

# Subministrament energètic

Jordi Andreu\*

## Introducció

Moltes de les activitats que desenvolupem depenen de l'energia. Quan aixequem un pes amb la nostra força muscular realitzem treball mecànic. Els processos industrials, el transport, la calefacció i la refrigeració d'habitatges, els ordinadors i altres aparells electrònics, quasi totes les activitats que portem a terme depenen de l'energia.

En temps remots els humans van aprofitar l'energia muscular pròpia o la dels animals. Ja en temps dels romans es va desenvolupar la roda hidràulica per produir energia, però no se'n va estendre l'ús. En la transició del treball artesà a la industrialització es va començar a aprofitar la força de l'aigua dels rius i embassaments. En el segle IX la utilització de molins hidràulics es va començar a generalitzar i en el segle XII van aparèixer fàbriques que utilitzaven l'energia hidràulica. Durant aquest període també van aprofitar de manera important l'energia del vent. El desenvolupament de les primeres aplicacions pràctiques de la màquina de vapor (Denis Papin, 1690; Thomas Savery, 1698; Thomas Newcomen, 1705; James Watt, 1769) permet produir treball mecànic a partir de la calor de combustió. El procés tecnològic que porta al desenvolupament de la màquina de vapor va impulsar també el desenvolupament de la termodinàmica.

El tema del subministrament energètic és d'actualitat per dues raons: perquè és important per al desenvolupament econòmic mundial i perquè les fonts d'energia que utilitzem actualment s'estan exhaurint i caldrà canviar-les per noves fonts d'energia en un futur més o menys llunyà. Però, per estar en condicions de buscar noves formes d'energia, cal una informació quantitativa acurada sobre les fonts de subministrament energètic que utilitzem actualment i un coneixement raonable de les lleis de la física i, en particular, del primer i segon principi de la termodinàmica.

## Una mica de termodinàmica

La primera llei de la termodinàmica tracta de la conservació de l'energia. Podem expressar-la amb l'equació:

$$Q = W + \Delta U,$$

\***Jordi Andreu** (Barcelona, 1958) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona i professor titular del Departament de Física Aplicada i Òptica (UB). Ha estat responsable de diferents projectes fotovoltaics dels programes marc de la UE i actualment dirigeix el grup fotovoltaic i d'electrònica de gran superfície del Centre de Referència en Materials Avançats per a l'Energia de la Generalitat de Catalunya (CeRMAE).

on  $Q$  és la calor absorbida pel sistema,  $W$  és el treball realitzat i  $\Delta U$  és el canvi en l'energia interna. En el nostre exemple de l'energia muscular, el treball realitzat prové dels canvis químics produïts per la combustió dels sucres i greixos que el nostre organisme transforma en treball. L'energia interna dels sucres, dels greixos i de l'oxigen utilitzats a la reacció és més gran que la dels productes de la reacció i aquesta diferència s'inverteix en treball mecànic i calor.

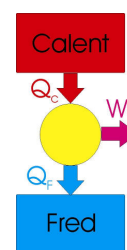


Figura 1: Esquema de màquina tèrmica

Una màquina tèrmica extreu calor d'una font calenta, envia calor a una font freda i realitza treball mecànic. Una representació esquemàtica d'aquest procés es mostra en la figura 1. La segona llei de la termodinàmica imposa restriccions als processos de transformació de l'energia. Segons aquesta llei no hi pot haver un procés que tingui com a únic resultat la transformació de calor en treball mecànic. Hi ha diferents enuncis de la segona llei de la termodinàmica, però, aplicada a màquines tèrmiques, podem dir que una màquina tèrmica reversible és la que pot extreure el màxim treball mecànic per a una determinada quantitat de calor de la font a temperatura alta. Un exemple d'aquests cicles reversibles ideals el va introduir Nicolas Léonard Sadi Carnot el 1824. El cicle de Carnot extreu calor d'una font calenta, envia calor a una font freda i produeix treball mecànic. El rendiment ( $\eta$ ) d'una màquina tèrmica definit com la relació entre el treball realitzat per la màquina tèrmica i la calor rebuda de la font calenta s'expressa com:

$$\eta = \frac{W}{Q_C} = \frac{(Q_C - Q_F)}{Q_C}.$$

Del tractament del cicle de Carnot es dedueix que aquest rendiment depèn de les temperatures de les dues fonts:

$$\eta = \frac{(T_C - T_F)}{T_C}.$$

Qualsevol altra màquina que tingui com a únic efecte extreure calor d'una font calenta a temperatura  $T_C$  i enviar-la a una font freda a temperatura  $T_F$  té menys rendiment (i produeix menys treball mecànic) que la màquina reversible.

