

En aquest article introduïm el concepte de taxa de retorn energètic (TRE) i les relacions que aquest concepte, cada cop més utilitzat en els estudis acadèmics sobre recursos energètics, té amb les lleis de la termodinàmica. Un dels problemes actuals fonamentals de la relació existent entre els recursos energètics i el funcionament socioeconòmic és arribar a entendre i quantificar les múltiples interaccions que hi ha entre la complexitat socioeconòmica i la quantitat d'energia necessària per mantenir l'estructura de l'actual sistema financer, econòmic i industrial. Un cop s'ha entès que els recursos energètics no són una mercaderia més del sistema econòmic, sinó que són a la base del funcionament de la societat actual (i de qualsevol altra que històricament puguem considerar) podem comprendre per què la TRE va més enllà dels indicadors econòmics clàssics, incorporant-ne l'ús i l'aprofitament de l'energia. Finalment, veurem com la TRE ens serveix per fer alguns càlculs que ens indicaran les tendències futures del sistema energia-economia-societat.

Introducció

A la física, un mètode general per descriure processos a la natura és estudiar-los com a intercanvis d'energia. Fer-ho d'aquesta manera ens dona un marc de referència i una metodologia que podem aplicar de forma sistemàtica, la qual cosa ens permetrà tenir un formalisme relativament senzill per estudiar processos complexos. En aquest sentit, doncs, podem estudiar els processos biològics, els ecosistemes o la vida segons els principis que regeixen els processos energètics: les lleis de la termodinàmica. Una aplicació interessant de les lleis de la termodinàmica és que ens permeten, sense fer càlculs gaire complicats, definir rangs de les variables implicades en el procés estudiat. En aquest sentit, i partint de la física aplicada a l'ecologia, és com neix el concepte d'energia utilitzable que, en essència, pretén quantificar quina és l'energia que té disponible un ecosistema per portar a terme els processos que hi observem. La taxa de retorn energètic (TRE, EROI o EROEI en anglès: energy return on energy invested) és una mesura introduïda pel professor Charles Hall (Hall, 1972) d'acord amb les idees inicials d'Odum (Hall, 1995) sobre l'ús d'energia en els ecosistemes. La TRE té en compte el que podríem anomenar energia neta o útil. En qualsevol procés físic, per obtenir energia cal invertir-ne una part, i la TRE ens indica la proporció entre l'energia total obtinguda i la invertida a obtenir-la, així:

$$\epsilon = \frac{E_p}{E_i} \quad (1)$$

on ϵ és la TRE, E_p l'energia produïda i E_i l'energia invertida per obtenir E_p . El que realment ens interessa és el que s'anomena energia útil, és a dir, la que finalment queda descomptant la invertida a la produïda:

$$E_u = E_p - E_i \quad (2)$$

si posem l'energia útil (E_u) en funció de ϵ :

$$\epsilon = \frac{E_u + E_i}{E_i} \quad (3)$$

llavors

$$E_u = E_i \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) \quad (4)$$

Per tant, fer estimacions de la TRE ens ajuda a saber quina és l'energia utilitzable en un determinat procés de producció d'energia. Això ens és molt útil, tant per valorar una determinada font energètica (la qual, per ser-ho, ha de tenir una TRE sempre més gran que 1:1) com per fer prediccions del seu comportament en el futur. La TRE es calcula per les quantitats d'energia produïdes i consumides al llarg de tota la vida útil de la font, ja que algunes fonts consumeixen més al començament i en canvi d'altres més tard. Precisar detalladament aquest càlcul de la TRE ens fa veure el caràcter no instantani de la TRE, cosa que en complica el càlcul i, per tant, la falta de propietat, perquè es fa servir fora de l'estat d'equilibri, si no es precisa ben bé què es fa en calcular-la. Aquestes consideracions, però, van més enllà del marc d'aquest article. Una propietat interessant de la TRE és que per a qualsevol procés d'extracció d'energia sempre és una funció decreixent en el temps: tant de forma local com de forma mitjana (per tot el planeta, pel recurs estudiat). Per exemple, en el cas del petroli cru, la TRE al començament de l'exploració d'aquest combustible fòssil era de 100:1, és a dir, per cada 100 unitats energètiques produïdes se n'havia d'invertir una per obtenir-les; actualment, la TRE per al petroli cru s'estima que és al voltant de 20:1. Aquesta evolució decreixent de la TRE, doncs, ens porta necessàriament a una evolució de decreixement d'energia neta, és a dir, d'energia disponible per a la societat, sempre que no s'incrementi l'energia produïda E_p . És a dir, si el ritme de decaïment de la TRE és més ràpid que el de creixement

de la E_p , llavors l'energia neta per a la societat decreixerà i això serà més greu si, a més, la E_p no només no creix sinó que decreix. A la Figura 1 es pot veure quin és el comportament de E_u , l'energia útil (o neta) en funció de la TRE (ϵ). D'una banda, veiem com la disminució de la TRE ens indica el sentit d'evolució del temps i, de l'altra, que a partir de TRE inferiors a 10 la caiguda proporcional en energia útil (E_u) és molt més accentuada que per a variacions de la TRE de la mateixa magnitud, però molt més a prop de 50, per exemple. Aquest decreixement de la TRE amb el temps també s'aplica a l'explotació dels recursos minerals, a causa de la quantitat minvant de recursos que van quedant a mesura que anem explotant el recurs mineral considerat. Perquè la TRE té aquest comportament? Incorporant millores tècniques en el sistema, es podria revertir o, com a mínim, estabilitzar la TRE, de manera que fos constant?

