3,5	15,18	3,94	4,02	4,80	225,0	0,020	0,320	0,032
Cultius	16,0	2,99	6,77	3,07	0,40	128,0	0,006	0,090	0,009
Àrea humana	2,0	1,44	0,18	0,20	0,20	10,0			
Ecosist. terrestres	149,3	599,75	59,90	42,62	59,50	1.635,6	0,452	3,515	0,409
Mar obert	332,0	1,00	18,68				0,360	7,470	1,125
Zones de surgència	0,4	0,008	0,004				0,002	0,032	0,005
Plataf. continentals	26,6	0,27	0,12				0,072	1,350	0,194
Algues i esculls	0,6	1,20	0,54				0,005	0,108	0,016
Estuaris	1,4	1,40	0,63				0,009	0,144	0,022
Ecosist. marins	361,0	3,88	19,97				0,449	9,104	1,361
Total ecosistemes	510,3	603,63	79,87				0,901	12,618	1,770

¹ Aquesta taula s'ha confegit a partir de les dades del document [SCOPE13-1979]. Les columnes sobre àrees i éssers autòtrofs resulten de l'elaboració del propi treball (taules 5.5, 5.7 i 5.9 del document). Les dades sobre éssers heteròtrofs procedeixen de la taula 5.2 (resum de treballs d'altres autors) i es basen en una classificació de tipologies d'ecosistemes lleugerament diferent.

² La taula 5.3 del document [SCOPE13-1979] no precisa si les dades són en DM (*dry matter*) o en carboni. Pel context, hem suposat que es donen en DM i els hem aplicat el factor 0,45 per transformar-les en C.

Font: [SCOPE13-1979]. **Elaboració:** Carles Riba Romeva

11.3. El carboni, l'oxigen i la vida

Al nostre planeta, la vida existeix gràcies al manteniment d'una sèrie de paràmetres entre límits estrets. La composició de l'atmosfera o l'existència d'una capa líquida en forma de mars i oceans, fets que ens semblen tan naturals, no són fruit d'una casualitat, sinó de processos autoregulats entre els sistemes vius i els inerts.

Quan la NASA va demanar la col·laboració de J. Lovelock [Lov-1988] per estudiar si hi havia vida a Mart, aquest va dir que no calia anar-hi ja que n'hi havia prou analitzant la composició de la seva atmosfera. Si en un planeta hi ha vida, l'atmosfera en conté les traces.

Al planeta Venus, més proper al Sol que la Terra, amb una atmosfera densa (90 bar), quasi tota de CO₂ (el 96,5%), es produeix un intens efecte hivernacle que situa la temperatura de la seva superfície a uns 450°C. En canvi, al planeta Mart, amb una atmosfera molt tènue (0,0064 bar), també majoritàriament de CO₂ (el 95,3%), es produeix un efecte hivernacle molt feble (uns 5°C) que situa la temperatura mitjana de la superfície a uns -60°C.

L'atmosfera de la Terra és completament diferent: es compon majoritàriament de nitrogen (el 78%) i oxigen (el 21%), mentre que el CO₂ hi és present tan sols de forma residual (el 0,28% o 280 ppm, parts per milió, a l'època preindustrial, i el 0,39% o 390 ppm actualment).

El percentatge de CO₂ és clau per regular la temperatura de la Terra a través de l'efecte hivernacle. Canvis de concentració relativament petits poden produir variacions de la temperatura i del clima suficientment significatius per desequilibrar les condicions que fan possible la vida. Alhora, el CO₂ (de l'atmosfera i dissolt en l'aigua) és també un compost essencial del qual s'alimenta la vida a través de la fotosíntesi, funció sintetitzadora de les plantes i les algues, com també un subproducte de la respiració de tots els éssers vius.

El vapor d'aigua té un efecte hivernacle encara més potent que el CO₂, però l'evaporació i les precipitacions regulen el cicle de forma molt ràpida (per això, el temps té variacions localment tan intenses); de fet, és un aspecte encara no del tot ben conegut i que està en estudi ([IPCC-AR4-SR-2007], pàgina 73). En canvi, el CO₂ s'acumula i roman a l'atmosfera en un cicle molt més llarg a escala geològica i, per tant, té més incidència en la temperatura i el clima a llarg termini.

Així, doncs, malgrat que quotidianament el canvi climàtic es percep de forma molt confusa a través del temps variable en cada indret i en cada moment, s'estan generant unes condicions climàtiques globals que esdevindran molt diferents (i, probablement, més adverses) per a les generacions futures.

Una mirada al passat

Per establir unes referències a les possibles conseqüències del canvi climàtic, és interessant retrocedir en el temps i veure com era el clima d'eres passades (o paleoclima).

Contràriament al que molta gent pensa, la primitiva atmosfera terrestre es componia majoritàriament de CO₂ (com la de Venus i Mart). Però, ara fa uns 3.800 MA (milions d'anys, uns 750 MA després de l'origen del planeta), van aparèixer unes primeres formes de vida, els cianobacteris anaeròbics, que van anar transformant aquesta atmosfera de CO₂ fixant el carboni (C) com a matèria orgànica o roques calcàries i alliberant l'oxigen (O₂) a l'atmosfera.

No va ser fins molt més tard (ara fa uns 2.400 MA) que l'atmosfera va adquirir una composició amb nitrogen i oxigen relativament semblant a l'actual. Com a resultat d'això, es va produir la primera gran glaciació, en disminuir successivament els gasos d'efecte hivernacle: primer el CO₂ i després el metà. Tanmateix, la fotosíntesi oxigènica, més eficient, va impulsar l'evolució i el desenvolupament de noves formes de vida aeròbies (avui, majoritàries).

Les catifes d'éssers unicel·lulars procariotes sense un nucli diferenciat (entre ells, els cianobacteris) van dominar la Terra durant més de 2.000 MA, fins a l'aparició dels eucariotes,

amb un nucli diferenciat. Els primers éssers multicel·lulars són més recents (entre -850 MA i -650 MA), però no és fins a les eres paleozoica (o primària, de -542 a -251 MA) i mesozoica (o secundària, de -251 a -65 MA) que es produeix una gran evolució de la fauna i la vegetació (primer, marines i, després, terrestres), amb grans esclats de vida però també amb grans extincions (cinc d'elles, massives), període que acaba amb la desaparició dels dinosaures (-65 MA). Aleshores, comença l'era cenozoica (o terciària, de -65 MA fins avui), en què predominen els mamífers i apareixen l'herba i els prats com a noves formes de vegetació. Els homínids no arriben fins als darrers 4,5 MA i l'*Homo sapiens* pròpiament dit correspon als darrers 130.000 anys (0,130 MA). Les civilitzacions humanes comencen amb l'agricultura i la ramaderia després de la darrera glaciació, ara fa 10.000 anys (0,010 MA).

El clima i la vida han tingut una existència entrelaçada. El primer fenomen climàtic d'ample abast de què es té constància foren les grans glaciacions, que van tenir lloc entre -2.500 i -2.300 MA, presumiblement per haver fallat l'efecte hivernacle. Més endavant, al final de l'era proterozoica (de -800 a -600 MA), es van produir unes noves glaciacions massives o de "terra bola de neu" (probablement, les més severes), que van extingir quasi completament la vida. Tanmateix, a l'entrada de l'era paleozoica (-542 MA), diversos moviments de plaques continentals vers l'equador i una forta activitat volcànica van revertir la glaciació i s'iniciaren noves formes de vida més desenvolupades, que van deixar un important registre fòssil.

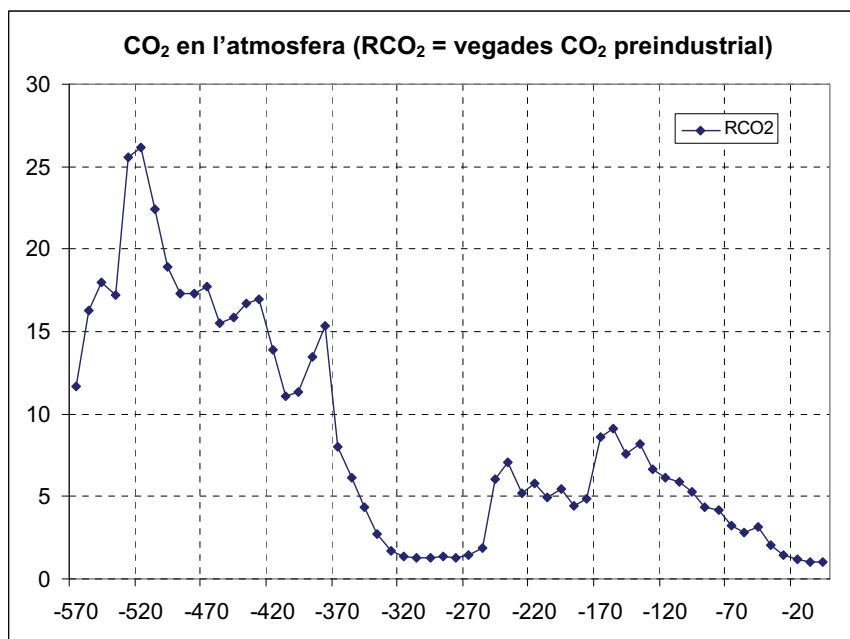


Figura 11.11. Model d'emissions de CO₂ des de l'era paleozoica fins avui (RCO₂: proporció de CO₂ a l'atmosfera en relació amb la proporció del CO₂ preindustrial). S'observa que sempre hi ha hagut valors molt més elevats de CO₂ (fins a 26 vegades els actuals). A l'inici de l'era paleozoica, el Sol brillava un 6% menys que avui dia. **Font:** [GEOCARB III-2002]

No es coneixen amb certesa les condicions climàtiques que van fer possible els esclats de vida i els episodis d'extinció durant les eres paleozoica i mesozoica i la primera part de la cenozoica (-65 MA a -2,5 MA). Tot fa pensar que hi van intervenir aspectes tan diversos com els moviments tectònics, el vulcanisme, els canvis dels corrents marins, els xocs d'asteroides o les modificacions de la composició atmosfèrica causades pels mateixos éssers vius. En tot cas, els coneixements actuals no permeten establir una correlació uní-

voca entre el nivell de CO_2 de l'atmosfera estimada pels models [GEOCARB III-2002] i les condicions per a l'evolució de la vida en aquestes eres (figura 11.11).

L'era quaternària va començar ara fa uns 2,5 MA, després d'un llarg període d'uns 200.000 anys on no hi va haver pròpiament cap glaciació. Diverses condicions, com ara la nova configuració dels continents i la disminució del CO_2 a l'atmosfera, van conduir a un refredament progressiu del clima, en què es van començar a manifestar unes oscil·lacions entre glaciacions i interglaciacions relacionades amb fenòmens astronòmics.

Aquestes oscil·lacions resulten de la combinació del canvi d'excentricitat de l'òrbita terrestre al voltant del Sol (de quasi circular a 155 Mkm, a una excentricitat d'uns 5 Mkm, en cicles d'uns 100.000 anys); el canvi d'inclinació de l'eix de la Terra (entre $22,2^\circ$ i $24,5^\circ$; actualment, $23,5^\circ$, en cicles d'uns 41.000 anys), i la precessió (o canvi de la direcció de la inclinació) de l'eix de la Terra en cicles d'uns 21.000 anys. En la primera part del període (de -2,5 a 0,9 MA), van predominar les oscil·lacions cada 40.000 anys i, posteriorment (entre -0,9 i -0,010 MA), les grans glaciacions es van repetir cada 100.000 anys.

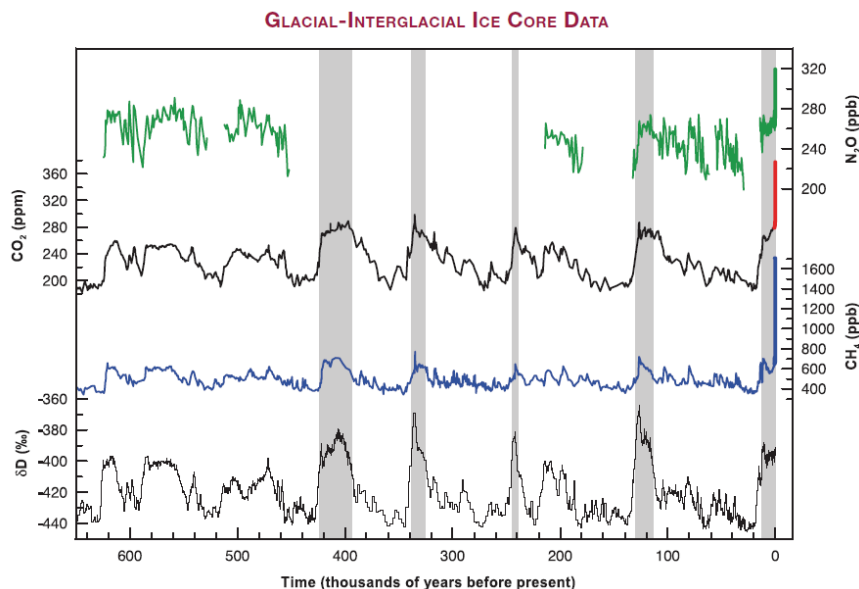


Figura 11.12. Variacions de deuteri (δD) en el gel antàrtic (indicador de la temperatura) i concentracions atmosfèriques dels gasos d'efecte hivernacle, diòxid de carboni (CO_2), metà (CH_4) i òxid nitrós (N_2O) a l'aire atrapat dins els nuclis de gel. Les dades abasten 650.000 anys i les bandes ombrejades indiquen els períodes càlids interglacials. En vermell s'indiquen les recents variacions antropogèniques de CO_2 . **Font:** IPCC, AR4, Working Group I, *Technical summary*, pàgina 24 [IPCC-AR4-WGI-TS-2007]

Hi ha una notable correlació entre les temperatures en els cicles glacials i interglacials dels darrers 650.000 anys i els registres de concentracions de CO_2 a l'atmosfera, que han variat en un rang entre 180 a 300 ppm. Però ja hem constatat que hi ha un gran consens científic que la causa primària d'aquestes variacions de temperatura en els darrers cicles glacials i interglacials són els canvis orbitals de la Terra (o cicles de Milanković).