La màquina de Carnot és reversible perquè podríem utilitzar el treball produït per extreure la calor de la font freda, portar-la a la calenta i tornar, per tant, a l'estat inicial. En canvi, una màquina irreversible produeix menys treball mecànic i envia més calor a la font freda que la màquina reversible; el treball mecànic produït no serà suficient per tornar les dues fonts a la situació inicial.

Els processos reals sempre són irreversibles. Per exemple, les forces de fregament transformen treball mecànic directament en calor, que no es pot transformar de nou en treball mecànic. La transmissió espontània de calor entre dos cossos a temperatures diferents també és irreversible.

La funció entropia ( $S$ ) és una funció de l'estat del sistema. Podem determinar el canvi d'entropia entre dos estats del sistema considerant un procés reversible que ens porti d'un estat a l'altre. Per a petits canvis en el sistema, durant els quals la temperatura es mantingui constant i igual a la temperatura de l'ambient, el canvi d'entropia es pot determinar a partir de l'expressió:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q_{rev}}{T}.$$

La suma dels increments d'entropia ( $\Delta S$ ) de tot el procés ens dona l'increment d'entropia total entre els dos estats del sistema.

Un procés reversible ideal manté constant l'entropia de l'Univers, mentre que un procés irreversible incrementa l'entropia de l'Univers.

Si ara ens mirem el nostre sistema energètic tenint en compte el primer i segon principi de la termodinàmica, veiem que no tenim un problema d'energia, ja que l'energia de l'Univers es manté constant, sinó que tenim un problema d'increment d'entropia.

Considerem un exemple: utilitzem un combustible per fer funcionar el motor del nostre cotxe, sortim de casa al matí i tornem a la tarda; el resultat global de tot el procés és que hem convertit energia interna del combustible en calor, ja que tot el treball s'ha utilitzat per a vèncer forces de fregament. Aquest procés és irreversible i no podem restituir el combustible i l'oxigen que hem utilitzat i que s'han convertit en  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ .

## Les fonts primàries d'energia

Pel segon principi de la termodinàmica sabem que l'energia que rebem prové de la disminució d'energia d'una altra part de l'Univers. La font primària d'energia és la substància que disminueix la seva energia interna.

Per a fonts no renovables, en què alguna substància de la Terra pateix una disminució d'energia interna,

aquesta substància s'anomena *combustible*. Són exemples de combustibles el petroli, el gas natural, el carbó, la fusta i l'urani.

Per a les fonts renovables la disminució d'energia és exterior a la Terra. Principalment prové de la disminució de l'energia interna del Sol, que utilitza grans quantitats d'hidrogen, que, en un procés de reacció de fusió nuclear, es converteix en He. L'energia es transmet en forma de radiació. Les fonts renovables provenen principalment de l'energia de la radiació solar que incideix sobre la Terra. Aquesta darrera es pot aprofitar de manera directa o indirecta. L'aprofitament de l'energia del vent o de l'aigua dels rius és una manera indirecta d'aprofitament de l'energia solar.

## Situació actual de les fonts d'energia

Les fonts primàries d'energia més importants són el petroli, el gas natural, el carbó, l'energia hidroelèctrica i l'energia nuclear. El gràfic de la figura 2 presenta l'evolució de l'ús d'aquestes fonts d'energia des de l'any 1965 (BP, 2004). La unitat d'energia utilitzada és la tona equivalent de petroli. Aquesta no és una unitat real d'energia des del punt de vista de la física, però en podem entendre l'interès pràctic si tenim en compte la situació actual del subministrament energètic. Dels combustibles fòssils en podem aprofitar directament la calor o bé utilitzar algun tipus de màquina tèrmica per produir treball mecànic. El treball mecànic es pot transformar també en corrent elèctric amb molta eficiència. L'energia dels combustibles nuclears s'utilitza per produir corrent elèctric. El mateix passa amb l'energia dels salts d'aigua en les centrals hidroelèctriques. L'equivalència entre els combustibles fòssils es fa a partir de la calor de combustió, per exemple 1 tona de petroli equival a 1.100 m<sup>3</sup> de gas natural o a 3 tones de lignit. Per produir electricitat a partir d'aquests combustibles s'utilitzen màquines tèrmiques i alternadors, el rendiment de producció d'electricitat a partir de l'energia de combustió és de l'ordre del 33 %, encara que depèn de la tècnica utilitzada. L'energia elèctrica en tones equivalents de petroli es determina a partir de la producció elèctrica mitjana d'1 tona de petroli amb la tecnologia actual. En l'estudi que es presenta 1 tona de petroli equival a 12 MWh d'electricitat.