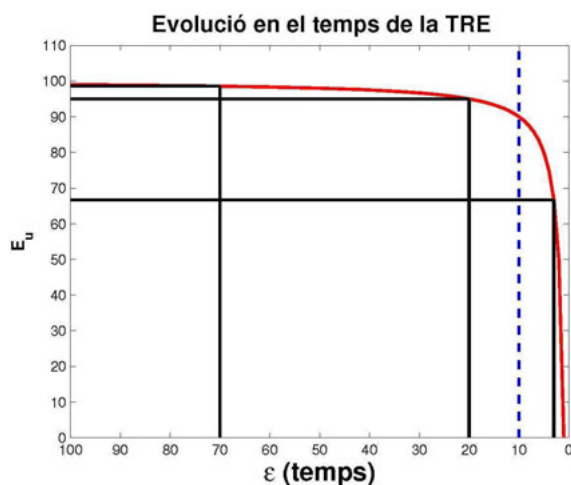


Figura 1: Evolució temporal de la TRE (ϵ) que decreix amb el temps. Veiem com el descens de la TRE a partir de valors de 10 implica descensos molt més grans d' E_u .

La resposta a aquesta pregunta ens la dona el segon principi de la termodinàmica, que identifica la TRE amb el rendiment d'un procés termodinàmic: si volem que el sistema treballi a potències més altes (i això és el que hem anat fent històricament, incrementar la producció i el consum per dia de la quantitat de combustibles fòssils i d'energia total), llavors el rendiment d'aquest procés disminuirà (és a dir, a més potència, menys rendiment). Per a una màquina tèrmica, el rendiment d'un procés serà màxim en el cicle de Carnot i, per aquest cicle, la potència és zero (el cicle de Carnot és un conjunt de processos quasiestàtics que, en integrar-los, donaran un temps infinit per a tot el cicle). Aquest darrer punt és crucial per entendre que, en un recurs energètic, la disminució

de producció d'energia del recurs un cop arribat al màxim (pic de producció) serà molt més ràpida que durant la fase de creixement de la corba de Hubbert (Hubbert, 1956). Si el procés fos reversible i poguéssim considerar només l'evolució instantània, en descendir la potència consumida s'incrementaria el rendiment (la TRE), cosa que suavitzaria el descens i, per tant, faria que la corba de Hubbert fos simètrica. No és així quan anem a models que incorporin una dinàmica raonable del sistema energètic. En aquests models, el descens més brusc i la falta de simetria en la corba, de vegades, són interpretats com un increment de la pol·lució del sistema (la Terra) que acaba revertint en el rendiment. És el que Bardi anomena pena-segat de Sèneca (Bardi, 2012). La pol·lució que comenta Bardi és entesa en un sentit molt ample, que inclou tant la contaminació com la degradació de les infraestructures que formen la part artificial del nostre hàbitat, tant pel que fa al nostre sosteniment directament com pel que fa al manteniment de la nostra capacitat extractiva i productiva. Finalment, podem deduir que, si sempre que mantenim un increment de potència del sistema energètic baixa el rendiment, per molt que hi hagi processos que millorin el rendiment a petita escala (cotxes més eficients, bombetes de baix consum, millora en motors d'explosió, en cèl·lules fotovoltaïques, etc.), aquesta millora no es traslladarà en un increment del rendiment global (pujada de la TRE) mentre continuem incrementant la potència consumida total. És el que es coneix com a paradoxa de Jevons (Jevons, 1865). Així doncs, l'increment d'eficiència per si mateix no ens porta a escenaris on hi haurà un menor consum i, per tant, una menor dependència de l'energia.

Aplicacions

Tenint en compte, doncs, el que hem exposat, ara podem utilitzar aquest concepte fent alguns càlculs, donant rangs de variables i contrastant algunes hipòtesis. Aquí ens plantejarem utilitzar la TRE en tres exemples. En primer lloc, parlarem de les TRE estimades per mantenir la societat i les seves diferents activitats. En segon lloc, considerarem l'aspecte més termodinàmic de la TRE i farem algunes extrapolacions senzilles d'estimacions i projeccions futures pel que fa a la producció d'energia. Finalment, utilitzarem la TRE per calcular els costos energètics de la substitució d'algunes de les fonts energètiques per d'altres. Això darrer és una qüestió important, perquè, d'una banda, els combustibles fòssils són finits i, de l'altra, perquè el petroli cru ja ha arribat al pic de producció. La recerca actual en aquest camp se centra a determinar la TRE de les diferents fonts energètiques (fòssils i renovables) i, a més, a veure si aquesta TRE variaria si substituïssim el petroli cru per una altra font, renovable o no.