Tot i que les variacions del CO_2 atmosfèric segueixen aquests cicles, amb un efecte de retroalimentació positiva (en reforcen tant el refredament com l'escalfament), la seva explicació continua essent una de les principals qüestions sense resoldre en la recerca del clima, segons es manifesta al capítol de paleoclima ([IPCC-AR4-WGI-C6-2007], pàgina 446).

En aquest mateix capítol (pàgina 449), s'afirma que el clima global el determina el balanç de radiació del planeta, que es pot modificar de tres formes fonamentals: 1) canviant la radiació

solar entrant (per exemple, canvis en l'òrbita de la Terra o de la intensitat de radiació del Sol); 2) modificant la fracció de radiació solar reflectida (o albedo; per exemple, canvis de nuvolositat, de presència d'aerosols a l'atmosfera o de tipus de cobertura dels sòls), i 3) modificant l'efecte hivernacle per retorn de l'energia irradiada d'ona llarga des de la superfície de la Terra (per exemple, canvis en les concentracions de gasos d'efecte hivernacle). A més, el clima local també depèn dels efectes dels vents i dels corrents oceànics. Tots ells són factors que juguen un paper en els canvis climàtics presents i passats.

Afirmar que les variacions climàtiques dels darrers centenars de milers d'anys són funció de les concentracions de CO₂ (com podria fer entendre *Una veritat incòmoda*, d'Al Gore) no es correspon amb el consens científic actual i ha estat objecte de nombroses crítiques.

En efecte, la continuació dels cicles de Milanković hauria conduït a una nova glaciació. Tanmateix, el rapidísim increment antropogènic de CO₂ durant els dos darrers segles (i, en especial, els últims cinquanta anys), que avui dia ja ateny les 390 ppm i que té l'origen fonamentalment en la crema massiva de combustibles fòssils, sembla que és la causa principal d'un escalfament no usual del clima que trenca la tendència natural.

El climatòleg W. Ruddiman [Rud-2005] encara va més enllà i defensa que, sense les emissions de CO₂ derivades de la desforestació per crear cultius i prats des de l'inici de les civilitzacions humanes, el clima de la Terra ja hauria entrat en una nova etapa de glaciació. Segons les seves avaluacions, els impactes climàtics de l'agricultura i de la ramaderia en els darrers 10.000 anys són del mateix ordre que els impactes de les emissions industrials en els darrers 150 anys.

L'informe de l'IPCC de 2007 i el canvi climàtic

El Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC en les sigles angleses) és un organisme creat el 1988, en el marc de les Nacions Unides i amb seu a Ginebra (Suïssa), que té per objectiu central l'estudi del canvi climàtic.

Avui dia agrupa uns 2.000 científics procedents de més de cent països i ha emès quatre informes: el *Primer informe d'avaluació* (FAR), publicat l'any 1990, va confirmar els elements científics que susciten la preocupació sobre el canvi climàtic; el *Segon informe d'avaluació* (SAR), emès el 1995, va proporcionar les bases per a les negociacions del protocol de Kyoto; el *Tercer informe d'avaluació* (TAR), de 2001, tractava diverses qüestions científiques i tècniques útils per al disseny de polítiques relacionades amb el canvi climàtic; finalment, el *Quart informe d'avaluació* (AR4), de 2007, confirmava inequívocament l'origen antropogènic de l'escalfament climàtic i n'avaluava les conseqüències.

Els darrers documents (TAR i AR4) estableixen les conclusions principals de l'IPCC sobre el canvi climàtic, que val la pena resumir i comentar. El quart informe (AR4-2007) confirma, fonamentalment, les conclusions del tercer informe (TAR-2001) i, en molts temes, alerta sobre el fet que els nous coneixements aportats posen de manifest conseqüències més greus que les previstes a l'informe anterior.

En el moment de resumir les conclusions de l'informe AR4 de 2007 de l'IPCC, ens trobem amb una situació mental contradictòria. Alhora que hi ha un dramàtic toc d'atenció de fons sobre la gravetat de la situació, el llenguatge "ben educat" i ple de "matisos" per no molestar ningú en fa un text críptic i feixuc, que proporciona moltes "coartades" als escèptics o als poc informats perquè hi puguin argumentar en sentit contrari o dilatori.

Aquest aspecte m'ha fet reflexionar molt. L'IPCC és una comissió "intergovernamental", és a dir, que reporta als governs dels països del món. Malgrat la gran importància que té la seva pròpia existència i el treball que ha fet, la seva veu resta apagada. Tinc la impressió que es produeix una situació com la del conte del "rei nu". Molta gent ho veu, però ningú no s'atreveix a dir-ho fins que un nen petit ho verbalitza: "El rei va nu."

Despullat de les precaucions i dels tecnicismes reiteratius, el resum que fem de les conclusions del *Quart informe d'avaluació* (AR4 2007) és el següent:

1. "Cinc motius de preocupació":

Riscos per als sistemes singulars. L'augment de la temperatura fa especialment vulnerables determinats àmbits singulars, com els ecosistemes polars i d'alta muntanya, els esculls de coral i els paratges amb molta biodiversitat, amb un risc elevat d'extinció d'espècies.

Riscos de fenòmens meteorològics extrems. En moltes regions, tant dels països desenvolupats com dels que estan en via de desenvolupament, es preveu que augmentin les sequeres, les onades de calor i les inundacions, amb impactes majoritàriament adversos, que comportaran un augment de l'estrès hídric i de la freqüència d'incendis incontrolats, amb efectes adversos sobre la producció dels aliments, la salut i les infraestructures.

Distribució dels impactes i les vulnerabilitats. Sovint, les regions o els col·lectius més dèbils econòmicament seran els més vulnerables i susceptibles de patir danys relacionats amb el clima: zones seques, grans deltes i illes petites i, en general, la gent pobre i els ancians. Àfrica és un dels continents més vulnerables a causa de la gran diversitat d'impactes, de múltiples factors d'estrès i de la seva escassa capacitat adaptativa.

Impacte totalitzat. En comparació d'informes anteriors de l'IPCC, els beneficis del canvi climàtic serien inferiors als previstos, mentre que els danys serien majors i afectarien negativament centenars de milions de persones per efecte de la disminució del subministrament hídric, l'augment de la malnutrició i un impacte més gran sobre la salut.

Riscos de singularitats a gran escala. A més d'una dilatació de l'aigua de mar més gran que la prevista inicialment, el desgel de Groenlàndia i, possiblement, de part de l'Antàrtida podria tenir efectes molt importants a gran escala. Un desgel complet del mantell de gel de Groenlàndia elevaria el nivell del mar en 7 metres i podria resultar irreversible.

2. Què cal fer? Estabilització de gasos d'efecte hivernacle? Mitigació i adaptació?

Aquest és un apartat clau del document, alhora que creiem que té una exposició argumental poc afortunada. Comencem a l'inrevés, pel toc d'atenció fonamental:

Com més es tardi a reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle, més difícil serà assolir nivells d'estabilització baixos (valor màxim a què arribarà el CO₂ a l'atmosfera, en ppm). I, com més alt sigui el valor d'estabilització del CO₂, més greus i irreversibles seran els impactes i les conseqüències del canvi climàtic.

A manca de mesures de mitigació, és probable que el canvi climàtic a llarg termini desbordi la capacitat d'adaptació dels sistemes naturals i dels sistemes gestionats per l'home (impactes en zones costaneres per augment del nivell del mar en diversos metres, desaparició de les glaceres de muntanya que tenen un paper insubstituïble com a magatzem i abastiment d'aigua, pèrdua d'ecosistemes bàsics per al sosteniment humà).

L'informe acompanya aquestes afirmacions amb les advertències següents:

Els beneficis de les mesures de mitigació (en termes de canvi climàtic evitat) trigaran diverses dècades a fer-se evidents. Però aquestes mesures evitarien ancorar-se en infraestructures i en vies de desenvolupament molt dependents del carboni, de conseqüències encara molt pitjors. Entre línies, l'informe de l'IPCC ens demana un canvi de paradigma de desenvolupament.

Ni la mitigació ni l'adaptació per si soles no poden evitar tots els impactes del canvi climàtic, però caldrà l'adaptació fins i tot en els escenaris d'estabilització més modestos. D'altra banda, un cop estabilitzades les concentracions de gasos d'efecte hivernacle, la temperatura continuarà augmentant durant decennis i tendirà a una estabilització que trigarà segles a aconseguir-se.

3. Escenaris d'estabilització.

El *Quart informe d'avaluació* de l'IPCC estableix diversos escenaris d'estabilització de les emissions de CO₂ i d'altres gasos d'efecte hivernacle [IPCC-AR4-SR-2007], que es resumeixen a la taula 11.9.

Taula 11.9. Característiques dels escenaris d'estabilització ¹						
Categoria	CO ₂ ppm	CO _{2eq} ² Ppm	Emiss. màx. ³ anys	ΔCO ₂ 2050 ⁴ %	Δ temper. ⁵ °C	Δ nivell mar ⁶ Metres
I	350 – 400	445 – 490	2000 – 2015	-85 a -50	2,0 – 2,4	0,4 – 1,4
II	400 – 440	490 – 535	2000 – 2020	-60 a -30	2,4 – 2,8	0,5 – 1,7
III	440 – 485	535 – 590	2010 – 2030	-30 a +5	2,8 – 3,2	0,6 – 1,9
IV	485 – 570	590 – 710	2020 – 2060	+10 a +60	3,2 – 4,0	0,6 – 2,4
V	570 – 660	710 – 885	2050 – 2080	+25 a +85	4,0 – 4,9	0,8 – 2,9
VI	660 – 790	885 – 1130	2060 – 2090	+90 a +140	4,9 – 6,1	1,0 – 3,7
¹ L'estabilització és el manteniment, a nivell constant, de les concentracions atmosfèriques dels gasos d'efecte hivernacle. ² El CO _{2eq} inclou també els efectes de la resta de gasos d'efecte hivernacle. ³ Intervals d'anys de la magnitud màxima d'emissions de CO ₂ . ⁴ Variació de les emissions mundials de CO ₂ en relació amb les de l'any 2000. ⁵ Augment de la temperatura respecte als nivells preindustrials en condicions d'equilibri. ⁶ Augment del nivell del mar respecte al nivell preindustrial en condicions d'equilibri, per dilatació tèrmica. Font: IPCC [IPCC-AR4-WGI-TS-2007], pàgina 67. Elaboració-resum: Carles Riba Romeva						

A partir de l'exposició d'aquests escenaris, l'informe de síntesi del *Quart informe d'avaluació* entra en molts tecnicismes i disquisicions que fan molt difícil discernir a quin d'aquests escenaris d'estabilització sembla que ens dirigim. Més endavant proposem una línia de raonament per respondre a aquesta qüestió tan important.

4. Mesures tècniques? O canvi de paradigma de desenvolupament?

En aquest darrer aspecte de l'informe de síntesi [IPCC-AR4-SR-2007], hem de manifestar que hi estem obertament en desacord. Traduïm literalment la introducció del punt 5.5 d'aquest informe (i en cursiva negreta en reproduïm el text original):

"Hi ha un alt grau de coincidència i moltes evidències que tots els nivells d'estabilització examinats es poden aconseguir si s'implanta un conjunt de tecnologies actualment disponibles o previsiblement comercialitzables en les properes dècades, sempre que existeixin uns incentius apropiats i eficaços per al desenvolupament, l'adquisició, la implantació i la difusió de les tecnologies i per afrontar les barreres corresponents." (*"There is high agreement and much evidence that all stabilisation levels assessed can be achieved by deployment of a portfolio of technologies that are either currently available or expected to be commercialised in coming decades, assuming appropriate and effective incentives are in place for development, acquisition, deployment and diffusion of technologies and addressing related barriers."*)

El missatge sembla ser: ciutadans del món, podem continuar fent el que fèiem, no cal modificar ni renunciar a res! El problema del canvi climàtic es resol amb mitjans tècnics.

Segons el meu criteri, el missatge és totalment equivocat (jo diria, poc valent), dictat per instàncies polítiques i no científiques. Potser aquest optimisme imprudent s'explica (però no es justifica) perquè l'AR4 va ser redactat en moments d'eufòria-follia col·lectiva (2007), que a partir de llavors es van començar a transformar en la profunda crisi sistèmica en què estem instal·lats ara.

Probablement, abans de cinc anys, els primers símptomes del declivi del petroli ens faran adonar de cop que la nostra economia va "nua" de recursos naturals que la sosten-

tin. I, a més, descobrirem que estem jugant a “aprenents de bruixot” amb el clima, que és a la base dels recursos que ens han de tornar a sostenir en el futur.

Conseqüències climàtiques de cremar els combustibles fòssils

El discurs econòmic i polític que domina actualment és contradictori, sinó esquizofrènic.

Per un costat, comencem a tenir consciència de l'escassetat d'energia i, per tant, qualsevol nou descobriment o nova explotació de jaciments de combustibles fòssils és celebrat com una notícia excel·lent (recentment, BP i algunes companyies petroleres russes s'han disposat a explotar l'Àrtic). I, per altre costat, cada cop són més acceptades les polítiques de sostenibilitat que propugnen (però no aconsegueixen) una economia més lliure de carboni.

Hem de percebre amb nitidesa que l'energia fòssil i el canvi climàtic formen part d'una mateixa equació. I que les dues concepcions anteriors són totalment incompatibles ja que, com més reserves de combustibles fòssils es descobreixin i s'usin, més inapel·lable serà el canvi climàtic.

Per il·lustrar aquesta qüestió, proposo la línia argumental següent. Ens preguntem:

En el context polític actual, hi ha països amb importants reserves de combustibles fòssils (petroli, gas natural, carbó) disposats a no utilitzar-les per responsabilitat ambiental? Els Estats Units? Rússia i els països d'Àsia Central? La Xina? L'Índia? Els països del golf Pèrsic? Austràlia? Àfrica del Sud? Veneçuela? El Brasil? (Per cert, caldria seguir amb molta atenció el cas de les reserves de petroli del parc nacional de Yasuní, a l'Equador, una petita experiència que va en el sentit de la renúncia i que és un cas paradigmàtic de preservació de la biodiversitat, amb una potentíssima defensa.) I, seguint amb aquesta mateixa línia argumental: les costoses inversions en la cerca de noves fonts de combustibles fòssils límits (petrolis i gasos no convencionals) són per després no utilitzar-les? Per desgràcia, les respostes són negatives.