En el gràfic de la figura 2 es pot veure que l'única font renovable que apareix és la hidroelèctrica, que ha proporcionat 595,4 Mtep d'energia elèctrica l'any 2003, valor quasi idèntic als 598,8 Mtep subministrats el mateix any per l'energia nuclear. Les energies renovables representen només el 6,11 % del consum mundial. En alguns estudis s'inclou l'aportació de la biomassa com a energia renovable, però com que la major part d'aquesta energia s'extreu de boscos que estan en regressió no és gens clar incloure aquesta aportació com a contribució de les energies renovables.

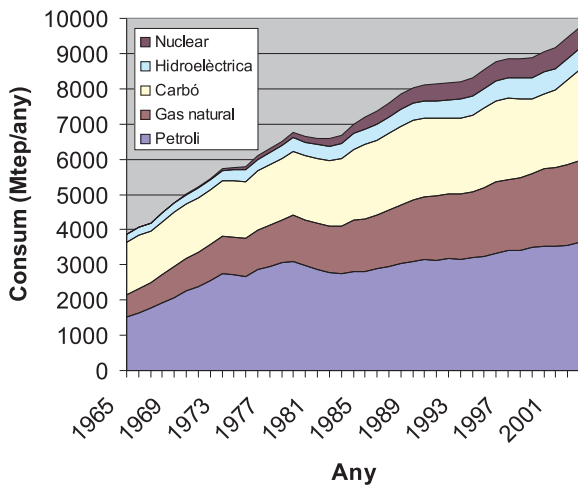


Figura 2: Evolució del consum mundial d'energia primària

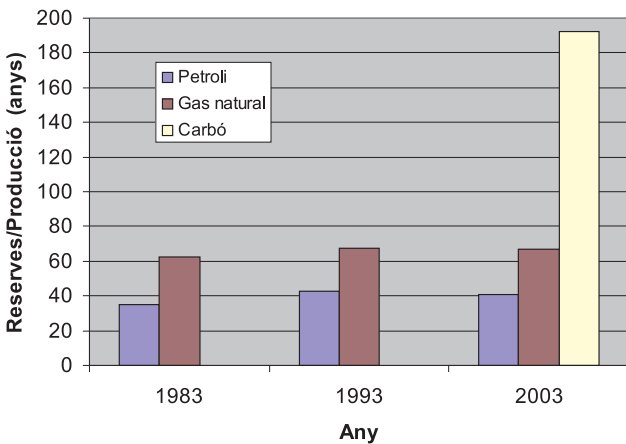


Figura 3: Reserves de combustibles fòssils

Cal tenir present que els combustibles fòssils que estem consumint s'han produït en períodes geològics molt llargs i si mantenim el ritme de consum actual s'exhauriran. És difícil predir durant quant temps el nostre sistema energètic podrà basar-se en el consum de combustibles fòssils, ja que no es coneixen totes les reserves de combustible i el consum mundial és variable. A més, aquest plantejament no té gaire sentit per dos motius. En primer lloc, no podem mantenir l'actual nivell d'emissions de  $\text{CO}_2$  ja que causa importants problemes ecològics d'escalfament global per l'efecte hivernacle. Recentment un gran nombre d'estats han signat el protocol de control d'emissions de Kyoto que pretén limitar aquestes emissions. En segon lloc, en un sistema d'economia de mercat, a mesura que un bé es torna més escàs puja el preu i en disminueix el consum. Això afavoreix la transició a altres alternatives energètiques.