TRE mínima pel petroli cru		
	Activitat	TRE
1	Arts i d'altres	14:1
2	Sanitat	12:1
3	Educació	9 ó 10:1
4	Suport familiar als treballadors	7 ó 8:1
5	Cultivar aliments	5:1
6	Transport	3:1
7	Refinat del cru	1.2:1
8	Extracció del cru	1.1:1

Taula 1: Taula que expressa els diferents valors de la TRE per a les diverses activitats de la civilització. Adaptat de Lamber i Lambert (2012) i extret de Prieto i Hall (2013). Els valors de la TRE més alts són més especulatius. Així els valors de 7 i 8 serien els menys especulatius, mentre que els d'1 i 2 els que ho són més.

TRE i societat

El concepte de TRE ens permet pensar en termes energètics relatius (fluxos d'energia més que quantitats absolutes) més enllà del que s'interpreta en termes econòmics clàssics, en parlar de lleis de mercat i quantitats produïdes. Considerar l'energia neta per se no ens diu res, ja que aquesta quantitat creix amb la població i amb els usos; la TRE, però, ens dóna el balanç net del sistema respecte a una referència, i així no depèn ni de la població ni del volum productiu, sinó només d'aquest balanç. Així doncs, una qüestió important que es pot començar a valorar quan hem definit la TRE és: quina energia neta necessita una societat o civilització per poder mantenir-se? Per respondre aquesta pregunta el que es pot fer és estimar la TRE necessària per a les principals activitats socials i econòmiques i veure si es correspon amb les activitats que sabem que s'hi han desenvolupat o s'hi desenvolupen. El problema l'hem traslladat, doncs, a fer un càlcul acurat de la TRE segons les diferents activitats socials. Cal dir també que, com hem vist a la definició, la TRE per a l'activitat social considerada variarà segons la font o recurs energètic utilitzat. Així, doncs, recentment Lambert i Lambert (Lambert, 2012) n'han fet una valoració per a una societat que consumeix petroli cru i que sintetitzem a la Taula 1 (extreta de Prieto i Hall, 2013).

La Taula 1 il·lustra el fet que, com més complexitat social, més energia neta requerida i, per tant, la TRE necessària és més alta (Tainter, 1989). La complexitat socioeconòmica està lligada amb més energia disponible i, per tant, amb un recurs energètic creixent exponencialment que permeti compensar l'efecte de la disminució de la TRE. D'això en deduíem que les diferents societats que històricament s'han col·lapsat, no ho han fet perquè exhaurissin totalment els recursos en els quals es basaven sinó, més aviat, perquè no han estat capaces de compen-

sar la disminució de la TRE que en rebaixava l'energia neta necessària per mantenir-se. Per tant, i insistint en aquest darrer punt, la importància no rau només en els recursos que tinguem a la nostra disposició, sinó a poder compensar el flux decreixent d'energia neta al qual ens aboca la termodinàmica.

TRE i termodinàmica

A la introducció hem vist com la TRE estava relacionada amb el segon principi de la termodinàmica i que aquesta relació ens permetia entendre'n l'evolució temporal decreixent sempre que forcem un increment de potència en el temps. En aquest apartat prendrem les dades del darrer informe de l'Agència Internacional de l'Energia (AIE), a finals de l'any passat (l'anomenat World Energy Outlook, WEO). Així doncs, l'AIE publicava aquest gràfic (Figura 2) pel que fa a la producció dels diferents líquids del petroli.

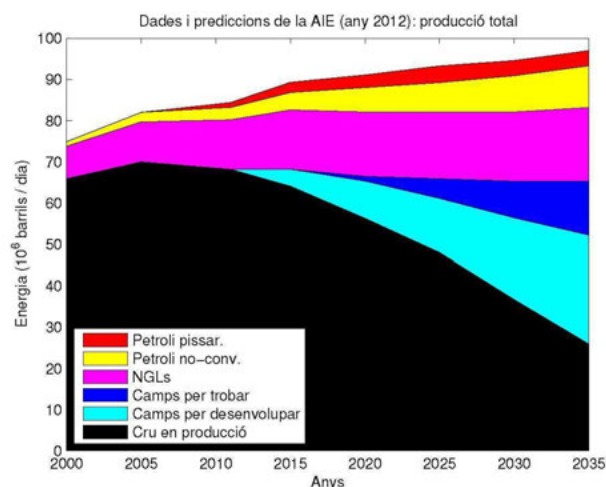


Figura 2: Evolució de la producció en volum dels líquids del petroli segons l'AIE (informe WEO, 2012). En negre tenim la producció de petroli cru; en blau cel, la producció estimada de pous que encara no s'exploten perquè el preu del cru encara no és prou alt; en blau marí, la producció dels pous encara per descobrir; en magenta, tots els líquids que es produeixen quan s'extreu el gas natural però no el gas natural; en groc, els petrolis no convencionals; i en vermell, el petroli de pissarra.