Si no estem disposats a renunciar a utilitzar les reserves de combustibles fòssils, les polítiques de sostenibilitat podran allargar el canvi climàtic en el temps, però difícilment en podran anul·lar els efectes globals i acumulatius.

Vist això, val la pena analitzar els impactes globals que la combustió de les reserves actuals de combustibles fòssils tindrà en la concentració de CO₂ a l'atmosfera. Per fer aquesta estimació, hem tingut en compte els aspectes següents:

1. Actualment (2010), hi ha a l'atmosfera uns 3.000 Pg (10^{15} grams = milers de milions de tones) de CO₂, que corresponen a uns 820 PgC (calculats a partir de la relació de pesos moleculars: C=12; O = 16; CO₂=12+16+16=44).
2. L'any 2010, la quantitat de CO₂ a l'atmosfera és, aproximadament, de 389 ppm (parts per milió, o fracció de 0,000389, el 0,0389%) en volum respecte al conjunt de gasos de l'atmosfera i, els darrers deu anys ha crescut, de mitjana, prop de 2 ppm/any (Earth System Research Laboratory, <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>).
4. Per transformar les reserves de combustibles en quantitat de CO₂ a causa de la combustió, s'utilitzen les relacions de la taula 5.5: gas natural (mitjana de 0,0502 kgCO₂/MJ), petroli (mitjana de 0,0620 kgCO₂/MJ), carbó (mitjana de 0,0896 kgCO₂/MJ).

Amb relació als gasos d'efecte hivernacle, la natura ens proporciona dos grans embornals quan la concentració de CO₂ de l'atmosfera augmenta: creix l'absorció per la fotosíntesi de la vegetació i augmenta la dissolució en les capes superficials dels oceans. Aquestes tendències compensen una part important de l'augment antropogènic de CO₂ a l'atmosfera.

El Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic estableix estimacions dels fluxos atmosfera-oceans i atmosfera-Terra, com també del balanç global de CO₂ per als anys 1980 i 1990 i per al període 2000-2005 [IPCC-AR4-WGI-TS-2007], pàgina 26. Vegeu la taula 11.10.

Taula 11.10. Balanç global de CO ₂ entre l'atmosfera, els oceans i la biosfera (Pg/any)			
	Anys 1980	Anys 1990	2000-2005
Creixement atmosfèric	3,3 ± 0,1	3,2 ± 0,1	4,1 ± 0,1
Emissions de CO ₂	5,4 ± 0,3	6,4 ± 0,4	7,2 ± 0,3
Flux net oceans–atmosfera	-1,8 ± 0,8	-2,2 ± 0,4	-2,2 ± 0,5
Flux net Terra–atmosfera	-0,3 ± 0,9	-1,0 ± 0,6	-0,9 ± 0,6
Flux per canvi d'ús de la Terra	1,4 (0,4 a 2,3)	1,6 (0,5 a 2,7)	no disponible
Embornal residual de la Terra	-1,7 (-3,4 a 0,2)	-2,6 (-4,3 a -0,9)	no disponible
Font: [IPCC-AR4-WGI-TS-2007], pàgina 26			

Això significa que la fracció de CO₂ emès que absorbeixen els sistemes naturals (Terra + oceans) ha estat la següent: anys 1980: 2,1/5,4 (Pg/Pg) = 0,389; anys 1990: 3,1/6,4 = 0,484; anys 2000 a 2005: 3,1/7,2 = 0,431. Davant d'aquestes fluxos naturals d'embornament, el segrest tècnic de CO₂ realitzat per l'home (també conegut com a CCS, *carbon capture and storage*) és pràcticament residual: amb la capacitat de les comptades plantes operatives i de les projectades per als propers anys, s'estarà lluny del segrest d'1/1000 del CO₂ emès (< 0,1%).

La taula 11.11 explora el nivell d'estabilització de les emissions que resultaria de la crema completa dels combustibles fòssils. S'avaluen en funció de la fracció de CO₂ (de 0,6 a 0,3) que són capaços d'absorbir els embornals naturals (la vegetació terrestre i els oceans).

Taula 11.11. Estimacions globals del CO ₂ emès en la crema dels combustibles fòssils					
Avaluació del CO ₂ emès per la crema de combustibles fòssils					
Combustible fòssil	Reserves		Impacte kgCO ₂ /MJ	Emissions de CO ₂	
	TW _A	EJ (10 ¹⁸ J)		PgCO ₂	PgC
Petroli	258,577	8.154,5	0,0620	505,58	137,88
Gas natural	215,383	6.792,3	0,0502	340,97	92,99
Carbó	577,032	18.197,3	0,0896	1.630,48	444,68
Total	1.050,992	33.144,1		2.477,03	675,55
Avaluació dels increments de CO ₂ a l'atmosfera (en ppm)					
2009 ppm CO ₂	Emissions crema comb. fòssils		Absorció fracció	Increment PgCO ₂	Final ppm CO ₂
	ΔPgC	Δ=ppm CO ₂			
389,0	675,55	320,47	0,60	128,2	517,2
389,0	675,55	320,47	0,55	144,2	533,2
389,0	675,55	320,47	0,50	160,2	549,2
389,0	675,55	320,47	0,45	176,3	565,3
389,0	675,55	320,47	0,40	192,3	581,3
389,0	675,55	320,47	0,35	208,3	597,3
389,0	675,55	320,47	0,30	224,3	613,3
Fonts: Reserves de petroli i gas: <i>Oil&Gas Journal</i> ; de carbó: World Energy Council (WEC); emissions: Earth System Research Laboratory (Mauna Loa, CO ₂), < http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/ >. Elaboració: Carles Riba Romeva					

L'informe de síntesi d'AR4 indica que, a mesura que l'escalfament es vagi produint, s'espera que l'acoblament entre el clima i el carboni incrementi la fracció d'emissions antropogèniques que subsisteix a l'atmosfera ([IPCC-AR4-SR-2007], pàgina 67). Per tant, sembla prudent adoptar un valor per a la fracció absorbida no superior a 0,45.

Això situaria l'estabilització de CO₂ en unes 565 ppm, en el límit superior del IV escenari d'estabilització (taula 11.9), amb un increment de temperatura d'uns 4°C i un augment del nivell del mar (per dilatació, sense comptar el desgel) d'uns 2 metres. Tot fa pensar que aquest escenari no ens l'evitarà ningú si és no hi ha un canvi global de mentalitats.

12. Reflexions finals

12.1. Resum de les tendències principals

A continuació, es resumeixen les tendències principals que s'han analitzat en els capítols anteriors:

1. *Consum d'energia contínuament creixent*
El consum d'energia mundial creix de forma cada cop més ràpida. Però, al mateix temps, l'augment de la població ha fet que el consum d'energia per càpita quasi s'hagi mantingut constant en aquestes darreres dècades (1980-2008), fora d'un petit augment els anys previs a la crisi de 2007.
2. *Gran desigualtat entre societats*
Hi ha una gran desigualtat en la distribució dels consums d'energia entre les regions del món, entre els països (fins a deu vegades de diferència) i en el si dels propis països, tant en termes absoluts com per càpita. Fins ara, el consum d'energia estava molt relacionat amb la riquesa dels pobles i amb l'evolució del seu desenvolupament.
3. *Reserves limitades de combustibles no renovables*
Les reserves mundials (provades) d'energies no renovables són limitades i la seva avaluació presenta moltes incerteses (de nous jaciments per descobrir, però també de reserves sobredimensionades). Si continua el ritme de creixement actual (econòmic i poblacional) en el món, és previsible que s'exhaureixin totalment vers l'any 2060.
4. *Impacte del zenit del petroli sobre el desenvolupament*
D'acord amb la teoria del zenit del petroli (i el zenit posterior d'altres recursos no renovables), és molt possible que el model econòmic actual, basat en consums creixents d'energia fòssil, experimenti un desajustament generalitzat molt abans d'aquesta data (probablement, la crisi actual n'és l'inici).
5. *Els combustibles fòssils no convencionals no són la solució*
Els combustibles fòssils no convencionals difícilment poden mitigar el declivi dels combustibles convencionals i, en tot cas, comporten unes extraccions més lentes i unes inversions en equipaments i uns costos ambientals molt superiors.
6. *L'alternativa nuclear és incerta i llunyana*
Per ara, l'energia nuclear es basa en el consum (combustió) de l'urani U235, molt escàs a la natura. Les alternatives de reactors reproductors o d'energia de fusió (per ara, molt incertes) no estaran disponibles fins dintre d'uns trenta anys o més, quan el declivi dels combustibles fòssils haurà trastocat el model de desenvolupament actual.
7. *Les energies renovables seran més limitades*
Les energies renovables alternatives (els biocarburants, l'energia hidroelèctrica, la solar, l'eòlica, la geotèrmica, la mareomotriu) no permetran mantenir el nivell de consum actual ni seran disponibles tan fàcilment. En tot cas, seran les energies que ens sostindran en el futur.
8. *Abús dels recursos de la biosfera*
L'evolució de l'agricultura, la ramaderia, la pesca, l'aqüicultura i l'explotació dels boscos ha seguit més els dictats de l'economia que una gestió que preservi aquests recursos i s'adapti als seus ritmes. En la majoria dels casos, els grans augments de productivitat són fruit d'esmerçar-hi grans quantitats de combustibles fòssils.
9. *Conseqüències del canvi climàtic*
El canvi climàtic i el consum de combustibles fòssils formen part d'una mateixa equació. Com més avança l'explotació dels jaciments, menys eficients són els combustibles fòssils i més grans les emissions. Afronem, alhora, una manca greu d'energia i un

canvi climàtic de conseqüències imprevisibles. En tot cas, però, tot fa preveure que les capacitats de sosteniment futures minvaran (informes de l'IPCC).

10. *Necessitat d'un canvi de paradigma de desenvolupament*

La crisi energètica i climàtica es pot resoldre de dues formes: amb una nova percepció de la nostra relació amb la natura i els seus recursos que generi un canvi de paradigma de desenvolupament menys consumidor, més sostenible i més igualitari, o en lluites (econòmiques o militars) per acaparar els darrers recursos. És a les nostres mans (a les mans de la humanitat) optar per una sortida o l'altra.

Taula 12.1. Resum de les dades principals de l'estudi				
Capítol 1	Consum d'energia primària			
		1980	2008	Increment
	Total	10,379 TW _t	17,867 TW _t	72,23 %
	Petroli	4,383 TW _t	5,720 TW _t	30,50 %
	Gas natural	1,802 TW _t	3,809 TW _t	111,37 %
	Carbó	2,223 TW _t	4,572 TW _t	105,67 %
	Urani	0,353 TW _t	0,908 TW _t	287,35 %
	No renovable	84,56 %	84,01 %	71,00 %
	Hidroelèctrica	0,599 TW _t	1,028 TW _t	71,62 %
	Altres electr. renov.	0,016 TW _t	0,195 TW _t	1.218,75 %
Capítol 2	Consum d'energia primària per càpita			
		1980	2008	Increment
	Món	2.331 W _t /hab	2.670 W _t /hab	14,54 %
	Amèrica del Nord	9.563 W _t /hab	9.028 W _t /hab	-5,59 %
	Àfrica	895 W _t /hab	961 W _t /hab	7,37 %
	Àsia i Oceania	887 W _t /hab	1.733 W _t /hab	95,38 %
Capítol 3	Reserves d'energia no renovable (món, 2007)			
		Unitats físiques	Unitats d'energia	% total reserves
	Total		1.126,191 TW _t A	100,00 %
	Petroli	1.316,7 Gb	258,577 TW _t A	22,96 %
	Gas natural	6.189,4 Tcf	215,383 TW _t A	19,12 %
	Carbó	826.002,0 Tg	577,032 TW _t A	51,24 %
Capítol 8	Produccions dels sistemes biològics			
		1980	2008	Increment
	Total	5.177 Tg/A	13.153 Tg/A	154,07 %
	Agricultura	3.454 Tg/A	10.249 Tg/A	196,73 %
	Ramaderia	429 Tg/A	1.038 Tg/A	141,96 %
	Pesca i aquicultura	37 Tg/A	159 Tg/A	329,73 %
Capítol 9	Emissions de CO ₂ a l'atmosfera (gCO ₂ /A)			
		1980	2008	Increment
	Total	18.443,9 TgCO ₂ /A	30.493,2 TgCO ₂ /A	65,33 %
	Petroli	8.825,2 TgCO ₂ /A	11.170,8 TgCO ₂ /A	26,58 %
	Gas natural	3.086,3 TgCO ₂ /A	6.273,4 TgCO ₂ /A	103,27 %
	Carbó	6.522,4 TgCO ₂ /A	13.049,0 TgCO ₂ /A	100,06 %
Elaboració: Carles Riba Romeva				

12.2. Canviar el paradigma de desenvolupament

Disposar d'energia fàcil i abundant ha estat una gran oportunitat que ha permès el desenvolupament de les societats industrials avançades, amb un desplegament del coneixement i del benestar social sense precedents. Però aquesta mateixa facilitat també ha induït pràctiques malbaratadores en què la gran capacitat energètica dels combustibles fòssils s'ha utilitzat més per acumular riquesa que per assegurar el benestar equilibrat entre persones i entre països.

Però l'energia fòssil és finita i ja se n'insinuen els límits. Encara en queda més de la meitat, però amb els ritmes actuals de consum i de creixement no n'hi ha ni per a 50 anys, atès que els zenits de producció són a tocar en la dècada que iniciem. A més, estem induint un canvi climàtic imprevisible però de conseqüències greus. Seran 200 anys irrepetibles (des de 1830 fins a 2030) en què alguns hauran viscut amb una abundància inusitada, però la crisi en què hem entrat recentment n'anuncia el principi de la fi.

Què cal fer davant de la nova perspectiva energètica i climàtica que se'ns apropa?

En primer lloc, no amagar el cap sota l'ala. Malgrat que el coneixement d'aquest límit conté un missatge que no agrada, els creadors d'opinió i els governs han d'explicar-lo a la ciutadania. No porta enlloc continuar pregonant que sortir de la crisi es resol fomentant simplement altre cop el consum indiscriminat (aquestes són les regles del passat) ja que, sense el suport d'una energia abundant i barata, els nous "brots verds" no faran més que realimentar les pitjors conseqüències de la crisi energètica i climàtica.

Certament, els combustibles fòssils no s'acabaran sobtadament, d'un dia a l'altre. Però el simple fet d'atènyer el sostre de producció (o zenit) del petroli, el recurs energètic més determinant, canviarà tots els paràmetres de desenvolupament en què ens hem basat fins ara.