Per tal de tenir una indicació sobre el temps durant el qual s'ha de produir aquesta transició podem considerar

el quocient entre els recursos coneguts i la producció anual (R/P). La figura 3 presenta el comportament de R/P en estudis duts a terme a finals de 1983, 1993 i 2003 per al petrolí i el gas natural, mentre que per al carbó només es presenta l'estudi del 2003. El valors menors, de l'ordre de 40 anys, s'obtenen per al petrolí. Per al gas natural s'obtenen valors de l'ordre de 60 anys i per al carbó, de 200 anys.

Actualment es fa molt difícil trobar noves reserves i el paràmetre R/P tendeix a disminuir en els darrers anys.

Aquesta situació produeix un increment de preus de l'energia i una substitució progressiva dels combustibles fòssils com a fonts d'energia.

## Potencial de les fonts renovables

Així com en el cas de les fonts no renovables el paràmetre més important són les reserves, i el quocient entre reserves i producció ens dona una indicació de la durada del recurs, en el cas de les fonts renovables el paràmetre més important és la producció màxima anual que podem utilitzar. L'aprofitament d'una mateixa font renovable es pot dur a terme mitjançant diferents tecnologies. Les possibilitats d'explotació de cada font renovable depenen també del grau de desenvolupament de la tecnologia considerada. Per exemple, podem aprofitar la radiació solar per produir calor a baixa temperatura (plafons tèrmics plans) o a alta temperatura (sistemes amb concentradors òptics). A partir de la radiació solar també podem produir corrent elèctric, o bé amb centrals tèrmiques solars o bé amb centrals fotovoltaïques. Encara que la tecnologia fotovoltaica s'ha desenvolupat recentment, actualment ja és més utilitzada que les altres alternatives més tradicionals per produir corrent elèctric a partir del Sol. Els primers experiments per al desenvolupament de generadors fotovoltaics els van dur a terme Pearson, Chapin i Fuller als Bell Labs l'any 1950.

De manera indirecta l'energia del Sol dona lloc a la pluja, al vent i al creixement de les plantes, que també es poden utilitzar com a fonts d'energia renovables. Per a l'aprofitament de l'energia hidràulica s'utilitzen turbines instal·lades en salts d'aigua naturals o en embassaments, que produeixen corrent elèctric. L'energia eòlica s'aprofita mitjançant centrals eòliques basades en molins de vent que també produeixen corrent elèctric. L'energia de la biomassa es pot aprofitar com a combustible de manera similar a com s'aprofiten els combustibles fòssils. Com que la biomassa es produeix a partir del carboni que s'obté del  $\text{CO}_2$ , gràcies a l'energia del Sol, podem considerar aquesta font com a renovable mentre no provoqui la disminució de la biomassa total; per això cal explotar-la al mateix ritme a què es produeix.<sup>1</sup> Les

<sup>1</sup>Un compendi de les dades de producció d'energia de les diferents fonts renovables i una prospecció del seu potencial de creixement es pot trobar a l'informe de l'EREC (2004).