En la Figura 2 tenim la producció històrica, des de l'any 2000, dels diferents líquids del petroli i la projecció de producció fins a l'any 2035. Si ens fixem en el gràfic veiem que, més enllà de les previsions, l'AIE admet que els camps actualment en explotació de cru han arribat al seu màxim de producció i que, per tant, segueixen la cor-

ba de Hubbert. Així doncs, segons aquestes dades, no només els camps de petroli cru en explotació estan en un procés de davallada ràpida, sinó que el petroli cru en conjunt (les tres primeres franges), comptant el que actualment està en explotació, el que està pendent d'explotar i el que encara s'ha de trobar, també està en declinació, ja que passa de 70 Mb/d el 2005 a 65 Mb/d el 2035. Una davallada encara lleugera, però un reconeixement significatiu per part de l'AIE, que fa tan sols sis anys estimava produccions per al 2035 un 25 % més altes que les que dóna avui en dia. D'altra banda, aquest gràfic, que indica el volum per dia (milions de barrils de petroli per dia), caldria que l'expresséssim en unitats d'energia, perquè no totes aquestes fonts tenen la mateixa quantitat d'energia per unitat de volum. Així doncs, si la normalitzem a l'equivalent en cru, tindrem l'energia total produïda, el que anomenàvem en la introducció E_p , que hem representat en la Figura 3. Per obtenir aquestes dades hem estimat un 70 % de reducció de densitat energètica (energia per unitat de volum) respecte al petroli cru, tant dels líquids del gas natural com dels petroli no convencionals i el de pissarra.

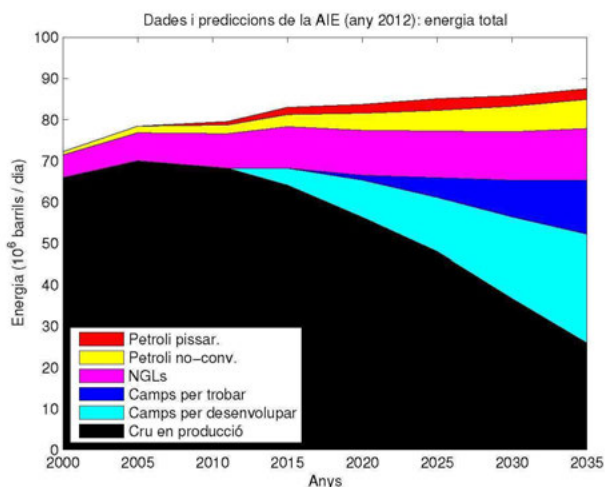


Figura 3: Evolució de la producció d'energia total de combustibles fòssils segons l'AIE. A diferència de l'anterior, aquí la producció d'energia no passa dels 90 milions de barrils diaris en total

En la Figura 3 veiem que, en realitat, l'energia total no és tanta com si prenem el volum total. Ara afinem aquestes prediccions tenint en compte la TRE. Suposarem TRE constants en primera aproximació i ajustarem les corbes per veure quin és el ritme de declivi d'aquesta energia. Si tenim en compte això darrer, les TRE per als diferents combustibles que hem representat és: TRE de

20 per al cru en explotació, TRE de 5 per al que encara està per explotar, TRE de 3 per al petroli que encara està per descobrir, TRE de 5 per als líquids del gas natural i TRE de 2 per als petroli no convencionals, incloent-hi el de pissarra (Hall, 2009).

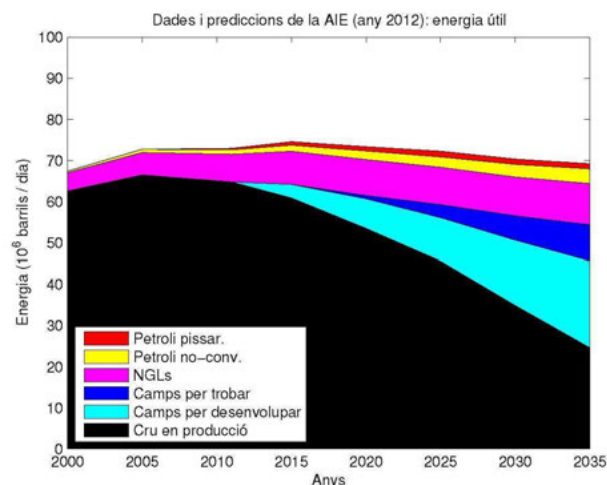


Figura 4: Evolució de la producció d'energia útil o neta de combustibles fòssils segons l'AIE. A diferència de l'anterior (energia total) aquí la producció d'energia neta total comença a declinar a partir de l'any 2015.

Veiem en la Figura 4 que el màxim de producció d'energia neta és al voltant del 2015. A partir d'aquí s'entra en un declivi suau de l'energia fòssil (sense comptar el carbó i el gas natural), i s'arriba el 2035 a nivells lleugerament superiors als de l'any 2000, és a dir, sobre uns 70 milions de barrils equivalents diaris. Fins ara hem suposat una TRE constant en tot el període fins a l'any 2035. Si ara considerem que la TRE decreix en el temps, seguint el treball de Heun i de Wit (Heun, 2012), proposem dues funcions per a la TRE: una de lineal i una altra d'exponencial.

$$\epsilon(t) = \epsilon_{2010} - \delta t \quad (5)$$

$$\epsilon(t) = \epsilon_{2010} - e^{t-2010/\tau} \quad (6)$$

Els valors de ϵ_{2010} són els que hem pres abans per calcular el gràfic amb la TRE constant i prenem $\delta = 0,74$ i $\tau = 30$. Aquests valors corresponen en el treball de Heun et al. (2012) a l'escenari de variació moderada de la TRE per les dues funcions.