El consum mundial d'energia és immens avui dia, i les alternatives socials i tecnològiques no s'improvisen. Quan, dintre d'unes dècades, el declivi dels combustibles fòssils estigui en una fase més avançada, la nostra civilització esdevindrà extraordinàriament vulnerable si no hem fet els passos necessaris per adaptar-nos-hi. I, com més riques i més urbanes siguin les societats, més dures seran les conseqüències i més difícils aquestes adaptacions.

- Com mantindrem el sistema actual sense créixer econòmicament?
- Com se sostindrà la globalització amb una reducció progressiva del transport?
- Com alimentarem els augments impressionants de població del tercer món?
- Com farem la transició vers les energies renovables si malgastem els recursos formidables d'energia fòssil en consums fútils?
- És sensat impulsar les societats encara agràries vers economies basades en els combustibles fòssils, ara que aquests comencen a davallar?

Però, per construir l'alternativa encara no escrita a la crisi sistèmica actual, calen alguns canvis essencials en les nostres mentalitats i en els nostres comportaments. N'assajo una primera aproximació a través de les qüestions següents:

- N'hi ha prou a millorar l'eficiència energètica?
- La tecnologia pot resoldre el problema energètic?
- Són suficients les energies renovables?
- Riquesa i autonomia
- Construir l'alternativa

La mentalitat dels ciutadans de les societats avançades s'ha instal·lat en una comoditat despreocupada i pensa que la societat serà capaç de proporcionar per sempre els recursos energètics suficients en tot moment i en la quantitat requerida.

I aquests termes aviat no seran possibles. La reflexió sobre els punts anteriors m'ha fet entreveure alguns dels elements per poder superar en positiu la crisi actual.

N'hi ha prou amb l'estalvi energètic? La paradoxa de Jevons

Molta gent confia que el problema de l'energia es resol simplement millorant l'eficiència energètica dels nostres sistemes tècnics. El fet de consumir menys energia per produir el mateix resultat ocasiona un estalvi del consum energètic (per exemple, les bombetes de baix consum, que produeixen la mateixa llum amb menys d'un 20% de l'energia elèctrica).

Tanmateix, aquesta actitud desconeix la paradoxa enunciada per l'economista britànic W. S. Jevons el 1865 en la seva obra titulada *The Coal Question*. Segons Jevons, millorar l'eficiència d'un sistema disminueix el consum momentani del recurs considerat però, en fomentar-ne l'ús, a la llarga induïx un increment global del consum (per exemple, motors cada cop més eficients fomenten l'augment del parc de vehicles, que acaba per incrementar el consum global de combustible).

En economia, es donen dinàmiques anàlogues ben conegudes: en disminuir el preu d'un producte, el mercat s'expandeix de manera que el volum de negoci augmenta per damunt de la contracció causada per la disminució del preu. La paradoxa de Jevons n'és una conseqüència aplicada als consums energètics.

Des del punt de vista de la creació de riquesa monetària, aquesta expansió del mercat constitueix un efecte positiu. Però, quan s'associa a una energia que amenaça d'esdevenir escassa, l'augment del consum es transforma en un problema. És la situació que es donarà en un futur immediat: les economies basades en energies fòssils no renovables quedaran escanyades pel declivi d'aquests recursos.

La tecnologia pot resoldre el problema energètic?

Més enllà de l'eficiència, també es confia que la tecnologia serà capaç de resoldre el problema energètic, fins i tot si augmenta el consum global d'energia. Es diu: "Les tecnologies hi són; en tot cas cal aplicar-les." I després el problema es remet a condicionaments econòmics sobre els recursos monetaris i els temps necessaris per a les inversions.

Analitzant l'evolució de les societats humanes i, sobretot, de les societats industrials i tecnològiques dels darrers 150 anys, la resposta sembla que és afirmativa. L'evolució ascendent de les societats humanes s'ha acompanyat de consums energètics cada cop més elevats (figura 2.1) alhora que, a escala més petita, s'observa un acoblament entre els avenços i les regressions econòmiques de determinats països (antiga URSS, Cuba, Corea del Nord, la crisi actual en les societats avançades) i el consum energètic.

Tanmateix, avui dia apareix un element nou determinant: comencem a tenir una visió global de la Terra i sabem que, amb l'evolució dels consums i de la població, els recursos energètics no renovables tenen els dies comptats. Després d'un creixement espectacular gràcies al consum exponencial dels combustibles fòssils (creats per la naturalesa durant milions d'anys), per primera vegada en percebem els límits i ens trobem a les portes del seu declivi i del seu exhauriment posterior.

Com evolucionar sense el concurs d'aquestes fonts d'energia excepcionals?

Això representa un canvi de paradigma en l'evolució de la humanitat que no podem resoldre delegant cegament en les tecnologies i l'economia. En tot cas, recordem que darrere de les solucions tecnològiques i econòmiques, també hi ha persones que imposen els seus punts de vista i les seves opcions.

Per tant, entrem en una nova etapa en què, per resoldre la crisi energètica i ambiental, no podem continuar confiant més en les dinàmiques de l'economia i de la tecnologia. Cal invertir els termes: en funció de la nova situació, caldrà establir acords de desenvolupament postcarboni i alinear l'economia i la tecnologia amb aquests objectius.

I això demanarà canvis de mentalitat, sacrificis i renúncies.

Són suficients les energies renovables?

Davant del declivi previsible de les fonts energètiques no renovables (combustibles no convencionals i urani inclosos) i de la incertesa i la llunyania de l'alternativa de la fusió nuclear, és pertinent plantejar-se si les energies renovables són suficients.

La resposta és afirmativa: les fonts d'energia renovable (solar tèrmica i fotovoltaica, eòlica, hidràulica, geotèrmica, biomassa) tenen un potencial suficient per cobrir les necessitats energètiques bàsiques de la humanitat avui. Gràcies a elles, la humanitat podrà subsistir en el futur, però el seu aprofitament i la seva gestió demanen un canvi radical de mentalitat, un canvi de paradigma energètic.

El retorn a les energies renovables es farà en condicions molt millors que no s'havia fet en etapes històriques anteriors, ja que ara tenim (o podem tenir) uns coneixements molt més precisos dels recursos, dels fenòmens naturals i de les capacitats per gestionar la demanda; però això exigirà adaptar-se a la dinàmica que requereixen aquests recursos. Tanmateix, com hem vist a la part 3 d'aquest llibre, les tecnologies basades en fonts energètiques renovables no podran proporcionar, ni de lluny, la disponibilitat ni la intensitat de les energies fòssils a què ens hem acostumat.

Caldrà migrar de la idea de "*el client mana*" (visió antropocèntrica) al concepte de "*la natura ofereix*" (visió ecosfèrica) [Gar-2010]. Per a molts ciutadans de les societats desenvolupades, aquesta "aparent regressió" es pot percebre com un retrocés de civilització, però no és així. Després de fer el canvi, descobrirem que l'extrema despreocupació i la comoditat en què les societats desenvolupades ens havíem instal·lat comportava també importants renúncies de caràcter personal i social.

Les energies renovables estan molt més repartides que els combustibles no renovables (fòssils i nuclear), són més escalables i la seva posada en valor demana inversions menors. Però caldrà una intervenció humana més gran en la seva gestió, sovint a escala més local. És decisiu considerar novament l'ús del temps i aprendre a no consumir tot el que tenim, a fer reserves (estalvis) per a moments menys favorables.

Riquesa i autonomia

El debat sobre la riquesa i la pobresa se sol establir sobre la base de la renda per càpita, índex mediatitzat per l'economia i les polítiques, que no permet copsar ni gestionar adequadament el desenvolupament dels pobles. Aquest debat crec que s'ha de complementar amb la consideració sobre l'autonomia o la dependència de les persones, les famílies i les col·lectivitats (la reflexió també es podria establir en termes de possessió o despossessió).

Una persona (una família o un poble) és pobra quan a penes té el que necessita per viure; pot controlar els mitjans de subsistència, però, per causes diverses (recursos poc rendibles, coneixements o tècniques poc eficients), ha de dedicar molt d'esforç a subsistir. En canvi, una persona (una família o un poble) és dependent (no autònom, o desposseït) quan no té el control dels mitjans de subsistència; pot ser una persona rica si té subsidis o amb poc treball obté recursos suficients, però no controla els recursos o els coneixements i les capacitats que la sustenten. En la perspectiva de la crisi energètica i climàtica, la dimensió d'autonomia/dependència pot tenir tanta importància o més que la de riquesa/pobresa.

Sovint, l'ajuda dels països rics als països pobres imposa formes organitzatives i tecnològiques que desposseeixen els col·lectius pobres i els converteixen en dependents (o, en algun cas, subvencionats, per compensar la despossessió).

Un cas notori fou la revolució verda dels anys 1960 a 1990. Amb el patrocini de diverses fundacions americanes i amb l'acord d'alguns governs nacionals (Mèxic, Índia, Pakistan, Filipines), es van aplicar criteris tecnològics i econòmics (monocultius, variants transgèniques, fertilitzants i pesticides), que van aconseguir fer augmentar algunes produccions agrí-

coles (especialment, de cereals). En el costat negatiu hi ha, però, la pèrdua d'una gran part de la biodiversitat agrícola i ramadera, els impactes dels fertilitzants i els pesticides en el medi ambient, un augment enorme del cost de l'energia fòssil i l'aigua per unitat de producció i, encara, un altre efecte silenciàt: la desposseïció de milions d'agricultors de les seves terres i dels seus coneixements tradicionals. Com la mateixa FAO reconeix avui dia, "els agricultors pobres que no tenien aquests recursos van quedar exclosos de la revolució verda; molts es van fer encara més pobres" <<http://www.fao.org/kids/es/revolution.html>>.

Una altra forma de dependència és la concentració de població a les grans ciutats, especialment en els països pobres, ja que, en un context de penúria energètica, la vida a les grans ciutats serà més vulnerable que la vida rural. A l'informe *State of Mundial Population 2007*, el Fons de Població de les Nacions Unides (UNFPA) estima que, l'any 2008, la població urbana (3.300 milions de persones) supera per primera vegada la rural, i preveu que l'any 2030 la població urbana sigui de quasi 5.000 milions, molts d'ells pobres <<http://www.unfpa.org/help/sitemap/index.html>>.

En un projecte de col·laboració del Centre de Disseny d'Equips Industrials (CDEI-UPC), que dirigeixo, amb el Nepal vaig aprendre moltes coses sobre les actituds d'autonomia. Es tractava de millorar un sistema de transport telefèric (replicat en diversos indrets) per tal de facilitar l'arribada dels productes agrícoles produïts a les terrasses de les fal·des de les muntanyes a la carretera-mercat del fons de la vall (figura 12.1). Els responsables nepalesos havien optat per un sistema autònom, accionat per la pròpia gravetat, amb una gestió certament més complexa que la tradicional motoritzada, però totalment al seu abast. I, a més, van posar com a condició que el disseny de totes les parts del sistema es poguessin construir al Nepal, a excepció del cable i dels rodaments, elements crítics que acceptaven importar. Aquesta és una actitud orientada a l'autonomia i que evitarà que aquests sistemes es vegin afectats per la crisi energètica.



Figura 12.1. Transportador telefèric accionat per la gravetat al Nepal, en la millora del qual va participar el Centre de Disseny d'Equips Industrials de la Universitat Politècnica de Catalunya (Carles Domènech, de vermell). Una de les condicions que van posar els responsables del projecte nepalesos va ser que totes les parts es poguessin construir en aquest país (condició d'autonomia), excepte el cable i els rodaments. **Font:** CDEI-UPC

Els coneixements tradicionals associats amb els recursos naturals, que fins fa poques generacions havien estat el sosteniment principal de les famílies i de les col·lectivitats, ara són desconeguts per àmplies capes de la població. En la perspectiva de la necessària transició vers un nou paradigma de desenvolupament postcarboni (que no de creixement en el sentit econòmic clàssic), cal una reeducació vers l'autonomia, tant pel que fa als recursos físics com als coneixements i a les capacitats.

Construir l'alternativa

Com més s'avança en la tecnificació amb la premissa de créixer, més se substitueix la mà d'obra barata per tecnologia sofisticada, àvida d'energia. És l'economia del contrasentit: cada cop es marginen més persones, en lloc d'integrar-les, i cada cop es consumeixen més energia i recursos, en lloc d'estalviar-los. Això sí, alguns sectors econòmics i socials s'enriqueixen i generen desequilibris escandalosos. I això també passa entre països.

La concepció dominant insisteix que l'economia i la tecnologia són realitats ineludibles, més enllà dels desitjos i de les voluntats de les persones i les col·lectivitats. Però, darrere de l'economia i de la tecnologia, hi ha persones en situacions clau d'informació i de poder que decideixen seguint els seus propis interessos. No hi ha, doncs, veritats absolutes sinó opcions basades en determinades premisses, que es poden modificar per acords col·lectius. Sobre la base d'aquests acords, l'economia i la tecnologia poden esdevenir uns instruments magnífics per aconseguir-los.

La sortida de la crisi energètica i climàtica actual demana un canvi de paradigma de desenvolupament, ja que el creixement registrat aquests darrers anys als països desenvolupats no és extensible a la resta dels pobles. No tenim prou recursos naturals, ni suficient planeta Terra (vegeu la informació sobre la petjada ecològica a la secció 10.2).

Si es treballa tan sols per substituir les tecnologies actuals per altres de més eficients o amb menys impacte ambiental, no farem més que estimular el consum en una població des preocupada (paradoxa de Jevons), que s'estrlocarà de forma catastròfica amb el declivi dels recursos fòssils. Alhora, haurem malgastat l'energia fòssil amb objectius prescindibles sense haver posat les bases per impulsar el desenvolupament vers una societat postcarboni.

Cal prendre consciència de la limitació dels recursos de la natura i generar noves actituds en la població (especialment als països més desenvolupats) perquè abandonin privilegis com ara la desresponsabilització o la comoditat desmesurada en aspectes com el consum de productes fora de temporada, l'ús de l'automòbil tothora, la costosa facilitat del tot elèctric o la des preocupació sobre els recursos primaris que ens sustenten.