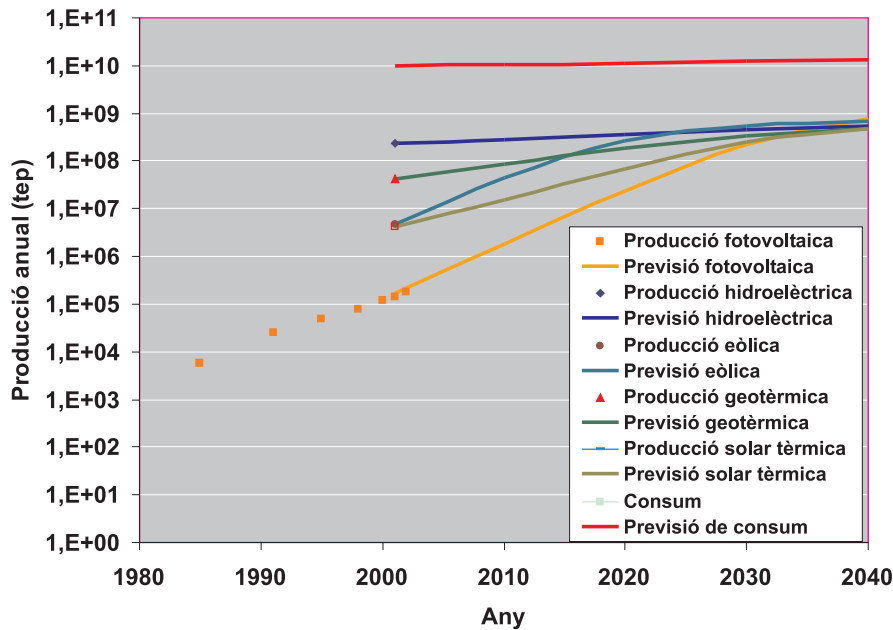


Figura 4: Previsió de creixement de les fonts renovables

dades de producció de les diferents fonts renovables i la seva previsió de creixement es presenten en la figura 4. Aquest gràfic utilitza la representació logarítmica per poder representar simultàniament les fonts que tenen contribucions molt diferents. L'evolució de la producció fotovoltaica entre el 1985 i el 2002 també es presenta en aquest gràfic.

L'energia de la radiació solar dipositada anualment sobre un punt de la superfície de la Terra depèn molt de la latitud. Per a latituds de 30° tenim energies anuals de 2100 kWh/(m<sup>2</sup> any), per a latituds de 40° tenim valors de 1900 kWh/(m<sup>2</sup> any) i per a latituds de 50° tenim valors de 1200 kWh/(m<sup>2</sup> any).

La tecnologia fotovoltaica per a la producció d'electricitat a partir de la radiació solar, encara que només està a l'inici del seu desenvolupament, domina el mercat per davant de les centrals elèctriques solars convencionals basades en turbines de vapor. Amb la tecnologia actual una central solar fotovoltaica aprofita una mica més del 10 % de l'energia solar incident. En les nostres latituds tenim irradiacions anuals superiors a 1.600 kWh/(m<sup>2</sup> any); per tant, la producció elèctrica d'una central fotovoltaica és aproximadament de 160 kWh/(m<sup>2</sup> any). El consum mitjà d'energia elèctrica d'un ciutadà europeu és de 6.000 kWh anuals. Per produir aquesta energia amb centrals fotovoltaiques es necessiten 38 m<sup>2</sup> de central per habitant. Per a tota la població catalana caldria la superfície d'un quadrat de 15 km de costat.

En el cas de l'energia eòlica és difícil estimar la superfície necessària per produir una determinada quantitat d'energia. D'una banda l'energia produïda depèn molt de la situació; petits canvis en la situació d'un molí de vent poden provocar canvis importants en la seva producció. D'altra banda, els molins no es poden situar gaire propers, ja que la pertorbació que crea un d'ells disminueix la producció dels que es troben al seu darrere. Una estimació pràctica d'utilització de les millors zones dels EUA amb molins distribuïts en una superfície de 43.000 km<sup>2</sup> permetria obtenir una energia de 560 10<sup>9</sup> kWh/any. Així, fins i tot utilitzant les millors zones, la producció eòlica per unitat de superfície és d'uns 13 kWh/(m<sup>2</sup> any), valor més de deu vegades inferior a la densitat d'energia que s'obté amb l'aprofitament fotovoltaic de l'energia solar.

La concentració d'energia hidràulica explotable depèn molt de la situació. En un estudi ampli dut a terme a escala mundial, la densitat d'energia que podem produir al nostre entorn és de 0,2 kWh/(m<sup>2</sup> any), un miler de vegades inferior a la densitat d'energia obtinguda per captació directa de l'energia solar amb tecnologia fotovoltaica. Malgrat això, veiem que actualment l'energia hidroelèctrica és l'única que contribueix significativament a la producció d'energia mundial perquè l'energia d'una superfície molt gran de captació s'acumula de manera molt localitzada i és fàcil d'explotar. La presa recull l'aigua de pluja d'una gran superfície i aconsegueix un gran cabal en una zona de gran desnivell.

vell. Com a recurs renovable és el que s'apropa més al límit d'explotació i, per tant, la contribució de l'energia hidràulica podrà augmentar poc en els propers anys.

L'estimació del consum actual de biomassa per a aplicacions energètiques és d' $1,2 \cdot 10^9$  tep. Però aquest nivell d'explotació produeix una regressió de la quantitat de biomassa, i per tant no es pot considerar una font renovable de producció d'energia. A més, gran part d'aquest consum es destina a la producció de calor en països pobres amb mètodes poc eficients. L'explotació de la producció agrícola per produir energia s'ha investigat àmpliament. Estudis recents (Shapouri et al., 2002) sobre la producció d'etanol a partir de blat de moro mostren que el contingut energètic del combustible és un 34 % superior a l'energia invertida en tot el procés; això vol dir que per produir 134 tep d'etanol cal invertir 100 tep d'energia en el procés de producció. La rendibilitat econòmica del procés és molt dubtosa. D'altra banda, si considerem que, en el millor dels casos, la producció de blat de moro per obtenir etanol té un rendiment de 332,5 gal/acre i que, un cop descomptada l'energia invertida, el rendiment net de l'etanol produït és de 21.105 BTU/gal, el rendiment d'aquest procés per produir electricitat és de només 0,5 kWh/(m<sup>2</sup> any).