A partir d'aquesta dependència temporal de la TRE les dades d'energia neta de la Figura 4 ens acaben donant l'evolució representada en les figures 5, on representem un decreixement de la TRE lineal (Figura 5a) i l'energia neta

amb un decreixement de la TRE amb la funció exponencial (Figura 5b).

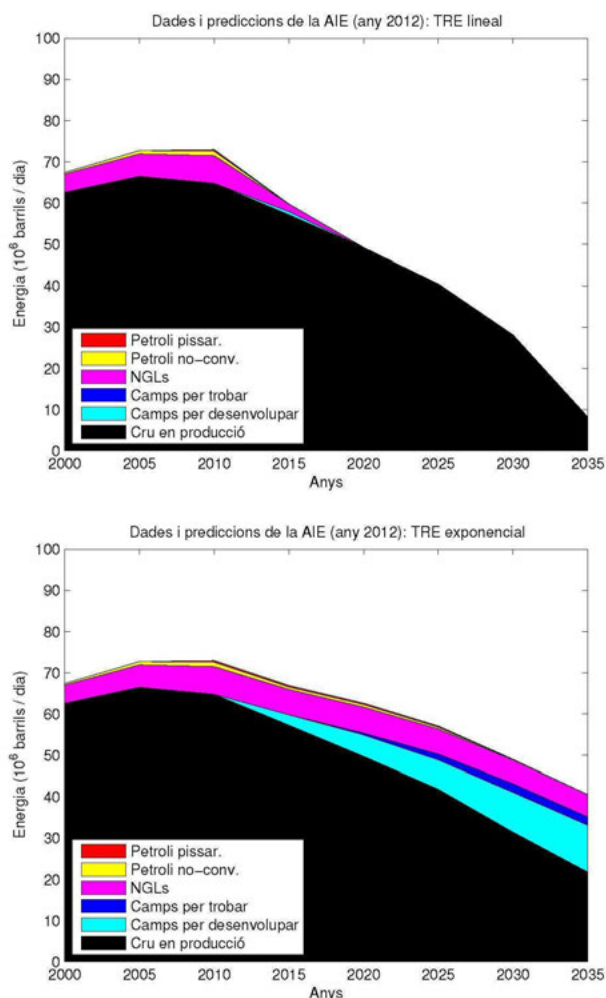


Figura 5: a) Evolució de la producció d'energia útil o neta de combustibles fòssils segons l'AIE amb una TRE decreixent linealment amb el temps; b) Evolució de la producció d'energia útil o neta de combustibles fòssils segons l'AIE amb una TRE decreixent exponencialment amb el temps

Com veiem en aquestes dues darreres figures, tant en el cas de disminució lineal com en el de l'evolució exponencial, el pic d'energia neta hi és (igual que en la Figura 4) en qualsevol moment des d'ara fins al 2015, ja que les dades tenen una resolució màxima de cinc anys. Observem també que la caiguda de tots els combustibles fòssils és particularment alarmant en el cas de la funció lineal. A més, en el cas lineal el 2020 totes les altres fonts es veuen anul·lades, de manera que només queda el decaïment del petroli cru. Pel que fa a l'evolució amb el decaïment exponencial, veiem que és més suau, però que en qualsevol

cas les fonts, que a hores d'ara s'anuncien com a «futurs substituïts del petroli», no creixen en la seva aportació, sinó que disminueixen fins a gairebé desaparèixer. L'únic recurs que veiem que és capaç de mantenir lleument la seva aportació són els líquids del gas natural. Un altre apunt interessant és que, tot i estar sobreestimades, les explotacions de camps per descobrir, aplicant la TRE decreixent, tenen una contribució molt minsa al total.