Això vol dir no tan sols un canvi d'actitud respecte als consums, sinó també una altra forma de valorar les inversions en funció del nou paradigma:

- Noves prospeccions petroleres o inversions en energies renovables?
- Més infraestructures per a l'automòbil, o infraestructures per al transport públic?
- Inversions en aviació, o inversions en sistemes públics de telecomunicació?

Hem de procurar construir l'alternativa no renunciant als millors avenços culturals, socials i tecnològics de la nostra societat industrial. Però una cosa és que el motor de l'activitat humana (de l'economia) sigui un mercat àvid per acaparar riquesa, que no vol sentir parlar de limitacions en els recursos, i una altra cosa és que el motor social siguin activitats que donin solució a les necessitats de les persones tenint en compte l'equitat, l'autonomia i el compromís amb la sostenibilitat futura.

Formem part de la biosfera i ens hem de reconciliar amb la resta dels éssers vius i treballar en cooperació. Hem d'aturar l'acceleració del nostre treball i respectar els temps de la natura ja que moltes de les ineficiències energètiques vénen de les presses. Hem de ser respectuosos amb la biodiversitat i amb la pròpia diversitat cultural humana.

En aquesta nova perspectiva, cal una simbiosi entre les tecnologies tradicionals i les noves tecnologies, entre les cultures tradicionals (generalment ben integrades en el seu entorn natural) i les cultures més desenvolupades, que ha de propiciar, alhora, la dura i difícil etapa d'adaptació al decreixement energètic però que, probablement, també ens farà redescobrir nous valors socials i ens proporcionarà més felicitat. Hem de reaprendre dels pobles més pobres els processos més eficaços, des del punt de vista energètic i ecològic.

12.3. El futur d'Europa: liderar el decreixement

Voldria acabar aquest text fent una fotografia de la població i dels principals recursos de les diferents regions del món, necessàriament simplificada però que, alhora, proporciona la imatge de la situació. A partir d'ella, després faré una reflexió sobre el paper d'Europa.

He escollit els recursos següents, ja que intervindran de forma decisiva en la transició cap a un futur sostenible (taula 12.2): a) les reserves d'energies no renovables (petroli, gas natural, carbó i urani), base energètica dels països desenvolupats i principal vector de desenvolupament d'altres països; b) la superfície emergida de què disposen les poblacions d'aquestes regions; c) la superfície dedicada a sòl agrícola (terres cultivables, cultius permanents i prats), i d) la superfície que roman com a sòl forestal.

Taula 12.2. Principals recursos del món, per regions						
Valors absoluts						
Regions	Població 2008 Mhab	Reserves 2007 TWtA	Superfície 2007 Mkm ²	Cultius 2007 Mkm ²	Pastures 2007 Mkm ²	Bosc 2007 Mkm ²
Amèrica del Nord	447,36	247,676	23,747	2,522	3,336	6,773
Amèrica del S. i c.	468,32	44,376	18,593	1,412	4,702	8,509
Europa	597,29	26,626	5,673	1,503	0,901	1,793
Euràsia	283,69	263,316	22,307	2,027	3,621	8,499
Orient Mitjà	198,99	238,18	5,597	0,364	2,374	0,164
Àfrica	967,83	78,863	30,315	2,465	9,110	6,273
Àsia i Oceania	3.727,22	227,155	29,947	5,242	9,739	7,363
Món	6.690,69	1.126,191	136,180	15,537	33,782	39,373
Valors per càpita						
Regions		Reserves 2006 kWtA/hab	Superfície 2007 m ² /hab	Cultius 2007 m ² /hab	Pastures 2007 m ² /hab	Bosc 2007 m ² /hab
Amèrica del Nord		553,64	53,08	5,64	7,46	15,14
Amèrica del S. i c.		94,76	39,70	3,02	10,04	18,17
Europa		44,58	9,50	2,52	1,51	3,00
Euràsia		928,18	78,63	7,15	12,76	29,96
Orient Mitjà		1196,94	28,13	1,83	11,93	0,82
Àfrica		81,48	31,32	2,55	9,41	6,48
Àsia i Oceania		60,94	8,03	1,41	2,61	1,98
Món		168,32	20,35	2,32	5,05	5,88
Valors per càpita relatius a la mitjana mundial						
Regions		Reserves 2006 Món=100	Superfície 2007 Món=100	Cultius 2007 Món=100	Pastures 2007 Món=100	Bosc 2007 Món=100
Amèrica del Nord		328,92	260,80	242,77	147,69	257,27
Amèrica del S. i c.		56,29	195,06	129,84	198,85	308,75
Europa		26,48	46,66	108,36	29,88	51,01
Euràsia		551,43	386,33	307,69	252,80	509,09
Orient Mitjà		711,10	138,19	78,77	236,28	14,01
Àfrica		48,41	153,89	109,68	186,43	110,14
Àsia i Oceania		36,21	39,48	60,56	51,75	33,57
Món		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Fonts: població: EIA-govEUA; recursos energètics: <i>Oil&Gas Journal</i> , WEC i IAEA; superfície de la Terra i els diferents usos: ResourceSTAT (FAO). Elaboració: Carles Riba Romeva						

Els resultats de la taula 12.2 es representen gràficament a les figures 12.2 i 12.3, on es posen de manifest les diferències de població i de recursos entre les diferents regions.

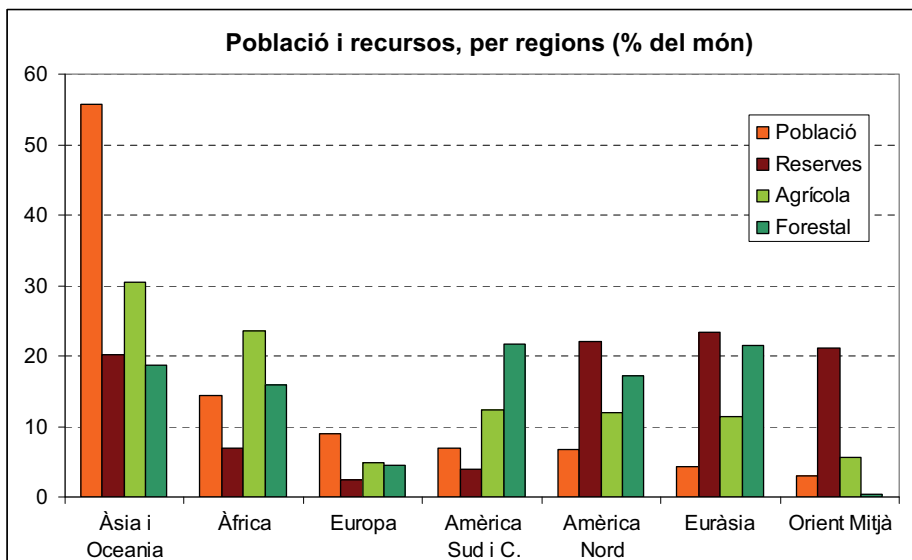


Figura 12.2. Representació gràfica, per regions, de la població, les reserves d'energia no renovable, el sòl agrícola (terres llaurables, cultius permanents i prats) i la superfície forestal, donades en tant per cent sobre el total del món. Les regions s'han ordenat en percentatges decreixents de la població. **Fonts:** població: EIA-govEUA; recursos energètics: *Oil&Gas Journal*, WEC i IAEA; superfície de la Terra i els seus diferents usos: ResourceSTAT (FAO). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

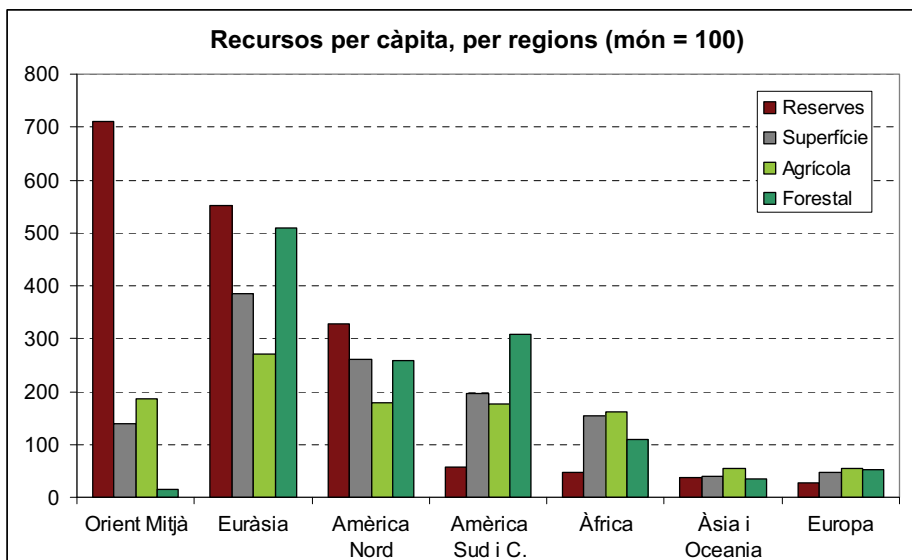


Figura 12.2. Representació gràfica de determinats recursos per càpita, per regions: reserves d'energia no renovable, superfície total, sòl agrícola (terres llaurables, cultius permanents i prats) i superfície forestal, prenent com a unitat el món = 100. Les regions s'han ordenat segons reserves per càpita decreixents d'energia no renovable. **Fonts:** població: EIA-govEUA; recursos energètics: *Oil&Gas Journal*, WEC i IAEA; superfície de la Terra i els diferents usos: ResourceSTAT (FAO). **Elaboració:** Carles Riba Romeva

Comentaris a la taula 12.2 i a les figures 12.2 i 12.3:

1. Hi ha quatre regions (Àsia i Oceania, Àfrica, Europa i Amèrica del Sud i Central) que tenen molta més població que reserves d'energies no renovables, mentre que hi ha tres regions (Amèrica del Nord, Euràsia i l'Orient Mitjà) en què aquesta relació s'inverteix (com s'observa clarament a la figura 12.2).
2. Àsia i Oceania i Europa tenen tots els recursos per càpita (de reserves d'energies no renovables, però també de terres i de superfície agrícola i forestal) molt inferiors a les mitjanes mundials (Europa va a la cua en reserves d'energia, poc més del 25% de la mitjana mundial). Les regions restants tenen recursos de terres agrícoles i forestals per càpita que superen la mitjana mundial, excepte l'Orient Mitjà en boscos (figura 12.3).

Europa

Per a bé i per a mal, Europa té una gran responsabilitat històrica en la forma de desenvolupament que ha adoptat la humanitat. Europa va ser la primera regió del món que va iniciar el desenvolupament industrial basat en els combustibles fòssils (fonamentalment, el carbó durant el segle XIX i la primera meitat del segle XX), que va colonitzar altres regions de món per tal d'explotar-ne els recursos a benefici seu, a més d'explotar els recursos fòssils propis (especialment, el carbó) fins a pràcticament exhaurir-los.

Amb tot això, Europa ha adquirit un alt nivell de vida i de desenvolupament i ha estat la punta de llança de l'actual civilització del món (lamentablement, també és on s'han congriat les dues grans guerres mundials). Però avui té la base més feble de recursos energètics i d'altres relacionats amb la Terra entre les regions del món i, per tant, des d'un envejable nivell de riquesa i benestar, s'hi insinua un important declivi per manca de recursos.

A la segona meitat del segle XX, després de la Segona Guerra Mundial, l'Amèrica del Nord anglosaxona ha rellevat Europa en el lideratge mundial, i ara tot fa pensar que estem en una fase de transició vers el lideratge de la Xina (mentre tingui l'energia del carbó) i d'altres països de l'Àsia.

Quin paper pot tenir Europa en el món?

Fa temps que va acabar el seu lideratge econòmic, tecnològic i de domini dels recursos naturals a través de la colonització. Ara, amb les reserves d'energia fòssil gairebé esgotades i amb uns recursos de la biosfera limitats en relació amb la seva població, Europa es troba, a contracor, en la punta de llança d'un canvi no tan fàcil ni tan atractiu avui dia: liderar el "decreixement energètic" procurant de mantenir, en la mesura que sigui possible, els millors valors de la seva cultura, encara reconeguda arreu del món.

I parlem de *lideratge* en el sentit següent: altres regions del món (Euràsia, Orient Mitjà i, en menor proporció, Amèrica del Sud, Àsia i Àfrica) disposen encara d'un potencial de recursos energètics fòssils en què basar la millora de les baixes condicions de vida de les seves poblacions. I, per tant, és difícil de pensar que renunciïn a usar-los fins que no es trobin en una situació límit d'esgotament que els obligui a canviar.

Tanmateix, progressivament (i començant per Àsia, que és la regió que té uns recursos més ajustats a la seva població) totes les regions s'han d'orientar a articular noves infraestructures energètiques sostenibles, adaptades a consums decreixents, en un camí anàleg al que Europa haurà iniciat.

L'Amèrica del Nord anglosaxona, Euràsia i l'Orient Mitjà són les regions amb més reserves d'energies no renovables en relació amb la seva població i, per tant, les que es veuran menys forçades a iniciar el canvi cap a la sostenibilitat.

Paradoxalment, l'escassetat mundial de recursos fòssils (que els governs ignoren) pot ser la millor solució al canvi climàtic.