## Conclusions

Pel que fa a les fonts d'energia renovables, el potencial d'aprofitament de l'energia solar és centenars de vegades superior al potencial de les altres fonts renovables indirectes. L'energia elèctrica que podem obtenir per metre quadrat de superfície és:

Fotovoltaica	160 kWh/(m <sup>2</sup> any)
Eòlica	13 kWh/(m <sup>2</sup> any)
Hidroelèctrica	0,2 kWh/(m <sup>2</sup> any)
Biomassa	0,5 kWh/(m <sup>2</sup> any)

L'energia hidroelèctrica té l'avantatge que la central aprofita, de manera natural, l'energia que el Sol ha donat a l'aigua en una superfície molt més gran que la que ocupa la central. És per això que és més fàcil d'explotar i que actualment se n'estan utilitzant gran part dels recursos explotables. L'energia eòlica té un potencial unes seixanta vegades superior a la hidroelèctrica en les mi-

llors zones. Com que la tecnologia d'explotació ha avançat molt en els darrers anys i encara estem lluny d'aprofitar-ne una part important del potencial, l'energia eòlica és, sens dubte, la font d'energia renovable que pot contribuir de manera més important a la substitució dels combustibles fòssils a curt termini. L'energia solar fotovoltaica té un creixement molt important, de més del 20 % anual en els darrers vint anys, però encara està lluny de contribuir significativament a la producció energètica, cosa que succeirà al voltant del 2030. Com que aquesta tecnologia de producció energètica té potencial per produir més energia de la que es consumeix a tot el món i només està limitada per aspectes tecnològics, és l'elecció més raonable com a font d'energia a llarg termini. El seu desenvolupament depèn de dos tipus de mesures: dedicar recursos per a la investigació i implantar mesures de mercat que afavoreixin la utilització de sistemes fotovoltaics durant el període en què encara no siguin econòmicament rendibles. L'actual desenvolupament d'aquesta tecnologia a Alemanya té l'origen en una política de subvenció de l'energia produïda per les centrals fotovoltaïques mitjançant preus regulats garantits, que s'ha demostrat que és molt més eficaç que la subvenció directa de les instal·lacions. Molts governs estan empenent mesures similars per a la promoció d'aquesta font d'energia (PV-TRAC, 2004).

En definitiva, el subministrament energètic és una necessitat de la nostra societat. Aquest subministrament depèn actualment dels combustibles fòssils. Aquests combustibles s'estan exhaurint i el control de l'extracció i la distribució està produint importants tensions polítiques a escala internacional. En aquest context, no és estrany que tots els estats es preocupin de preparar estratègies d'actuació sobre el sistema de producció d'energia. Aquests plans presenten sovint el problema que són només a curt termini. Els plans a curt termini produeixen un efecte immediat en l'opinió pública mentre que és més difícil de detectar si les accions polítiques són correctes a llarg termini. Però en un tema com el de l'energia és imprescindible tenir present els efectes a llarg termini de les accions que s'empenen; en cas contrari, els problemes ecològics i d'abastiment energètic apareixeran tard o d'hora i seran de més difícil solució.

## Bibliografia

- Statistical Review of World Energy. BP, 2004.  
European Renewable Energy Council (EREC), *Renewable energy scenario to 2040*, (Brussels, 2004).  
SHAPOURI, H., DUFFIELD, J. A. I WANG, M., *The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update, Agricultural Economic Report*, **813**, (2002) United States Department of Agriculture.  
Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV-TRAC), *A Vision for Photovoltaic Technology up to 2030 and Beyond*, [http://europa.eu.int/comm/research/energy/photovoltaics/vision\\_report\\_eu.html](http://europa.eu.int/comm/research/energy/photovoltaics/vision_report_eu.html). (Brussels, 2004).