TRE i renovables

Finalment, com a darrer exemple d'utilització del concepte de TRE, ens plantejem què implicaria substituir la producció energètica basada en el petroli per producció d'energia amb renovables. Això és crític quan parlem d'un recurs finit que ja ha entrat en la fase de declivi, com ja hem vist. Cal veure si algun càlcul senzill amb la TRE ens pot donar algun indici de quin pot ser el comportament del sistema de producció d'energia pel fet d'introduir l'expansió de les renovables a una escala planetària. Pel que fa a l'existència de materials i construcció d'infraestructura, és possible una transició renovable (García-Olivares et al. 2012). En els darrers anys, però, hi ha un debat acadèmic al voltant d'aquesta qüestió (Jacobson, 2011, 2012; Delucchi, 2011; Trainer, 2012 i Castro, 2012, entre d'altres) que actualment se centra en quina és la potència màxima que és capaç de subministrar un sistema energètic totalment renovable. Sense prendre posició en aquest debat, aquí intentem fer un càlcul senzill tenint en compte la TRE per a les potències que ens dona la bibliografia com a acceptables. La implantació a nivell global d'un sistema energètic totalment renovable implica la utilització de part de l'energia no renovable en la construcció i el manteniment d'infraestructura: d'una banda, mineria (recursos de prospecció i inversió en extracció) i, de l'altra, reconversió i inversió d'indústria pesant (entre d'altres, reconversió de la indústria de l'automòbil). Això es pot expressar com una reducció de la TRE, és a dir que -com ja hem comentat- un increment de potència, ni que aquesta sigui renovable, implicarà una reducció de la TRE (Dale, 2011). Aquesta reducció de la TRE no té el mateix origen que el de les energies d'origen fòssil. Per calcular-ho, bàsicament, cal tenir en compte la inversió energètica en la implantació de renovables que ara s'estima en el model actual amb el suport dels combustibles fòssils. Aquesta és una qüestió important però també encara en fase d'estudi i, per tant, sense un consens en la comunitat científica. Donarem doncs una estimació, segons la TRE, del cost energètic de l'anomenada transició renovable, en alguns sectors. Ens plantejem la instal·lació d'11 TW de potència l'any 2035, és a dir, en aquest any s'hauria d'arribar a produir l'equivalent a 155 milions de barrils diaris (Mb/d) amb energia renovable; això equivaldria a substituir amb un descens de 6 TW la potència total produïda actualment (aproximadament, comptant

totes les fonts d'energia, se'n consumeixen uns 17 TW). Un cop tenim aquesta quantitat podem aplicar-li el mateix que hem considerat en l'apartat anterior, si la potència s'ha d'incrementar, la TRE ha de disminuir. Per calcular un límit superior, prenem primer que les renovables tenen una TRE de 20 constant, que és el màxim que s'estima per a l'eòlica, i aquesta és també la de TRE més alta de totes (a excepció de la hidroelèctrica, que presenta poc potencial d'expansió en el futur). Això vol dir que per produir 155 Mb/d n'hauríem d'invertir una vintena part en la seva construcció, i suposarem que aquesta vintena part vindrà bàsicament del petroli i que, a més, com ja hem dit, és manté constant. Sortirem de l'estimació que el total actual en renovable és un 13 % de tota l'energia primària produïda i ens proposem arribar al voltant del 100 % el 2035. Suposarem una implementació i un creixement de renovables lineal des de l'actual 13 % fins a l'objectiu 100 % del 2035. En aquest cas, prenem l'evolució en la producció de cru amb la TRE exponencial decreixent (Figura 4) i així li traiem el que cal desviar (invertir energèticament) a renovables. En la Figura 6a veiem que hi ha una disminució del total final de cru l'any 2035 en 7,9 Mb/d respecte a una situació de no increment d'inversió en renovables. L'altra estimació que podem fer és suposar que la TRE també decreix en el temps per a les renovables, a causa de l'increment de potència i, per tant, de la disminució del rendiment. Aquest decreixement de la TRE en la implantació de renovables seria causat, a diferència del cas de no renovables, pel desenvolupament d'infraestructura i adaptació de l'existent a escala global, d'una banda, i per l'escalat, de l'altra. És a dir, a mesura que incrementem la potència exhaurim els millors llocs de captació, cosa que fa cada cop més difícil incrementar la potència i, per tant, el rendiment és més petit (Dale, 2011). En aquest darrer cas, prenem l'evolució exponencial de la TRE i l'apliquem, i l'energia desviada necessària per fer aquesta migració a renovables augmenta considerablement. Ho hem representat a la Figura 6b. El 2035 l'energia que hauríem d'invertir és d'uns 14 Mb/d (al voltant del doble que en el cas anterior), sobre un total d'energia que estarà al voltant dels 40 Mb/d.

El petroli cru com a limitant

Finalment, un darrer aspecte que cal considerar és que, en la societat actual, tenim un efecte limitant del petroli cru. En un sistema que necessita una proporció de diversos elements per mantenir-se en el temps, l'element que esdevé més escàs de tota la proporció és el que en limita el seu creixement o manteniment. Aquesta llei és coneguda com a llei de Liebig o llei del mínim (Chesword, 2008), pel nom del seu descobridor en agricultura: el nutrient que hi ha en menor quantitat al sòl en limita tota la producció vegetal. Així doncs, en el cas dels diferents combustibles fòssils, aquell que veiem que limita la producció total