Bibliografia

- ALEKLETT, K. [Ale-2007], "Reserve Driven Forecast for Oil, Gas & Coal and Limits in Carbon Dioxide Emissions. Peak oil, peak gas, peak coal and peak CO₂", Discussion Paper No. 2007-18, organitzat pel Joint Transport Research Centre (OECD) i International Transport Forum (IEA), París, desembre de 2007.
- ALSEMA, E.A.; WILD-SCHOLTEN, M.J. DE; DTHENAKIS, V.M. [Als-2006], "Environment Impacts of the PV Electricity Generation. A critical comparison of energy supply options", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, 4-8 de setembre de 2006.
- BECKER, M.; MEINECKE, W.; GEYER, M.; TRIEB, F.; BLANCO, M.; ROMERO, M.; FERRIÈRE, A. [Bec-2000], "Solar Thermal Power Plants". EUREC-Agency, maig de 2000.
- BODEN, T.; MARLAND, G. (CDIAC) [Bod-2010], "Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2007", CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory (EUA), <http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2007.ems>, 2010.
- CAMPBELL, C.J.; LAHERRÈRE, J.H. [Cam-1998], "The End of Cheap Oil", *Scientific American*, març de 1988, pp. 78-83, <<http://dieoff.org/page140.pdf>>.
- CLEVELAND, C.J.; COSTANZA, R.; HALL, C.A.S.; KAUFMANN, R. [Cle-1984], "Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective", *Science*, 225, p. 890-897, 1984.
- CLEVELAND, C.J. [Cle-2005], "Net Energy from the Extraction of Oil and Gas in the United States", *Energy, The International Journal*, 30(5), p. 769-782, 2005.
- COCHRAN, B., et. al. [Coc-2010], "Fast Breeder Reactor Programs: History and Status", Report of the International Panel on Fissile Materials (IPFM), 2010.
- CODERCH, M.; ALMIRON, N. [Cod-2008], "El espejismo nuclear", Editorial Los Libros del Lince, Barcelona, 2008.
- COOK, E. [Coo-1971], "The Flow of Energy in an Industrial Society", *Scientific American*, setembre de 1971.
- CRAIG, J.R.; VAUGHAN, D.J.; SKINNER, B.J. [Cra-2001], "Resources of the Earth: Origin, Use and Environmental Impact", Parson Education Inc., Nova Jersey, 2001.
- CRONE, T.J.; TOLSTOY, M. [Cro-2010], "Magnitude of the 2010 Gulf of Mexico Oil Leak", *Science*, vol. 330, núm. 6004, p. 634, octubre de 2010.
- DITTMAR, M. [Dit-2009], "The Future of Nuclear Energy: Facts and Fiction": Chapter I: "Nuclear Fission Energy Today" (<http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0908/0908.0627v1.pdf>, arXiv: 0908.0627, agosto de 2009); Chapter II: "What is known about Secondary Uranium Resources?" (<http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0908/0908.3075v1.pdf>, arXiv:0908.3075v1, agosto de 2009); Chapter III: "How (un)reliable are the Red Book Uranium Resource Data?" (<http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0909/0909.1421v1.pdf>, arxiv.org/abs/0909.1421, septiembre de 2009) Chapter IV: "Energy from Breeder Reactors and from Fusion?" (<http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0911/0911.2628v1.pdf>, arXiv:0911.2628v1, noviembre de 2009).
- DUARTE, C. M.(coord.) [Dua-2009], "Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra", CSIC, Madrid, 2009.
- DUCH GUILLOT, G.; FERNÁNDEZ SUCH, F. [Duc-2010], "L'agroindústria sota sospita", *Quaderns de Cristianisme i Justícia*, 171. Barcelona, 2010. <<http://www.fespinal.com/espinal/lib/ct171.pdf>>.
- DUNCAN, R. [Dun-2001], "World Energy Production, Population Growth, and the Road to the Olduvai Gorge", *Population and Environment*, vol. 22, núm. 5. Palo Alto (EUA), 2001.

- DYNI, J.R. [Dyn-2006], "Geology and Resources of Some World Oil-Shale Deposits", Scientific Investigations Report 2005-5294, USGS, Reston (Virginia, EUA), 2006.
<http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5294/pdf/sir5294_508.pdf>.
- EWG, ENERGY WATCH GROUP (ZITTEL, W.; SCHINDLER, J.) [EWG-2006], "Uranium Resources and Nuclear Energy", EWG-Paper No 1/06, desembre de 2006.
<<http://www.energywatchgroup.org/Topics.55+M5d637b1e38d.0.html>>.
- EWG, ENERGY WATCH GROUP (ZITTEL, W.; SCHINDLER, J.) [EWG-2007], "Coal: Resources and Future Production", EWG-Paper No 1/07, març de 2007.
<<http://www.energywatchgroup.org/Topics.55+M5d637b1e38d.0.html>>.
- EWG, ENERGY WATCH GROUP (SCHINDLER, J.; ZITTEL, W.) [EWG-2008], "Crude Oil: The Supply Outlook", Energy Watch Group, 2008/02/11 LBST.
<<http://www.energywatchgroup.org/Topics.55+M5d637b1e38d.0.html>>.
- FAO (WIEBE, K., coord.) [FAO-2008], "The State of Food and Agriculture. Biofuels: Prospects, risks and opportunities". FAO, Roma, 2008.
<<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0100e/i0100e.pdf>>.
- FAO (IERSEL, S. VAN; FLAMMINI, A., coord.) [FAO-2010], "Algae-Based Biofuels: Applications and co-products". Environment and Natural Resources Management, Working Paper 44. FAO, Roma, 2010.
- FAOSTAT [FAOSTAT-2011], FAO, Roma 2011.
FAOSTAT <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>: cultius (superfície i producció), ramaderia (caps i producció), entre d'altres.
PopSTAT <<http://faostat.fao.org/site/452/default.aspx>>: població, homes i dones, població urbana i rural, població econòmicament activa i econòmicament activa en l'agricultura.
ResourceSTAT <<http://faostat.fao.org/site/405/default.aspx>>: dades sobre la Terra; també: aigua, fertilitzants, plaguicides, maquinària, mà d'obra.
ForestSTAT <<http://faostat.fao.org/site/630/default.aspx>>: produccions forestals.
- GARCÍA ACOSTA, G.; RIBA ROMEVA, C. [Gar-2010], "From Anthropocentric Design to Eco-spheric Design: Questioning Design Epicentre", *11th International Design Conference*. p. 29-37. The Design Society, Dubrovnik 2010.
- GEOCARB III (BERNER, R.A.) [GEOCARB III-2002], "GEOCARB III: A Revised Model of Atmospheric CO₂ over Phanerozoic Time". World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, and NOAA Paleoclimatology Program.
<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate_forcing/trace_gases/phanerozoic_co2.txt>
Referència original: BERNER, R.A.; KOTHAVALA, Z., "GEOCARB III: A Revised Model of Atmospheric CO₂ over Phanerozoic Time", *American Journal of Science*, vol. 301, p.182-204, febrero de 2001.
- GFN (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK) [GFN-2010], "Harmonizing the National Footprint Accounts with the System of Integrated Environmental and Economic Accounting", 5a Reunió de la UNCEEA, Nova York, 23-25 de juny de 2010.
<<http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/ceea/meetings/UNCEEA-5-11.pdf>>.
- GORE, AL [Gor-2009], "La nostra opció. Un pla per resoldre la crisi climàtica", Edicions 62 i Editorial Gedisa S.A., 2010. (títol original "Our Choice. A Plan to Solve the Climate Crisis").
- GREET, [GREET-2008], "Transportation Fuel Cycle Analysis Model, GREET 1.8b" (publicat el 5 de setembre de 2008), Argonne National Laboratory, Argonne, 2008,
<http://www.transportation.anl.gov/modeling_simulation/GREET/index.html>.
- HALL, C., CLEVELAND, C.J. AND KAUFMANN, R. [Hal-1986], "Energy and Resource Quality", Wiley-Interscience, Nova York, 1986 (segona edició, University Press of Colorado, 1992).

- HAMMOND, G.; JONES, C. [Ham-2008], "Inventory of Carbon & Energy" (ICE), versió 1.6a. Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Energy, University of Bath, Regne Unit, 2008. <<http://people.bath.ac.uk/cj219/>>.
- HERWEYER, M.C.; GUPTA, A. [Her-2008], "Unconventional Oil: Tar Sands and Shale Oil, apèndix D": *The Oil Drum*, 2008, <<http://www.theoil Drum.com/node/3839>>.
- HIRSCH, H., et. al. [Hir-2007], "Los peligros de la energía nuclear", Greenpeace, 2007.
- HÖÖK, M.; ALEKLETT, K. [Höö-2009], "A review on coal-to-liquid fuels and its coal consumption", *International Journal of Energy Research*, John Wiley & Sons, Ltd., 1099-114X, 0363-907X, <<http://dx.doi.org/10.1002/er.1596>>.
- HUBBERT, M.K. (dir.), et. al. [Hub-1962], "Energy Resources. A report to the Committee on Natural Resources", Publication 1000-D, National Research Council – National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1962.
- IAEA [IAEA-2010], "Nuclear Power Reactors In The World, Edition 2010" (Reference Data Series No 2), publicat per l'Agència Internacional de l'Energia Nuclear, 2008. <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/iaea-rds-2-30_web.pdf>
- IAEA [IAEA-RB- 2007], "Uranium 2007: Ressources, Production and Demand", (conegut també com a "Red Book 2007"), Informe conjunt de NEA-IAEA (Agència de l'Energia Nuclear-OCDE i Agència Internacional de l'Energia Nuclear-NU) i publicat per IAEA, 2008.
- IEA-ETSAP [IEA-ETSAP-XXX-2009], XXX=: P01, "Conventional oil and gas production; P02, Non-conventional oil and gas production"; E01, "Coal fired power"; E02, "Gas-Fired Power"; E03, "Nuclear Power"; E04, "Combined Heat and Power"; E05, "Biomass for Heat and Power"; E06, "Geothermal Heat and Power"; E07, "Hydropower"; E08, "Marine Energy"; E14, "CO₂ Capture and Storage (CCS)"; S01, "Synthetic Production of Gas from Coal"; S02, "Liquids Fuel Production from Coal and Gas". Agència Internacional de l'Energia (Energy Technology Systems Analysis Program - ETSAP), 2010. <<http://www.etsap.org/index.asp>>.
- IEA-OES [IEA-OES-2009], "Implementing Agreement on Ocean Energy Systems" (OES-IA). Annual Report 2009. Agència Internacional de l'Energia. <<http://www.iea-oceans.org/>>.
- IEA [IEA-WEO-1998], "World Energy Outlook", edició de 1998. Agència Internacional de l'Energia (IEA-AIE). <http://www.manicore.com/fichiers/world_energy_outlook_1998.pdf>. (<<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/1990/weo1998.pdf>>, 2009).
- IEA [IEA-WEO-2006], "World Energy Outlook", edició de 2006. Agència Internacional de l'Energia (IEA-AIE). <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/weo2006.pdf>>.
- IEA [IEA-WEO-2008], "World Energy Outlook", edició de 2008. Agència Internacional de l'Energia (IEA-AIE). <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf>>.
- IEA [IEA-WEO-2009], "World Energy Outlook", edició de 2009. Agència Internacional de l'Energia (IEA-AIE). <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/weo2009.pdf>>.
- IEA [IEA-WEO-2010], "World Energy Outlook", edició de 2010. Agència Internacional de l'Energia (IEA-AIE). <<http://www.worldenergyoutlook.org/2010.asp>>.
- IPCC (METZ, B.; DAVIDSON, O.; DE CONINCK, H.; editors) [IPCC-2005], "IPCC Special Report On Carbon Dioxide Capture And Storage, Annex I. Properties of CO₂ and carbon-based fuels", IPCC, 2005. <<http://www.ipcc-wg3.de/publications/special-reports/special-report-on-carbon-dioxide-capture-and-storage>>.
- IPCC (SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M., et al.) [IPCC-AR4-WGI-TS-2007], "Technical Summary. A: Climate Change 2007: The Physical Science Basis". Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change [SALOMON, S., et al.]. Cambridge University Press, Cambridge, Regne Unit i Nova York, EUA, 2007. <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ts.html>.
- IPCC (JENSEN, E.; OVERPECK, J., et al.) [IPCC-AR4-WGI-C6-2007], "Paleoclimate" (capítol 6) A: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SALOMON, S., et al.]. Cambridge University Press, Cambridge, Regne Unit i Nova York, EUA, 2007. <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch6.html>.
- IPCC (DENMAN, K.L.; BRASSEUR, G., et al.) [IPCC-AR4-WGI-C7-2007], "Couplings between Changes in the Climate System and Biogeochemistry" (capítol 7). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch7.html>.
- IPCC (PACHAURI, R.K.; REISINGER, A. (ed.)) [IPCC-AR4-SR-2007], "Climate Change 2007: Synthesis Report", Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Ginebra, Suïssa, 104 pàg. <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html>.
- KENWARD, M. [Ken-1976], "Potential Energy: An Analysis of World Energy Technology". Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- KIEHL, J. T.; TRENBERTH, K. E. [Kie-1997], "Earth's Annual Global Mean Energy Budget", *Bulletin of the American Meteorology Society*, núm. 78, p.197-208, Boston, 1997.
- KLARE, M.T. [Kla-2008], "Planeta sediento, recursos menguantes. La nueva geopolítica de la energía", Ediciones Urano S.A., Barcelona, 2008.
- KUBISZEWSKI, I.; CLEVELAND, C.J. [Kub-2008], "Energy return on investment (EROI) for wind energy", *The Encyclopaedia of Earth*, <[http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_\(EROI\)_for_photovoltaic_energy](http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_(EROI)_for_photovoltaic_energy)>.
- KUBISZEWSKI, I.; CLEVELAND, C.J. [Kub- 2009], "Energy return on investment (EROI) for photovoltaic energy", *The Encyclopaedia of Earth*. <[http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_\(EROI\)_for_photovoltaic_energy](http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_(EROI)_for_photovoltaic_energy)>.
- KUBISZEWSKI, I.; CLEVELAND, C.J.; ENDERS P.K. [Kub-2010], "Meta-analysis of net energy return for wind power systems", *Renewable Energy* No 35 pp. 218–225, 2010.
- LAHERRÈRE, J. H. [Lah-2008], "Essai de perspectives energetiques", Seminari TOTAL Marketing, Deauville (França), 2008. <http://aspofrance.viabloga.com/files/JL_Deauville_2008.pdf>.
- LAHERRÈRE, J. H. [Lah-2009], "Creaming Curves & Cumulative Discovery at End 2007 by Continents", ASPO (França) 2009. <http://aspofrance.viabloga.com/files/JL_cream_end2007.pdf>.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. [Lop-2002], "Erosión y desertificación. Heridas de la Tierra", Nivola Libros y Ediciones S.L., Tres Cantos (Madrid), 2002.
- LOVELOCK, J. E. [Lov-1988], "The Ages of Gaia". Oxford University Press, 1988. (versió en castellà: "Las edades de Gaia. Una biografía de nuestro planeta vivo" (4a edició, 2007), Tusquets Editores S.A., Barcelona, 1993).
- LOZANO LEYVA, M. [Loz-2010], "Nucleares, ¿por qué no? Cómo afrontar el futuro de la energía". Ed. Debolsillo, Barcelona, 2010.
- MARTÍNEZ, I. [Mar-2011], "Termodinámica: básica y aplicada". Editorial Dossat S.A., Madrid, 1992 (exhaurit). N'hi ha una edició actualitzada, traduïda a l'anglès amb el títol "Isidoro