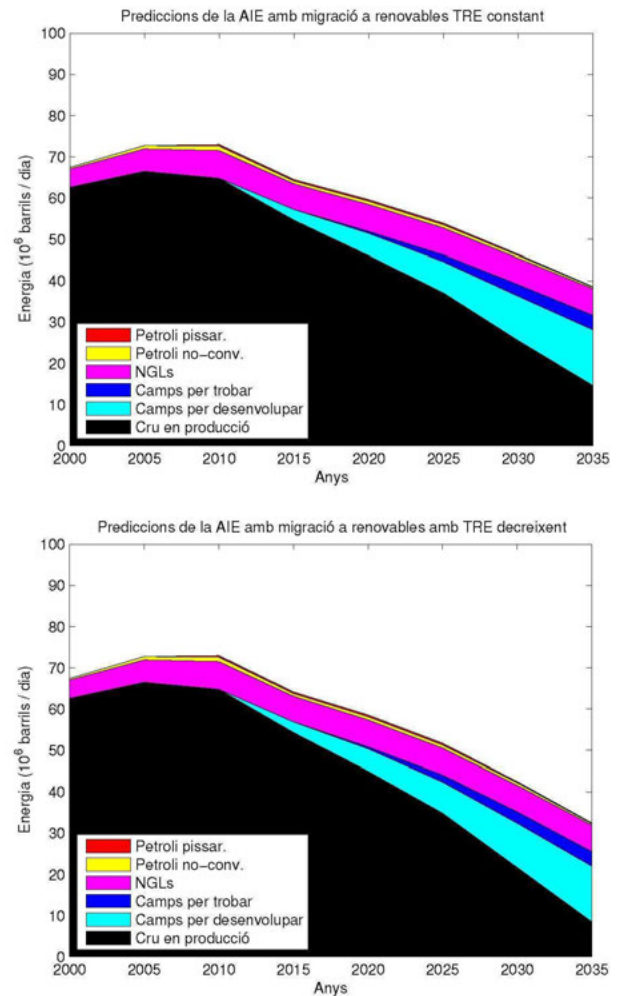


Figura 6: a) Evolució de la producció d'energia útil o neta de combustibles fòssils, amb una transició renovable en evolució lineal, amb TRE constant en el temps; b) Evolució de la producció d'energia útil o neta de combustibles fòssils, amb una transició renovable en evolució lineal, amb TRE decreixent exponencialment en el temps

d'energia neta acaba sent el petroli cru. Per tant, això també caldria incloure-ho en la quantitat d'energia neta (o útil) que s'hauria de desviar dels usos actuals per poder adaptar-nos a una societat amb una forta implantació de renovables. Podem calcular, doncs, el percentatge dels altres líquids del petroli respecte al cru i veure com aquest percentatge canvia si considerem la transició a renovables a escala global. En el darrer gràfic (Figura 7) mostrem com canvia en el temps la proporció dels altres combustibles respecte al total de cru produït (tenint en compte les franges blau cel i blau marí també com a cru produït total) amb TRE exponencial (Figura 7a) i si hi incorporem

la transició renovable de la Figura 6b (Figura 7b).

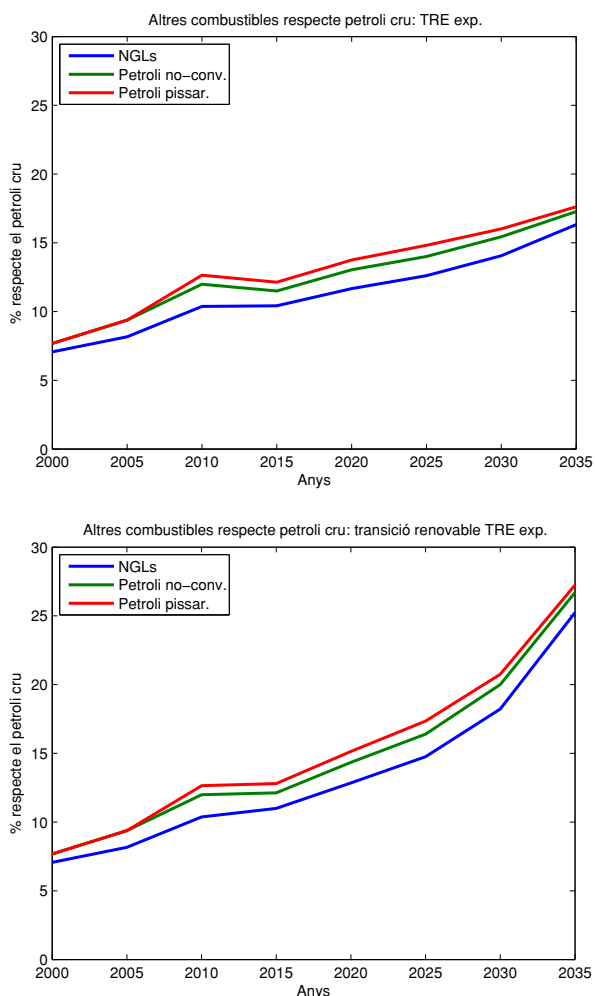


Figura 7: a) Evolució de la proporció entre petroli cru i altres combustibles en energia neta, TRE exponencial decreixent per als líquids del petroli i TRE constant per a les renovables. b) el mateix que a), però introduint la transició renovable amb TRE exponencial decreixent per a les renovables.

Veiem que aquesta transició renovable fa que la proporció final canviï el 2035 per sobre d'un 25 %. En aquest darrer cas, teòricament aquesta proporció és el que ens limitaria la producció d'altres combustibles fòssils i, potser, les renovables mateix. Això introduiria un descens més brusc de totes les altres fonts d'energia i ens abocaria a uns escenaris molt més difícils pel que fa a una pretesa transició per mantenir l'actual model socioeconòmic, però una transició al cap i a la fi inajornable a causa del pic d'extracció del cru.

Conclusions

En aquest article hem introduït un concepte molt utilitzat en els darrers anys i que és especialment interessant per poder fer càlculs de recursos energètics i el cost que tenen, sense passar necessàriament per la utilització de valors econòmics clàssics. La utilització de la taxa de retorn energètic permet tant avaluar proporcions d'energia neta per mantenir diferents activitats socioeconòmiques, d'una banda, com fer estimacions i projeccions de futur, de l'altra. Prenent les dades del darrer informe de l'Agència Internacional de l'Energia hem calculat quina seria la projecció més realista (tenint en compte la TRE) d'aquestes estimacions en energia neta o útil. Hem estimat dos escenaris d'evolució de la producció de petroli i altres derivats seguint la degradació de la TRE i en ambdós casos arribem a poder dir que el màxim de producció d'energia neta de petroli cru i derivats és pels voltants de l'any 2015. Finalment, hem vist quin impacte en la producció de petroli i derivats tindria el desenvolupament a escala global de renovables. En aquest sentit, hem vist que no només força la producció de cru a disminuir una quarta part sinó que, a més, n'altera l'evolució de la proporció de cru respecte als seus derivats, amb la conseqüència que, si el petroli cru és l'element limitant, això imposarà un decreixement més accentuat que l'estimat inicialment, tant dels altres combustibles fòssils, com posant en compromís una expansió renovable amb les potències estimades en aquest article. És a dir, una conseqüència important de l'aplicació de la TRE ens diu que com més s'ajorni l'adaptació energètica cap a energies d'origen renovable, més impacte tindrà en tot el sistema socioeconòmic i requerirà objectius d'assoliment de potència global més baixos, a causa, bàsicament, de la limitació del cru per a la transició. Tot amb tot, el concepte de TRE ens dona una eina potent, estretament lligada als principis termodinàmics, que ens facilita el disseny d'estratègies i escenaris futurs, i ens alerta sobre els perills d'objectius massa ambiciosos o de deixar per a més endavant el que a hores d'ara ja és una necessitat imperiosa.

Bibliografia

- [1] HALL, C.A.S., Migration and Metabolism in a Temperate Stream Ecosystem, *Ecology*, **53**, 585-604 (1972).
- [2] C.S. HALL, *Maximum Power: The Ideas and Applications of H.T. Odum.*, University Press Colorado (1995).
- [3] M. KING HUBBERT, *Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Presented before the Spring Meeting of the Southern District Division of Production. American Petroleum Institute, San Antonio, Texas. March 8, 1956*, Publication No. 95. Houston: Shell Development Company, Exploration and Production Research Division (1956).
- [4] DALE, M., KRUMDIECK, S., BODGER, P., A

Dynamic Function for Energy Return on Investment, *Sustainability*, **3(10)**, 1972-1985 (2011).

[4] JEVONS, W.S., *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, Macmillan & Co. (1865).

[5] LAMBERT JG, LAMBERT GP., Predicting the Psychological Response of the American People to Oil Depletion and Declining Energy Return on Investment (EROI), *Sustainability*, **3(11)**, 2129-2156 (2011).

[6] PRIETO, P., HALL, C.A.S., *Spain's Photovoltaic Revolution. The Energy Return on Investment*, Springer (2013).

[7] TAINTER, J., *The Collapse of Complex Societies*, New York & Cambridge, UK: Cambridge University Press (1988).

[9] HALL, C.A.S. BALOGH, S. MURPHY, D.J.R., What is the minimum EROI that a sustainable society must have?, *Energies*, **2**, 25-47 (2009).

[10] HEUN, M. K., de WIT, M., Energy return on (energy) invested (EROI), oilprices, and energy transitions, *Energy Policy*, **40**, 147-158 (2012).

[11] GARCÍA-OLIVARES, A. J. BALLABRERA-POY, E. GARCÍA-LADONA, A. TURIEL., A global renewable mix with proven technologies and common materials, *Energy Policy*, **41**, 561-574 (2012).

[12] JACOBSON, M.Z., DELUCCHI, M.A., Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials, *Energy Policy*, **39**, 1154-1169 (2011).

[13] DELUCCHI, M.A., JACOBSON, M.Z., Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials, *Energy Policy*, **39**, 1170-1190 (2011).

[14] JACOBSON, M.Z., ARCHER, C.L., Saturation wind power potential and its implications for wind energy, *PNAS*, **109(39)**, 15679-15684 (2012).

[15] TRAINER, T., A critique of Jacobson and Delucchi's proposals for a world renewable energy supply, *Energy Policy*, **44**, 476-481 (2012).

[16] DE CASTRO, C., MEDIIVILLA, M., MIGUEL, L.J., FRECHOSO, F., Global Wind Power Potential: physical and technological limits, *Energy Policy*, **39**, 6677-6682 (2011).

[17] CHESWORTH, C. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*, Springer (2008).