- Martínez' lectures on Thermodynamics" (capítol 17: "Thermodynamics of power generation") a: <<http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html>>, 2011.
- MCNEILL, J.R. [Mcn-2003], "Algo nuevo bajo el sol. Historia medioambiental del mundo en el siglo XX", Alianza Editorial S.A., Madrid, 2003.
- MÉRENNE-SCHOUMAKER, B. [Mer-2007], "Géographie de l'énergie. Acteurs, lieux et enjeux", Éditions Belin, Paris, 2007.
- MIT (director executiu: BECKJORD, E.S.) [MIT-2003], "The Future of Nuclear Power (An Interdisciplinary MIT Study)", Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2003.
- MUI, S.; TONACHEL, L.; MCENANEY, B.; SHOPE, E. [Mui-2010], "GHG Emission Factors for High Carbon Intensity Crude Oil", Natural Resources Defense Council, NRDC, juny de 2010. <<http://www.circleofblue.org/waternews/wp-content/uploads/2010/08/NRDC-ghg-emissions-report-from-unconventional.pdf>>.
- OBSERV'ER; [Obs-2010], "Worldwide electricity production from renewable energy sources Twelfth Inventory - Edition 2010", Observ'ER (associació amb seu a París que informa i promou energies renovables), <<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Eng/conclusion.asp>>.
- PRIETO, P. [Pri-2008], "La última gran esperanza negra (El yacimiento petrolífero Carioca en las costas de Brasil a la luz de la desinformación mediática y la especulación bursátil)", *Rebelión*, 18 d'abril de 2008. <<http://www.rebelion.org/noticia.php?id=66169>>.
- REEBURG, W.S. [Reeb-1997], "Figures Summarizing the Global Cycles of Biologically Active Elements". <<http://www.ess.uci.edu/~reeburgh/figures.html>>, 2011.
- REES, W.E. [Ree-1992], "Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out", *Environment and Urbanization*, vol. 4, núm. 2, octubre de 1992. <http://phobos.ramapo.edu/~vasishth/Readings/Rees-Ecol_Footprints+Carrying_Capacity.pdf>.
- REN21 [REN21-2010], "Renewables 2010, Global Status Report", REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), 2010. <http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf>.
- RIBA ROMEVA, C. [Rib-2007], "Disseny de màquines IV. Selecció de materials". Edicions UPC, Col·lecció TEM (Temes d'Enginyeria Mecànica), núm. 20, Barcelona, 2007.
- RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, J. [Rod-2010], "Ecología" (2a ed.), Ediciones Pirámide, Madrid, 2010.
- RUDDIMAN, W.F. [Rud-2005], "Los tres jinetes del cambio climático. Una historia milenaria del hombre y el clima" (títol original: "Plows, Plagues and Petroleum. How Humans Took Control of Climate"), Turner Publicaciones S.L., Madrid, 2005.
- RUIZ, VALERIANO [Rui-2006], "El reto energético. Opciones de futuro para la energía", Editorial Almuzara S.L., 2006.
- SAMARAS, C.; MEISTERLING, K. [Sam-2008], "Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emission from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy", *Environmental Science & Technology*, vol. 42, núm. 9, p. 3179-3176, University of Iowa (EUA).
- SASOL (MULDER, H.) [SAS-2009], "Coal-to-Liquid: can CO₂ emissions be significantly reduced?" (presentació PowerPoint), empresa sudafricana SASOL Technologfy Ltd., 2009. <<http://www.engr2.pitt.edu/pcc/2009/2009%20Plenary%20Presentations/Mulder.Presentation.pdf>>.
- SCOPE (BOLIN, B., et. al.) [SCOPE13-1979], "The Global Carbon Cycle, Life Cycle", Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE 13), Wiley, 1979. <<http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope13/index.html>>.

- SCOPE (BOLIN, B.; COOK, R.B.) [SCOPE21-1983], "The Major Biogeochemical Cycles and Their Interactions", Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE 21), Wiley, 1983. <<http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope21/index.html>>.
- SOVACOO, B.K.; [Sov-2008], "Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey", *Energy Policy*, 36, 2008, p. 2940-2953. <http://www.nirs.org/climate/background/sovacool_nuclear_ghg.pdf>.
- STORM VAN LEEUWEN, J.W. [Sto-2006], "Energy from Uranium", publicat per Oxford Research Group, 2006. <<http://www.stormsmith.nl/>>
- STORM VAN LEEUWEN, J.W. [Sto-2007], "Nuclear Power – The Energy Balance". Part A: "Nuclear power in its global context" (octubre de 2007). Part B: "The reference reactor" (octubre de 2007). Part C: "Energy analysis – The method" (octubre de 2007). Part D: "Uranium" (octubre de 2007). Part E: "Energy analysis – Process data" (octubre de 2007). Part F: "Reactor: construction, operation, maintenance and refurbishments, decommissioning and dismantling" (desembre de 2007). Part G "Energy analysis – Results" (gener de 2008); Part H: "The future of nuclear power" (febrer de 2008). Treball original de J.W. Storm van Leeuwen i Philip Smith, agost de 2005, <<http://www.stormsmith.nl/>>.
- STOUT, B.A.; MYERS, C.A.; HURARS, A.; FAIDLEY, L.W. [Stou-1979], *Energy for World Agriculture*, FAO, 1979.
- ŠŮRI, M.; HULD, T.A.; DUNLOP, E.D.; OSSENBRINK, H.A. [Sur-2007], "Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries". *Solar Energy*, 81, 1295-1305. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.007>>.
- USGS [USGS-1980], "Principles of a Resource/Reserve Classification for Minerals". United States Geological Survey, USGS Circular 831, editada el 1980. <http://www.jorc.org/pdf/1980_usgs-usbm_circular_831.pdf>.
- USGS [USGS-2008], "Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle". United States Geological Survey, USGS Fact Sheet 2008-3049, <<http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/fs2008-3049.pdf>>.
- WACKERNAGEL, M.; REES, W.E. [Wac-1996], "Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth"; New Society Publishers, Canadà, 1996.
- WEC [WEC-2007], "Survey of Energy Resources". World Energy Council, 2007. <http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf>.
- WEC [WEC-2010], "Survey of Energy Resources". World Energy Council, 2010. <http://www.worldenergy.org/documents/ser_2010_report.pdf>.
- WNA [WNA-2010], "Supply of Uranium", World Nuclear Association. <<http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>> (actualitzada a desembre de 2010).
- WTW [WTW-2007], "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context. WELL-to-WHEELS Report", versió 2c, març de 2007, JRC/IES-EU, CONCAVE, EUCAR. <<http://ies.jrc.ec.europa.eu/jec-research-collaboration/downloads-jec.html>>.
- WTW [WTW-TTW-2007], "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context. TANK-to-WHEELS Report", versió 2c, març de 2007, JRC/IES-EU, CONCAVE, EUCAR. <<http://ies.jrc.ec.europa.eu/jec-research-collaboration/downloads-jec.html>>.
- WTW [WTW-WTT-2007], "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context. WELL-to-TANK Report", Versió 2c, març de 2007, JRC/IES-EU, CONCAVE, EUCAR. <<http://ies.jrc.ec.europa.eu/jec-research-collaboration/downloads-jec.html>>.

- WTW [WTW-WTT1-2007], "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power-trains in the european context. WELL-to-TANK Report; Appendix 1, Description of individual processes and detailed input data", versió 2c, març de 2007, JRC/IES-EU, CONCAVE, EUCAR.
<<http://ies.jrc.ec.europa.eu/jec-research-collaboration/downloads-jec.html>>.
- WTW [WTW-WTT2-2007], "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power-trains in the european context. WELL-to-TANK Report; Appendix 2, Description and detailed energy and GHG balance of individual pathways", versió 2c, març de 2007, JRC/IES-EU, CONCAVE, EUCAR.
<<http://ies.jrc.ec.europa.eu/jec-research-collaboration/downloads-jec.html>>.
- WWEA, World Wind Energy Association [WWEA-2009], "La energía eólica en el mundo. Informe 2008", WWEA, Bonn (Alemanya), febrer de 2009.
<http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2008_es.pdf>.
- WWF (WORLD WIDE FUND FOR NATURE) [WWF-2010], "Living Planet Report 2010. Biodiversity, biocapacity and development". WWF org., Suïssa, 2010.
<<http://assets.panda.org/downloads/lpr2010.pdf>>.

Principals fonts d'informació utilitzades

CDIAC (CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, EUA)

És un centre americà que compta amb el suport del Departament d'Energia del Govern dels Estats Units i li proporciona dades sobre els gasos d'efecte hivernacle i el canvi climàtic. Com altres institucions americanes d'aquest tipus, fa pública la seva informació.

Per tal d'estimar les emissions passades i els combustibles ja utilitzats, ha estat de gran utilitat la seva base de dades sobre les emissions de CO₂ al llarg del temps (dades anuals que, en alguns casos, es remunten fins al 1751), per països i per causes que les originen. Concretament, la combustió del carbó, del petroli i del gas natural, la producció de ciment i la crema de gas natural no usat (*flaring*).

<<http://cdiac.ornl.gov/>>

També és interessant la informació que el CDIAC proporciona sobre el cicle del carboni (*carbon budget*) i les seves modificacions recents.

<<http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/09/data.htm>>

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY

Departament de Comerç del Govern dels Estats Units / National Oceanic & Atmospheric Administration / NOAA Research.

Proporciona informació actualitzada sobre les evolucions mensuals de les concentracions de CO₂ a l'atmosfera (en ppm) al Mauna Loa Observatory (Hawaii) i també valors mitjans en diferents punts de la superfície marina. Alhora, també proporciona l'augment anual en ppm per a aquestes dues avaluacions.

<<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>

EIA, ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION

Departament d'Energia (DOE) del Govern dels Estats Units. Té com a subtítol: "Independent Statistics and Analysis".

Proporciona una informació molt completa sobre temes relacionats amb l'energia per als Estats Units i també per al conjunt del món (és la informació que s'ha utilitzat majoritàriament en aquest treball).

<<http://www.eia.doe.gov/>>

Aquesta font d'informació té els dos avantatges següents: 1) Les seves dades estadístiques bàsiques són de lliure accés (sèries molt completes des de 1980 fins a 2008). 2) Adopta el criteri d'establir l'equivalent tèrmic per a les energies elèctriques d'altres orígens (electrohidràulica i noves energies elèctriques renovables no hidràuliques). No obstant això, presenta dos inconvenients: 1) Proporciona les dades en unitats allunyades del SI: el petroli, en barrils (b); el gas natural, en peu cúbics (cf); el carbó, en tones curtes (st); l'energia tèrmica, en *British thermal units* (BTU); això ha obligat a presentar un annex d'equivalències d'unitats i mesures. 2) No dona dades de la biomassa tradicional (només per als EUA).

Presenta la producció o la generació d'energies per tipus, regions i països, i els continguts energètics de les diferents fonts, les emissions de CO₂ generades per les diferents fonts i la població per països i regions. Les dades de l'EIA s'han utilitzat com a base en aquest estudi.

<<http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm>>

Entre altres publicacions, anualment presenta l'*International Energy Outlook* (IEO-any), on, entre d'altres informacions, estableix les projeccions sobre l'evolució de la producció i els consums d'energia en un termini de vint anys o més.

<<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/>>

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION

ONU (Organització de les Nacions Unides per a l'Alimentació i l'Agricultura)

La FAO, fundada el 1945 i amb seu a Roma, duu a terme accions internacionals encaminades a eradicar la fam. Actua com un fòrum neutral on tots els països (desenvolupats i en via de desenvolupament) es reuneixen per negociar acords i debatre polítiques, i fa especial atenció a les zones rurals i als països pobres.

<http://www.fao.org/index_es.htm>

La FAO té diverses bases de dades estadístiques de gran interès a escala mundial: FAOSTAT, estadístiques d'agricultura, nutrició, productes pesquers, productes forestals, ajuda alimentària, aprofitament de terres i població; AQUASTAT, sistema d'informació global sobre l'ús de l'aigua a l'agricultura i al medi rural; TERRASTAT, informació de les limitacions principals dels sòls i els efectes de l'acció de l'home.

Les bases de dades de la FAO proporcionen dades molt interessants per avaluar els usos del sòl, les produccions agrícoles i ramaderes, els actius agraris i la mecanització, la dinàmica i els usos dels boscos o la disponibilitat i l'ús de les aigües. Les dades de la FAO han estat utilitzades en diversos capítols d'aquest treball.

<<http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=291&lang=es>>

IAEA, AGÈNCIA INTERNACIONAL DE L'ENERGIA ATÒMICA

(International Atomic Energy Agency, ONU)

Organització especialitzada de les Nacions Unides amb seu a Viena, actualment amb 144 estats membres, que té per objecte "accelerar i augmentar la contribució de l'energia atòmica a la pau, la salut i la prosperitat arreu del món". El seu estatut fou aprovat l'octubre de 1956 per 81 països i va entrar en vigor el juliol de 1957.

<<http://www.iaea.org/>>

Des de 1965, l'Agència per a l'Energia Nuclear (*Nuclear Energy Agency*, NEA), creada el 1958 per l'OCDE, fa revisions periòdiques, junt amb la IAEA i en col·laboració amb els estats membres, dels recursos, la producció i la demanda d'urani (1965, 1967, 1970, 1973, 1976, 1977, 1979, 1982, 1983, 1986, 1988, 1989, i, darrerament cada dos anys: 1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007 i 2009), en un informe conegut com a Llibre Vermell (o *Red Book*).

<<http://www.oecdbookshop.org/>>

IEA-AIE, AGÈNCIA INTERNACIONAL DE L'ENERGIA

(International Energy Agency, OCDE)

És una organització intergovernamental amb seu a París, fundada arran de la crisi del petroli de 1973-1974, que actua com a assessora en polítiques energètiques per als seus 28 països membres (Alemanya, Austràlia, Àustria, Bèlgica, Canadà, Corea del Sud, Dinamarca, Eslovàquia, Espanya, Estats Units d'Amèrica, Finlàndia, França, Grècia, Holanda, Hongria, Irlanda, Itàlia, Japó, Luxemburg, Noruega, Nova Zelanda, Polònia, Portugal, Regne Unit, República Txeca, Suècia, Suïssa i Turquia). La seva funció inicial fou *coordinar mesures en temps d'emergència en el subministrament de petroli*, que va ser ampliada amb noves activitats relacionades amb la *seguretat energètica*, el *desenvolupament econòmic* i la *protecció ambiental*.

La IEA-AIE és una de les principals fonts d'informació de què es disposa sobre energia. Tanmateix, presenta dos inconvenients: 1) La documentació i les dades, especialment pel que fa a sèries històriques, les ven a preus no assumibles per als particulars. 2) Suma potència tèrmica (W_t) i potència elèctrica (W_e), criteri que no compartim ja que disminueix molt l'efecte d'energies com la hidroelèctrica, l'eòlica o la fotovoltaica.

En canvi, és l'única de les grans fonts d'informació que proporciona dades sobre la *biomassa tradicional*. El primer estudi consistent que hem trobat sobre el tema és el capítol 10 ("Biomass") del *World Energy Outlook 1998*. En aquest capítol, es posa de manifest que la biomassa representa el 14% del consum d'energia mundial (més que el carbó i el gas natural, i comparable a l'electricitat). I que, en els països en via de desenvolupament (on viu el 75% de la humanitat), la biomassa (llenya, carbó vegetal, residus de collites i restes d'animals) cobreix, de mitjana, 1/3 del consum total d'energia i prop de 3/4 parts de l'energia utilitzada a les llars per cuinar i escalfar-se.

En un moment d'aquest capítol (pàgina 158) es diu: "Malgrat el seu significat a escala mundial i la seva importància per als països en via de desenvolupament, moltes de les fonts estadístiques globals sobre energia solen tractar la biomassa com una nota a peu de pàgina. Aquesta exclusió se sol justificar pel fet que les dades sobre biomassa tradicional són massa escasses i poc fiables per presentar-se al costat de les dades sobre l'energia comercial." I més endavant (pàgina 161) afegeix: "Per primera vegada, la IEA ha preparat una base de dades sobre l'ús d'energia de biomassa, en què s'inclouen dades de més de 100 països fora de l'OCDE."

Tanmateix, més endavant, la IEA-AIE integra en un mateix apartat, anomenat CR&W (*combustible renewables & waste*, combustibles renovables i residus), tant la *biomassa tradicional*, com els *biocombustibles* i l'*energia dels residus industrials i urbans*, cosa que novament dificulta destriar cada un d'aquests termes, sinó és per països o per regions. En tot cas, cal acudir a una informació més detallada, que s'ha d'adquirir a preus elevats.

<<http://www.iea.org/>>

IEA-ETSAP (ENERGY TECHNOLOGY SYSTEMS ANALYSIS PROGRAMME)

És un programa establert per l'Agència Internacional de l'Energia (IEA) el 1976 que té per objecte analitzar les capacitats dels diferents sistemes d'energia, des dels punts de vista econòmic, mediambiental i tecnològic, en un àmbit multinacional. Funciona com un consorci de cooperació entre equips dels diferents països membres, en el qual són invitats d'altres grups o persones, per tal d'obtenir anàlisis consistents sobre les realitats energètiques.

<<http://www.etsap.org/E-techDS/>>

IPCC, GRUP INTERGOVERNAMENTAL D'EXPERTS PER AL CANVI CLIMÀTIC, ONU (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE)

Fundat el 1989 i amb seu a Ginebra (Suïssa), constitueix el cos d'assessorament per al canvi climàtic del Programa de les Nacions Unides per al Medi Ambient (PNUMA, o UNEP: *United Nations Environment Programme*) i l'Organització Meteorològica Mundial (WMO), amb vista a proporcionar al món una visió clara i científica sobre l'estat del clima i les seves conseqüències mediambientals i socioeconòmiques potencials.

Els documents principals de l'IPCC són els *assessment reports*. N'ha emès quatre: *IPCC First Assessment Report 1990* (FAR); *IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995* (SAR); *IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001* (TAR), i *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007* (AR4). Els escenaris que s'han reproduït en aquest treball han estat extrets del darrer informe (AR4).

<<http://www.ipcc.ch/>>

El Joint Research Centre (JRC) és una direcció general de la Comissió Europea que té com a objectiu proporcionar un suport tècnic i científic específic per a la concepció, el desenvolupament, la implementació i el control de les polítiques de la Unió Europea.

L'Institute for Environment and Sustainability és un dels set instituts que configuren el JRC i s'orienta a les polítiques per a la protecció i el desenvolupament sostenible del medi ambient a Europa i arreu del món. Fou creat l'any 2001, té més de 400 empleats i un pressupost de 45 M€/any, i la seu és a Ispra (Llac Major, Itàlia).

Se centra en set camps d'activitat: 1) Ús sostenible dels recursos naturals: aigua, sòl i boscos. 2) Agricultura sostenible i desenvolupament rural. 3) Mitigació i adaptació al canvi climàtic. 4) Riscos ambientals i perills naturals. 5) Transport sostenible i qualitat de l'aire. 6) Dimensió ambiental de la cooperació per al desenvolupament. 7) Monitoratge ambiental i sistemes d'informació: GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) i INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*).

<<http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm>>

Well-to-Wheels Report

EUCAR (European Council for Automotive R&D, associació dels principals fabricants europeus d'automòbils, amb seu a Brussel·les) i CONCAWE (associació de companyies petrolieres líders que operen a Europa, creada el 1963), junt amb IES-JRC (Comissió Europea), fan una avaluació de l'energia i de les emissions de gasos d'efecte hivernacle en tot el cicle d'ús dels vehicles automòbils (WTW, *well-to-wheels*, del *pou a les rodes*) per a una àmplia gamma de combustibles i de sistemes d'accionament actuals o amb un potencial futur d'aplicació.

La primera versió de l'informe es va publicar el 2003; la segona, el 2007, i actualment s'està completant la tercera edició.

<<http://ies.jrc.ec.europa.eu/jec-research-collaboration/downloads-jec.html>>

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)

Inclou un inventari de base cartogràfica dels recursos d'energia solar i l'avaluació de la generació d'electricitat a partir dels sistemes fotovoltaics a Europa, Àfrica i el sud-est asiàtic. És una part de l'acció SOLAREC, que contribueix aplicar les energies renovables a la Unió Europea com una font d'energia sostenible i de llarg termini. Aquest sistema conté uns mapes interactius que permeten fer-ne avaluacions.

<<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>>

NASA. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION

Agència governamental dels Estats Units d'Amèrica (EUA) fundada el 1958 i que és responsable del programa de recerca i exploració espacial i d'aeronàutica civil. El febrer de 2006, la NASA descriu la seva missió en aquests termes: "Avançar-se al futur en l'exploració espacial, en el descobriment científic i en la investigació aeronàutica."

En la seva trajectòria, la NASA ha liderat els esforços dels Estats Units en l'exploració espacial, amb les missions a la Lluna de l'*Apollo*, l'estació espacial *Skylab* i, més tard, el transbordador espacial. Actualment, la NASA dona suport a l'Estació Espacial Internacional i ha desenvolupat la nau espacial tripulada *Orion*.

D'altra banda, els desenvolupaments científics de la NASA se centren a conèixer millor la Terra a través del sistema d'observació de la Terra (*Earth Observing System*), especialment en heliofísica, com també a explorar el sistema solar i a fer recerques en astrofísica. La NASA comparteix dades amb diverses organitzacions nacionals i internacionals, com el satèl·lit d'observació dels gasos d'efecte hivernacle.

<<http://www.nasa.gov/>>

La base de dades de la NASA, *Surface Meteorology and Solar Energy* (NASA/SEE), conté paràmetres orientats a avaluar i dissenyar sistemes d'energies renovables a totes les regions del món. El conjunt de dades de SSE es formulen a partir dels mesuraments obtinguts dels satèl·lits de la NASA i la seva elaboració posterior. Comprenen el període des del 22 de juliol de 1983 fins al juny de 2005 i els resultats es donen prenent una malla d'1° de latitud i 1° de longitud. També es proporcionen valors mitjans.

<<http://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/espas/world/ION/ion-pwv.html>>

REN21. RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY

Xarxa de polítiques globals que ofereix un fòrum de lideratge internacional en matèria d'energia renovable. És oberta a totes les parts interessades i vol establir contacte amb els governs, les institucions internacionals, les organitzacions no governamentals, les associacions industrials i d'altres associacions i iniciatives. El seu objectiu és impulsar el desenvolupament de polítiques per estendre ràpidament les energies renovables a les economies en via de desenvolupament i a les industrials.

<<http://www.ren21.net/>>

Periòdicament, publica el *Renewables Global Status Report* (anys 2005, 2006, 2007 i 2009), que constitueix una font d'informació sobre aquestes tecnologies d'evolució tan ràpida.

<<http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/tabid/5434/Default.aspx>>

SCOPE. SCIENTIFIC COMMITTEE ON PROBLEMS OF THE ENVIRONMENT

Xarxa mundial de científics i institucions científiques que fan síntesis i revisions del coneixement científic en aspectes que tenen incidència en el medi ambient, o que en poden tenir. Aquest cos de coneixements interdisciplinaris sobre ciències naturals i socials se situa entre les instàncies científiques i les que prenen les decisions.

Entre els treballs de síntesi que ha realitzat, són especialment interessants per al nostre treball els següents: SCOPE 13 (*The Global Carbon Cycle*, 1977), SCOPE 21 (*The Major Biomechanical Cycles and Their Interactions*, 1983) i SCOPE 27 (*Climate Impact Assessment*, 1984).

<<http://www.icsu-scope.org/>>

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY

(Servei Geològic dels Estats Units)

Organisme científic del Govern nord-americà (sense responsabilitat reguladora), creat el 1879 i organitzat en les disciplines de biologia, geografia, geologia i hidrologia, amb l'objectiu de proporcionar informació sobre els recursos naturals, la salut dels ecosistemes i el medi ambient, i sobre els perills dels fenòmens de la natura.

Tot i ser un organisme dels Estats Units, la majoria dels seus estudis abasten territoris molt més extensos i, sovint, tot el planeta, per la qual cosa és un organisme de referència obligada quan es tracta de recursos geològics o de recursos i de reserves d'energia primària.

<<http://www.usgs.gov/>>

WEC. WORLD ENERGY COUNCIL

Fundat el 1923 i amb seu a Londres, el World Energy Council (Consell Mundial sobre l'Energia) és un fòrum global que cobreix tots els tipus d'energia, inclosos el petroli, el gas natural, el carbó, l'energia hidroelèctrica, l'energia nuclear i les diverses energies

renovables. La seva missió és promoure el subministrament d'energia sostenible i la seva utilització en benefici de totes les persones.

El WEC té una xarxa de 93 comitès nacionals que representen més de 3.000 organismes, inclosos governs de països (tant dels grans productors d'energia com dels grans consumidors), institucions especialitzades i indústries.

<<http://www.worldenergy.org/>>

Entre d'altres activitats, el WEC publica el *Survey of Energy Resources* (anàlisi de la situació dels recursos energètics més importants del món), del qual acaba d'editar la 21a edició (2010). Entre molts altres aspectes, aquesta sèrie de documents, iniciada el 1924 (i amb una periodicitat aproximada de cada dos anys), conté avaluacions de les reserves de carbó als diferents països i regions del món, classificades segons carbons bituminosos (inclosa l'antracita), carbons subbituminosos i lignits, que constitueixen una referència mundial per a les reserves d'aquest recurs energètic.

<<http://www.worldenergy.org/publications/>>

El WEC també organitza cada tres anys el Congrés Mundial de l'Energia. La propera edició (la 22a) tindrà lloc a Daegu, Corea del Sud, l'octubre de 2013.



Recursos energètics i crisi

La fi de 200 anys irrepetibles

Els recursos de la natura són finits, especialment les energies no renovables, un fet que no sembla que tinguin en compte molts dels responsables polítics i empresarials. L'autor es pregunta si serà possible mantenir el sistema de desenvolupament industrial iniciat ara fa 200 anys, amb l'explotació del carbó i, més tard, del petroli, del gas natural i de l'urani.

Aquesta anàlisi es basa en dades de les grans agències de l'energia (l'Energy Information Administration, EIA, del Govern dels Estats Units, i l'Agència Internacional de l'Energia, IEA-AIE, de l'OCDE), com també en altres fonts estadístiques reconegudes a escala internacional, convenientment contrastades i reelaborades. Els resultats contradiuen moltes argumentacions oficials. Mostren que la crisi energètica serà profunda i que es manifestarà ja en la dècada actual: els recursos no s'acabaran immediatament, però l'escassetat de l'oferta davant de l'augment de la demanda qüestionarà el paradigma del creixement continu. Se suggereix que la crisi financera n'ha estat un preludi.

La reducció energètica començarà amb el petroli, fet que comportarà la crisi del transport, el fre de les produccions globalitzades i, en darrera instància, la crisi alimentària (també als països desenvolupats!). El canvi climàtic -imparable, segons les tendències analitzades- serà una dificultat afegida a les readaptacions necessàries.

Quin paper podria fer Europa en el futur, amb els recursos energètics ja exhaurits?

Carles Riba Romeva

És Doctor Enginyer Industrial i professor de la UPC des de 1971. L'any 1972 fou enginyer de Seat. De 1979 a 1983, va ser alcalde de Sant Joan Despí i, de 1980 a 1983, vicepresident de la Corporació Metropolitana de Barcelona.

Des de la universitat, fa més de vint-i-cinc anys que col·labora amb empreses i administracions en nombrosos projectes de transferència de tecnologia. Des de 1999, dirigeix el Centre de Disseny d'Equips Industrials de la Universitat Politècnica de Catalunya (CDEI-UPC), acollit a la xarxa TECNIO de la Generalitat de Catalunya.

El 2006 va impulsar la fundació empresarial CEQUIP, orientada a la innovació en béns d'equip.

L'any 1995 va assumir la presidència del Centre d'Estudis Comarcals del Baix Llobregat i, anys més tard, la vicepresidència de la Coordinadora de Centres d'Estudis de Parla Catalana, responsabilitats que encara exerceix. És autor d'una dotzena de llibres tècnics i de nombrosos articles en revistes especialitzades, fonamentalment en el camp del disseny avançat de màquines. També ha escrit articles d'opinió per a la premsa i ha publicat diversos treballs en l'àmbit dels estudis locals.



iniciativa
digital
Publicacions Acadèmiques UPC



CDEI Centre de Disseny d'Equips Industrials
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Institut de Sostenibilitat IS.UPC
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA