

Anàlisi Energètic de la Bioesfera Humana: Peak Oil i Termoeconomia.

Índex

1 Peak Oil **7**

1.1 Introducció 7
1.2 Definició del Peak Oil 9
1.3 El Model de Hubbert 12
1.3.1 Teoria del Model de Hubbert 12
1.3.2 Aplicacions del model de Hubbert 15
1.3.3 Tassa de producció de petroli en front les reserves de petroli 16
1.3.4 La qüestió de les reserves - retroactivitat i substitució . 19
1.3.5 Hem sentit a parlar de tot això amb anterioritat? . . . 22
1.3.6 Camps petrolífers gegants 28
1.3.7 Producció futura de petroli 28
1.4 Oil Crash 31
1.4.1 Crisi econòmica o energètica? 31
1.4.2 Solucions de la industria 34
1.4.3 Procés d'eliminació 39
1.4.4 Possible implementació de solucions tècniques 41
1.4.5 Dos exemples de transició: Corea del Nord i Cuba . . . 43
1.4.6 Que podem fer com a individus? 44
1.4.7 Que podem fer com a físics? 46
1.5 Conclusions 46

2 Termodinàmica i Economia **49**

2.1 Introducció 49
2.1.1 Economia i valors 53
2.2 Termodinàmica i Valor Físic 53
2.2.1 Exergia 54
2.2.2 La Creació Còsmica de l'Exergia 54
2.2.3 Valor de l'Exergia i Estructura 55
2.3 Sistemes Termodinàmics i Sistemes Econòmics 56
2.3.1 Exergia i l'Economia de Nau Espacial 57

2.4 Fluxos Termodinàmics i Valors Economics 57
2.5 Eficiència Termodinàmica i Eficiència Econòmica 61
2.6 Termodinàmica de Temps-Finit 64
2.6.1 Cicle de Curzon-Ahlborn 64
2.6.2 Restriccions econòmiques i ecològiques 70
2.7 Termodinàmica i Sostenibilitat 74
2.7.1 La funció de producció 75
2.7.2 Dinàmiques i Control 76
2.7.3 Consum i Utilitat 77
2.7.4 Sostenibilitat, Espai Operacional i Estats Estacionaris . 77
2.7.5 El Problema d'Optimització 78
2.7.6 Resultats del model 79
2.8 Conclusions 80

3 Annex **83**
3.1 Cicles de Treball i Exergia 83
3.2 Exergia com a variable termodinàmica d'estat 84
3.3 Resolució del problema d'optimització d'exergia 86
3.3.1 Potència mecànica a partir d'un conjunt de font de calor amb fluxos limitats 86
3.3.2 Resolució del problema d'optimització de la potència màxima disponible a partir d'un conjunt de fluxos estacionaris 89

4 Bibliografia **93**

Resum

El contingut d'aquest treball està estructurat principalment en dos capítols, el primer Capítol 1, Peak Oil, i el Capítol 2, Termodinàmica i Economia.

En el primer capítol la intenció és introduir al possible lector a la problemàtica energètica actual, particularment la del peak del petroli, d'una manera clara partint dels conceptes bàsics. Per tal de fer-ho, partint des de la base històrica, expliquem un dels primers models que va modelitzar una corba de producció petrolífera. Més enllà donem a conèixer certes aplicacions d'aquest model. Introduïm els conceptes de tassa de producció i de reserves petrolíferes, tot indicant de quina manera la indústria sol mesurar aquestes variables i quins són els seus valors actuals. També realitzem un anàlisi històric-polític mostrant les diferències entre les crisis petrolíferes anteriors respecte la situació l'actual. Indiquem com una possible variable com la producció de petroli en els camps gegants pot ser més indicadora de l'arribada del zenit que l'augment del preu del petroli. Finalment indiquem quines són les tendències per a la producció futura de petroli.

Dins de la part del oil crash, indiquem quines són les possibles conseqüències d'aquest peak del petroli. Analitzem la situació energètica i la situació econòmica i arribem a veure una correlació, la qual indica una situació continua de decreixement per països com el cas d'Espanya. Analitzant les possibles fonts d'energia primària disponible, intentem plantejar una solució de caire tècnic, rebutjant les fonts energètiques més problemàtiques. Realitzant el càlcul veiem una possible transició a partir de la concentració d'energia solar i la energia eòlica, no obstant veiem que la problemàtica és més aviat política que no pas tècnica. Assumint un descens en el consum de petroli, comparem dos casos històrics de transició energètica, el de Corea del Nord i el de Cuba. A partir de les conclusions d'aquesta comparativa proposem un seguit de possibles actuacions a realitzar, tant a nivell individual, col·lectiu i científic.

Ja en el capítol 2, proposem una línia d'actuació per tal de solucionar els problemes exposats en el capítol 1, a partir de l'estudi del nexe d'unió entre la termodinàmica i l'economia. Comencem amb una introducció, la qual ens serveix per veure la connexió entre aquestes dues ciències, amb conceptes recíprocs com valor econòmic i valor físic. Per tal quantificar el valor econòmic basat en l'ús de recursos finits veiem que l'exergia esdevé una variable clau capaç de imposar límits termodinàmics als problemes econòmics. Mostrem també dos exemples que permeten entendre la correlació entre fluxos termodinàmics i valors econòmics. El primer està basat en una màquina tèrmica de la qual n'optimitzem l'extracció d'exergia. El segon està basat en la termodinàmica de temps-finit i ens serveix per tal d'optimitzar la potència

extreta d'una màquina tèrmica endo-reversible. Definim també varis conceptes diferents d'eficiència tant econòmics com termodinàmics. Finalment mostrem un model de sostenibilitat , el qual ens dona unes equacions del moviment, basat el les funcions de producció econòmiques.

El tercer capítol està reservat a l'annex, en el qual es profunditza tant en la definició tècnica de l'exergia, com en la solució dels problemes matemàtics d'optimització en l'extracció d'exergia.

En el capítol 4 trobem la bibliografia la qual està ordenada segons l'ordre d'aparició de les referències citades en tots els capítols.

Capítol 1

Peak Oil

1.1 Introducció

La història de la humanitat, incloent-hi els esdeveniments contemporànis, es pot considerar que tracta essencialment amb l'energia, les tecnologies necessàries per tal d'explotar i emplear l'energia i la creixent habilitat dels humans d'emplear-la en l'explotació d'altres recursos. Tal com va dir L.Boltzmann l'any 1886, "Lebenskampf ist zuallerst ein Wettbewerb um Energie" (La vida és primàriament una competició per l'energia disponible). Un cop les necessitats bàsiques es veuen cobertes, tals com el menjar, la roba, el refugi, etc, un sobrant d'energia permet a una societat crèixer en tamany, desenvolupar-se en complexitat i tenir un excedent.

Històricament el creixement econòmic està correlacionat amb un augment en l'explotació de l'energia. Abans de la industrialització, l'energia disponible per als humans provenia directament del sol, tal com la biomassa, la potència humana muscular i la dels animals de ròssec. El desenvolupament de la civilització era bàsicament el resultat d'una explotació creixent d'energies de qualitat cada cop major. La concentració d'energia trobada en els recursos fòssils i el desenvolupament de tecnologies per capturar i utilitzar aquesta energia (per produir una major potència) va propiciar un període de creixement massiu en la industria de l'agricultura en el Regne Unit entre els segles 18 i 19, que més tard es va expandir cap a Nord Amèrica, la resta d'Europa i finalment cap a la resta del món. Aquest fet va derivar, a partir de començaments del segle 19, en el nostre sistema econòmic capitalista actual.

Els combustibles fòssils tenen la propietat de permetre un creixement industrial ràpid, degut al seu relatiu baix cost , a la seva gran abundància, l'alta densitat energètica, la transportabilitat i la seva concetració en les fonts. Desafortunadament, el petroli, el gas i el carbó són en la seva naturalesa fonts

no renovables, garantint finalment un descens en el seu subministrament. El punt clau no és quan exhaurirem el petroli sinó quan no serem capaços de bombejar més petroli respecte als anys previs. Per tant la producció de petroli ha d'arribar a un pic i després començar a descendre. Aquest concepte no és un exercici acadèmic sinó més aviat una realitat. Cinquanta dels vuitanta països amb la producció de petroli més gran ja han arribat a un pic en la seva producció. Els Estats Units va arribar-hi l'any 1970 i el gas natural poc més tard.

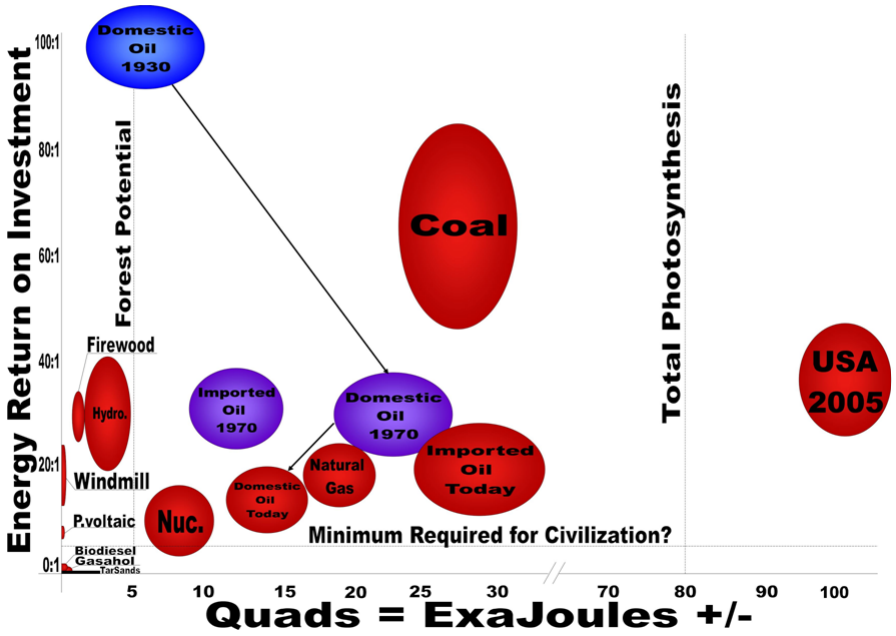


Figura 1.1: El diagrama de globus resumeix les principals característiques del combustibles. La grandària relativa del globus és un índex aproximat de la incertesa qualitativa del EROI (qualitat) i de la quantitat de combustible. Les fletxes representen les diferents connexions entre els diferents punts en el temps. E.E.U.U. va utilitzar aproximadament 100 quads d'energia l'any 2005.

El "energy return on energy investment" (EROI), representat en l'eix Y del diagrama de globus en la figura (1.1), és el ratio d'energia obtinguda relativa a l'energia invertida en obtenir aquesta energia. És un mètode per tal de mesurar i comparar l'energia neta retornada a la societat a través de varis combustibles. Ens permet estimar la quantitat d'energia requerida per tal de produir la següent unitat d'energia.

Els combustibles fòssils han tingut un EROI relativament alt. Durant la dècada dels anys 30, el petroli d'Estats Units tenia un EROI aproximadament de 100:1. L'abundància de petroli en aquesta època va permetre una ràpida expansió i creixement de l'economia. Durant els següents 50 anys el EROI es va situar en uns 30:1, arrivant als anys 2000 a decrèixer fins a un 14:1. En els anys 1970 l'EROI per el petroli importat als Estats Units era de 35:1, derivat dels preus del petroli i del cost energètic en generar canvi. Aquest va caure a 9:1 seguint la pujada de l'any 1973 i altre cop cap a 3:1 després de la segona pujada de preus en el petroli l'any 1979. Subsequentment ha crescut per després tornar a descendre i sembla ser que aquesta tendència a la baixa es manté.

La major part de les alternatives als combustibles fòssils explota l'energia solar a través d'alguna classe de fotosíntesi. Totes les alternatives, amb la possible excepció de l'energia nuclear, no gaudeixen de les característiques favorables dels combustibles fòssils. Les tecnologies existents, per a la major part de les alternatives, no són capaces de replicar tant la quantitat com la qualitat d'energia que s'adquireix actualment a través dels combustibles fòssils. L'esgotament de fonts de combustible amb un alt EROI juntament amb la dificultat de trovar alternatives viables és probable que tingui un impacte enorme en el futur del creixement econòmic. Les millores en eficiència i les noves tecnologies són importants, no obstant semblen ser insuficients per compensar l'esgotament. Si volem continuar el nostre camí com a societats viables, aleshores haurem d'anticipar tots aquests temes i aquestes problemàtiques i apendre a viure amb la realitat dels recursos existents.

1.2 Definició del Peak Oil

Existeixen algunes qüestions bàsiques relacionades amb el peak oil les quals hem de tractar. Les qüestions són les següents:

- Què és el peak oil
- És el peak oil una temàtica nova
- Hi haurà un peak oil a nivell global

L'ús de la frase peak oil és relativament nou i va ser inventada per Colin Campbell l'any 2001, el qual el va definir com:

"El terme Peak Oil es refereix a la tassa màxima de producció de petroli en qualsevol àrea sota consideració, reconeixent que es tracta d'un recurs finit, subjecte a exhauriment."

A la pràctica, la tassa màxima de producció en una àrea determinada s'assoleix quan la producció de nous camps no és suficient per compensar la disminució en la producció dels camps petrolífers. Si aquest fenomen ocorre a escala global, la producció global de petroli comença a disminuir i s'assoleix un peak global de petroli. D'acord amb aquest fet, un increment o inclús una demanda estable de petroli no pot ser satisfeta per la producció. Per tant, la producció global de petroli té un nivell de pic el qual no pot excedir, tal com és pot observar en la figura (1.2). Hem de mencionar que els valors de les prediccions i de la demanada no són projeccions reals sinó especulatives, fetes per tal d'il·lustrar el concepte del peak oil. No obstant, el pic en la producció pot ser causat també per una caiguda i un decreixement en la demanda. És també important distingir entre l'esgotament del petroli i el pic del petroli. Després del pic, la producció de petroli continuarà durant molt temps encara, però en un mode decreixent. A més, existeix encara una quantitat molt gran per produir. D'una altre banda, l'esgotament del petroli significa que existeix una quantitat molt petita i bé nul·la de petroli per produir.

Les freqüents mencions i debats entorn el peak oil suggereixen que és un tema relativament nou, no obstant és realment un tema bastant antic. El concepte d'un pic producció futur per el petroli va ser discutit primerament per M. King Hubbert l'any 1949, un geofísic empleat en la companya petrolífera Shell Oil. Va desenvolupar un mètode, basat en una corba en forma de campana, la qual va utilitzar com a model per a la producció anual i de l'ultimately recovery resource de petroli i gas en el món i a EEUU. El seu mètode i la corba de campana sovint es referencia com a model de Hubbert i corba de Hubbert respectivament. Aquesta teoria es veurà en més detall en la secció següent.

L'any 1956, Hubbert va predir, utilitzant una corba en campana i dues estimacions diferents per els URR de petroli en els EEUU, que la producció petrolífera per els 48 lower states de EEUU tindrien un pic entre els anys 1965 i 1972. Aquesta predicció va resultar ser certa, ja que la producció de petroli a EEUU va arribar al pic l'any 1970. Versions modificades d'aquesta teoria s'han utilitzat per Campbell i Laherrère [1998], Ivanhoe [1996] i Deffeyes [2001] per anomenar-ne uns quants. No obstant el model de Hubbert és força controvertit i debatut per alguns autors tals com Lynch [2003].

L'àrea de producció de petroli més antiga i madura, és a dir la més ben explorada del món és la formada pels 48 lower states d'EEUU. La regió petrolífera més recentment descoberta és el Mar del Nord, on el Renge Unit i Noruega es reparteixen el pastís de la producció. Els primers pous perforats al Mar del Nord van ser perforats l'any 1963 i el primer camp petrolífer gegant va ser el Norueg Ekofisk l'any 1969. La producció de petroli als EEUU incloent-hi Alaska, mostra un pic clar l'any 1970, tal com podem observar

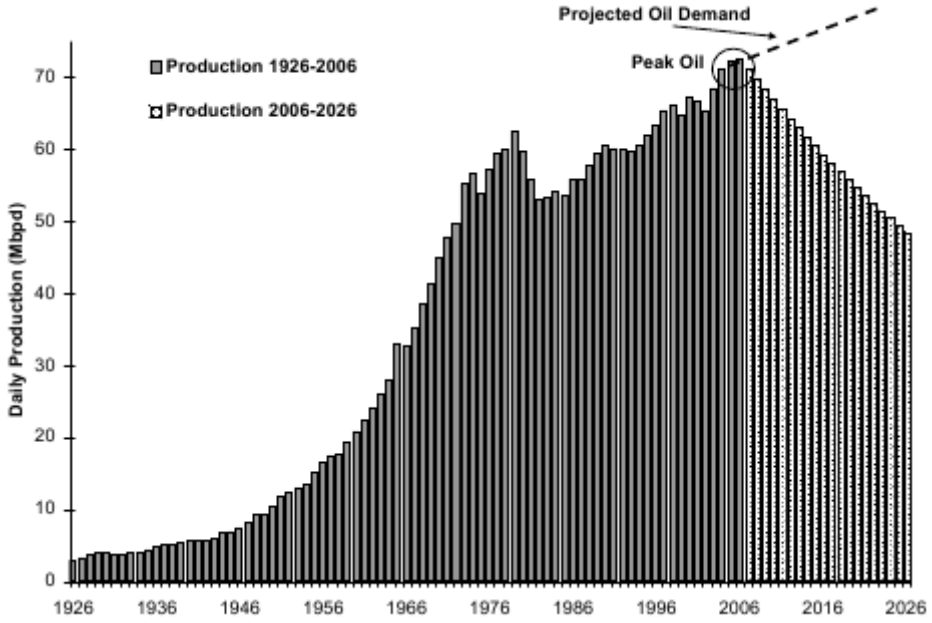


Figura 1.2: Producció mundial diària de petroli en milions de barrils per dia (Mbpd), de 1926 a 2006, i projeccions per a la producció futura. Les prediccions no són estimacions reals, però estan incloses per tal d'il·lustrar el concepte del peak oil.

en la figura (1.3). L'increment en la producció dels EEUU l'any 1976 es deu majoritàriament a l'obertura del conducte d'Alaska. Durant aquells anys el conducte contenia petroli produït a la badia de Prudhoe, la qual conté el camp petrolífer més gran en els EEUU.

El doble pic en la producció del Regne Unit (figura 1.3) necessita d'explicació. El primer pic, el qual va succeir als anys 1985-6 i la següent caiguda en picat en la producció del Regne Unit no és deguda a la mancança de busques sinó al tràgic desastre del conducte Piper Alpha i les seves conseqüències.

El 6 de juliol de 1988, una explosió en la fuga de condensat (el condensat està en fase gasosa en el reservori però condensa a líquid a la superfície) va produir grans flames de petroli a la plataforma Piper Alpha del Mar del Nord. Les flames van provocar explosions massives i l'accident va prendre la vida a 167 persones.

Òbviament, les normes de seguretat van esdevenir d'alta prioritat i la instal·lació de nous equipaments i de rutines va restringir la producció durant uns quants anys. No obstant, la caiguda en la producció de 1999 i en endavant és deguda al decreixement de producció dels camps petrolífers en combinació de descobriments cada cop menors i més petits. Aquest fet és cert inclús no

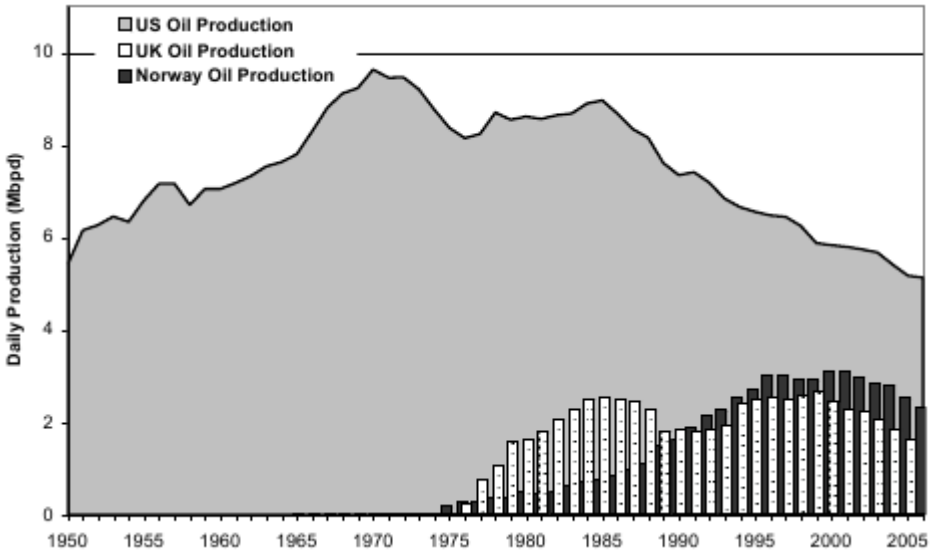


Figura 1.3: Producció de petroli entre 1950 i 2006, en milions de barrils per dia (Mbpd), d'Estats Units (incloent-hi Alaska), Regne Unit i Noruega.

només si es considera exclusivament el petroli en cru sinó que s'inclouen tots els líquids. La producció de petroli de la part noruega del Mar del Nord al igual que la producció del mar noruec va arribar al seu pic l'any 2000 (figura 1.3), però la producció total de líquids va arribar al seu pic l'any 2001.

Per tant, l'àrea petrolífera més madura, és a dir la d'EEUU, i l'última regió més gran descoberta, el Mar del Nord, estan ambdues en decreixement i han passat els seus respectius pics. La conclusió és que totes les regions petrolíferes, les madures al igual que les més noves, assoliran un pic per després començar a declinar. Per ambdues regions el fet ha esdevingut tot i una demanda de petroli i d'un preu del petroli considerablement alt. Així les tasses de producció altes estaven motivades però eren aparentment impossibles. Això no és en si mateix una evidència per a un imminent pic de petroli global però hi apunta clarament en un futur no gaire distant.

1.3 El Model de Hubbert

1.3.1 Teoria del Model de Hubbert

El model més conegut per a l'exhauriment d'un recurs natural és el model de Hubbert. Aquest model respecte al petroli considera tres factors: la tassa de descobriments petrolífers, la tassa de producció petrolífera i la grandària

de la reserva petrolífera a un temps determinat. La idea és que per a una regió nova, on s'assumeix que no existeixen restriccions en l'explotació, els primers descobriments són petits i la tassa de descobriments és baixa. Durant l'exploració tant la grandària dels descobriments i la tassa de creixement augmenten degut a un coneixement més ampli de la regió. Més tard durant l'exploració la tassa de descobriments decreix al igual que la mida dels descobriments. En acord, la valor acumulat de tots els descobriments (V_D) vindrà representat per una gràfica de tipus sigma (forma de S) (figura 1.4).).

Un factor important és el fet que el petroli ha de ser descobert abans de que pugui ser produït. Per tant, la producció de petroli retardada en el temps respecte els descobriments. La producció acumulada (V_P) tindrà un comportament similar al igual que els descobriments acumulats. Més enllà s'assumeix també que el petroli es produeix sense cap tipus de restriccions.

Com que existeix un temps de retard entre els descobriments i la producció hi haurà una quantitat de petroli disponible, la qual és la reserva (V_R). La grandària de la reserva a un temps determinat ve donat per l'equació (1.1) i es mostra en la figura (1.4).

$$V_R = V_D - V_P \tag{1.1}$$

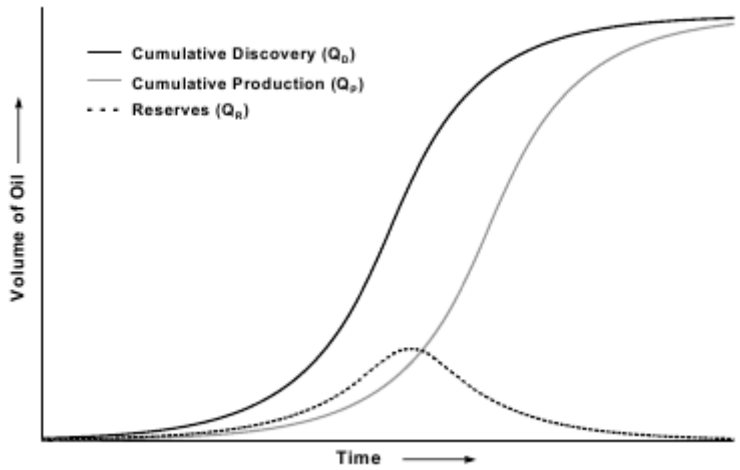


Figura 1.4: Forma teòrica de la curva de Hubbert, la qual és un model per l'explotació i el descobriments de petroli en front del temps.

El tassa de canvi temporal tant per els descobriments acumulatius i la producció seran corbes similars, però un altre cop mogudes per un retard temporal. La tassa de canvi és la pendent de la corba, la qual és la derivada de la corba. Aquesta dona una tassa de descobriments i una tassa de producció.

Prenent la derivada de l'equació (1.1) ens dona la tassa de canvi de les reserves (equació 1.2) i es mostra en la figura (1.5).

$$\frac{dV_R}{dt} = \frac{dV_D}{dt} - \frac{dV_P}{dt} \tag{1.2}$$

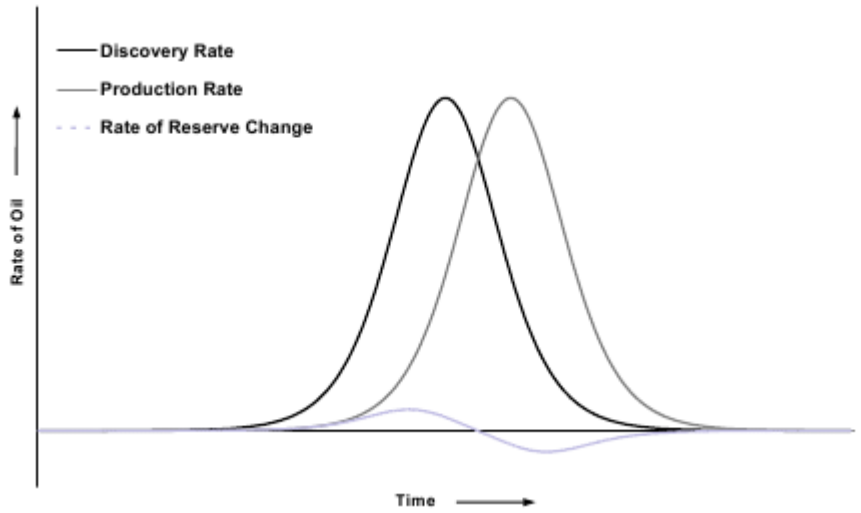


Figura 1.5: Forma teòrica de la curva de Hubbert, quan s'utilitza la tassa en comptes del volum. (Comparar amb la figura 1.4)

Aquesta gràfica mostra dos temps importants: el temps quan $\frac{dV_R}{dt}$ està en el màxim i el temps quan $\frac{dV_D}{dt}$ és igual a zero. Aquest primer temps se l'anomena com a punt punt d'inflexió. L'últim temps succeeix a meitat de camí entre el pic de la tassa de descobriments i el pic de la tassa de producció. Aquesta observació es pot utilitzar per tal de determinar per endavant el temps del pic de producció. Es necessiten dos paràmetres: el retard temporal (Δt) entre els descobriments i la producció i el temps quan $\frac{dV_R}{dt}$ és igual a zero (t_0). No obstant aquesta predicció assumeix que hi ha una bona correlació entre descobriments i producció al igual que no existeixen restriccions en ninguna d'aquestes.

La corba tipus sigma (figura 1.4) es pot descriure matemàticament a través d'una corba logísitica, la qual va ser formulada primerament per Verhulst l'any 1845 i usada en estudis demogràfics. Aquesta corba pot també ser utilitzada per modelitzar la producció acumulada de petroli i està descrita per l'equació (1.3).

$$V_P(t) = \frac{dU}{1 + e^{a(t-t_m}} \tag{1.3}$$

on

- $V_P(t)$ és la producció acumulada de petroli al temps t.
- U és el Ultimate Recovery (també anomenat URR).
- t és el temps.
- t_m és el punt mig o el temps del pic.
- a és un factor que descriu el pendent.

No obstant, la corba (figura 1.5) per a la producció anual és més convenient d'utilitzar ja que mostra el pic d'una manera clara. Tal com hem mencionat a dalt, la derivada de la corba de producció acumulada és la tassa de producció. En acord, la tasa de producció és per tant la derivada respecte al temps de l'equació (1.3), la qual s'expressa en l'equació (1.4):

$$P = \frac{dV_P}{dt} = \frac{aU}{2 + 2cosha(t - t_m)} = \frac{2P_m}{1 + cosha(t - t_m)} \tag{1.4}$$

on

- P és la producció de petroli anual.
- $P_m = \frac{aU}{4}$ és el pic de producció.

El tractament matemàtic de la corba de Hubbert no està discutit en els treball de Hubbert tal com explica Deffeyes en el llibre "The impeding oil shortage", però l'equació és anterior és la corba de Hubbert d'acord amb els treballs de Laherrère.

Un altre tipus de funció usat extensament en la literatura per tal de descriure la producció anual és la Gaussiana, o funció normal. Els paràmetres usats en una funció Gaussiana la qual descriu la producció anual són: ultimate recovery (U), el punt mig (t_m) i la desviació estàndard (σ).

1.3.2 Aplicacions del model de Hubbert

L'aplicació principal del model de Hubbert és predir la producció de petroli futura a partir de les dades històriques. Això es fa a través de la construcció de diferents corbes de Hubbert usant o bé l'equació Gaussiana o bé la logística i ajustant els paràmetres per tal que la corba s'ajusti el millor possible amb les dades actuals. La fiabilitat de la predicció depèn de l'estatus d'esgotament i hi ha tres situacions diferents [Laherrère, 2000].

Peak de post-producció En aquest cas coneixem tant P_m com t_m, només necessitem calcular a. Aquest cas dona la predicció més fiable.

Pic de pre-producció però post inflació Si s'ha arribat el punt d'inflexió, és a dir, quan l'increment de producció té un màxim, es possible calcular P_m i t_m. Aquesta predicció és menys fiable que la predicció quan el peak de producció ha succeit.

Peak de pre-producció i pre inflació Les prediccions no es poden fer a través de les dades de producció. No obstant les dades de reserves es poden utilitzar de dues maneres diferents. Primerament, les dades de descobriments anuals es poden utilitzar si assumim una bona correlació entre els descobriments i la producció (figura 1.5). No obstant, si els descobriments no han arribat al seu peak, la predicció esdevé molt poc fiable. El segon mètode està basat en la utilització de les estimacions dels ultimate recorvery. El peak succeirà al punt mig del exhauriment, el qual s'arriba quan es produeix la meitat del ultimate recovery. No obstant, això assumeix un cicle únic d'exploració (figura 1.5).

Els 48 lower states de E.E.U.U. Poden ser modelitzats a través de l'equació (1.4), la qual condueix cap a un bon ajustament de les dades actuals (figura 1.6). Aquest fet es pren com una validació del model, però és important aclarir que les restriccions en l'exploració i l'explotació van ser en aquell temps molt poques. Per tant, les assumpcions per al model teòric estaven completes. Un estudi similar sobre la producció global, un altre cop utilitzant l'equació (1.4), mostra un bon ajust fins l'any 1973 (figura 1.7). No obstant, a partir d'aquesta data, quan la Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC) va restringir la producció, es mostra una clara discrepància entre el model i la realitat, on per tant les condicions del model no es compleixen. Utilitzant més d'un descobriment per cicle es possible construir un models més avançats que els de Hubbert, els quals mostren un ajustament molt bo a les dades actuals i com a conseqüència a la corba de producció global [Laherrère, 2000].

1.3.3 Tassa de producció de petroli en front les reserves de petroli

Tot i que pot semblar molt fàcil, entendre la diferència entre la tassa de producció i les reserves és necessari, especialment per als anàlisis de la producció futura. A més, el concepte de l'exhauriment és un altre tòpic del qual se'n necessita una explicació clara.

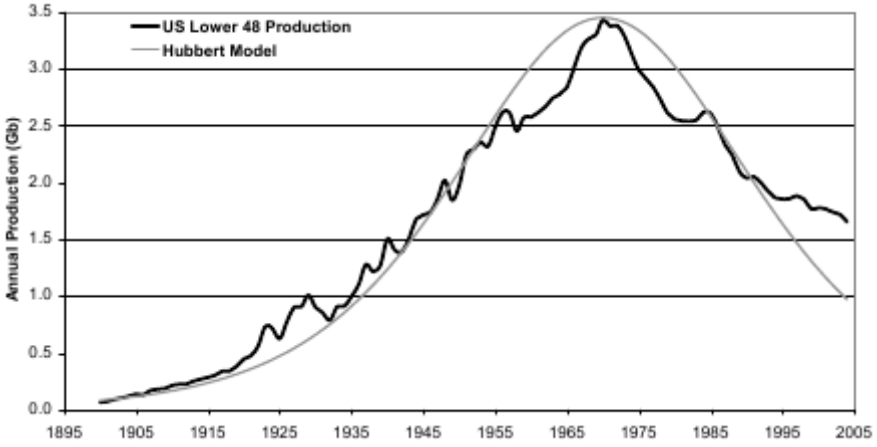


Figura 1.6: Model de Hubbert de la producció anual de petroli dels 48 lower states de E.E.U.U. en bilions de barrils (Gb), comparat amb la producció actual.

La tassa de producció de petroli és única per a cada un dels camps petrolífers individuals i depèn de quina és la naturalesa del petroli, les característiques de la reserva, la pressió del reservori, el nombre de pous i el volum de petroli en el reservori. El flux d'un pou petrolífer pot veure's augmentat gràcies a una instal·lació adequada del tipus bomba de pressió o un recuperador secundari.

Hem de tenir en compte l'exhauriment alhora de discutir la tassa de producció i les reserves d'un camp petrolífer. L'exhauriment volumètric d'un camp petrolífer és simplement l'explotació de petroli i comença en el moment en el qual es produeix el primer barril de petroli. La tassa de producció és una manera habitual d'expressar el temps de vida restant d'una reserva petrolífera. No obstant, la divisió de les reserves provades entre la producció actual no ens proporciona una mesura de la sostenibilitat d'un camp petrolífer. Primerament s'assumeix que la producció continuarà sent constant a un cert nivell, la qual cosa no succeeix com és el cas de la figura (1.8). Després s'assumeix que es pot produir l'últim barril de petroli en el futur igual de ràpidament que en l'actualitat. Aquestes assumpcions ignoren el concepte d'exhauriment de recursos i com a conseqüència són errònies. El punt crucial és que les reserves provades no ens indiquen totalment el futur de les capacitats de producció. Per exemple, el camp de Beryl en el Regne Unit i part del mar del Nord té una reserva estimada del voltant de 200 Mb. El camp Alpine d'Alaska més o menys disposa de la mateixa quantitat de petroli. No obstant, la producció esperada dels camps dista molt de semblar-

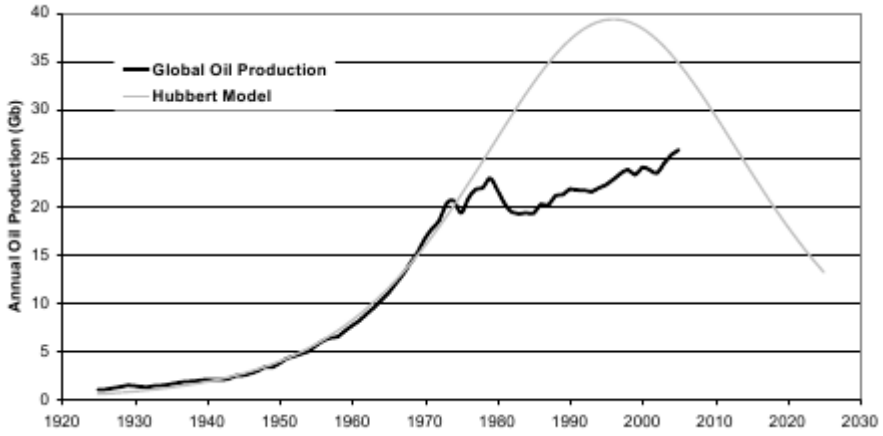


Figura 1.7: Model de Hubbert de la producció anual de petroli en bilions de barrils (Gb). La corba es va construir per tal de ajustar-se a la producció fins l'any 1973.

si, Beryl produeix al voltant de 25.000 bpd mentre que la producció d'Alpine està sobre els 120.000 bpd. La diferència en la tassa de producció d'ambdós camps és deguda principalment a l'exhauriment volumètric i de pressió, el temps de vida del camp i on és el camp es veu en la figura (1.8). En aquest exemple, Beryl és un camp antic en la seva fase de descens, la qual cosa significa que la tassa de producció continuarà minvant en el temps. D'una altre part, Alpine està encara en fase de construcció i pròximament arribarà a un plateau en la producció. Quan un camp ha arribat a la seva fase de decreixement en aquest moment s'ha acabat amb una producció fàcil i sense costos alts. En la majoria dels casos el decreixement serà permanent. El que es pot fer són varis intents per tal d'abaixar la disminució i per tant reduir la pendent de la fase de descens. La producció futura d'Angola s'estimà que està al voltant de 14 Gb [Sandrea i Barkindo 2007], al igual que les contribucions futures del Mar del Nord (Dinamarca, Noruega i Regne Unit) [Radler 2006]. No obstant les tasses de producció futura per aquests països no són similars: a Angola s'espera que les tasses de producció creixin ràpidament mentre que les previsions per el Mar del Nord s'espera que decreixin. Per tant, les reserves petrolíferes majors no són suficients per tal d'indicar-nos si la producció futura declinarà o decreixerà. Per tant s'ha d'incloure també la maduresa i les adicions eventuals de nous camps petrolífers.

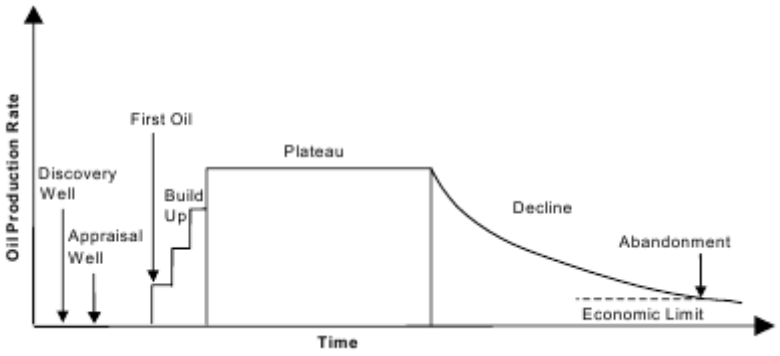


Figura 1.8: Perfil de producció d'un camp petrolífer

1.3.4 La qüestió de les reserves - retroactivitat i substitució

Des de la baixada en la indústria del petroli s'ha produït nou petroli i s'han realitzat nous descobriments. La diferència entre el volum acumulatiu descobert i el volum acumulatiu produït és la reserva de petroli. Cada any es produeix mundialment petroli i també se'n descobreix anualment. Diem que ocorre una substitució positiva en les reserves i una adició neta si el volum descobert de petroli és major que el volum produït. Aquesta connexió és certa òbviament a escala global de la mateixa manera que per a una petita empresa petrolífera. La reserva global és un dels paràmetres a estudiar per tal de determinar la producció futura. D'acord amb això, la qüestió si la reserva global està creixent o bé minvant és important. Aquesta qüestió sembla tenir una resposta òbvia clara, no obstant és un tema de debat amb molta controvèrsia. Més enllà es necessiten prendre en consideració les següents qüestions.

- Que s'inclou dintre de l'estimació de les reserves.
- De quina manera respecte la incertesa d'una reserva es mesura.
- Quin mètode de càlcul de reserva s'ha utilitzat.
- És l'estimació de la reserva extreta d'una entitat pública o per una font de la indústria.

El punt crucial és ser conscient de les diferents inclusions en les estimacions de les reserves. Especialment si, per exemple, les terres vituminoses de

Canada i/o de l'Orinoco Veneçolà s'inclouen o no s'inclouen en les estimacions. La base de recursos d'ambdós reserves és molt gran però igualment és una proporció petita la qual es desenvolupa.

És també important saber amb quin tipus d'estimació de reserves utilitzem, és a dir, si són reserves provades (1P) o bé reserves provades més probables (2P). Les reserves provades indiquen o bé el volum que és més probable que es produeixi com o el que està dintre d'un 90% de probabilitat. Les reserves provades més provables són l'estimació més optimista i haurien de ser majors a les reserves provades.

Quan es descobreix un camp petrolífer es realitza una estimació del volum recuperable. Aquesta estimació conté estimacions de les reserves provades, probables i possibles. La grandària de les estimacions anirà creixent al llarg dels anys esdevenint cada cop més acurades en el volum recuperable. En aquest desenvolupament de l'estimació de la reserva s'inclouen les extensions dels camps, les revisions de les estimacions primeres i la disponibilitat de noves tecnologies que millorin la recuperació del petroli. Aquests punts es refereixen normalment al creixement de les reserves. Això significa que el volum de petroli recuperable estimat pot créixer amb el temps. Això pot ser una mica confús ja que un coneixement d'un camp i dels seus reservoris es pot interpretar com a un nou descobriment. Per tal de solucionar aquesta confusió s'utilitza la retroactivitat, és a dir, el creixement subseqüent d'una reserva està datat al l'any del descobriment original. Aquest mètode mostra de manera simple el descobriment d'un camp i el desenvolupament d'una reserva al llarg del temps. A més, les contribucions per part dels descobriments de nous camps són bastant evidents.

Les bases de dades públiques utilitzades més àmpliament són les de BP Statistical Review of World Energy [BP] i Oil & Gas Journal Worldwide Report [OGJ]. Hi ha d'altres tals com World Oil i OPEC Annual Statistical Bulletin. Les estimacions de BP, les quals "no representen necessàriament la visió de BP sobre les reserves provades per a cada país" [BP 2005], són en gran mesura fonamentades en les dades de OGJ.

En alguns casos les dades públiques poden ser intencionadament confoses i alterades. Aquesta visió està fonamentada per els dubtosos informes sobre reserves d'alguns països associats amb l'OPEC al voltant dels anys 1980 i per les noticies provinents de fonts internes a l'IEA sobre les modificacions de les previsions en la publicació del WEO de l'any 2010.

Les empreses nacionals de petroli (NOC) es van establir dins dels països principals de l'OPEC durant els anys 1970 degut a l'expropiació de les explotacions d'empreses estrangeres. L'any 1985 Kuwait va informar sobre un increment de prop del 50% de les seves reserves (taula 1.14). Degut a que la mesura de les reserves era un paràmetre per el càlcul de la quota d'expor-

tació d'un país això incrementaria la quota de producció de Kuwait i com a conseqüència un increment en les exportacions. Uns anys més tard , el 1987, Veneçuela va doblar les seves reserves, probablement incloent-hi reserves conegudes de fa temps de petroli pesat. Això va portar a Abu Dhabi, Dubai, Iran i Iraq a incrementar en gran quantitat les seves reserves per tal de protegir les seves quotes. Uns anys més tard Aràbia Saudí va acompanyar-ho amb un increment de quasi el 50%. En total l'increment de 1986 a 1991 va ser de 306 Gb. No obstant, l'augment de les reserves estimades va ser atribuïda a que les estimacions de les companyes estrangeres eren massa baixes [Hemer i Phillips, 1989, 1990]. No obstant el creixement de les reserves en els camps gegants d'aquests països va ser de 108 Gb, produint una diferència en les revisions de 108 Gb, tamany considerable a 15 camps de la mida de la baia de Prudhoe a Alaska. La manca d'informació de descobriments juntament la diferència de creixement de les reserves i les revisions implica que les revisions van ser massa grans. A més tots els països principals de l'OPEC han produït grans quantitats de petroli de 1986 a l'actualitat però la gran part de la informació sobre reserves no ha estat alterada (taula 1.14).

Una mirada més enllà de les estimacions de les reserves revela que 65 països d'un total de 98 no han canviat els nombre de les reserves al final del 2004 com en el final del 2005. Durant el període 2002-2007, 37 estimacions de reserves no han canviat mentre que 25 no ho han fet en el període 1997-2007. És per tant raonable pensar les estimacions de caire públic sobre les reserves no són molt fiables. Per tant l'ús de dades de provinença pública s'ha de fer amb cautela.

Al contrari, tenim més fiabilitat fent servir dades provinents de la indústria les quals estan fonamentades en les reserves retroactives .Una comparació entre l'estimació de les reserves disponible en el domini públic i en les fonts de la indústria mostra una sorprenent similitud al voltant de 1200 GB (figura 1.9). No obstant, les tres estimacions públiques estan basades en reserves provades, mentre que les estimacions de la indústria són de tipus 2P, excepte per els E.E.U.U. i Canadà. Una manera de convertir 2P a 1P és amb el factor de 1P igual 0,75P [Mearns 2006]. Per tant, les fonts provinents de la indústria donen una estimació per a les reserves considerablement més petites que per les de domini públic (figura 1.9).

Els descobriments de nous camps anuals han estat menors, excepte per algunes excepcions, que els volums produïts els últims 25 anys (figura 1.10). No obstant, si afegim el creixement de reserves, els descobriments anuals han excedit els volums produïts en la majoria dels anys.

És important adonar-se que aquest fet indica una manca de descobriment de nous camps i el creixement de les reserves es principalment degut als descobriments antics, cosa que resulta òbvia al comparar els descobriments

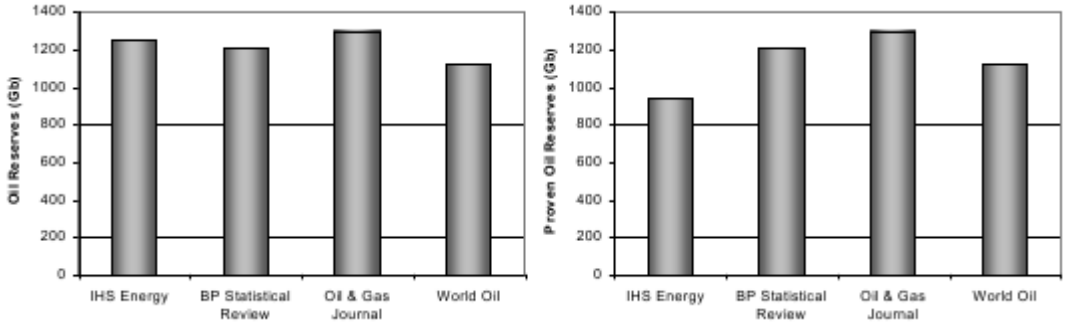


Figura 1.9: En la primera figura es compara la font de la industria 2P amb la estimació de les reserves pública 1P.En la segona figura es compara la font de la industria 1P amb l'estimació pública 1P.

anuals tal com es veu al 1994 i al 2005 (figura 1.11). A més, les futures contribucions en el creixement de les reserves de part dels camps madurs haurien d'anar decreixent amb el temps. La tendència de descobriments al trobar cada cop menys volums en camps nous ens porta cap a una altre preocupació: la base de recursos per al creixement futur de reserves està decreixent.

La quantitat de dades disponibles no és suficient per tal de determinar si existeix una tendència clara. No obstant, el dràstic decreixement en el creixement de les reserves en els últims anys és alarmant (1.12). A més, el resultat de les exploracions durant el 2005, un any on els preus del petroli han estat els més alts en 20 anys, eren del tot menys encoratjadores: 11,5 Gb en camps nous i 9 Gb en adicions de reserves. Casi 10 Gb menys respecte el volum produït (figura 1.12).

1.3.5 Hem sentit a parlar de tot això amb anterioritat?

El pics recents en el preu del petroli, recordem el juliol i l'agost de 2006 quan el preu estava per sobre del 73 dòlars al barril, poden indicar que el pic del petroli global està ja aquí. O bé, ja ne'm sentit a parlar d'això amb anterioritat? Hi ha hagut èpoques anteriors en les quals les crisi petrolíferes han conduit a augments en el preu i on també hi ha hagut la creença en l'esgotament. No obstant cap de les crisis ha mostrat ser un peak, per tant és necessita una mica de precaució alhora de adreçar la qüestió.

Fins el 1993, hi ha hagut 6 crisi petrolíferes de després de guerres [Yergin 1993]. Incloent-hi la crisi de l'Iraq l'any 2003, el nombre de crisis s'eleva a 7. A continuació els hi donem una breu explicació de cada una.

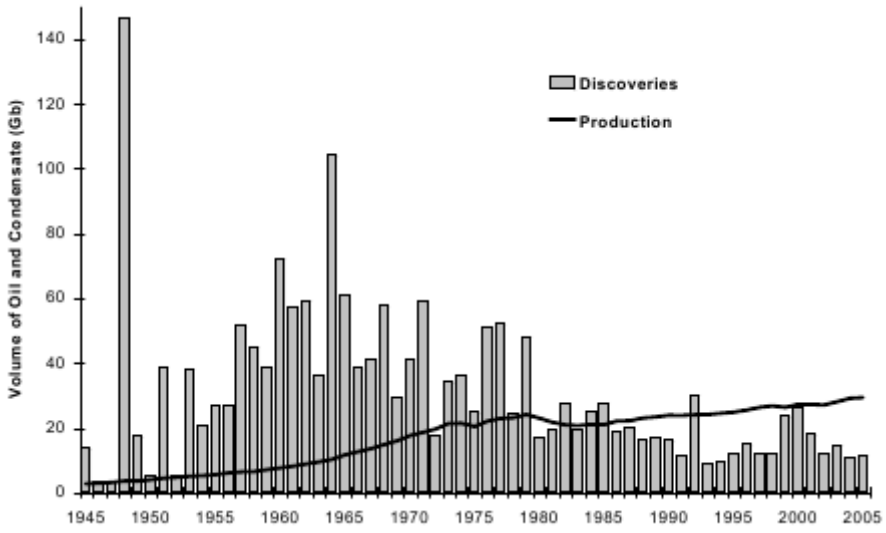


Figura 1.10: Descobriments globals anuals de petroli i condensar i la producció petrolífera en bilions de barrils (Gb).

Nacionalització de Anglo-Iranian Oil Co. (A-I), 1951 Iran volia un millor tracte en la revenue del petroli per part de A-I però el Regne Unit ho va refusar. Aquest conflicte juntament amb les notícies sobre un tracta 50%-50% entre Arabia Saudí i Aramco va portar a la demanda de nacionalització de A-I, la qual més tard es va dur a terme. El govern del Regne Unit va voler declarar la guerra a Iran, no obstant el que es va fer va sur dur a terme un embargament en el comerç. A més, cap quantitat de petroli es va transportar des d'Iran degut a un tracte que va imposar el govern del Regne Unit els propietaris dels pous. Les operacions petrolíferes a Iran van cessar de la mateixa manera que les exportacions de petroli.

Crisi de Suez, 1956 França i Israel van atacar a Egipte quan aquest va nacionalitzar el canal de Suez. Com a resposta, Egipte va tancar el canal i va aturar les estacions d'extracció de la companya Iraq Petroleum Company a Syria. L'efecte combinat va significar que un 75% del subministrament de l'Europa de l'Oest es va interrompre. A més, Arabia Saudí va instituir un embargament de petroli al Regne Unit.

La Guerra dels Sis Dies, 1967 Israel va atacar Egipte i Jordània com a reacció al procés de mobilització militar per part d'Egipte i d'altres països àrabs. Els ministres del petroli àrabs van decidir imposar un embargament de petroli als estats aliats d'Israel tals com el Regne

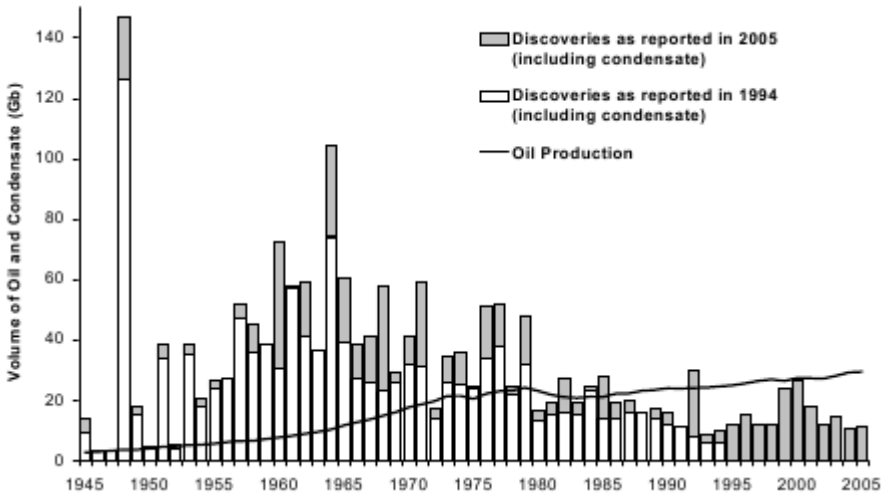


Figura 1.11: Descobriments globals anuals de petroli i condensat, l'any 1994 i el 2005, juntament la producció de petroli en bilions de barrils (Gb).

Unit i E.E.U.U. Aquest va ser el primer cop en el que es va utilitzar l'anomenada "arma petrolífera". El canal de Suez i i les estacions d'extracció d'Iraq i Aràbia Saudí es van tancar en el Mediterrani. Gairebé la meitat de les necessitats petrolíferes de l'Europa del Oest es van deshabilitar. No obstant, la capacitat de diversificació, especialment per part de E.E.U.U., i el desenvolupament del super-contenidors van fer possible exportar petroli a tot Europa.

Guerra de Yom Kippur, 1973 A octubre, Egipte i Syria van atacar Israel. Quan E.E.U.U. i d'altres països van donar suport a Israel, l'OPEC va respondre amb un augment del preu del petroli. El suport continuu en el subministrament per part d'E.E.U.U. a Israel venia com a reacció del suport de la U.R.S.S. a Syria. No obstant, l'OPEC va decidir usar el petroli com a arma un altre cop i va imposar un embargament de petroli als E.E.U.U., és a dir, va aturar tots els carregaments marítims de petroli a E.E.U.U. En aquesta època E.E.U.U no disposava de capacitat de diversificació i el preu va pujar pels núbols.

Revolució Iraniana i Pànic de Preus, 1979-81 Els esdeveniments que van portar a l'endarrocament del governant d'Iran (el Shah) van provocar revoltes en els camps petrolífers i al decembre de 1979 les exportacions iranianes van cessar. La falta de subministrament en combinació amb la pressa per construir inventaris petrolífers va portar a un creixement de preus.

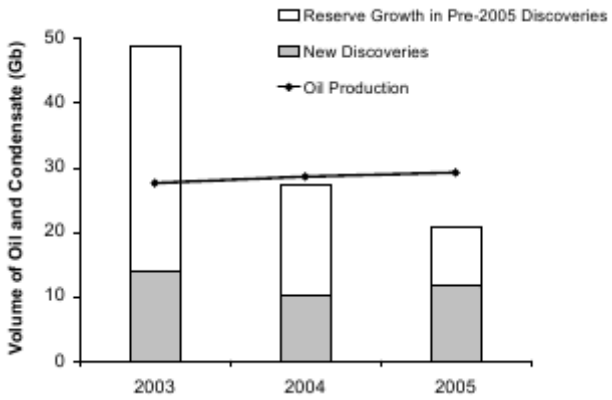


Figura 1.12: Descobriments globals anuals i creixement de les reserves tant de petroli com condensat de 2003 a 2005 juntament amb la producció de petroli en bilions de barrils (Gb).

Embargament de L'ONU a Iraq, 1990 Kuwait va produir més de la quota assignada per part de l'OPEC, la qual cosa va preocupar a la veïna Iraq. A més , una invasió de Kuwait portaria a Iraq a ser la potència petrolífera mundial. Per tal de prevenir una invasió la ONU va imposar en embargament en el petroli des d'Iraq. No obstant, la invasió es va fer realitat i l'efecte combinat del embargament i de la disrupció del petroli kuwaità va portar a un increment en el preu.

Guerra d'Iraq, 2003 Es va voler pensar, sobretot per part d'E.E.U.U., que Iraq desenvolupava armes de destrucció massiva. Iraq, governada per S.Hussein, era considera una amenaça a la pau mundial i al març E.E.U.U. va conduir una invasió. La disrupció en el petroli va comportar increments en el seu preu.

Les set crisis i el seu impacte en el preu del petroli es mostren en la figura 1.13. No obstant, s'ha de veure que el preu és una mitjana anual i per tant no reflecteix els pics de període curt en el preu.

Totes les crisis anteriors denominadors comuns. Primerament el factor geogràfic, totes les crisis estan relacionades amb la dependència en l'Oest Mitjà i el Món Occidental del seu petroli. Després, el petroli no va arribar al mercat degut al fet que alguns països productors van tancar deliberadament les vàlvules dels seus camps i van cessar amb les seves exportacions. Finalment, algunes parts dels mitjans i alguns governs han fet explotar les crisis amb pànic i salvaguardant-se amb l'argument que el món està exhaurint el petroli.

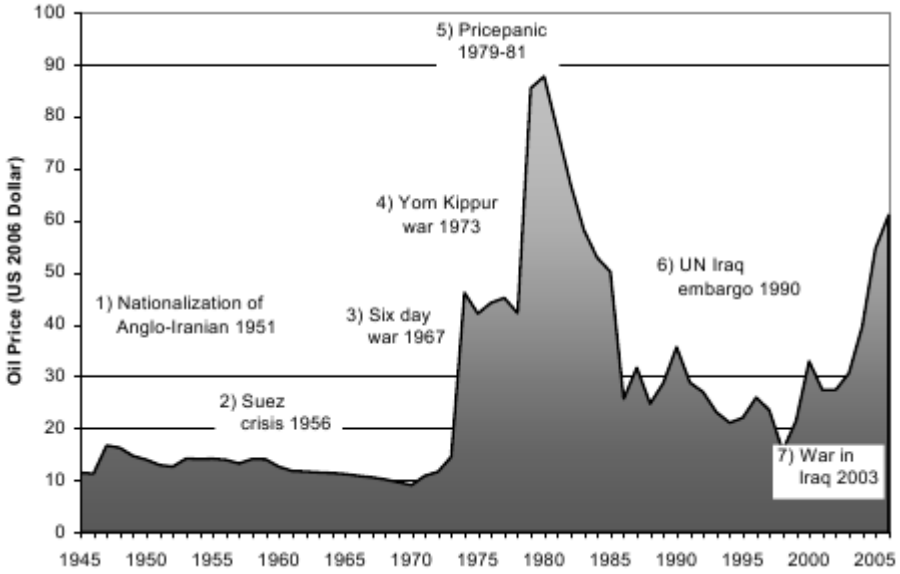


Figura 1.13: Preu del petroli fins al 2006 en USD (preu ajustat a la inflació) i les anteriors set crisis petrolíferes.

Clarament, és fàcil rebutjar la noció d'un peak global de petroli actual respecte a aquestes crisis anteriors, però hi ha una diferència clara: actualment ningú està tancant deliberadament aquelles vàlvules, ans el contrari, totes les vàlvules estan obertes i la producció està més o menys maximitzada. No obstant, una altre qüestió que s'ha d'adreçar és amb quina extensió el preu del petroli és un paràmetre vàlid per tal de predir el futur del peak del petroli. Un altre paràmetre més important per a la producció futura de petroli i per a la predicció del peak del petroli són els camps gegants de petroli, és a dir, els camps petrolífers més grans en tot el món.

Year	Abu Dhabi [Gb]	Dubai [Gb]	Iran [Gb]	Iraq [Gb]	Kuwait [Gb]	Neutral Zone [Gb]	Saudi Arabia [Gb]	Venezuela [Gb]
1980	28	1.4	58	31	65	6	163	18
1981	29	1.4	58	30	66	6	165	18
1982	31	1.4	57	30	65	6	165	20
1983	31	1.4	55	41	64	6	162	22
1984	30	1.4	51	43	64	6	166	25
1985	31	1.4	49	45	***90***	5	169	26
1986	30	1.4	48	44	*90*	5	169	26
1987	31	1.4	49	47	*92*	5	167	25
1988	***92***	***4***	***93***	***100***	*92*	5	167	***56***
1989	*92*	*4*	93	*100*	*92*	5	170	*58*
1990	*92*	*4*	93	*100*	*92*	5	***258***	*59*
1991	*92*	*4*	93	*100*	*95*	5	*258*	*59*
1992	*92*	*4*	93	*100*	*94*	5	*258*	*63*
1993	*92*	*4*	93	*100*	*94*	5	*259*	*63*
1994	*92*	*4*	*89*	*100*	*94*	5	*259*	*65*
1995	*92*	*4*	*88*	*100*	*94*	5	*259*	*65*
1996	*92*	*4*	93	*112*	*94*	5	*259*	*65*
1997	*92*	*4*	93	*113*	*94*	5	*259*	*72*
1998	*92*	*4*	*90*	*113*	*94*	5	*259*	*73*
1999	*92*	*4*	*90*	*113*	*94*	5	*261*	*73*
2000	*92*	*4*	*90*	*113*	*94*	5	*259*	*78*
2001	*92*	*4*	*90*	*113*	*94*	5	*259*	*78*
2002	*92*	*4*	*90*	*113*	*94*	5	*259*	*78*
2003	*92*	*4*	*126*	*115*	*97*	5	*259*	*78*
2004	*92*	*4*	*126*	*115*	*99*	5	*259*	*78*
2005	*92*	*4*	*132*	*115*	*102*	5	*264*	*80*

Figura 1.14: Revisió de les reserves de l'OPEC on els nombres en negreta indiquen l'any de revisió.

1.3.6 Camps petrolífers gegants

Tot i que el nombre de camps petrolífers gegants és bastant petit, és a dir, representen un total de 507 respecte el total de 47500, la seva contribució és molt important. Un 65% de les ultimate recoverable reserves (URR) globals es troba en ells. Històricament els camps petrolífers gegants han estat els màxims contribuïdors a la producció total de petroli i l'any 2005 en representaven un 60% (figura 1.15).

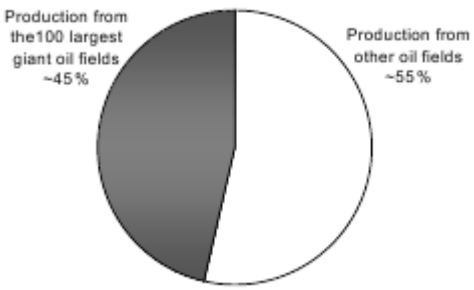


Figura 1.15: Producció dels 100 camps petrolífers gegants més grans comparada amb la producció de petroli total.

Per tant els camps petrolífers gegants són i seran molt importants per a la producció global de petroli. No obstant, aquests camps són en gran part camps madurs que han estat produint petroli durant més de 50 anys. La major part dels camps petrolífers gegants es van descobrir durant els anys 1960. A partir d'aquí, tant el nombre de camps gegants descoberts com les reserves descobertes en aquests ha anat minvant (figura 1.16.

En general, els camps gegants poden sustentar una tassa alta de producció durant un llarg període de temps. Inclús una gran quantitat de camps petits no podria ser capaç de compensar el decreixement de producció d'un camp gegant. Aquest és el cas de Noruega, on els camps gegants van arribar al seu peak uns anys abans de que la producció total ho fes. A una escala major, el mateix argument és vàlid per a Europa i Nord Amèrica. Com a conseqüència, aquest fet juntament amb la tendència a la baixa en els descobriments, suggereix la idea d'un peak de petroli governat per els camps petrolífers gegants.

1.3.7 Producció futura de petroli

L'augment mitjà en la demanda del petroli de 1994 a 2006 calculat a partir de la International Energy Agency (IEA) Oil Market Reports era de 1,74%.

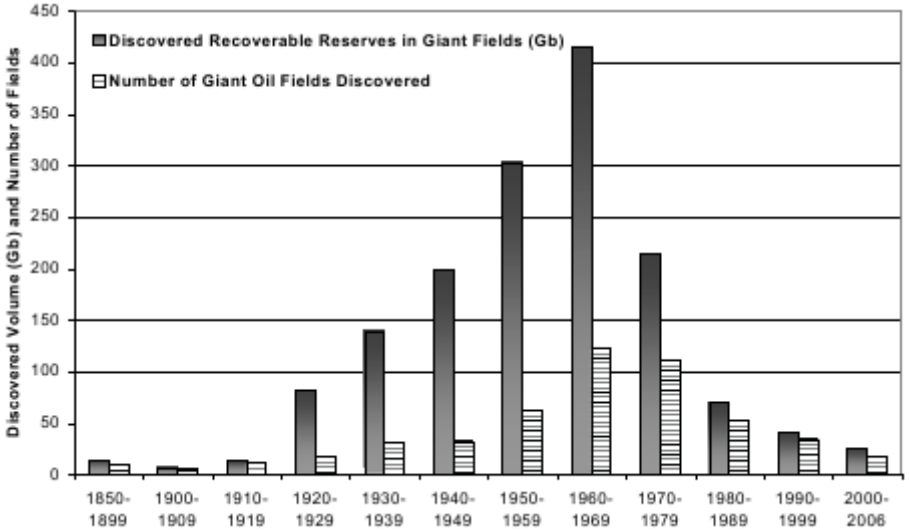


Figura 1.16: Descobriment de camps petrolífers gegants per dècades respecte el nombre i el URR.

Però informes posteriors de l'IEA asseguraven una destrucció en la demanda, deguda als alts preus, fins arribar a unes tasses que abaixen la demanda fins a un 1,3% en l'estimació que va fins l'any 2030 [IEA 2006]. No obstant, el creixement estimat per el World Energy Outlook [IEA 2006] referenciava una demanda de 1,7% en previsions al 2015, en la línia calculada de valors històrics. Un altre dels informes àmpliament citats sobre previsions en la demanda futura d'energia és el el International Energy Outlook publicat per la EIA als Estats Units. En el seu escenari de referència per a la demanda d'energia calculen un 1,4% de creixement en la demanda anual [EIA 2006]. Els dos casos possibles en les previsions es situen entre el 1% i el 2% (figura 1.17).

A la vegada, els camps petrolífers madurs mostren una disminució anual que oscil·la entre un 3% i un 8%. Partint de la producció del 2005, incloent-hi tots el líquids, hi haurà un buit creixent entre el subministrament i la demanda (figura 1.18). Omplir aquest buit és un dels reptes més difícils per a la indústria petrolífera. Primerament la producció de nous camps haurà de compensar la producció en descens dels camps petrolífers madurs ja existents. Per tal de fer-ho, s'arribarà a nivells de producció previs. Després aquests nous camps hauran de incrementar el seu nivell de producció inclús més enllà per tal de satisfer la demanda creixent.

La producció en descens en certes regions amb una demanda creixent generarà una pressió major als països exportadors. Aquest fet a la vegada farà més difícil cobrir el buit. Les fonts principals amb les quals la indústria

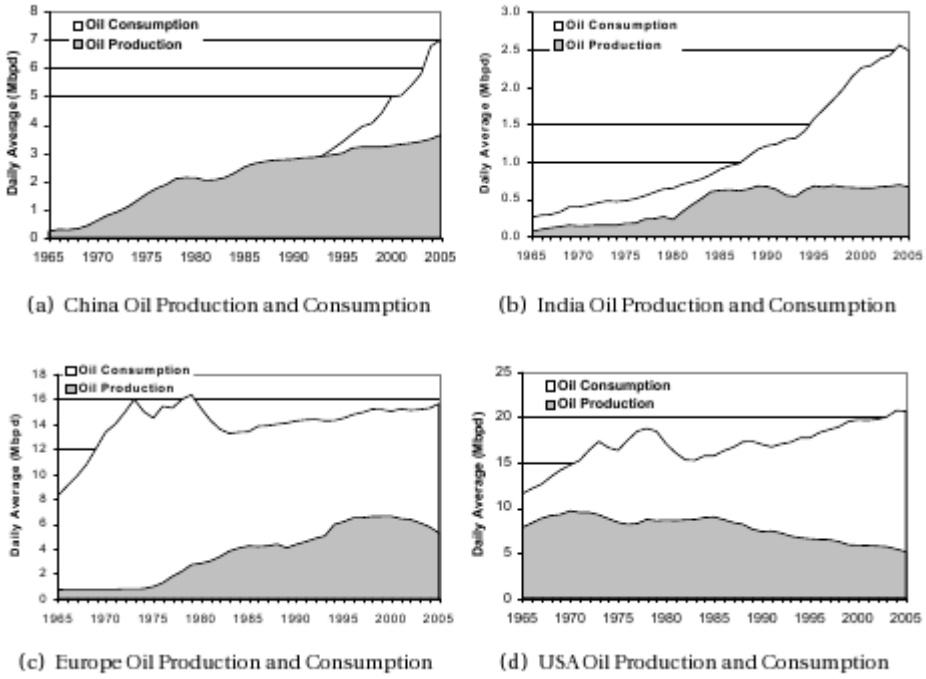


Figura 1.17: Producció de petroli i consum de les 4 regions/països amb major consum mundial a) Xina b) India c) Europa d) E.E.U.U.

intenta suplir aquest buit, dintre de la indústria petrolífera són les terres i esquists bituminosos de Canada, petroli pesat de Venezuela i els petrolis provinents d'aigües profundes. La indústria busca una X per tal de substituir el petroli, la qüestió és existeix aquesta X? A continuació ho veurem.

Finalment, és molt important citar que els informes publicats per la EIA fins el 2006 han estat molt optimistes en quan a disminució a tasses de disminució en la producció, la qual cosa no és sorprenent sabent que la EIA és una agència depenent de la OCDE. No obstant, aquesta tendència a canviat a partir de 2006 fins al punt que el director general de la EIA, Fatih Birol, declarava el 3 d'agost de 2009 que la tassa de disminució de la producció en el 2008 estava entre un 6,7% i un 8,9% anual. El 9 de novembre de 2009 sorgia en la portada de The Guardian l'escàndol sobre els confidents de la EIA, els quals alertaven sobre la manipulació de les dades en els informes sobre previsions futures de la EIA. Ja el 10 de desembre de 2009, Fatih Birol, parlava obertament a The Economist sobre la possibilitat del cènit del petroli per l'any 2020.

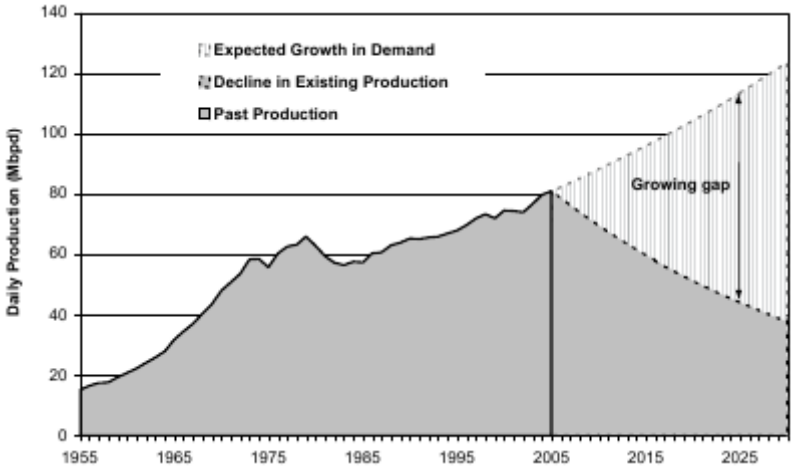


Figura 1.18: Producció històrica juntament amb el creixement esperat de la demanda i la disminució en la producció existent, en milions de barrils (Mbpd). La tassa de creixement de demanda és de 1,7% i el descens en la producció d'un 3% anual.

1.4 Oil Crash

En les seccions anteriors hem vist quin és l'estat de la producció i la demanda de petroli a nivell global. Observant les dades veiem que la producció tard o d'hora arribarà a un pic, si no és que ja ha arribat, a partir del qual cada cop es produirà amb menys quantitat. A continuació si pensem en la dependència de la nostre societat en aquest combustible, veiem que el grau d'impacte d'aquesta mancança d'energia primària pot arribar a generar conseqüències molt dràstic. Arran d'aquest fet s'encunya el terme Oil Crash el qual descriu la imminent i inevitable arribada a un punt en el qual la societat basada en el petroli deixarà de ser viable. Remarquem que Oil Crash no significa que el petroli s'acabi sinó que simplement cada cop es produirà en menys quantitat. Si no es prenen mesures el grau d'impacte es pot elevar al col·lapse del paradigma de societat capitalista, emulant els col·lapses d'algunes societats complexes anteriors a la nostra [Tainter 1990].

1.4.1 Crisi econòmica o energètica?

El fet que la producció de petroli no creixi des del 2005, com hem vist anteriorment i com podem veure amb més precisió en la figura (1.19), no significa que ens estanquem en el nostre consum, el que succeeix és que decreixem. Si mirem la figura (1.20) veiem com China i India i altres països amb economies

més dinàmiques estan augmentant més el seu consum que nosaltres, perquè amb el seu creixement els hi costa menys pagar factures petrolíferes més elevades [Turiel 2010]. Les últimes dades del Oil Watch indiquen que els paisos de la OCDE (incloent-hi Espanya) han perdut en 15% de petroli respecte el 2005 (figura 1.21).

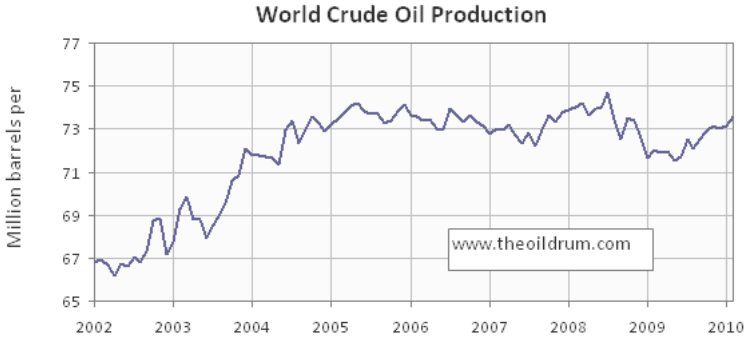


Figura 1.19: Producció mensual de petroli cru durant els últims 8 anys, expressat en promig de milions de barrils diaris (Mbpd).

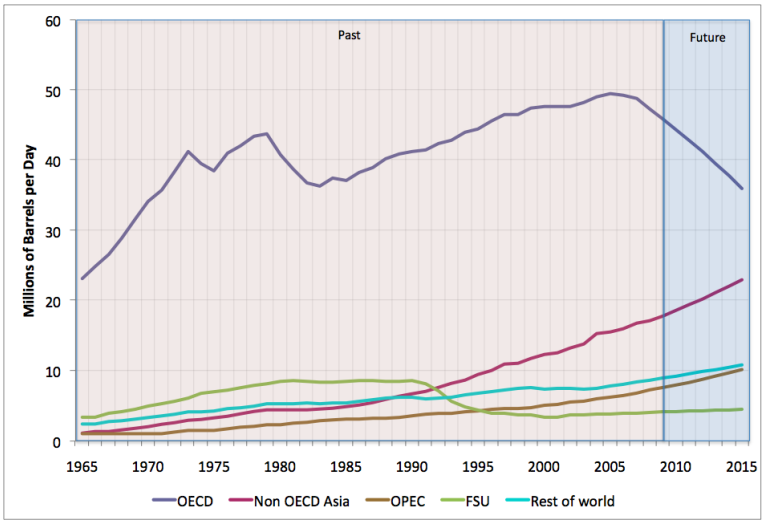


Figura 1.20: Consum en (Mbpd) dels varies regions/països i predicció del consum realitzada per Stuart Staniford a partir de dades de l'IEA.

Tal com veiem en la figura (1.21) anterior estem en una situació de disminució ràpida del consum d'energia, la qual no ha estat planificada sinó més aviat el contrari, ha estat forçada per les circumstàncies. Actualment el

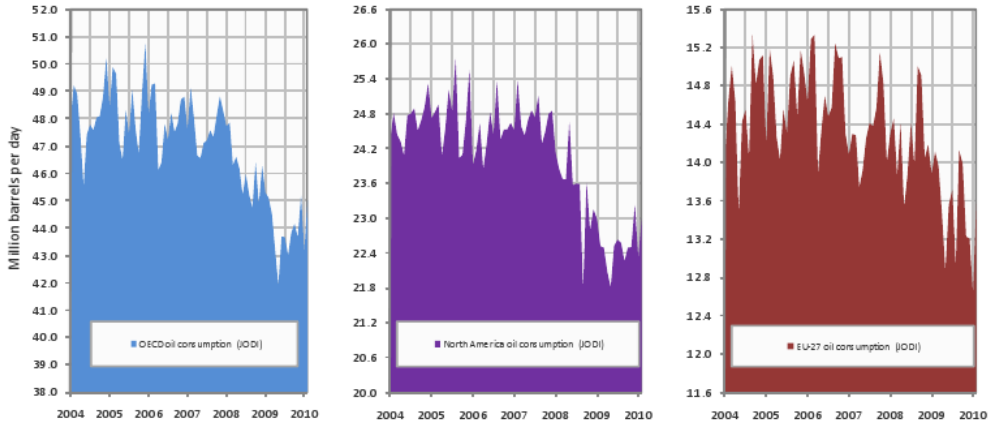


Figura 1.21: Consum en disminució per part dels països membres de la OECD (blau), E.E.U.U (lila) i U.E. (marró), en (Mbpd).

petroli significa, en mitjana, el 33% de l'energia primària consumida mundialment, tot i que a Espanya significa fins a un 48%. Això significa que amb la caiguda del 15% en aquests últims 5 anys hem reduït el nostre consum de petroli en aproximadament un 1,5% anual, és a dir, un 8% de la nostre energia primària. És evident que totes les activitats econòmiques estan fortament lligades amb el consum de petroli, per tant aquesta baixada en el seu consum pot arribar a generar un seguit de conseqüència, les quals són cada cop més impactants a mesura que anem perdent consum petrolífer i el preu d'aquest augmenta. Els graus d'impacte del Oil Crash a la societat es poden organitzar en tres grups:

Primer Nivell d'Impacte:

Automoció privida

Transport de mercaderies

Trasnport de viatjers

Maquinària

Petroquímica

Electricitat

Segon Nivell d'Impacte:

Fabricació d'automòbils

Turisme

Agricultura item Pesca

Aigua

Medicina

Tercer Nivell d'Impacte:

Estat

Ordre social

Llars

La correlació entre el consum d'energia i el PIB[1] es tant ben coneguda que la IEA cada any en la publicació del WEO publica una gràfica (figura 1.22) la qual mostra la forta connexió entre ambdues variables, les quals és mantenen correlades inclús en els moments de fortes recessions econòmiques [Turiel 2010].

Veiem per tant que per tal de créixer econòmicament necessitem créixer el nostre consum energètic i recíprocament si el nostre consum energètic decreix ho fa també el PIB contraient-se d'igual manera. La correlació anterior indica que la crisi que patim actualment és en gran part deguda a la crisi energètica deguda al descens de producció de petroli.

D'una altre banda, degut a l'estacament de la producció de petroli, juntament amb l'efecte sincronitzat d'esgotament d'altres recursos no renovables (peak everything) i el creixement d'altres economies emergents ens veiem portats a reduir el nostre consum d'energia a un ritme bastant ràpid, que en el cas d'Espanya s'aproxima al 1,5% anual [Turiel 2010].

1.4.2 Solucions de la industria

Tal com dèiem anteriorment, la indústria busca una X per tal de substituir el petroli per una altre font energètica. No obstant, sembla probable que no hi hagi una X la qual solucioni aquesta equació energètica, bàsicament degut

[1]El producte interior brut o producte intern brut (PIB) és la suma de tots els bénsi serveis finals produïts en un espai econòmic durant un període de temps determinat, normalment un any, excloent el consum intermedi utilitzat en la producció. Fins a la dècada de 1980 es preferia l'ús del Producte Nacional Brut (PNB), un altre mesurament gairebé idèntic al PIB però que incorpora els béns i serveis produïts per factors propis a l'exterior. La variació d'aquesta magnitud macroeconòmica sol utilitzar-se per mesurar el creixement econòmic

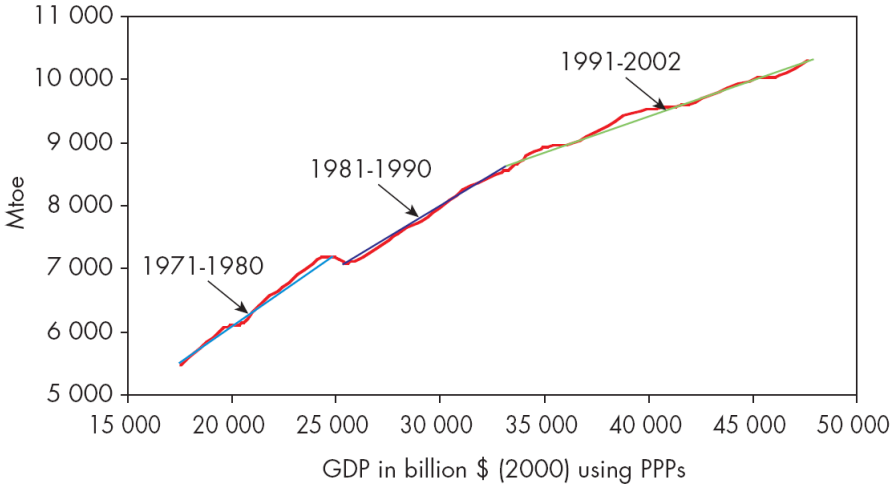


Figura 1.22: En l'eix de les ordenades es veu el consum total d'energia mundial, expressat en milions de tones d'equivalent de petroli i a l'eix de les abscisses es veu el PIB del món, expressat en paritat de poder de compra.

a que el petroli té una densitat energètica sense igual. El petroli s'ha format mitjançant un complex procés geològic a partir de restes orgàniques durant milions d'anys, en aquest punt hem consumit aquest reservori i cada cop en disposem de menys.

A continuació analitzarem les restriccions que tenen cada una de les fonts energètiques disponibles, i anirem descartant cada una de les possibilitats de substitució per finalment plantejar el problema de si existeix una solució tècnica de substitució energètica. Finalment reflexionarem si tot i haver-hi una solució tècnica aquesta es pot implementar sense la necessitat de canviar el sistema polític-econòmic actual.

Per tal de començar, tenim tres tipus de problemes que convé adreçar: la substitució del petroli cru, la mitagació i l'adaptació [García-Olivares 2010].

- **La substitució** del petroli cru és la necessitat de trobar una font primària d'energia capaç de prendre el lloc al petroli, com a font primària d'energia en la societat, sense un col·lapse radical dels nostres estàndards de vida.

- **La mitigació** respon a acceptar el probable decreixement de l'energia disponible després del peak del petroli i intentar evitar les conseqüències més pertorbadores per la societat humana.

- **L'adaptació** respon a l'intent d'adaptar la població humana actual en un nou escenari a llar termini sense combustibles fòssils.

Fonts d'energia primàries

Una font d'energia primària futura ha de ser capaç de proporcionar una quantitat substancial d'energia -potser una quarta part de l'energia utilitada actualment tant nacionalment com globalment. Aquesta font hauria de tindre una EROI de 10:1 o superior, i òbviament no pot ser perjudicial per al medi ambient (incloent-hi el clima), per a la societat i no pot tenir impactes geopolítics grans (tals com la predominança política d'una nació per sobre d'una altre). Finalment un requisit bàsic és que ha de ser renovable. A continuació proposem els candidats [Heinberg 2009].

Sorres Bituminoses i Petrolis Extra-pesats

- Consisteixen en bitúmens (mescles inflamables d'hidrocarburs i d'altres substàncies les quals són components de l'asfalt i de les sorres bituminoses) inclosos en les sorres i el fang.

- El recurs és essencialment petroli que es va formar sense un límit geològic en roca impermable (esquist, sal o anídrit) la qual cosa va permetre que les molècules d'hidrocarburs arribessin a la superfície i es volatilitzessin.

- L'alta viscositat de concentracions de sulfur i metalls las com el niquel i el vanadi, impliquen una gran dificultat per a la recuperació i per al refinament.

- En el informe de Hirsch, s'estima que només 6×10^{11} barrils poden ser econòmicament recuperables de Venezuela, el que implica un temps de 19 anys de consum.

Esquists Bituminosos

- També anomenat kerogen, és el petroli cuit: material orgànic que va ser enterrat a una profunditat suficient o durant un temps suficient necessari per tal de transformar-se químicament en petites cadenes hidrocarburs les quals es troben en el petroli cru i en el gas natural.

- Del kerogen, la tecnologia pot extreure hidrocarburs líquids (esquists bituminosos) i combustible en fase gas.

- Si els esquists bituminosos podessin proveir la demanda actual de 85,5 Mbpd, els 800 bilions de barrils de recurs recuperable durarien aproximadament 26 anys.

- L'EROI estimat varia de 1,5:1 fins a 4:1 i probablement decreixerà en el futur.

Carbó

– Les reserves mundials de carbó s'estima que estan en els 850 bilions de tones mètriques.

– La producció anual està al voltant de 4 bilions de tones, la qual cosa implica reserves per a 200 anys. El carbó produeix el 27% de l'energia mundial total.

– Estudis recents mostren que els límits en el subministrament poden aparèixer aviat; s'espera que la producció global de carbó arribi a un peak sobre l'any 2025 o 2030, amb un descens gradual en la seva producció [Energy Watch].

– Els preus del carbó s'han incrementat substancialment l'any 2007-2008 a mesura que l'economia s'ha anat escalfant, la qual cosa suggereix que un límit en la producció és proper.

– L'impacte ambiental degut a les altes emissions de CO_2 és un dels seus handicaps principals.

– Un de les preocupacions és la sostenibilitat. Una transició del petroli cap al carbó és una transició d'un recurs geològic limitat cap a un altre igual.

Biomassa

– Consisteix en fusta i altres tipus de materials vegetals, com també de fem animal.

– Varies formes de biomassa suposen el 13% del consum d'energia mundial i s'utilitzen per part de 3 bilions de persones per tal de cuinar i escalfar.

– Les targes oficials comparatives d'energia de varies fonts, tals com de la IEA, ometen l'ús de la contribució de la biomassa no comercial i la de caire tradicional.

– La biomassa es pot utilitzar a nivell industrial cremant-se per tal de produir electricitat.

– En un sistema agrícola menys intensiu en l'energia, tal com el que podrem requerir en un futur globalment, els residus de cultius seran necessaris per tal de refertilitzar els cultius i per tant no seran utilitzables per a la generació d'energia.

Biofuels

– Els biofuels són combustible derivats de la biomassa. L'ús de bioetanol i biodiesel està ja establert en certs països.

– Juguen un rol significant en el debat "menjar vs. combustible" i en l'eficiència.

– L'Etanol és un biofuel produït a partir dels alts residus del sucre (canya de sucre, sorgo dolç) o bé del midó (blat de moro).

– També es poden produïr a partir de les plantes que contenen altes quantitats de oli vegetal, tals com l'oli de palma, girasol, algas o jatropha. Aquests es poden cremar directament en màquines biodiesel o bé es poden processar químicament per tal de produir fals tals com el biodiesel.

– La fusta i els bio-productes també es poden convertir en biofuels tals com el gas de fusta, metanol o combustible d'etanol.

Cel·les Fotovoltaiques amb Concentradors

– El plàstic o el vidre amb tints funciona com a guia d'ona.

– Economització de cel·les i metalls estranys.

– El vidre el qual permet entrar la llum del sol en les nostres cases i oficines pot generar també potència per fer funcionar aquests espais.

– El l MIT espera la seva disponibilitat en un panorama de 3 anys.

– La duració actual dels pigments és de 3 mesos, quant el mínim desitjable seria d'uns 10 anys.

Conversió d'Energia Tèrmica Oceànica (OTEC)

– L'energia total disponible és d'un o de dos ordres de magnitud major que la mareomotriu.

– Té una eficiència real de tant sols un 1% o un 3%. Mentre que l'eficiència teòrica oscil·la entre un 6-7%.

– Encara està sota recerca.

1.4.3 Procés d'eliminació

- El gas natural arribarà a un peak més o menys amb el peak del petroli.
- La conversió cap al carbó pot amortir la producció per alguns països (US, Ru, Ch, In, Aus, South Af, Ukr, Kaz) però el carbó disminuirà ràpidament després d'unes dècades després del peak del petroli.
- Els esquists i les terres bituminoses poden contribuir altament al efecte hivernacle i al canvi climàtic, tenen un rendiment energètic menor que el carbó i un EROI limitat.
- Els biofuels tenen un baix EROI i existeix límits tant marítims com terrestres per a la seva producció, tot i que poden ser uns bons "carriers" per al transport (juntament amb l'hidrogen).
- L'energia derivada dels residus no és escalable, la base dels recursos és probable que disminueixi a mesura que la societat esdevingui més eficient.

De les següents 10 possibilitats d'energia primària actuals (nuclear, hidràulica, solar fotovoltaica, eòlica, tèrmica, solar passiva, biomassa, geotèrmica, mareomotriu). La hidroelèctrica no pot augmentar en capacitat més enllà d'un 30%. La nuclear té un creixement lent i costós i existeixen límits en el subministrament d'urani i aquest fet limita la seva escalabilitat, tot i que es podrà utilitzar en alguns països durant les properes dècades. La producció d'energia a partir de biomassa està limitada en escalabilitat a través de la terra i l'aigua disponibles i competeix directament amb els usos del sol per a la biomassa i el menjar. L'energia solar passiva és excel·lent per l'escalfament d'espais, no obstant no genera un excedent energètic útil per a la indústria i l'ús en els transports. L'energia mareomotriu i la de les onades no és tampoc escalable, tot i que pot ser una font complementaria en les regions costeres. La generació d'energia geotèrmica, tampoc és escalable, les bombes de calor es poden utilitzar casi a tot arreu però no poden produir energia primària per el transport i per les xarxes elèctriques. La solar fotovoltaica és encara costosa i es basa en l'ús per a la seva producció de materials estranys els quals podrien ser exhaurits amb facilitat. Les fotovoltaiques de concentració prometen solucionar aquests límits però encara falta molta recerca.

Els candidats finals són l'**energia eòlica** i la **solar tèrmica** de concentració.

- Aquestes tenen un bon EROI, tot i que molt menor al del petroli.

- Poden ser capaces de produir energia a preus raonables.
- No són dependents de metalls estanys i d'altres substàncies.
- Necessiten un bon emplaçament geogràfic.
- Ambdues són dependents de les reserves d'acer i coure.
- Requereixen d'una electrificació de la societat.
- Els "carriers" podrien ser l'electricitat i l'hidrogen.

Molins Eòlics

- Per tal de minimitzar la interferència aerodinàmica les turbines s'han d'espaiar a una distància mínima de entre 5-9 diàmetres del rotor en la direcció del vent i entre 3-5 diamàtres del rotor en la direcció perpendicular del vent

- Els molins de vent majors produeixen entre 2MW i 5MW.

- Tenen una alçada de 78m i un diàmetre de rotor de 82m.

- Espanya és el segon país mundial en el seu ús.

- Desenvolupant el 20% dels llocs de planeta rics en vent es podria produir set cops la demanda mundial d'energia.

Estació Concentradora de Sol

- Andosol 1, 2009, Guadix, Granada (figura 1.23).

- Tubs a una temperatura de 292-392^{o}C.

- 50MW, 21MW-any, 200 Ha.

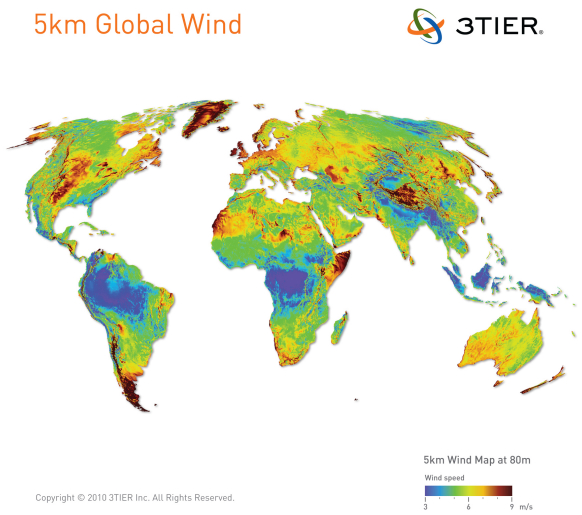
- Concentració solar, EROI 82:1, miralls cilíndro-parabòlics.

- Reflectivitat del 93%.

- 14000 tonelades d'acer.

- Motors de seguiment del sol.

- Eficiència anual de conversió d'energia solar del 16%.



- 2 tancs de 28000 tones de NO_3NA + NO_3K fosos.

- Pèrdues d'energia emmagatzemada de 2,7%.

- Inversió de 260 milions d'euros.

- Energia per a 200000 persones.

- Una gran quantitat de estacions solars s'haurà de emplaçar en els deserts del planeta connectats la xarxa elèctrica a un voltatge molt alt (pèrdues de 1%/1000km).

- Sensors i ordinadors distribuïts millorarien l'eficiència, fiabilitat i seguretat en el subministrament d'energia.

1.4.4 Possible implementació de solucions tècniques

En aquest apartat realitzarem un calcul per veure si es possible una substitució del model energètic basat en el petroli [Jacobson i Deluchi], a partir de la implementació de les dues fonts energètiques que hem considerat anteriorment com les més viable [García-Olivares 2010].

La potència màxima consumida mundialment avui en dia suposa un total de 12,5TW. No obstant segons la US Energy Information Administration es preveu un augment en el 2030 cap als 16,9TW. No obstant, amb un sistema



Figura 1.23: Andasol és el primer complex termosolar del món amb emmagatzemant tèrmic. Andasol està formada per Andasol-1, Andasol-2 y Andasol-3.

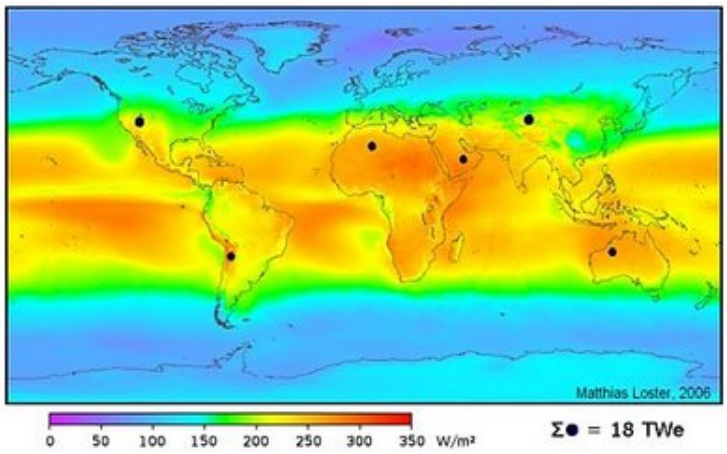


Figura 1.24: Els punts negres indiquen l'àrea necessària per tal de obtenir l'energia mundial necessària amb fotovoltàiques de rendiment del 8%. Amb concentradors solars l'àrea és la meitat.

elèctric global implementat la demanda baixaria fins als 11,5TW, degut a una major eficiència en l'ús de l'energia. Per exemple, només el 17-20% de la energia emmagatzemada en la gasolina s'utilitza per tal de moure un vehicle (la resta es perd en forma de calor) i el 75-86% de l'electricitat proporcionada a un vehicle elèctric va a parar cap al moviment.

Per tant, quina és la manera d'aconseguir aquests 11,5TW? Primerament 3,8 milions de turbines diversificades per el territori global, cadascuna amb una tassa de 5MW, proporcionarien un 51% de la demanda. Cal donar-se compte que el món produeix diàriament un total de 73 milions de coxes o camions lleugers, per tant un redireccionament econòmic possiblement podria construir aquesta quantitat d'aerogeneradors. També és necessitaria un total de 89000 plantes fotovoltaiques i de concentració, que en mitjana generen 300MW, proporcionarien un 40% de la potència necessaria. El 30% d'aquesta

potència de sortida vindria per part dels panells instal·lats en les taulades de les cases i dels edificis comercials. Per tal de cobrir el 10% restant es necessitaria de 900 centrals hidroelèctriques, és a un 30% de les que ja hi ha instal·lades.

Per tal de produir tots aquests molins de vent es necessitaria una gran quantitat de coure per al filament dels alternadors i també per el filament de distribució de l'electricitat en aquestes centrals i en les de concentració solar.

Per als molins de vent situats a terra s'utilitzen 4t/MW i per els molins situats en la costa marina un total de 10t/MW. Amb això el coure utilitzat per els parcs eòlics seria de $1{,}52 \times 10^8$. Si totes les plantes solars són plantes solars passives i utilitzen la mateixa tassa de coure que els molins de vent de terra (4t/MW), aleshores 39000 estacions de 300MW equivalen a 26700000MW que a 4t per WM consumirien $1{,}07 \times 10^8$t. Finalment el coure total necessitat mundialment seria de $2{,}59 \times 10^8$t (250 milions de tones).

Donem un cop d'ull a les reserves de coure. La producció global de coure és de 16 milions de tones per any. Les reserves econòmicament explotables s'estimen en 470 milions de tones [US Geological Survey 2005]. Calculant, veiem que necessitaríem invertir en els parcs solars i eòlics el 55% de les reserves mundials, és a dir, la producció de 16 anys.

En aquest punt hem vist l'existència de possibles solucions tècniques per al canvi de font energètica primària, no obstant com sabem el problema és molt més complicat i sempre va a parar finalment a una qüestió política. Per citar podem posar dos casos en els quals un tall en el subministrament de petroli va provocar diferents conseqüències, el primer és el cas de Corea del Nord i el segon el de Cuba [Solé 2010].

1.4.5 Dos exemples de transició: Corea del Nord i Cuba

A Corea del Nord la situació en el consum de petroli per capital l'any 1990 era equivalent a la meitat del consum de Japó i el doble que el de Xina. El col·lapse de la URSS va generar una mancança de petroli fins al punt que a 1996 la importació de petroli i de gas va gaure un 40% respecte a la de 1990. La solució de Corea del Nord va ser apostar per mantenir el model industrial autàrquic. Durant els anys 1995 i 1996 el país va patir importants inundacions que van destruir infraestructures i sòl cultivable.

Les conseqüències d'aquella presa de decisió van ser que en pocs anys les infraestructures és van esfondrar i res ja no funcionava. La producció de gra va caure i va començar la fam. S'estima que un milió de persones (sobre 23) van morir de fam.

Durant l'època soviètica Cuba importava el 60% d'aliments i pràcticament tot el petroli. El col·lapse de l'URSS i el bloqueig d'USA va fer que la importació caigués un 85%. La ingesta calòrica per cápita va caure de les 2900 calories al 1980 al 1863 calories al 1995. Durant els anys de crisi s'atribueixen unes 7500 morts addicionals per any degut a la mancança d'aliments.

El govern va prendre dues mesures bàsiques per a evitar el col·lapse: programes d'alimentació dels sectors socials més febles i cartilles de racionament per a tota la població. Un pla agressiu de reforma agropecuària, un retorn progressiu i incentivat al camp i la investigació en agricultura ha permès mantenir un nivell alimentari raonable. Cuba no ha assolit la independència energètica, però ha demostrat que la transició és possible.

1.4.6 Que podem fer com a individus?

Hem vist durant tot el primer capítol el grau d'abast de la problemàtica del peak del petroli i hem citat algunes de les possibles conseqüències que tindria en la nostre vida quotidiana la mancança de subministrament d'aquest recurs. Hem vist com aquesta crisi energètica és la mateixa cara de la moneda que la crisi financera que està patint Espanya en aquests moments. Estem començant a notar les causes provocades per aquest sistema econòmicament capitalista, el qual és cec per anticipar la problemàtica que hem exposat. Cecs també sembla que ho siguin els nostres polítics, tot i que ara comencen a veure que aquesta crisi no té marxa enrere i que no podran assumir tot el deute públic generat en aquests anys de benaurança econòmica. La nostre economia està condemnada a decréixer i a més a un ritme ràpid. Aquest concepte segurament ja està manejat a instàncies governamentals, no obstant els poders governamentals no poden reconèixer obertament aquest fet per les conseqüències polítiques que comporta [Turiel 2010]. Per aquest motiu tendeix a buscar solucions que no existeixen en comptes de replantejar el sistema. El fet de canviar de sistema econòmic, no vindrà motivat per la classe política dirigent i no sembla que les esquerres estiguin molt per la feina. Haurà de ser per tant el teixit social que prengui consciència del problema el que canvii de paradigma econòmic, el qual cada cop és més disfuncional per falta d'energia i de matèries primes i el qual ens impulsa a un consum desaforat i ens condueix al col·lapse mentre somiem en la recuperació econòmica que no arribarà mai.

Per tant, que fem? Que podem fer? Ignorar el problema i seguir amb el nostre dia a dia? O bé, prendre una posició activa i afavorir un canvi de model? Ja coneixem el cas de Corea del Nord i el de Grècia per poder decidir racionalment.

Quin ha de ser el primer pas si escollim la segona opció? Clarament ha

de ser la CONSIENCIACIÓ, per més tard passar al següent pas de promoció de presa de mesures que condueixin a un canvi de model [Turiel 2010].

CANVI DE MODEL

És necessari canviar el model basat en el consum a un model basat en la sostenibilitat i això implica:

- Eliminar l'automoció privada, la qual suposa en 25% del consum actual de petroli.
- Localitzar la producció i disminuir les xarxes de distribució, la qual cosa significa un 25% del consum.
- Eliminar els bens superflus, un 25% dels quals disposem actualmet.

- Agricultura És necessari fer una reforma agropecuària profunda:

- El camp requerirà una major quantitat de mà d'obra (del 30% o més).
- És inevitable disminuir la ingesta de carn.
- És necessari consumir localment.
- És necessari recuperar pràctiques com la rotació de cultius, etc, que donin sostenibilitat.
- Es pot cultivar a les ciutats.

- Indústria La societat seguirà necessitant producció industrial:

- L'energia estarà racionada, per tant els processos hauran de ser optimitzats.
- Els recursos (matèries primeres, humans) hauran de ser locals, les idees no.
- Cal atendre les necessitats específiques locals.
- Els dissenys han d'afavorir el manteniment, la reparació i el reciclatge.
- Cal prioritzar la sostenibilitat i el respecte al medi ambient, al rendiment.

- Comunitat La interdependència entre els individus serà més forta: la solució o és per tots o no serà.

- Cal construir bancs d'aliments per protegir als més necessitats.

- La gent sense feina pot aportar el seu temps en tasques en pro de la comunitat.

- Resulta convenient constituir cooperatives productor- consumidor de productes agrícoles.

- Són aconsellables els horts urbans

.

1.4.7 Que podem fer com a físics?

A través del mètode científic podem contrastar la informació publicada tant en els mass media com en les publicacions especialitzades. D'aquesta manera tenint una informació nítida i destriada podem validar, anular o ampliar els arguments de les diferents fonts informatives.

Podem ser útils en grups de treball pluridisciplinaris. Utilitzar els fonaments sobre termodinàmica per tal de crear un nexe entre la teoria econòmica, basada en els recursos materials, i la teoria física. Podem crear i solucionar models econòmics utilitzant variables energètiques com a variables fonamentals del sistema, per tal de fer prediccions i assessorar en la presa de decisions energètiques dels governs.

En el Capítol 2 mostrarem com la termodinàmica juntament amb l'economia poden ser útils per tal d'optimitzar els sistemes industrials i per tal de crear models evolutius econòmics basats en variables físiques tals com l'exergia.

1.5 Conclusions

Hem vist com a partir dels anàlisis de Hubbert sobre la producció de petroli d'Estats Units, es va començar a pensar en un peak de producció global.

Avui en dia ningú nega l'arribada al zenit del petroli i sabem que aquest com tots els recursos naturals són limitats; ho hem demostrat tant a partir d'anàlisis amb base científica com amb evidències.

Hem estudiat les diverses corbes d'extracció, producció i consum, arribant a la conclusió que l'escassetat d'aquest recurs natural juntament amb el peak dels demés recursos tindrà un impacte molt fort a la societat.

També hem vist com aquest impacte no es pateix quan el recurs s'esgota sinó quan el recurs no es produeix amb la mateixa tassa anualment , és a dir

quan la producció no satisfà la demanda i és crea un buit el qual no podem omplir amb altres fonts energètiques, si més no actualment.

Degut a aquesta falta d'alternativa energètica al petroli (recordem la seva alta densitat energètica, el seu EROI, la seva abundància, la seva fàcil transportabilitat i rang ampli d'utilització), el preu d'aquest i en general el de l'energia patirà increments. El preu a mesura que la producció baixà s'anirà tornant més volàtil amb pics com el de l'any 2008 on el preu del barril es situava en els 147$.

Què podem i cal que fem?

- Disminuir l'exposició individual.

- Reorientar, si és precís, la nostra carrera o professió, adquirint habilitats noves.

- Ajudar a la gent més propera, avisant-los del problema i constituint comunitats de recolzament.

- Influint en l'execució de polítiques de sostenibilitat.

- Educant a la ciutadania, especialment als joves.

Capítol 2

Termodinàmica i Economia

2.1 Introducció

La història de la termodinàmica va sorgir arran d'una qüestió econòmica al voler determinar quina quantitat de treball mecànic podia donar una quantitat de carbó, o bé La termodinàmica imposa alguns límits sobre el que és possible en un determinat procés i per tant determina quins recursos físics són escassos. En aquest rol, és òbviament rellevant com "la ciència del millor ús dels recursos escassos", tal com es defineix sovint a l'economia. No obstant en l'interregne després dels fisiòcrates, la termodinàmica va patir el mateix destí al igual que la major part de les altres ciències naturals, és a dir, el fet que van ser ignorades per a la teoria econòmica. Algunes excepcions, bàsicament les relacionades amb les teories energètiques del valor, van ser dutes a terme per Georgescu-Roegen [1986]. Només a partir dels anys 1960 les connexions entre les ciències físiques i l'economia van ser preses amb seriositat. Per tal de ser justos, la major part de les nombroses lleis de les ciències físiques tenen ben poc significat econòmic. Alguns economicistes prominents, tals com Koopmans [1977], han suggerit que l'economia hauria d'estudiar els efectes de les restriccions més importants que la natura imposa en els sistemes de producció.

Hi ha una notable excepció en aquesta història tragicòmica sobre la interacció entre les ciències naturals i l'economia. Dintre dels camps bioeconòmics (agricultura, ciències forestals, industria pesquera) ha estat impossible ignorar tots els aspectes biològics. No obstant, aquests camps han estat perifèrics dintre de les ciències econòmiques. A més, inclús dintre d'aquest concepte, els economistes acadèmics han utilitzat convenientment el coneixement de les ciències ecològiques. Per una altre banda, en el present aquesta és una àrea de ràpid desenvolupament especialment dintre dels

camps de " l'economia mediambiental" i " l'economia ecològica". Igualment la literatura sobre les conseqüències d'incorporar certs coneixements de les ciències naturals als models econòmics s'està expandint ràpidament. Alguns esforços al voltant dels temes d'integració d'ambdues ciències s'han realitzat per Berry, Salamon i Heal [1978], Berry i Andersen [1982], Lesourd [1985] i Islam [1985] on s'examinen les conseqüències de les lleis termodinàmiques dintre del context de la teoria de producció microeconòmica. El tema present, sobre termodinàmica i economia ha estat discutit per part de Mansson [1990], Bryant [1982] i Ayres i Nair [1984].

Els processos econòmics en una societat sempre contenen relacionades matèria, energia, entropia i informació. La voluntat de moltes activitats econòmiques és aconseguir una certa estructura. El coneixement recent, desenvolupat per part de la termodinàmica de processos fora d'equilibri, en particular aquells que comporten la formació d'estructures, pot ser rellevant. No obstant els economistes presumeixen que poden tractar amb totes aquestes qüestions a qualsevol nivell, tant si és en l'àmbit d'una empresa, regional, nacional, internacional sense qualsevol coneixement de termodinàmica. Un dels resultats d'aquesta arrogància és que la influent descripció, errònia i obscura, sobre l'ús de recursos, la conversió de recursos i les opcions tecnològiques, ha inhibit el reconeixement de possibilitats disponibles.

S'ha de tenir en consideració que mentre els fisiòcrates no van tenir accés a cap ciència natural, la situació avui en dia és completament diferent. Aquest fet es veu clarament en el cas de la termodinàmica i en particular dins del camp de la mecànica estadística i de la teoria de la informació.

Des del començament la teoria de la informació va estar lligada a la teoria física [Brillouin 1956], amb l'entropia com a concepte comú, i avui en dia proporciona i treballa sobre diferents conceptes útils en diferents branques científiques.

La major part de les ciències socials i les humanitats involucren la comunicació humana: com les persones, grups o cultures s'expressen, com els missatges són transmesos a la societat, com són interpretats o com poden ser interpretats, la interacció entre persones i grups a través de l'intercanvi d'informació. Si nous conceptes es formen dintre del marc de la teoria de la informació, potser poden ser rellevants per aquestes qüestions. Per tant, la teoria de la informació no és només la base per a la termodinàmica sinó que també comporta un potencial d'unió en el buit de les "dues cultures"; d'una banda les ciències naturals, les matemàtiques i la tecnologia i per l'altre banda les ciències socials i les humanitats.

La vida espiritual necessita matèria. La psique pot influenciar i inclús controlar els esdeveniments materials però també necessita d'energia i matèria per a la seva existència. En particular necessita matèria/energia fora de l'e-

quilibri. Anant més enllà, el sistema material que cultiva a la psique necessita de més, necessita d'estructura, internament correlada al igual que amb referència al món exterior. Els actes d'aquests sistemes físics han d'estar coordinats.

En la superfície de la Terra, el contrast entre el sol calent i l'espai fred és el primer prerequisit per a l'emergència i el manteniment d'estructures, algunes de les quals prenen formes altament intricades en les infraestructures socials i materials de les societats humanes. En una escala àmplia, el nostre planeta pot ser descrit vagament com una màquina tèrmica generalitzada, la qual utilitza energia per tal de construir i mantenir estructures. Per tant, la termodinàmica és rellevant per a "l'economia de nau espacial" [Boulding 1966]. Igualment tota activitat econòmica està englobada dintre dels fluxos naturals d'energia i materials a la superfície de la terra. És per tant incongruent que l'economia estigui encara essencialment separada de les ciències físiques, geofísiques i biològiques malgrat als numerosos esforços realitzats per tal d'eliminar aquests buits [Clark 1976, Ayres 1978, Berndt 1978, Dasgupta i Heal 1979, Daly 1980, Chapman i Roberts 1983, Hall et.al. 1986, Cleveland 1987, Faber et.al. 1987, Martinez-Alier 1987].

La nostre civilització és global: la tecnologia i les pràctiques administratives de les societats industrialitzades es difonen per tot el món. Aquest fet comporta canvis radicals, afecta a totes les societats i a tots els ecosistemes, inclús a la biosfera mateixa. D'una altre banda, no hi ha una cultura global de respecte i de responsabilitat per l'herència que tenim en comú amb els éssers vius, la biosfera. Per tal que sigui viable una cultura semblant ha de tenir un coneixement científic coherent i interdisciplinari i una investigació científica com a elements cognitius essencials; en això la termodinàmica i l'economia són essencials, però no suficients.

La discussió següent afronta la següent pregunta: quina és la part de la termodinàmica que es pot utilitzar dins de la teoria econòmica, les facetes de les quals són més rellevants? Depenent del context, un o més d'un dels següents sis punts poden formar part de la resposta.

- La termodinàmica pot ser utilitzada per tal de quantificar i identificar lligams importants per a una gran varietat de sistemes. Els lligams de caràcter físic més rellevants des del punt de vista econòmic són les lleis de conservació de la massa (la massa es conserva en qualsevol procés químic) i la primera (l'energia es conserva) i la segona (l'entropia sempre s'incrementa en qualsevol sistema tancat) llei de la termodinàmica.

- La termodinàmica identifica i proporciona les relacions essencials entre les variables més importants dels processos, és a dir, en processos de

producció industrials. Això és òbviament important per la part de la teoria econòmica que tracta amb funcions de producció.

- La termodinàmica proporciona una mesura clara i quantitativa de l'eficiència, en particular aclareix quant de proper està o podria estar un determinat procés al nivell màxim d'eficiència.

- La termodinàmica es pot fer servir per tal de valorar (quantificar) les pèrdues degudes a la irreversibilitat dels processos. En termes econòmics això pot venir descrit com a costos.

Els primers quatre punts estan continguts en la tradició de la "enginyeria econòmica" iniciada per Carnot. Dues branques d'aquesta tradició s'estudiaran a continuació, la termoeconomia i la termodinàmica de temps finit.

- La teoria termodinàmica és necessària per tal de establir un criteri per tal de fer comparacions entre diferents tipus d'energia, tal com s'ha de fer sovint dintre de la branca de economia energètica i en particular en l'anàlisi d'energia neta (net energy analisys) [Thomas 1977, Gilliand 1987] o en discussions de polítiques energètiques.

- La teoria moderna de la termodinàmica, la qual està íntimament lligada a la teoria de la informació, ha establert una visió evolutiva en les ciències físiques, a través de la sinergètica, la formació d'estructures i l'evolució com a conceptes centrals. Algunes parts d'aquestes perspectives ja han estat aplicades a les ciències humanes [Weidlich i Haag 1983, Haag 1989], però les possibilitats no han estat encara exhaurides.

Dins del concepte d'evolució no hi ha una noció d'emergència, en el sentit d'aparició de característiques completament noves. El primer pas dintre del procés evolutiu és el pas del no res i el mai en el espai-temps cap a l'existència. Implícit a això existeix un concepte de valor: sistemes més "majors" - sistemes amb un valor major- emergeixen de sistemes "menors" i el valor és creat un algun sentit. Part de la informació continguda en un sistema físic evolutiu és informació relacionada amb com el sistema es pot reproduir o mantenir. La societat, la ciència, la tecnologia i les tradicions culturals juguen rols similars. El sistema econòmic més rellevant actualment, l'economia de mercat, és per naturalesa evolutiva. L'evolució és primerament un procés de recol·locació de recursos entre les industries, sovint causat per innovacions tècniques. Aquest fet comporta canvis estructurals i manté el sistema en un no-equiibri econòmic (el qual no s'ha de confondre amb un no-equilibri termodinàmic, tot i algunes analogies formals).

2.1.1 Economia i valors

La qüestío, "què dona valor a una matèria prima?" té diferents respostes possibles en economia, depenent de la perspectiva. Sovint el valor o el cost d'un determinat article o matèria es deriva d'alguna classe de preu. Segons la visió històrica, probablement relacionada amb els fisiòcrates, el treball emmagatzemat o contingut s'utilitza com una mesura del valor [Smith 1776, Ricardo 1817, Marx 1867]. Sorprenentment, els conceptes de valor utilitzats en gran part de la teoria econòmica matemàtica són així d'insofisticats.

El valor en un sentit econòmic es pot considerar com un instrument de creació de "valor" en un sentit filosòfic. En aquest context, s'ha de recordar que aquests valors són sempre totalment immaterials. Els valors morals i econòmics de fet poden estar lligats a fluxos substancials de recursos naturals i en la manera en que els sistemes de gestió de recursos estan inclosos en els ambients socials, biòtics i abiòtics. El que, finalment, és el valor econòmic o el que hauria de ser està connectat a algun tipus de servei físic donat per els éssers humans.

2.2 Termodinàmica i Valor Físic

Una teoria del valor fonamentada en la física, normalment involucra la definició dels "valors", els quals no estan determinats per els processos de valoració dels actors humans. Un objecte físic, per exemple una quantitat d'energia, pot ser valuosa degut a que pot aconseguir un canvi en un sistema físic, és a dir, té un valor instrumental (o un valor en ús).

La major part de les teories del valor inclouen algun tipus d'hipòtesi, d'acord amb la qual el valor d'un determinat recurs o objecte es deriva de quina quantitat física s'ha gastat (directa o indirectament) per produir-la. Una de les teories físiques més importants del valor són les d'Odum [1971], Georgescu-Roegen [1979], Cottrell [1957], Costanza [1980], Roberts [1982] i Hudson [1989]. Segons els resultats d'aquest estudis és ineficient intentar reduir tots els aspectes del valor, incloent-hi els econòmics i filosòfics, a un standard físic únic tal com l'energia o l'entropia. No obstant, conceptes físics que tenen valor físic en el sentit anterior són importants per tal de construir una teoria general (psico-)econòmica. El concepte més important per sobre dels altres, en aquest aspectes, és el concepte d'exergia, a vegades denotat també com energia disponible o energia útil.

2.2.1 Exergia

L'exergia termodinàmica, la quantitat de treball mecànic el qual pot ser (reversiblement) extret d'un sistema, ha demostrat ser bastant fonamental, inclús en esferes llunyanes a l'enginyeria d'on va sorgir. Està definida d'una manera en la qual combina energia i entropia i com a conseqüència la primera i la segona llei de la termodinàmica. L'exergia en contrast a l'energia pot ser consumida i ha d'ésser gastada en qualsevol procés irreversible. [1]

2.2.2 La Creació Còsmica de l'Exergia

La idea que l'exergia és un recurs físic important i el fet que es destrueix de forma natural ens porta a plantejar-nos la següent pregunta: com va ser creada?

La nostre imatge present de l'univers és la que aquest neix, juntament amb la creació de l'espai i el temps, del no res. De la mateixa manera que no hi ha pregunta del exterior de l'univers en l'espai, tampoc hi ha cap pregunta sobre que era previ de l'univers en el temps, és dir, sorgim del Big Bang. Una de les característiques d'aquesta interpretació és que la radiació i l'alta temperatura de la matèria (conjuntament amb l'antimateria) va ser "comprada" per l'univers, durant un fase d'expansió ràpida, d'inflació, a expenses d'una energia negativa per unitat de volum en l'espai creixent.

Si l'energia de la matèria/antimatèria és considerada més valuosa que l'energia de camp del volum mateix, aleshores la fase inflacionària involucra també creació de valor. Poden existir altres fases en l'univers més jove en les quals per raons similars es poden veure com a creadores de valor. Eriksson et al. [1982] es va focalitzar en un procés que va succeir més tard, després que s'aniquilés l'antimatèria on l'excés de matèria va ser present en forma de nucleons. Durant el període que va dels segons a les hores, es va crear l'exergia nuclear, la qual més tard va esdevindre el combustible en ús de les estrelles. En particular és el combustible del Sol i com a conseqüència de la vida de la Terra i la de les activitats humanes. Algun dels combustibles usats en les activitats humanes no prové directament del Sol però ha estat acomul·lat a la Terra en un no-equilibri químic entre l'oxigen de l'atmósfera i l'hidrogen i els hidrocarburs dels combustible fòssils per sota de la superfície de la Terra.

Un valor obvi de l'exergia nuclear còsmica resideix en el fet que ha estat disponible per a les estrelles. Aquestes la transformen en radiació amb una temperatura equivalent a uns quants milers de graus , disponible per a les mol·lècules d'aigua i una rica varietat de compostos del carboni.

[1] Definició tècnica d'exergia i d'exergia com a variable termodinàmica d'estat en l'Annex

2.2.3 Valor de l'Exergia i Estructura

L'exergia es pot definir com un combustible de caire general el qual pot ser utilitzat per dur a terme varis processos físics. Des del punt de vista de la termodinàmica, l'exergia és per tant una mesura del valor físic en el sentit anterior, la qual es pot utilitzar per produir canvis en sistemes físics.

La transició d'una forma d'exergia cap a una altre, química cap a estructural, es pot veure com un procés en el qual es crea valor -si l'exergia estructural és més valuosa que la mera exergia química, és a dir, si el concepte de valor és estès per tal d'incloure aquests tipus de coses, tals com la valorització de la provisió d'un marc de treball directe per a altres processos. Per tant, si l'exergia en la forma química de no-equilibri és considerada com un combustible o una materia prima, un mitjà per tal d'aconseguir estructura, aleshores l'auto-organització és un procés productiu. No obstant, l'exergia és tan sols el combustible per tal d'estructurar la matèria o mantenir una estructura.

Una major demanda de subministrament d'exergia en una economia ve del fet que l'exergia perduda ha de ser reemplaçada. Un cotxe que perd energia cinètica degut a la fricció, obté el seu reemplaçament de l'exergia continguda en un combustible. Una casa que perd calor degut a un ambient hivernal, aconsegueix aquest reemplaçament de calor a través de l'electricitat o un combustible del sistema calefactor. Un material ric en exergia el qual s'utilitza per als objectes desgastats o bé dispersats a través de la corrosió es reemplaça amb una industria de demanda d'exergia.

En les industries de processament l'exergia s'utilitza per tal de millorar la qualitat del material processat. L'aspecte més simple del processament d'una matèria prima pot ser la part química, és a dir, el canvi en la composició. El següent aspecte és el canvi estructural, és a dir, com un material sòlid està compost de fibres de varies mides i sobre quins paràmetres límits els quals el descriuen poden variar. El següent és la forma dels components, etc. De fet, normalment atribuïm un valor econòmic major a l'estructura de la informació, reproduint una estructura preestablerta, per tant com a conseqüència també ho fem cap al l'exergia mateixa. A la temperatura ambiental, la unitat natural d'exergia connectada a un bit d'informació, $kTln2$, és aproximadament $3 \times 10^{-21} J$. Per a la majoria de processos l'exergia utilitzada per tal de transferir un bit d'informació és molt més gran. L'exergia continguda en la forma d'una tassa de cafè, per exemple, és extremadament petita. Els sistemes auto-organitzatius són interessants i en aquest sentit valuosos no degut a la seva exergia continguda sinó per el seu contingut d'estructura. Per tant, al igual que en altres conceptes termodinàmics, és inútil intentar reduir tots els aspectes del valor a un standard, l'exergia. L'exergia és necessària per tal

de construir una estructura, però l'estructura és més que l'exergia i té valors els quals no es reflecteixen en l'exergia.

2.3 Sistemes Termodinàmics i Sistemes Econòmics

Un obstacle important alhora d'introduir la termodinàmics dintre de l'economia és el fet que les teories operen amb diferents mides de sistemes i principis d'agregació. La teoria termodinàmica és més efectiva a unes escales de grandària menors, per sota de la mida d'una cèl·lula viva, i a una escala molt llarga, de l'ordre de la mida de la Terra. La teoria econòmica tracta essencialment amb sistemes a escales espacials intermèdies, dels éssers humans cap als països i cap a un grup de països.

Les teories es troben millor a l'escala de la producció de processos industrials, on la termodinàmica proporciona les teories de les màquines tèrmiques i de les reaccions químiques i la teoria econòmica conceptes tals com el capital i les funcions de producció. Aquest, de fet, és el terreny de la enginyeria econòmica. L'extensa literatura que tracta amb les funcions de producció pren en consideració diferent tipus de restriccions tècniques, algun cop identificables amb restriccions termodinàmiques, no obstant les quals en la major part no estan derivades a partir de les lleis de la física.

Georgescu-Roegen [1971, 1976, 1979, 1986] ha argumentat en favor d'utilitzar l'entropia com a variable física principal en l'anàlisi econòmic. El seu principal error, segons Mansson, és ingorar el fet que la radiació electromagnètica pot transportar entropia. Aquest fet significa que la Terra pot, i de fet, exporta la seva producció d'entropia al cosmos. La major part d'aquesta producció d'entropia succeeix quan la radiació solar incideix a la superfície de la Terra. Només una petita part de l'exergia solar s'utilitza. És per tant perfectament concebible, en un sentit termodinàmic, tindre una Terra amb els mateixos fluxos entrants i sortints d'entropia com l'actual, però amb l'entropia del planeta sent considerablement més petita que l'actual. Aquest fet també comporta que la dissipació de materials, que tant preocupa a Georgescu-Roegen, és de petita importància. Similarment, un anàlisi econòmic només en termes d'energia és igualment incomplet degut a que ignora la segona llei. Un concepte físic apropiat per a la descripció d'un sistema econòmic, el qual es regeix per ambdues lleis de la termodinàmica, és per tant l'exergia.

2.3.1 Exergia i l'Economia de Nau Espacial

Quan Boulding [1966] va encunyar el concepte "Economia de Nau Espacial" va senyalar que la Terra com a sistema tancat en el futur requeriria diferents principis econòmics, a través dels quals els homes trobarien el seu lloc en un sistema ecològic cíclic sense reservoris il·limitats per a qualsevol cosa. És una tasca per els economistes reflexionar sobre quins han de ser aquests principis i igualment considerar com un sistema com aquest pot fer-se que funcioni. En aquesta reflexió es necessiten coneixements derivats de les ciències.

Per fer de qualsevol model econòmic físicament útil, una restricció mínima és que les lleis de la termodinàmica no es poden violar. Observem que la llei de conservació de la massa és més difícil (encara que possible) d'incloure en una manera no simplista, especialment en models agregats.

Per a un model realista macroeconòmic, el qual abasta l'economia total de la Terra, la termodinàmica proporciona alguns fets concrets. Com que la disponibilitat de l'exergia és un factor limitant fonamental per a qualsevol sistema de producció, un últim factor limitant per a l'economia de nau espacial és el flux total d'exergia solar a la Terra, aproximadament $1,7 \times 10^{17} W$, suplementat per els dipòsits disponibles en l'escorça de la Terra. L'exergia és el que Koopmans [1973] va buscar en và, "un taló d'Aquiles del subministrament de recursos, un recurs específic que està limitat en subministrament, essencial per a la vida i el benestar, utilitzat dissipativament i sense cap substitut en major subministrament".

2.4 Fluxos Termodinàmics i Valors Economics

Tal com hem vist en els apartats anteriors podem interpretar donar una interpretació econòmica a l'exergia com a valor físic. En aquest apartat estendrem aquesta línia de raonament una mica més enllà, considerant una economia la qual mirarem a través d'un interval de temps el suficientment petit per tal de poder tractar-la com estacionaria.

El problema físic està formulat com el problema de trobar la quantitat màxima de flux d'exergia (quantitat màxima de potència mecànica) a partir d'un conjunt de fonts i claveguerams, amb fluxos estacionaris, restringits a certs intervals. En la etapa següent, el sistema de producció proporciona un flux de serveis a través d'uns fluxos d'exergia estacionaris.

Considerem un conjunt de sistemes separats (recursos) $A_1, A_2, ..., A_M$ on cadascú pot conduir (o absorbir) un flux estacionari de quantitats extensives (Figura 2.1). Aquests fluxos són vectors $\vec{J}_1, \vec{J}_2, ..., \vec{J}_M$ en l'espai r-dimensional de les variables extensives. Assumim que $M \geq r + 1$, i que cada flux porta

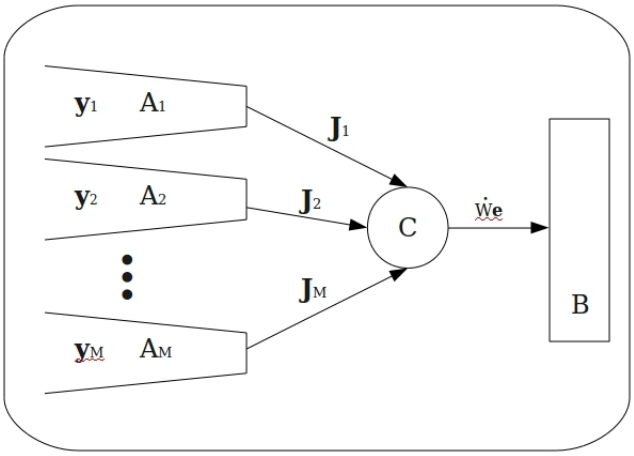


Figura 2.1: Un conjunt de fluxos estacionaris cap a/de diferents sistemes (parts de la base de recursos) entren o surten del conversor, el qual transmet el treball mecànic a un reservori de treball B. El treball emmgatzemat a B es podria utilitzar com a combustible en el procés de producció per tal de distribuir serveis, com per exemple en forma de bens materials.

proporcions constants d'aquestes quantitats, descrit pels vectors unitaris $\hat{e}_m$ amb components no negatives,

$$\vec{J}_M = P_M \hat{e}_m;\ \hat{e}_m \geq 0;\ \hat{e}_m^2 = 1; (m = 1, ..., M) \tag{2.1}$$

on P_M són variables de flux intensives. Les variables intensives (fixes) dels fluxos són respectivament $\vec{y}_1, ..., \vec{y}_M$. Els fluxos es conten positius si van cap al conversor. Les intensitats dels fluxos es restringeixen a certs intervals d'amplada diferent a zero,

$$\check{P}_m \leq P_m \leq \hat{P}_m;\ \check{P}_m < \hat{P}_m \tag{2.2}$$

Les fonts de les restriccions poden ser , per exemple, les restriccions de disponibilitat (per als fluxos de recursos), restriccions de capacitat (per als recursos dipositats) o restriccions mediambientals (per a les emisions).

El treball extret per unitat de temps (la potència) en el reservori de treball B s'assumeixen que és $\dot{W}\vec{e}$, on $\vec{e}$ és un vector fixe unitari característic de B, per tant

$$\sum_{m=1}^{M} \vec{J}_m = \dot{W}\vec{e} \tag{2.3}$$

la qual cosa implica les $r - 1$ condicions de conservació

$$\sum_{m=1}^{M}(\vec{e}_m - \rho_m\vec{e})P_m = 0 \tag{2.4}$$

on $\rho_m = \vec{e}_m\vec{e}$. (La matriu $(M \times r)$, $e_{m\alpha}$, s'assumeix de rang r; per tant $e_{m\alpha} - (\vec{e}_m\vec{e})e_\alpha$ té rang $r-1$.) La potència ve donada per

$$\dot{W} = \sum_{m=1}^{M}\rho_m P_m = 0 \tag{2.5}$$

Les restriccions (2.2) en els fluxos s'assumeixen compatibles amb les condicions de conservació (2.4).

La termodinàmica prescriu que la producció d'entropia $\dot{S}$ ha de ser igual al flux net d'entropia de sortida del conversor (veiem que el treball no transporta entropia). Sense una pèrdua molt gran de generalitat podem assumir que que $\dot{S}$ està limitat per baix per una funció X convexa dels fluxos. (Una major velocitat en el procés de conversió pot portar cap una producció d'entropia major.) Obtenim per tant,

$$\dot{S} = \sum_{m=1}^{M}\nu_m P_m \geq X(\vec{P}) \tag{2.6}$$

on l'entropia específica de cada flux és $\nu_m = \vec{y}_m \cdot \vec{e}_m > 0$ i $\vec{P} = (P_1, P_2, ...)$.

El problema d'optimització física és per tant maximitzar la forma lineal (2.5) subjecte als lligams (2.2), (2.4) i (2.6). Donat que X és convexa, el problema té solució en la frontera del volum determinat per les restriccions. Podem trobar la solució[2] [Eriksson et. al. 1987] a través del mètode de multiplicadors de Lagrange, amb el Lagrangià següent:

$$\begin{aligned} L_{fis} = \sum_{m=1}^{M}[&\rho_m P_m + \check{\mu}_m(P_m - \check{P}_m) + \hat{\mu}_m(P_m - \hat{P}_m) + \vec{s}(\vec{e}_m - \rho_m\vec{e})P_m - \\ &- \tau\nu_m P_m] - \tau X(\vec{P}) \end{aligned} \tag{2.7}$$

on els multiplicadors satisfan $\check{\mu}_m, \hat{\mu}_m, \tau \geq 0$ i $\vec{s} \cdot \vec{e} = 0$. Aquí, el multiplicador òptim τ^* (on * indica el valor òptim) es pot interpretar com la temperatura de referència.

En el model econòmic estacionari el conversor es pot interpretar com el conductor d'un sistema combinat de producció i distribució. La potència

[2]Resolució del problema de maximització en la tercera secció de l'Annex

extreta $\dot{W}\vec{e}$ s'utilitza per tal de proporcionar un flux serveis. Assumim que el mix de serveis està a una certa proporció fixada. El flux total de serveis C s'assumeix variable però limitat per la potència $\dot{W}$,

$$C \leq \frac{1}{\lambda}\dot{W}, \qquad \lambda = ct. > 0 \tag{2.8}$$

Per tal d'avaluar els beneficis derivats dels serveis, és comú en la teoria econòmica d'introduir un flux d'utilitat $U(C)$. La seva primera derivada, la utilitat marginal, s'assumeix positiva (més servei és millor) però decreixent,

$$U'(C) > 0; \quad U''(C) < 0 \tag{2.9}$$

Per tal de maximitzar el flux d'utilitat U podem utilitzar un Lagrangià econòmic el qual conté el Lagrangià físic (2.7),

$$L_{eco} = U(C) - \gamma\lambda C + \gamma L_{fis} \tag{2.10}$$

on γ és el paràmetre del Lagrangià, el qual compleix:

$$\gamma > 0; \quad \gamma(-\lambda C + L_{fis}) = 0 \tag{2.11}$$

Del servei de producció se'n diu que és tècnicament eficient quan la desigualtat (2.21) esdevé una identitat. Com $L_{fis} = \dot{W}$ aleshores (2.11) es satisfà independentment de γ. Si assumim que es compleix aquest cas i també que $\tau* \neq 0$, és a dir, que la restricció de la segona llei és efictiva, podem obtenir la utilitat marginal de varis fluxos de recursos,

$$\frac{\partial U}{\partial P_m} = \frac{dU}{dC}\frac{1}{\lambda}\frac{\partial \dot{W}}{\partial P_m} = \gamma\left(\kappa *_m - \tau * \frac{\partial X(\vec{P})}{\partial P_m}\right) \tag{2.12}$$

Aquí γ es pot identificar com el valor marginal de l'exergia, és a dir, l'increment d'utilitat per unitat incrementada d'exergia. En aquest punt, hem introduït un factor de Carnot generalitzat $\kappa *_m \equiv (\vec{s} * + \vec{e} * - \tau\vec{y}*)\vec{e}_m$ el qual és el contingut d'exergia del flux m-èssim, i l'últim terme en el parèntesi és la pèrdua marginal d'exergia (a través de la producció d'entropia) per unitat de flux.

El flux de servei també pot estar directament limitat per els fluxos d'exergia i de materials, per exemple, per una restricció del tipus

$$\vec{a}C \leq \sum_{m=1}^{M} P_m\vec{l}_m \tag{2.13}$$

on $\vec{a}$ expresa el requeriment de l'energia i els materials i on $\vec{l}_m$ expressa la seva disponibilitat tècnica en els diversos fluxos. En aquest cas el tractament

que hem fet anteriorment ha de ser modificat ja que ara haurem de prendre en consideració la restricció de (2.13) a través d'un terme extra en el Lagrangià, amb els corresponents vectors dels multiplicadors de Lagrange. El resultat final, després d'algunes redefinicions, és que la utilitat marginal del flux mèssim al costat dels termes basats en l'exergia de (2.25) s'obté un altre terme

$$\vec{p}\vec{l}_m \tag{2.14}$$

on $\vec{p}$ s'interpreta com un vector de preus d'energia/materials el qual reflecteix l'escassetat en la restricció (2.13), és a dir, aquells components de $\vec{p}$ s'eliminen la qual cosa correspon a la igualtat estricte (no hi ha escassetat) a (2.13).

2.5 Eficiència Termodinàmica i Eficiència Econòmica

El concepte d'eficiència es va usar inicialment en termodinàmica en el context de les màquines tèrmiques, les quals utilitzaven combustible per tal de produir treball mecànic. Els primers dispositius de vapor resultaven ser més eficients si podien elevar més aigua d'una mina respecte el mateix consum de carbó. (Veiem com el link entre economia i termodinàmica és implícit en aquesta definició: la termodinàmica proporciona els límits mentre que l'economia determina quins son els inputs de valor i els outputs desitjats). En aquest context l'eficiència ve definida simplement com el ratio entre el treball de l'output W i la calor de l'input Q

$$\varepsilon = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = \frac{(Q_{in} - Q_{out})}{Q_{in}} \tag{2.15}$$

La calor del output és simplement el que considerem com a residu. Sovint a aquesta eficiència se l'anomena com a "eficiència de primera llei", perquè només pren en consideració els límits imposats per la conservació de l'energia. Com és ben sabut, cap màquina tèrmica que opera dins d'un cicle termodinàmic pot convertir íntegrament tots els seus inputs de calor en outputs de treball; l'eficiència ϵ està limitada per el segon principi de la termodinàmica. Per tant s'utilitza sovint la definició d'un altre tipus d'eficiència la qual mesura quan de aprop un procés s'aproxima a les restriccions imposades per la segona llei. Per exemple: un tipus de "segona llei d'eficiència" és

$$\eta = \frac{A_{out}}{A_{in}} \tag{2.16}$$

on A és una mesura de l'exergia que inclou els inputs i els outputs. Sabem que per a un sistema amb energia interna U, volum V, entropia S i N_i mols de la substància i que està a un ambient a temperatura T_0, pressió p_0 i potencial químic μ_{i0}, l'exergia és

$$U + p_0V - T_0S - \sum_{i=1}^{N} \mu_{i0}N_i \tag{2.17}$$

la qual està relacionada amb l'energia lliure de Gibbs $U + PV - TS - \sum_{i=1}^{N} \mu_{i0}N_i$.

Per a la classe comuna de dispositius reversibles, operant entre dos reservoris de calor a temperatures T i T_0, ambdues eficiències es redueixen al límit de l'eficiència de Carnot

$$\varepsilon = \eta = 1 - \frac{T}{T_0} \tag{2.18}$$

No obstant, per a sistemes els quals no son sistemes de cicle tancat, tals com els cicles Rankine o Stirling, les dues eficències no tenen per que ser iguals. Per exemple en màquines de cicle obert (màquines de combustió interna tipus Otto o turbines de gas) les eficiències ε i η difereixen lleugerament i en alguns casos més àmpliament com en els sistemes de calefacció on un combustible amb una gran distribució de l'exergia (entropia baixa) es crema per tal de proporcionar calor a temperatures una mica més calentes que les del ambient. Una calefacció de gas domèstica típica pot tenir una eficiència ε del 70%, és a dir, només el 30% de la calor marxa per la xemeneia. La seva eficiència de la segona llei η pot arribar només a un 4%, és a dir, l'exergia en el combustible és quasi completament malgastada en comptes de ser transformada en treball mecànic. En comptes de simplement utilitzar la calor de la flama per tal de escalfar l'habitació un pot pensar en utilitzar-la, per exemple, com a un refrigerador d'absorció actuant com una bomba de calor; la mateixa quantitat de calor pot ser entregada a l'habitació amb un cost menor de gas o d'exergia -encara que amb un major cost de capital.

En economia l'eficiència es sol definir d'una manera una mica diferent de l'anteriorment citada ja que és un terme més aviat qualitatiu que quantitatiu. Un sistema econòmic ideal, en analogia al cicle de Carnot, és aquell mercat lliure competitiu que consisteix d'agents racionals, consumidors i productors ben informats i sense consideracions respecte el que els economistes anomenen indivisibilitats o externalitats. L'economista italià del segle XIX Vilfredo Pareto va sugerir que l'estat d'equilibri assolit per aquest sistema és el més òptim en el següent sentit: els recursos estan assignats de tal manera que cap persona en l'economia pot endur-se un benefici superior sense que al menys

una altre persona en surti en posició inferior. L'existencia d'aquest òptim depen que cada persona tingui un conjunt ben definit de preferències que depenguin únicament del seu entrant. Tot i això, la gent real no maximitza simplement una funció d'utilitat personal ben definida (per exemple, subordinen els interessos personals als interessos d'un grup major, es someten als costums i a les lleis i participen en un comportament altruista), per tant l'òptim de Pareto és pot considerar com una abstracció. No obstant els economistes ho troben útil per tal de definir l'eficiència d'un sistema econòmic, comparant-ho amb el grau de proximitat amb el òptim de Pareto.

L'eficiència econòmica, tal com esta concebuda, involucra un conjunt de variables incloent-hi els entrants i els preus de tots els bens i serveis -capital, treball, terra i recursos materials i energètics. Degut a la seva complexitat, la major part dels economistes han rebutjat el pensament de l'existència d'una relació entre l'eficiència termodinàmica i l'econòmica. D'una altre banda, alguns físics han argumentat que ha d'existir un nexe entre ambdues eficiències. En particular, Frederick Soddy, cap a l'any 1922 va suggerir que el preu d'un producte hauria de reflexar l'energia utilitzada, directa o indirectament, per tal de produir-la. (De fet, degut a que l'energia contabilitza tant la realitzada per el sistema com la que el sistema realitza sobre el medi, el terme més apropiat seria energia disponible o bé energia lliure). Cap als anys 1930 la idea de "energy-pricing" va ser propugnada per un moviment polític tecnocràtic sota el lideratge de Howard Scott, com a panacea per a la crisi econòmica en la Gran Depresió. La idea va rebifar un altre cop cap els anys 1960 a través de les inquietuts relacionades amb el mediambient i els recursos -en el pensament que, per exemple, en la construcció de projectes energètics de gran escala, com satèl·lits solars o gasohol[3], l'energia requerida en la seva implementació fos major que l'energia produida per aquests. A partir d'aquests anys alguns físics i científics, tals com H.T. Odum i C.S. Hall van continuar en aquesta línea en varies formes d'anàlisi d'energia útil (net-energy analysis).

Però no va haver i de fet no hi ha consens sobre quin és l'ús apropiat del l'anàlisi d'energia útil aplicat a la pràctica de la presa de decisions. El que sembla ser veritat és que l'òptim econòmic i el termodinàmic no coincideixen excepte sota condicions irrealistes i extraordinaries, és a dir, si estem en un mercat lliure i si i només si l'energia disponible o lliure és l'únic factor escàs de producció -és a dir, els "preus sombra" del treball, el capital i demés son zero.

[3]també anomenat alconafta, és una mescla de gasolina i alcohol en diferents proporcions, per a ús com a combustible en motors d'explosió disenyats per a cremar combustibles derivats del petroli.

2.6 Termodinàmica de Temps-Finit

Tal com he vist, el desenvolupament de la termodinàmica en els seus orígens, va anar lligat amb el desenvolupament de les màquines tèrmiques. Hem vist com els conceptes derivats de l'eficiència de les màquines tèrmiques es vinculen estretament amb el camp de l'economia. En concret veiem com s'ha d'incorporar el concepte d'eficiència per tal d'optimitzar els processos econòmics però veiem la necessitat d'incorporar restriccions ecològiques a aquests processos degut a les restriccions que existeixen en els nostres sistemes quan incorporem els fluxos de matèria i d'energia.

Sabem que obtenim l'eficiència màxima quan la màquina funciona en un cicle reversible, la qual només depèn de la diferència de temperatures entre les substàncies de treball i no de les substàncies en si. En aquests moments necessitem incorporar consideracions referents a l'eficiència del cicle, a través del output de treball que pot generar si aquest funciona en un temps finit, degut al fet que la societat necessita una quantitat de treball en un temps finit en comptes d'un treball proporcionat a una tassa temporal infinitesimal, com en les màquines reversibles.

Per tal d'optimitzar al màxim el funcionament de les nostres màquines tèrmiques necessitem incorporar restriccions temporals en els cicle termodinàmics que tractem. Per tant, a part de tenir en compte el criteri de màxima eficiència tindrem en compte també la màxima potència, o per exemple la minimització de la producció d'entropia o bé la maximització de la potència menys el producte de la temperatura i la producció d'entropia.

Tal com hem dit, la condició per a que una màquina operi amb el rendiment de la màquina de Carnot màxim, és que ho faci reversiblement, és a dir, infinitament lent. Una conclusió d'aquest fet és que la potència desenvolupada per una màquina reversible és de fet zero, la qual cosa no interessa en l"indústria ja que generalment el que necessitem és una quantitat de treball donada en un temps finint. Un cicle dut a terme en un temps finit significa una reducció en l'eficiència i per tant ens enfrontem amb la dicotomia de maximitzar l'eficiència o bé maximitzar la potència.

2.6.1 Cicle de Curzon-Ahlborn

Per tal de estudiar aquest problema l'any 1975 Curzon i Ahlborn van proposar un model teòric. Assumint que la tassa de calor intercanviada entre la substància de treball a una temperatura T_1' i el reservori de calor a una temperatura T_1 ve descrit per la llei de Newton de transport del calor, és a dir,

$$\frac{dQ_1}{dt} = \alpha_1(T_1 - T_1^{'}) \tag{2.19}$$

Anàlogament la tassa d'intercanvi amb la font freda serà

$$\frac{dQ_2}{dt} = \alpha_2(T_2^{'} - T_2) \tag{2.20}$$

on els coeficients α depenen de conducitivitat tèrmica de les parets que separen la substància de treball i la font, al igual que de factors geomètrics, d'àrea i d'amplada de la paret. Veiem un esquema del cicle de Curzon-Ahlborn en la figura (2.2).

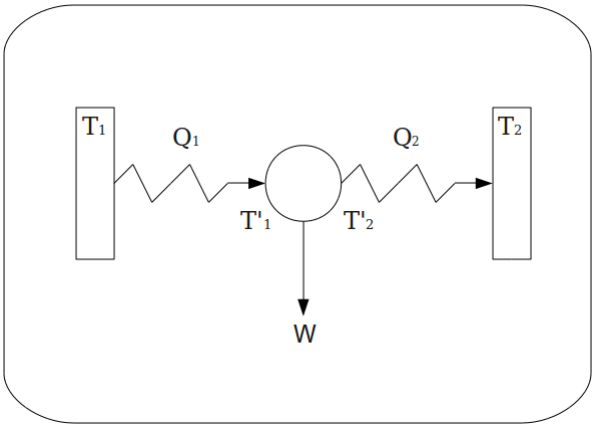


Figura 2.2: Màquina tèrmica endereversible de Curzon-Ahlborn, amb un funcionament no-ideal degut a les irreversibilitats introduides en l'intercanvi de calor entre els sitemes.

A través de les dues equacions anteriors podem trobar que els temps necessaris per absorbir una quantitat de calor Q_1 i entregar-la a Q_2 són respectivament

$$t_1 = \frac{Q_1}{\alpha_1(T_1 - T_1^{'})}\,, \qquad t_2 = \frac{Q_2}{\alpha_2(T_2^{'} - T_2)} \tag{2.21}$$

Aquí hem considerat les següents simplificacions: les temperatures de la substància de treball $T_1^{'}$ i $T_2^{'}$ són constants durant el procés d'intercanvi de calor i el temps de les parts adiabàtiques del cicle és molt més petit que el temps necessari per absorbir o entregar calor. Físicament això implica l'absència de pèrdues per fregament i d'efectes inercials, en definitiva es treballarà amb un pistó sense fricció de massa zero. La duració total del cicle serà per tant $t_{cicle} \approx t_1 + t_2$.

El treball que proporciona la nostra màquina durant un cicle complet és el cocient del treball que genera i el temps total de la duració del cicle, és a dir,

$$P = \frac{W}{t_{cicle}} \tag{2.22}$$

Per tal d'obtenir tant l'eficiència com la potència com a funció de la durada del cicle, utilitzem l'equació

$$\triangle S_{tot} = \triangle S_1 + \triangle S_2 + \triangle S_{màquina} = -\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + 0 = \triangle_{irr} S \geq 0 \tag{2.23}$$

que ens diu quina és l'entropia produïda durant un cicle. D'una altre banda, sabem que quan una quantitat de calor Q flueix d'un sistema a temperatura T cap a un altre sistema a temperatura T', la quantitat d'entropia produïda és

$$\triangle_{irr} S = -Q\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right) \tag{2.24}$$

Assumint que l'entropia total generada durant un cicle és només el resultat dels intercanvis de calor irreversibles entre els reservoris i la substància de treball, aleshores totes les possibles fonts d'irreversibilitat, tals com la viscositat, és negligeixen. Per tant sabent que

$$\triangle_{irr} S = -Q_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1'}\right) - Q_2\left(\frac{1}{T_2'} - \frac{1}{T_2}\right) \tag{2.25}$$

i utilitzant l'equació (2.23) s'obté finalment que

$$-\frac{Q_1}{T_1'} + \frac{Q_2}{T_2'} = 0 \tag{2.26}$$

Comparant les equacions (2.23) i l'equació (2.26) veiem que en la última apareixen les temperatures de la substància de treball durant l'expansió i la compressió isotèrmica en comptes de les temperatures de la font. Podem concloure per tant que la substància de treball funciona d'una manera reversible i que l'única font d'irreversibilitat prové de l'intercanvi de calor entre sistemes a diferents temperatures, és a dir, entre la substància de treball i els corresponents reservoris de calor. A aquest tipus de màquina se l'anomena "màquina de calor endoreversible", degut a que les causes de la irreversibilitat no tenen el seu origen en les causes internes i si en el contacte amb les fonts.

A través de la primera llei de la termodinàmica, per el cas particular del gas ideal, podem trobar el valor de les calors a través del quocient de compressió com

$$Q_1 = RT_1' ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right), \qquad Q_2 = RT_2' ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) \tag{2.27}$$

i el treball W com la diferència de calors $Q_1 - Q_2$. El treball serà major com més gran sigui Q_1 i més petit sigui Q_2. A partir de l'equació (2.26) veiem que aquest cas correspon a augmentar T_1' i reduir T_2'. No obstant si s'augmenta T_1' i es disminueix T_2', el quocient de la calor intercanviada entre les fonts disminueix, tal com es veu en les equacions (2.19) i (2.20). Sota aquestes circumstàncies els cicles s'alenteixen donant pas a un increment de l'eficiència amb una disminució de la potència. Si el quocient de la calor s'incrementa disminuint T_1' i augmentant T_2', l'eficiència es redueix, és a dir, cada cicle produeix menys treball però aquest és realitza en un temps menor. Quan el quocient és massa alt, el treball per cicle és molt petit de tal manera que la potència disminueix fins arribar a convertir-se en zero. Entre aquestes dues situacions extremes, on la potència és zero, existeix una on la potència del output és màxima, tal com es pot veure en la figura (2.4), on l'eix x correspon a t_{cicle}^{-1}, la recta correspon a l'eficiència η i la paràbola a la potència P.

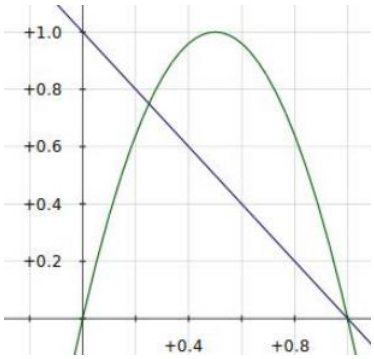


Figura 2.3: Balanç entre la potència (verd) i el rendiment (blau) en funció del temps obtinguts en un cicle de Curzon-Ahlborn. L'eix x correspon a la inversa del temps i l'eix y a la potència

Per tal de determinar els valors de les temperatures T_1' i T_2' corresponents al màxim output de potència, per a unes temperatures fixades dels reservoris de calor, escrivim explícitament l'expressió per a la potència,

$$P(T_1^{'}, T_2^{'}) = \frac{Q_1 - Q_2}{t_{cicle}} = \frac{Q_1 - Q_2}{\frac{Q_1}{\alpha_1(T_1 - T_1^{'})} + \frac{Q_2}{\alpha_2(T_2^{'} - T_2)}} \tag{2.28}$$

, eliminant Q_1 i Q_2 en termes de $T_1^{'}$ i $T_2^{'}$ utilitzant l'equació (2.26), obtenim

$$P(T_1^{'}, T_2^{'}) = \frac{T_1^{'} - T_2^{'}}{\frac{T_1^{'}}{\alpha_1(T_1 - T_1^{'})} + \frac{T_2^{'}}{\alpha_2(T_2^{'} - T_2)}} \tag{2.29}$$

Per tal de simplificar les anteriors equacions, introduïm les variables $x_1 \equiv T_1 - T_1^{'}$ i $x_2 \equiv T_2^{'} - T_2$. D'aquesta manera podem escriure

$$P(x_1, x_2) = \frac{\alpha_1\alpha_2 x_1 x_2(T_1 - T_2 - x_1 - x_2)}{\alpha_2 T_1 x_2 + \alpha_1 T_2 x_1 + (\alpha_1 - \alpha_2)x_1 x_2} \tag{2.30}$$

Per tal de trobar els extrems, resolem les següents equacions

$$\frac{\partial P(x_1, x_2)}{\partial x_1} = 0\,, \qquad \frac{\partial P(x_1, x_2)}{\partial x_2} = 0 \tag{2.31}$$

A partir de

$$\alpha_2 T_1 x_2(T_1 - T_2 - x_1 - x_2) = x_1(\alpha_2 T_1 x_2 + \alpha_1 T_2 x_1 + (\alpha_1 - \alpha_2)x_1 x_2) \tag{2.32}$$

$$\alpha_1 T_2 x_1(T_1 - T_2 - x_1 - x_2) = x_2(\alpha_2 T_1 x_2 \alpha_1 T_2 x_1 + (\alpha_1 - \alpha_2)x_1 x_2) \tag{2.33}$$

es pot verificar que

$$x_{2,max} = \left(\frac{\alpha_1 T_2}{\alpha_2 T_1}\right)^{1/2} x_{1,max} \tag{2.34}$$

amb

$$x_{1,max} = \frac{T_1 - (T_1 T_2)^{1/2}}{1 + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{1/2}}\,, \qquad x_{2,max} = \frac{-T_2 + (T_1 T_2)^{1/2}}{1 + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)^{1/2}} \tag{2.35}$$

A través de les dues equacions anteriors podem trobar que

$$T_1^{'} = C T_1^{1/2}\,, \qquad T_2^{'} = C T_2^{1/2}\,, \qquad C \equiv \frac{(\alpha_1 T_1)^{1/2} + (\alpha_2 T_2)^{1/2}}{\alpha_1^{1/2} + \alpha_2^{1/2}} \tag{2.36}$$

Si ara introduim l'equació (2.35) en l'equació (2.36), obtenim per a la màxima potència

$$P_{max} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(\alpha_1^{1/2} + \alpha_2^{1/2})} (T_1^{1/2} - T_2^{1/2}) \tag{2.37}$$

Per tant l'eficiència en termes de x_1i x_2 és

$$\eta(x_1, x_2) = 1 - \frac{T_2'}{T_1'} = 1 - \frac{T_2 + x_2}{T_1 - x_1} \tag{2.38}$$

Substituint-ho en les expresions (2.35), trobem la següent relació important

$$\eta_{max\, potència} = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/2} \tag{2.39}$$

A primera vista, comparant-ho amb l'eficiència teòrica de la màquina de Carnot veiem que l'eficiència a màxima potència va com l'arrel quadrada del quocient entre temperatures. Aquesta última relació ens resulta de gran interès ja que només és funció de les temperatures dels dos reservoris de calor i ens serveix per tal de considerar altres aspectes d'avaluació termodinàmics relacionats amb les màquines tèrmiques.

Considerant algunes centrals de producció elèctriques, comparem les eficiències reals amb les eficiències de Carnot i de Curzon-Ahlborn, tal com mostrem en la taula següent.

Central	$T_2(K)$	$T_1(K)$	η_{real}	η_{carnot}	$\eta_{curzon-ahlborn}$
Doel 4, Bèlgica	282	566	0,35	0,50	0,29
Almaraz II, Espanya	290	600	0,34	0,52	0.30
Sizewell, Regne Unit	288	581	0,36	0.50	0.30
Cofrentes, Espanya	289	561	0,34	0,49	0,28
Heysham, Regne Unit	288	727	0,40	0,60	0,37

Taula 2.1: Eficiències reals, màximes i a potència màxima per a diverses centrals de generació elèctrica.

Veiem com l'eficiència real observada en les centrals elèctriques és manté dins del límits marcats per a les eficiències de Carnot i de Curzon-Ahlborn, però sent sempre molt més properes a aquesta última. Per tant podem deduir que les centrals elèctriques funcionen amb cicles entre el cicle de màxima eficiència (Carnot) i el cicle de màxima potència (Curzon-Ahlborn), acostant-se molt més a aquest últim. Aquesta última conclusió, que les centrals

elèctriques funcionin amb cicles de màxima potència sembla ser bastant raonable, ja que el servei que se n'espera d'aquestes és que subministrin la major energia però sempre amb el menor temps possible, degut a les exigències de demanda del mercat.

Retornant a la qüestió de la independència dels coeficients de transferència de calor en l'equació (2.39) observem que aquesta no dependència no és general com en el cas de l'eficiència de Carnot, ja que en el nostre cas hem assumit que l'única font d'irreversibilitat és la proporcionada per la conducció tèrmica i hem negligit altres possibles fonts tals com els possibles processos dissipatius. També la no dependència de coeficients prové de l'elecció de la llei de Newton com a llei específica adoptada per a la nostre transferència de calor. Si en comptes d'escollir aquesta última llei, n'escollim una del tipus

$$\frac{dQ_1}{dt} = \beta_1 \left(\frac{1}{T_1'} - \frac{1}{T_1} \right) , \qquad \frac{dQ_2}{dt} = \beta_2 \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_2'} \right) \tag{2.40}$$

podem veure que la respectiva eficiència a màxima potència vé donada per

$$\eta(P_{max}) = \frac{1 + (\beta_1/\beta_2)^{1/2}}{2 + (1 + T_2/T_1)(\beta_1/\beta_2)^{1/2}} (1 - T_2/T_1) \tag{2.41}$$

la qual depèn explícitament dels coeficients de transferència de calor.

2.6.2 Restriccions econòmiques i ecològiques

Tal com hem vist en la taula anterior, en situacions pràctiques, el rendiment en les centrals de producció d'energia elèctrica han de jugar amb un compromís entre una eficiència màxima i una potència màxima. El tipus de rendiment, per tant, vindrà donat tant per les restriccions econòmiques (com per exemple la demanda d'electricitat en el mercat) com per restriccions de tipus ecològiques (disponibilitat de combustible).

Des d'un punt de vista econòmic particular podem definir l'eficiència d'una màquina com

$$\eta_{econòmic} = \frac{W \times Pr(W)}{Q_1 \times Pr(Q_1)} \tag{2.42}$$

on $Pr(W)$ és el preu de venda de la unitat de treball i $Pr(Q_1)$ és el preu de compra de la unitat de calor que s'ha de subministrar a la màquina per tal que funcioni. L'eficiència econòmica incorporarà informació de caràcter no físic al igual que els preus del combustible i del treball. L'eficiència econòmica

tal com l'hem definit en l'equació (2.42) és una simplificació ja que en realitat hauria d'incloure altres tipus de paràmetres, com per exemple la inversió en la construcció de la planta energètica i costos operatius tals com els preus dels treballadors i d'altres costos i taxes indirectes. No obstant això, el preu del combustible juga un rol molt important: si el combustible és costós i el treball produït per la màquina és ven a un preu baix, aleshores la la situació amb una eficiència més gran, en la qual se'n treu un major profit del combustible, serà la més convenient. Si al contrari el combustible és econòmic i el treball es pot vendre a un preu elevat, aleshores la situació en la qual obtenim la potència màxima serà la més adequada des d'un punt de vista econòmic. Per tant, com més gran sigui la potència en l'output, més ràpid es recuperaran les inversions, mentre que com més gran sigui l'eficiència, més ràpid es recuperarà el cost del combustible.

En aquest punt si incorporem restriccions ecològiques, el criteri anterior canviarà. Com més petita sigui l'eficiència, menys ecològica serà la planta energètica ja que consumirà més combustible per tal de produir la mateixa quantitat de treball i per tant produirà més contaminació. Per tant podem dir que la situació amb una eficiència major és la més ecològica, mentre que si el combustible és suficientment econòmic, l'operació a màxima potència serà la més interessant des d'un punt de vista econòmic. No obstant, la situació no és així de simple ja que s'ha d'incorporar variables que tinguin en compte la tassa de demanda d'energia.

Un altre exemple on existeix una dicotomia similar entre eficiència i potència és en les reaccions químiques exotèrmiques. Sabem que l'eficiència d'una reacció química, és a dir el nombre de mols que es produeixen per a una determinada quantitat de reactants, s'incrementa quan s'abaixa la temperatura, segons el principi de Le Chatelier. És a dir, si incrementem la temperatura d'un sistema en equilibri , aquest es desplaçarà en el sentit que absorbeixi el calor aplicar. En les reaccions exotèrmiques, aquelles que alliberen calor, del tipus $A+B \longleftrightarrow C+D+\text{Calor}$, si s'augmenta la temperatura hi haurà un desplaçament de l'equilibri cap als reactius i serà cap als productes si disminueix. No obstant, des d'un punt de vista cinètic, com més petita sigui la temperatura més petita serà la tassa de reacció. Per tant disminuir la temperatura té dos efectes oposats, incrementar l'eficiència i disminuir la tassa de reacció. La temperatura a la qual s'ha de produir una reacció no es pot determinar per tant només utilitzant paràmetres termodinàmics i per tant s'haurà de tenir en compte els condicionants econòmics i ecològics. Des d'un punt de vista econòmic, si el preu del reactant és baix, l'opció que més interessa és la més ràpida, no obstant si ens ho mirem des d'un punt de vista ecològic, com més ràpida sigui la reacció més alt és el consum del reactant i com a conseqüència més contaminació emet la industria.

Ambdues consideracions, la potència i l'eficiència, s'han de prendre en consideració en la producció i en la utilització de màquines tèrmiques actuals. Fins ara només s'han discutit dos criteris, l'optimització de la potència i l'optimització de l'eficiència, no obstant podem incloure altres elements per tal d'expressar millor els lligams entre les necessitats econòmiques i les necessitats ecològiques.

Una altre aproximació consisteix en minimitzar la producció d'entropia, la qual està relacionada amb la pèrdua de treball disponible a través de

$$W_{perdut} = T_2 \triangle_{irr} S \tag{2.43}$$

, per tant podem expressar la tassa de producció d'entropia σ^s fent ús de les equacions (2.38) per al $\triangle_{irr} S$ i (2.21) per a t_{cicle} com

$$\sigma^s \equiv \frac{\triangle_{irr} S}{t_{cicle}} = \frac{-Q_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1'} \right) - Q_2 \left(\frac{1}{T_2'} - \frac{1}{T_2} \right)}{\frac{Q_1}{\alpha_1 (T_1 - T_1')} + \frac{Q_2}{\alpha_2 (T_2' - T_2)}} \tag{2.44}$$

En termes de x_1 i x_2 com hem definíem anteriorment, l'equació (2.45) s'escriu com

$$\sigma^s(x_1, x_2) = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{T_1 T_2} \frac{x_1^2 x_2 T_2 + x_1 x_2^2 T_1}{\alpha_1 T_1 x_1 + \alpha_2 T_2 x_2 + (\alpha_1 - \alpha_2) x_1 x_2} \tag{2.45}$$

Un altre criteri ecològic que s'utilitza sovint és la maximització de la quantitat

$$\Psi = potència - T_2 \times producció\, entropia = P - T_2 \sigma^s \tag{2.46}$$

Fent-ho s'obté una combinació d'una potència alta (factor d'interès econòmic) juntament amb una dissipació petita (factor d'interès ecològic). L'equació (2.46) està relacionada amb el treball disponible en un procés el qual es pot escriure com

$$W = W_{rev} - T_2 \triangle_{irr} S \tag{2.47}$$

on W_{rev} és el treball realitzat en un procés reversible i $T_2 \triangle_{irr} S$ és el treball dissipat com a calor en les irreversibilitats. A través de l'equació (2.36) per a la potència de l'output i l'equació (2.45) per a la tassa de producció d'entropia obtenim

$$\Psi(x_1, x_2) = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{T_1 T_2} \frac{T_1 (T_1 - T_2) - (T_1 + T_2) x_1 - 2 T_1 x_2}{\alpha_1 T_1 x_1 + \alpha_2 T_2 x_2 + (\alpha_1 - \alpha_2) x_1 x_2} x_1 x_2 \tag{2.48}$$

Els valors de les variables per a les quals aquesta quantitat esdevé màxima, en el cas particular $\alpha_1 = \alpha_2$ són

$$x_{1,max} = \frac{T_1}{2}\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2 + 2T_1 A}, \quad x_{2,max} = A x_{1,max} \tag{2.49}$$

on

$$A \equiv \left[\frac{T_2(T_1 + T_2)}{2T_1}\right]^{1/2} \tag{2.50}$$

Introduint (2.49) a l'equació (2.38), trobem que l'eficiència corresponent ve donada per

$$\eta(\Psi_{max}) = \eta_{carnot}\frac{1 + 2\frac{T_2}{T_1} + \frac{3}{2}\sqrt{2}\left(\frac{T_2}{T_1} + \frac{T_2^2}{T_1^2}\right)^{1/2}}{1 + 3\frac{T_2}{T_1} + 2\sqrt{2}\left(\frac{T_2}{T_1} + \frac{T_2^2}{T_1^2}\right)^{1/2}} \tag{2.51}$$

L'optimització del criteri d'eficiència Ψ, ens dona un output de potència satisfactori, el qual és econòmicament interessant i disminueix suficientment la dissipació respecte a la situació de màxima potència, el qual és bo des del punt de vista ecològic. En la taula (2.2) comparem les eficiències de la taula (2.1) juntament amb la nova eficiència a Ψ_{max}.

Central	η_{real}	η_{carnot}	$\eta_{curzon-ahlborn}$	$\eta(\Psi_{max})$
Doel 4, Bèlgica	0,35	0,50	0,29	0,39
Almaraz II, Espanya	0,34	0,52	0.30	0,40
Sizewell, Regne Unit	0,36	0.50	0.30	0,39
Cofrentes, Espanya	0,34	0,49	0,28	0,38
Heysham, Regne Unit	0,40	0,60	0,37	0,47

Taula 2.2: Comparació d'eficiències reals, màximes, a potència màxima i a Ψ_{max} per a diverses centrals de generació elèctrica.

Veiem que la nova eficiència, la qual representa un compromís entre la potència i el producte de l'entropia per la temperatura del reservori fred, correspon aproximadament al promig de l'eficiència de Carnot i la de Curzon-Ahlborn.

En la taula (2.3) es donen els valors de l'eficiència, la potència, la producció d'entropia i la dissipació (el producte de la temperatura més baixa per la producció d'entropia) d'una màquina de Carnot amb una temperatura $T_1 = 400K$, $T_2 = 300K$, $V_{max}/V_{min} = 2$ i $\alpha = 209WK^{-1}$ sota diferents

	Ef.Màx.	Pot.Màx.	Prod.Entr.Mín.	Ψ Màx.
Eficiència ()	25	13	23	19,20
Potència (W)	0	375	114	294
Prod. Entropia (WK^{-1})	0	1,08	0,30	0,31
Dissipació (W)	0	325	90	93

Taula 2.3: Valors d'eficiència, potència, producció d'entropia i dissipació d'una màquina de Carnot sota les condicions operacions definides per la màxima eficiència, l'output de potència màxim, la mínima producció d'entropia i el màxim Ψ.

condicions operacionals. Considerem, com hem dit al començament, que $Q_1 = RT_1' ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$, $Q = RT_2' ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$.

S'observa que l'avantatge de l'optimització del criteri de Ψ_{max}és que tot i que redueix la potència disponible respecte la potència màxima (de 375 a $294W$, és a dir un 25% aproximadament), disminueix al contrari la producció d'entropia (de 1,08 a $0{,}3WK^{-1}$) i la dissipació (de 325 a $93W$).

2.7 Termodinàmica i Sostenibilitat

En el tercer exemple d'ús de la termodinàmica en la teoria econòmica, les restriccions termodinàmiques s'introdueixen en un model simple macroeconòmic, construït per l'anàlisi d'un creixement òptim sostenible [Mansson 1986](obviant que creixement sostenible té molts números de ser un concepte antonímic complementari, comparable a l'expressió de Groucho Marx "intel·ligència militar, són dos conceptes contradictoris"). La idea bàsica consisteix en utilitzar els límits proporcionats per la termodinàmica en l'economia de nau espacial per tal desenvolupar algun coneixement en el funcionament d'una economia sostenible. (Existeixen òbviament molts altres límits, els quals no prendrem aquí.) Les restriccions físiques es prendran en consideració a través de l'ús de l'exergia com una mesura dels recursos.

El model està construït a través de les idees de Bouilding [1966] i Meadows et.al. [1972] (també de Georgescu-Roegen [1971], però utilitzant l'exergia en comptes de l'entropia com a concepte físic central). L'economia la qual no és una economia d'estat estacionari, està basada en el flux d'un recurs únic, inexhaurible però limitat. Existeixen molts models similars en la literatura econòmica, els quals estudien recursos naturals exhauribles [Peterson i Fischer 1977, RES 1974 i Smith i Krutilla 1982].

2.7.1 La funció de producció

Les variables d'estat d'un sistema econòmic són l'estoc de capital fix K, mesurat en termes d'exergia i l'estoc tecnològic T, mesurat en les adients unitats adimensionals. A través de la tecnologia (coneixement tecnològic) s'entén no només el fet simple de "com les coses funcionen" ja que el coneixement teòric s'ha d'incorporar en les competències laborals o bé en el disseny de les màquines per tal que influeixin en l'eficiència. Una part de la tecnologia s'assumeix que està incorporada en el capital físic, reflectint el punt de vista en el qual el coneixement té una base material prèvia. El capital pot també incloure parts de la naturalesa ja que el capital posseeix algunes de les característiques del bé capital. El consum de recursos en l'economia R es mesura també en unitats d'exergia.

El sistema de producció està descrit a través de tres factors de producció, capital, tecnologia i consum de recursos. El procés de producció transforma el flux entrant de recursos cap al consum i la inversió en bens. Tots els factors de producció s'assumeixen que s'utilitzen completament. Els processos de producció estan descrits a través d'una eficiència exergética E (adimensional), la qual és una funció de la tecnologia, el capital físic i el consum de bens. El flux de productes (la funció de producció) es pot escriure de la següent forma:

$$(R, T, K) = R \cdot E(T, F) \tag{2.52}$$

on F és el capital per unitat de flux de recurs, $F \equiv K/R$ (és a dir, el doble de les unitats de capital poden gestionar el doble dels fluxos de recursos amb la mateixa eficiència termodinàmica). La idea que la qualitat del capital depèn de la tecnologia es pren en consideració a través de la funció d'eficiència.

Utilitzem ara un concepte físic d'eficiència, relacionant els fluxos entrants i sortints d'exergia d'un procés de producció. A aquesta eficiència també se l'anomena "efectivitat" o bé "eficiència de la segona llei", tal com hem vist amb anterioritat. D'acord amb la termodinàmica

$$0 < E(T, F) \leq 1 \tag{2.53}$$

La funció d'eficiència s'assumeix que és suau i que satisfà $0 < E(0, 0)$, $0 < E_T < \infty$ i $0 < E_F < \infty$. (S'utilitza la notació estàndard per a les derivades parcials, per exemple, $\partial W/\partial V = W_V$, mentre que $'$ denota la diferencial respecte al argument d'una funció d'una variable.) Veiem que per tal d'aconseguir una eficiència propera a la unitat són necessaris grans estocs

de capital i tecnologia. El requeriment d'estalvi mínim per tal de compensar la depreciació és per tant una alta proporció del output total.

Les condicions per les segones derivades parcials de la funció d'eficiència millorar la tractabilitat matemàtica i permetran l'existència de demostracions encara que no hi hagi fonament físic per tals assumpcions.

L'elasticitat de la producció, $e = 1 + TE_T/E > 1, \forall T, F > 0$, és a dir, hi ha "increasing returns to scale" (augment en l'eficiència a escala). Les assumpcions relacionades amb la funció d'eficiència no garanteixen que les elasticitats de substitució siguin no-negatives a tot arreu.

2.7.2 Dinàmiques i Control

El desenvolupament del sistema està controlat per tres variables, les tasses d'inversió, I en el capital i J en la tecnologia, juntament amb el consum de recursos R (tot mesurat en unitats d'exergia). Tot i que és possible concebre que el capital i la tecnologia s'utilitzin com un input de recursos, és convenient de no permetre-ho, és a dir, postular

$$I \geq 0 \quad \text{i} \quad J \geq 0 \tag{2.54}$$

Els estocs de recursos naturals no es consideren. Per tant, el consum de recursos ha de satisfer les següents desigualtats

$$0 \leq R \leq \hat{R}(K) \tag{2.55}$$

$$R \leq R^* \tag{2.56}$$

El límit de (3.11) reflecteix l'assumpció que el consum de recursos està restringit per la quantitat de capital disponible per crear el flux entrant. R^* és un límit superior per al consum de recursos, per exemple, el flux entrant total solar en una economia basada en el sol. Una part del flux entrant de recursos pot ser creada directament sense utilitzar cap capital, és a dir, $\hat{R}(0) > 0$ i que existeix una mida d'estoc de capital finit K^* definit a través de $\hat{R}(K^*) = R^*$.

Mantenir un cert nivell en una societat costa una determinada quantitat de input de recursos, ja que el nivell actual de coneixement i per tant tecnològic es deteriorarà si no s'inverteix en educació, entrenament, recerca i desenvolupament. La tecnologia només pot augmentar si més d'aquesta quantitat és invertida. Existeix també òbviament un deteriorament del capital i la tecnologia compresa també es deteriorarà amb el capital corresponent.

Assumim una depreciació de capital i tecnologia amb unes tasses constants de depreciació β_K i β_T, respectivament. Denotem amb γ l'increment

constant de tecnologia per unitat invertida d'exergia per tal d'obtenir les equacions del moviment per a les variables d'estat.

$$\dot{K} = -\beta_K K + I \tag{2.57}$$

$$\dot{T} = -\beta_T T + \gamma J + h(\beta_K K, I) \tag{2.58}$$

on la funció h s'utilitza per tal de prendre en consideració la inserció de la tecnologia en el capital. Normalment assumim que $h(\beta_K K = I) = 0, h(\beta_K K < I) > 0$ i que $h(\beta_K K > I) < 0$. Veiem immediatament que un estoc de capital major de R^*/β_K és impossible de mantenir; similarment, existeix un límit superior per a la tecnologia, $T < \gamma R^*/\beta_K$.

2.7.3 Consum i Utilitat

La producció pot utilitzar-se tant per al consum com per a la inversió. Assumint que no hi ha pèrdues, la tassa de consum és

$$C = P - I - J \tag{2.59}$$

Mentre que el sistema de producció podria funcionar sense capital i tecnologia, no hi ha cap garantia que la producció pogués cobrir suficientment el requeriment per tal de sostenir la població (constant) sota aquestes circumstàncies.

Una assumpció convencional en economia neo-clàssica és utilitzar una funció de utilitat la qual és només una funció del consum agregat, ignorant per exemple consideracions respecte la distribució per sobre els individus. Una aproximació d'aquest tipus ens permet concentrar-nos en els efectes de les restriccions físiques en un model econòmic raonablement simple. El major desavantatge és el fet que és perillosament semblant a una teoria exergética simplista del valor, ja que el consum està mesurat en termes d'exergia. Com és normal, la tassa d'utilitat $U(C)$ s'assumeix que compleix les condicions $U'(C) > 0, U''(C) < 0$.

2.7.4 Sostenibilitat, Espai Operacional i Estats Estacionaris

Les restriccions físiques prescriuen que aquest tipus d'economia ha d'operar dins d'un volum V de l'espai $K-T-R$ (figura 2.4) on el capital, la tecnologia i el consum de recursos son no-negatius i on les constants (3.11) i (2.56) és compleixen. Donat que $P(0,0,0) = \hat{R}(0) \cdot E(0,0) > 0$ existeix sempre producció. No obstant pot ser menys de la mínima requerida per al consum.

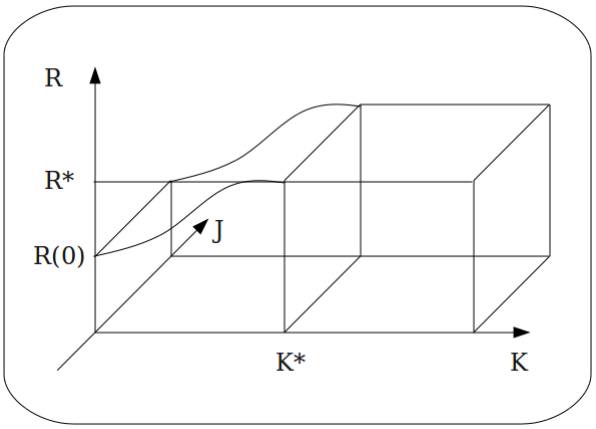


Figura 2.4: El volum operacional V en l'espai $K-T-R$. Les fronteres exteriors en els eixos K i T són degudes a la deppreciació. Parlant estrictament, això tambe significa que el volum total no és disponible per a un creixement sostenible.

2.7.5 El Problema d'Optimització

L'objectiu de la maximització és maximitzar la utilitat total a partir del temps actual, $t = 0$, cap a algun temps t_f. L'economia s'assumeix que opera en un marc on el treball i la població són estacionaris. Assumint un únic estat estacionari en el qual el consum és major que en els altres estats estacionaris, amb un consum C^* i usant-lo com a estat final en el camí òptim, la quantitat a ser optimitzada és:

$$W = \int_0^{t_f} [U(C(\tau)) - U(C*)]d\tau \tag{2.60}$$

Algunes propietats respecte els camins òptims es poden derivar a partir de les condicions de necessitat del principi de màxims de Pontryagin[4]. El problema de maximitzar W, donades unes equacions del moviment (2.57) i (2.58) i unes restriccions (2.54)-(2.56) està descrit a partir d'una funció Hamiltoniana amb quatre multiplicadors dependents del temps, els quals es poden interpretar com "shadow prices" (preus ombra) en les inversions i en el consum de recursos respectivament i dues variables que es poden interpretar com a preus ombra en el capital i la tecnologia. Les condicions necessàries de primer ordre del principi de màxims ens porten cap a les equacions del

[4]El principi màxim de Pontryagin s'aplica a una determinada classe de problemes de Bolzano. La major part dels problemes d'optimització es poden posar en la forma del problema de Bolzano, el qual involucra un nombre de variables d'estat que varien amb el temps de 0 a T.

moviment en el camí òptim i les condicions en els multiplicadors. Les condicions necessàries de segon ordre es poden utilitzar per tal de mostrar que per algunes funcions d'eficiència tots els camins òptims involucren l'ús del màxim consum de recursos.

Quatre variables involucrant els multiplicadors poden ser zero o positives, donades les 16 possibles combinacions (casos). Dos d'aquests casos són inconsistents des del punt de vista intern. Els altres casos són possibles, per algunes eleccions de funcions d'eficiència i sota certes condicions. Per tant, una solució òptima si existeix, està formada per una combinació de camins de 14 tipus diversos.

2.7.6 Resultats del model

En aquest apartat descriurem alguns dels resultats més importants del model. Potser un dels resultats més importants del model és el fet que alguns components matemàtics, convenients però poc convincents, usats en les primeres teories sobre creixement són innecessaris quan prenem en consideració les restriccions de caràcter físic. Un exemple és l'assumpció que la producció pot créixer sense límit (creixement exponencial!) a través del progrés tecnològic.

La solució del problema d'optimització comporta un nombre de propietats dels segments dels camins òptims la unió dels quals ens dona el camí òptim d'un estat inicial cap a un estat final. Les condicions de necessitat són bastant restrictives. Es pot provar el fet que l'estat final en l'optimització no pot romandre dintre del volum V permès, de fet en la majoria de casos el consum de recursos és el més gran possible donades les restriccions (3.11) i (2.56). De fet, el consum de recursos òptim està especificat sovint per a qualsevol K i T donades.

De les catorze alternatives possibles quatre involucren una economia en col·lapse, on la tassa de consum decreix amb el temps. Els altres deu casos tots involucren al menys un tipus d'inversió.

Hi ha dos tipus de segments de camins òptims: camins exteriors on el consum de recursos és màxim i camins interiors, sense la igualtat en (3.11) i (2.56). Tant per els camins exteriors i interiors existeixen condicions per a un creixement balancejat, on el desenvolupament en estoc de capital i tecnologia estan acoblats. Si els estocs estan sense balancejar, no hi hauria d'haver cap tipus d'inversió en l'estoc excedent.

En tots els camins interiors les elasticitats de substitució entre el consum de recursos i el capital al igual que entre el consum de recursos i la tecnologia són zero; també la productivitat marginal de R i el prou ombra del consum de recursos és zero, és a dir, R es pot considerar com un bé lliure. Els camins

òptims són exclosos dels subvolums de V on el producte marginal de R és negatiu.

Com és normal en aquest tipus de models, la tassa d'interès general r, és positiva si el consum s'incrementa amb el temps. És digne de menció el fet que un camí òptim el qual involucra tant inversions en l'estoc de capital com de tecnologia, tots els preus han de complir la "regla de Hotelling".

2.8 Conclusions

El principal d'aquesta part del treball és mostrar com la termodinàmica pot ser útil per a l'economia. Aquest fet és una part d'una convicció més gran, el fet que l'economia, com la ciència social concernida amb l'ús i la distribució de recursos naturals, ha de començar a fer ús del coneixement de les ciències naturals sobre els recursos. En això, la termodinàmica hi juga un paper molt important.

De la mateixa manera altres ciències naturals poden ser de gran importància com l'ecologia o la ciència de la informació. La primera és d'especial significat degut a que pot proporcionar proves sòlides les quals s'han de prendre en consideració, però també conté molts conceptes i models de gran utilitat, en particular aquells que descriuen l'evolució en els sistemes dinàmics complexos.

L'economia s'ha relegat com la ciència modelitzada després de la física (en particular la mecànica clàssica). El primer exemple, vàlida aquesta afirmació, mostrant un anàlegs molt propers entre ambdues ciències (valor, cost, preu).

En el segon exemple, a partir de la definició dels rendiments econòmics i termodinàmics, hem vist com podem incorporar anàlisis de millora d'eficiència en les plantes energètiques, tenint en compte les limitacions imposades per la termodinàmica degudes a les irreversibilitats i les limitacions de caire econòmic en el preus dels recursos fòssils exhauribles, els quals fan funcionar els processos industrials en qüestió.

En el tercer exemple, el model no inclou estocs de recursos naturals exhauribles, com dipòsits minerals, petrolífers,etc, mentre que el sistema de producció actual és extremadament dependent d'aquests estocs. Per tant, com el model s'aplica en una era en la qual els recursos naturals ja an estat exhaurits, e model és només un petit pas cap a la fisio-economia. Abans de la data d'exhauriment (la qual no és necessàriament finita per a tots el recurs, però si per els més importants) l'objectiu és utilitzar estocs de recursos exhauribles d'una manera òptima, amb una tecnologia de suport del tipus energia solar [RES 1974, Dasgupta i Heal 1979].

Els exemples demostren la facilitat amb la qual s'adapten els coneixements de la física en el conjunt de models d'economia teòrica.

Capítol 3

Annex

3.1 Cicles de Treball i Exergia

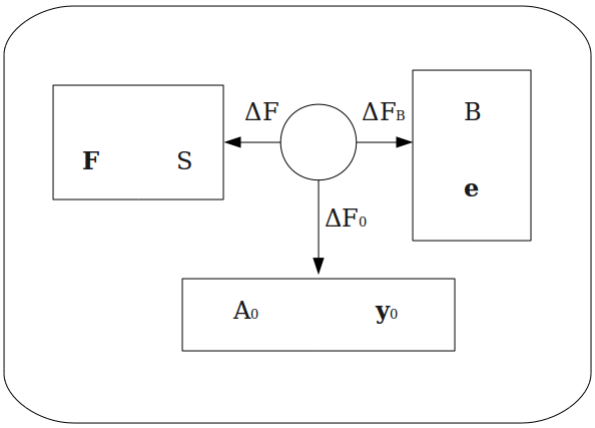


Figura 3.1: El sistema A, intercanviant treball amb el reservori B i calor amb el reservori A_0 a través del conversor C

Considerem un sistema com el de la figura A (figura3.1), amb variables termodinàmiques $\vec{F}$ i $\vec{y}$, el qual està en equilibri intern durant el cicle de treball. Assumim que A té un intercanvi de quantitats extensives conservades amb el "reservori de treball" B amb entropia zero i caracteritzat per un vector unitari $\vec{e}$, i amb un "reservori de calor" A_0 caracteritzat per les variables intensives constants $\vec{y}_0$. L'intercanvi es mediat per el conversor C. El conversor s'assumeix que retorna al seu estat original després d'un cicle complert. Si ΔW és el treball extret i ΔF és l'intercanvi amb A_0, aleshores la conservació implica que

$$\Delta F + \Delta F_B + \Delta F_0 = -\Delta F_C = 0; \qquad \Delta F_B = \vec{e} \cdot \Delta W \tag{3.1}$$

L'increment total d'entropia és no-negatiu,

$$0 \leq \Delta S_{tot} = \Delta S + \Delta S_0 = \Delta S + \vec{y}_0 \cdot \Delta \vec{F}_0 == -\Delta(\vec{y}_0 \cdot \vec{F} - S) - \vec{e}\vec{y}_0 \Delta W \tag{3.2}$$

Això es pot expressar de la següent manera

$$\Delta E + \Delta W = \frac{1}{\vec{e} \cdot \vec{y}_0} \Delta S_{tot} \leq 0 \tag{3.3}$$

on

$$E = \frac{1}{\vec{e} \cdot \vec{y}_0}(M\mu(\vec{y}_0) + \vec{y}_0 \cdot \vec{F} - S) = \frac{1}{\vec{e} \cdot \vec{y}_0} C(\vec{y}_0; \vec{y}) \tag{3.4}$$

és l'exergia generalitzada de A, és a dir, el treball generalitzat disponible en un intercanvi ideal reversible entre A i B. Tal com veiem a (3.3) la producció d'entropia introdueix pèrdues en l'intercanvi de treball amb B.

3.2 Exergia com a variable termodinàmica d'estat

La termodinàmica clàssica demostra que quan un sistema tancat homogeni canvia iostèrmicament i isobàricament d'un estat cap a un altre, el treball mecànic màxim que se'n pot extreure és la diferència entre els valors de l'energia lliure de Gibbs de l'estat final i l'estat inicial, $G = U + pV - TS$, del sistema. Similarment, per a un canvi isotèrmic tenim l'energia lliure de Helmholtz, $F = U - TS$. Ambdues energies lliures són funcions d'estat, degut a que U, H, T i S depenen únicament de l'estat del sistema i representen els límits superiors per al treball mecànic obtingut en una certa transformació. Es per tant natural preguntar-se per a una mesura més general per el treball màxim contingut en un sistema, aplicable a un procés general el qual involucra interaccions, tant internament com amb d'altres sistemes, al igual que d'altres restriccions. Una mesura del genere la proporciona el concepte d'exergia, introduït formalment en la secció anterior de l'annex. Quan el treball s'extreu d'un altre sistema tancat, l'exergia és una variable d'estat en el sentit usual, depenent únicament de les variables del sistema. Si el sistema es porta cap a l'equilibri amb un sistema de referència extern, i se'n extrau treball durant un cert procés, aleshores l'exergia també depèn de les variables intensives del sistema de referència.

Varis termes s'han utilitzat per tal de denotar a l'exergia: "energia disponible", "disponibilitat", "energia utilitzable" i "technische Arbeitsfähigkeit" són alguns exemples. Aquests termes s'utilitzen per tal de denotar el treball màxim en un procés particular. El terme "exergia" va ser introduït per Rant [1956].

A continuació passem de les variables generalitzades (utilitzades en la secció anterior de l'annex) a les variables termodinàmiques,

$$\begin{cases} M \mapsto V \\ \mu(\vec{y}) \mapsto \frac{p}{kT} \end{cases} \tag{3.5}$$

on p és la pressió i T la temperatura. Introduïm també l'energia interna U i el nombre de molècules N_i de les M espècies químiques ($i = 1, ..., M$) amb els seus respectius potencials químics μ_i (per molècula), podem reinterpretar $\vec{F}$ i $\vec{y}$ com

$$\begin{cases} \vec{F} = (U, N_1, ..., N_M) \\ \vec{y} = \frac{1}{kT}(1, -\mu_1, ..., -\mu_M) \end{cases} \tag{3.6}$$

Per tant les relacions de Gibbs i de Gibbs-Duheim es poden escriure com

$$\begin{cases} U = TS - pV + \sum_i \mu_i N_i \\ dU = TdS - pdV + \sum_i \mu_i dN_i \end{cases} \tag{3.7}$$

$$SdT - Vdp + \sum_i N_i d\mu_i = 0 \tag{3.8}$$

i l'exergia com

$$\begin{aligned} E = kT_0K &= (U - p_0V - T_0S - \sum_i \mu_{i0}N_i \\ &= U - U_{eq} + p_0(V - V_{eq}) - T_0(S - S_{eq}) - \sum \mu_{i0}(N_i - N_{ieq}) \\ &= S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_i N_i(\mu_i - \mu_{i0}) \end{aligned} \tag{3.9}$$

on T_0, p_0, μ_{i0} són les variables intensives de l'estat de referència (assumit en equilibri) i on U_{eq}, S_{eq}, V_{eq} i N_{ieq} són les corresponents variables extensives en l'estat de referència del sistema d'estudi.

3.3 Resolució del problema d'optimització d'exergia

Com deien en l'apartat de Fluxos Termodinàmics, degut a que la funció X és una funció convexa, aleshores el conjunt Ω de P's que satisfan

$$\begin{cases} \rho_m = \vec{e} \cdot \vec{e}_m \\ \nu_m = \vec{y}_m \cdot \vec{e}_m \end{cases} \tag{3.10}$$

també és convex. Per tant el nostre problema té solució en el contorn de Ω, la qual és única excepte per alguns casos degenerats. Primerament plantajarem i solucionarem el cas unidimensional per després extrapolar el mètode de resolució al r-tridimensional en qüestió.

3.3.1 Potència mecànica a partir d'un conjunt de font de calor amb fluxos limitats

Recordem que el problema plantejat per Carnot era el de determinar la quantitat de treball que es pot obtenir d'una màquina operant en un flux de calor entre una font de calor i un clavegueram de calor. La situació es pot generalitzar a un nombre arbitrari de fonts de calor, assumint que els fluxos estan limitats a uns certs intervals [Grubbström 1980]. A més, el sistema es pot generalitzar a altres tipus de fonts que les fonts de calor, tal com fonts de reactants químics [Eriksson 1984]. Aquests problemes tenen aplicacions pràctiques en varis camps, tals com els processos d'optimització.

A continuació, assumim que tenim M fonts de calor (o claveguerams) a diferents temperatures $0 < T_1 < T_2 < ... < T_M$. Els fluxos de calor q_i poden sortir les fonts de calor o bé entrar-ne, el primer cas el prendrem amb signe positiu i el segon com a negatiu. Els fluxos de calor assumim que estan lligats per uns certs límits,

$$\check{q}_i \leq q_i \leq \hat{q}_i; \quad \check{q}_i < \hat{q}_i; \quad (i = 1, ..., M) \tag{3.11}$$

Assumim que hi ha un conversor C per tal d'extreure la potència mecànica P a través d'un procés (cicle de treball) periòdic i estacionari, tal com veiem en la figura de dalt (3.2). En el cas de que tinguem un procés periòdic haurem de tractar amb fluxos nets per període. Assumim també que la tassa de producció d'entropia en el conversor té un límit inferior σ_{min}. Per tant, a partir de la conservació de l'energia i la limitació de l'entropia tenim

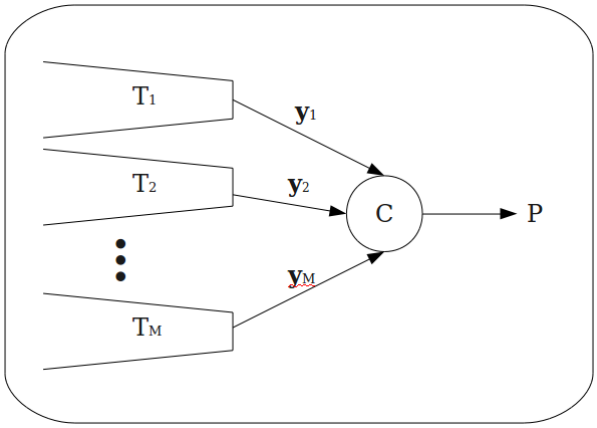


Figura 3.2: Extracció de potència mecànica P a partir d'un conjunt de M fonts de calor

$$\begin{cases} P = \sum_{i=1}^{M} q_i \\ -\sum_{i=1}^{M} \frac{q_i}{T} \geq \sigma_{min} \end{cases} \tag{3.12}$$

La solució formal consisteix en maximitzar la primera de les equacions anteriors sota els lligams de limitació dels fluxos i de producció d'entropia. Per tal de fer-ho creem un Lagrangià

$$L = \sum_{i=1}^{M} \{q_i - \tau \frac{q_i}{T_i} + \lambda(\hat{q}_i - q_i) + \mu_i(q_i - \check{q}_i)\} - \tau\sigma_{min} \tag{3.13}$$

on els multiplicadors de Lagrange satisfan

$$\begin{cases} \tau \geq o \\ \lambda_i \geq 0 \\ \mu_i \geq 0 \end{cases} \tag{3.14}$$

Per tant les condicions per a un màxim són

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \\ \tau \frac{\partial L}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = ... = \lambda_n \frac{\partial L}{\partial \lambda_n} = \mu_1 \frac{\partial L}{\partial \mu_1} = ... = \mu_n \frac{\partial L}{\partial \mu_n} = 0 \end{cases} \tag{3.15}$$

la qual cosa implica

$$\begin{cases} 1 - \frac{\tau}{T_i} - \lambda_i + \mu_i = 0 \\ \tau\left(\sum_{i=1}^{M} \frac{q_i}{T_i} + \sigma_{min}\right) = 0 \end{cases} \tag{3.16}$$

$$\begin{cases} 1 - \frac{\tau}{T_i} - \lambda_i + \mu_i = 0 \\ \tau\left(\sum_{i=1}^{M} \frac{q_i}{T_i} + \sigma_{min}\right) = 0 \end{cases} \tag{3.17}$$

i

$$\begin{cases} \lambda_i(\hat{q}_i - q_i) = 0; & (i = 1, ..., M) \\ \mu_i(q_i - \check{q}_i) = 0; & (i = 1, ..., M) \end{cases} \tag{3.18}$$

Ara observem que si $\tau > 0$, per a cada índex i es realitzen una de les tres següents possibilitats:

$$(A) \begin{cases} T_i = \tau \\ \lambda_i = 0 \\ \mu_i = 0 \\ \check{q}_i < q_i < \hat{q}_i \end{cases} \quad (B) \begin{cases} T_i < \tau \\ \lambda_i = 0 \\ \mu_i = \frac{\tau}{T_i} - 1 \\ q_i = \check{q}_i \end{cases} \quad (C) \begin{cases} T_i > \tau \\ \lambda_i = 1 - \frac{\tau}{T_i} \\ \mu_i = 0 \\ q_i = \hat{q}_i \end{cases} \tag{3.19}$$

El problema complet només es pot solucionar si s'iguala τ a alguna temperatura T_i, diguem-ne T_k, $\tau = T_k$. Aleshores per a $i = k$, es compleix la possibilitat (A), per a $i < k, T_i < T_k$ es compleix (B) i (C) per a $i > k, T_i > \tau$. Per tant, tenim que

$$\begin{cases} \lambda_k = \mu_k = 0 \\ \check{q}_k \leq q_k \leq \hat{q}_k \end{cases} \tag{3.20}$$

i

$$(i < k) \begin{cases} \mu_i = \frac{T_k}{T_i} - 1 \\ \lambda_i = 0 \\ q_i = \check{q}_i \end{cases} \quad (i > k) \begin{cases} \lambda_i = 1 - \frac{T_k}{T_i} \\ \mu_i = 0 \\ q_i = \hat{q}_i \end{cases} \tag{3.21}$$

Per tant, si $\tau > 0$, la font de calor k esdevé un bany tèrmic per al procés global. Les fonts de calor amb $i > k$ seran per tant escalfadors i com a conseqüència aquelles fonts amb $i < k$ esdevindran refrigeradors. A partir de l'equació $\tau = T_k$ i l'equació (3.16) podem concloure que la producció d'entropia està en el seu mínim,

$$\dot{S} = -\sum_{i=1}^{M} \frac{q_i}{T_i} = \sigma_{min} \tag{3.22}$$

Ara podem reescriure la potència mecànica extreta de la forma

$$P = \sum_{i=1}^{M} q_i = \sum_{i=1}^{M} \hat{q}_i\big(1 - \frac{T_k}{T_i}\big) - \sum_{i=1}^{k-1} \hat{q}_i\big(\frac{T_k}{T_i} - 1\big) - T_k\sigma_{min} \tag{3.23}$$

Veiem que els fluxos estan avaluats d'acord amb els factors de Carnot i que T_k és la temperatura de referència. La producció d'entropia dona peu a una pèrdua en el terme $T_k\sigma_{min}$.

Finalment, també q_k ha de satisfer (3.11). Ara degut a (3.23), q_k es pot expressar en termes d'altres quantitats com

$$q_k = P - \sum_{i\neq k} q_i = -T_k\big(\sigma_{min} + \sum_{i=k+1}^{M} \frac{\hat{q}_i}{T_i} + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\check{q}_i}{T_i}\big) \tag{3.24}$$

Aleshores la condició (3.11) implica el requeriment de consistència que

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{\check{q}_i}{T_i} + \sum_{i=k+1}^{m} \frac{\hat{q}_i}{T_i} \leq -\sigma_{min} \leq \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\check{q}_i}{T_i} + \sum_{i=k+1}^{M} \frac{\hat{q}_i}{T_i}, \quad \forall k \tag{3.25}$$

Si la restricció de la segona llei (3.12) es compleix per a tot $(q_1, ..., q_n)$ satisfent (3.11), aleshores $\tau = 0$. Només importa, per tant, la primera llei de la termodinàmica, i

$$P = \sum_{i=1}^{M} \hat{q}_i \tag{3.26}$$

3.3.2 Resolució del problema d'optimització de la potència màxima disponible a partir d'un conjunt de fluxos estacionaris

Les condicions per a un L màxim són

$$\frac{\partial L}{\partial P_m} = -\check{\mu}_m - \hat{\mu}_m - \mu_m = 0 \tag{3.27}$$

on

$$\begin{cases} \mu_m = \kappa_m - \tau\frac{\partial X(\vec{P}}{\partial P_m}) \\ \kappa_m = \rho_m - \tau\nu_m + \vec{s}\cdot\vec{e}_m \end{cases} \tag{3.28}$$

$$\begin{cases} \check{\mu}_m\frac{\partial L}{\partial \check{\mu}_m} = \check{\mu}_m(P_m - \check{P}_m) \\ \hat{\mu}_m\frac{\partial L}{\partial \hat{\mu}_m} = \hat{\mu}_m(\hat{P}_m - P_m) \end{cases} \tag{3.29}$$

$$\tau\{\sum_{i=1}^{M}\nu_m P_m + X(\vec{X})\} = 0 \tag{3.30}$$

veiem clarament que o bé $\check{\mu}_m$ o bé $\hat{\mu}_m$ han de ser zero. Quan P_m està a l'interior de l'interval permès, ambdós termes són zero, i per tant $\mu_m = 0$. Si en canvi $\mu_m \neq 0$, aleshores P_m ha d'estar a un dels finals de l'interval $\check{P}_m \leq P_m \leq \hat{P}_m; \check{P}_m < \hat{P}_m$, per tant podem escriure per aquest cas:

$$P_m = \hat{P}_m\theta(\mu_m) + \check{P}_m\theta(\mu_m), \qquad \forall\mu_m \neq 0 \tag{3.31}$$

on θ és la funció escaló, definida com

$$\theta = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \tag{3.32}$$

Considerem ara una funció de partició π dels índexs m en dos conjunts, A_π i B_π tal que

$$m \in A_\pi \begin{cases} \mu_m \neq 0 \\ P_m = \hat{P}_m \quad \text{si } \kappa_m > \tau\frac{\partial X}{\partial P_m} \\ P_m = \check{P}_m \quad \text{si } \kappa_m < \tau\frac{\partial X}{\partial P_m} \end{cases} \tag{3.33}$$

$$m \in B_\pi \begin{cases} \mu_m = \kappa_m - \tau\frac{\partial X}{\partial P_m} = 0 \\ \check{P}_m < P_m < \hat{P}_m \end{cases} \tag{3.34}$$

Aquí hem de tenir com a màxim $M - r + 1$ índexs en A_π i per tant com a mínim $r - 1$ índexs a B_π. Ara (3.34) i (3.28) juntament amb (2.4) donem per a

$$\vec{z} = \vec{s} + \vec{e} \tag{3.35}$$

el seguit sistema d'equacions

$$\begin{cases} \vec{x}\cdot\vec{e} = 1 \\ \vec{z}\cdot\vec{e}_m = \tau\{\nu_m + \frac{\partial X(\vec{P})}{\partial P_m}; \quad m \in B_\pi \end{cases} \tag{3.36}$$

A partir d'ara tenim dos casos segons si $\tau = 0$ o bé $\tau > 0$.

Cas 1: $\tau = 0$**.** Per tal de resoldre l'equació anterior, $r-1$ vectors $\vec{e}-\rho_m\vec{e}, (m \in B_\pi)$ han de ser linealment independents. Un cop s'ha determinat la z podem determinar $\mu_m, (m \in A_\pi)$ a partir de

$$\mu_m = \vec{z}\cdot\vec{e}_m; \quad m \in A_\pi \quad (\tau = 0) \tag{3.37}$$

Aleshores les $M-r+1$ equacions per P_m en (38) i les $r-1$ equacions (2.4) independents determinen completament $P_m \quad (m=1,...,M).\tau = 0$ és un cas força especial en el qual la regió determinada per (2.2) no inclou cap part de la superfície corresponent a la igualtat (2.6). Així per un augment de flux entrant s'han de realitzar millores a través d'un increment de l'eficiència. La productivitat del treball marginal d'un flux entrant ha de ser major que el que indiquen mes endevant (3.42) els factos de Carnot.

Cas 2: $\tau > 0$**.** En aquest cas com a molt $M-r$ índexs pertanyen a A_π i per tant com a mínim r índexs pertanyen a B_π. Assumim que hi ha $r+k$ índexs a $B_\pi \quad (k \geq 0)$ i $M-r-k$ índexs a A_π. Per tant hi ha d'haver k relacions lineals per els $\vec{e}_m \quad (m \in B_\pi)$., les quals són

$$\sum_{B_\pi} b_m^{(j)} \vec{e}_m = 0, \qquad (j=1,...,k) \tag{3.38}$$

Per tant, degut a (3.36), les P_m han de satisfer

$$\sum_{B_\pi} b_m^{(j)} \{\nu_m + \frac{\partial X(\vec{P})}{\partial P_m}\} = 0, \qquad (j=1,...,k) \tag{3.39}$$

De (**??**) tenim que

$$\sum_{m=1}^{M} \nu_m P_m + X(P_1,...,P_M) = 0 \tag{3.40}$$

Aleshores les dues equacions anteriors, $k+1$, juntament amb les $r-1$ equacions de (2.4) i les $M-r-l$ de (3.30) formen un conjunt de M equacions independents les quals determinen P_m completament, el resultat d'aquestes l'anomenarem com $P_m^{(\pi)}$. Per tant ara utilitzem $(\partial X/\partial P_m)^\pi$ en el sistema d'equacions (3.33) per tal de determinar z i τ, el resultat el qual anomenarem $z^{(\pi)}$ i $\tau^{(\pi)}$.

Sigui el valor més gran de $W^{(\pi)} = W^*$, i assumim que s'obté de la partició $\pi = \pi^*$. Excepte per a alguns casos degenerats, π^* és únic. Assumim que aquest és el cas. Per tant la màxima potència de sortida W^* s'obté de $P = P^*$, on P^* està a la frontera de Ω i a més a més a la superfície. Per tant la potència extraible és ($*$ denota l'elecció de $\pi = \pi^*$),

$$\dot{W}^* = \sum_{m=1}^{M} \rho_m P_m^* = \sum_{m=1}^{M} \kappa P_m^* - \tau^* X(\vec{P}) \tag{3.41}$$

on κ_m^* són els factors de Carnot generalitzats,

$$\kappa_m^* = \tau^*(\vec{y}^* - \vec{y}_m) \cdot \vec{e}_m; \quad (\vec{y}^* = \vec{z}^*/\vec{\tau}^*) \tag{3.42}$$

on $\vec{y}^*$ juga el rol de vector de referència per a les variables intensives, i on τ^* defineix la temperatura de referència. Amb això el nostre problema ha estat solucionat.

L'exergia es pot considerar com un "valor físic". Els factos de Carnot κ_m^* són per tant valors per unitat de varis fluxos i τ^* és el cost d'exergia per unitat d'entropia produïda.

Per aplicacions és important determinar la funció $X(\vec{P})$. En la regió dels processos lineals, descrits per les relacions d'Onsager entre fluxos i forces $\vec{J}_i = \vec{L}_{ij} \cdot \vec{X}_j = -(\vec{L}_{ik} G_{kj} \cdot \bigtriangledown \alpha_j), (L_{i\gamma j\beta} = L_{j\beta i\gamma})$, la funció $X(\vec{P})$ és quadràtica en $\vec{P}$, corresponent a pèrdues resistives segons Andresen et.al. [1977].

Capítol 4

Bibliografia

Capítol 1, en ordre d'aparició.

Campbell, C. J., Laherrère, J., 1998. The End of Cheap Oil. Scientific American (March 1998).

Ivanhoe, L., 1996. Updated hubbert curve analyze world oil supply. World Oil 217 (11).

Deffeyes, K. S., 2001. Hubbert's Peak - The Impending World Oil Shortage, Revised Edition. Princeton University Press, Princeton and Oxford.

Lynch, M. C., 2003. Petroleum resources pessimism debunked in Hubbert model and Hubbert modelers' assessment. Oil & Gas Journal 101 (27, July 14).

Laherrère, J. H., 2000. The Hubbert Curve: Its Strengths and Weaknesses. Oil& Gas Journal 98 (16, April 17).

Sandrea, I., Barkindo, M., 2007. West africa-1: Undiscovered oil potential still large off west africa. Oil & Gas Journal 105 (2, January 8).

Radler, M., 2006. Special report: Oil production, reserves increase slightly in 2006. Oil & Gas Journal 104 (47, December 18).

BP 2005. BP Statistical Review of World Energy, June 2005. www.bp.com.

BP 2006. BP Statistical Review of World Energy, June 2006. www.bp.com.

OGJ, 1993. More Angola Licenses To Be Issued. Oil & Gas Journal 91 (36, September 6).

OGJ, 1994. Exxon Unit Hikes Acreage Inventory On Angolan Coast. Oil & Gas Journal 92 (36, September 5).

Hemer, D. O., Phillips, C., 1989. Oil and Gas Developments in Middle East in 1988. AAPG Bulletin v73 (No. 10, October 1989).

Hemer, D. O., Phillips, C., 1990. Oil and Gas Developments in Middle East in 1989. AAPG Bulletin v74 (No. 10, October 1990).

Means, E., 2006. Mother of all budget busters. Upstream (17 November).

Mearns, E., 2006. Ihs data suggest kuwaiti and global proved oil reserves significantly lower than bp estimates. ExxonMobil's homepage exxonmobil.com, a post on the Oil Drum, an internet forum on peak oil, Friday November 17, 2006. The post contains an e-mail exchange between the author and Ken Chew of IHS Energy, where the latter "one-third on top for "probableïs a ball park figure that we find to be a useful rule of thumb for western companies in their reserves reporting".

Yergin, D., 1993. The Prize - The Epic Quest for Oil, Money and Power. Simon & Schluster Press, USA.

IEA, 2006a. Angola Towards An Energy Strategy. OECD/IEA, an International Energy Agency (IEA) publication.

IEA, 2006b. World Energy Outlook 2006. OECD/IEA, an annual International Energy Agency (IEA) publication.

Turiel, A., Febrero 2010, The Oil Crash, seminario.

García Olivares, A,, Soluciones para una sociedad sin petróleo (I) Una alternativa energética global posible – seminario Mayo 2010.

Heinberg R., Searching for a miracle: net energy limits and the fate of industrial society, A Report Published by the Post Carbon Institute, 2009.

Jacobson M. Z. & Delucchi M. A., A Path to Sustainable Energy by 2030, Scientific American 301, 58 - 65, 2009.

US Geological Survey 2005, www.usgs.gov.

Solé J., Turiel A., L'Oil Crash: La crisi energètica i les seves conseqüències a Catalunya, seminari, Abril 2010.

Capítol 2, en ordre d'aparició.

Georgescu-Roegen N.,The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect, Eastern Economic Journal, Vol. 12, No. 1 (Jan. - Mar., 1986), pp. 3-25 .

Koopmans, T.C., 1977, Concepts of Optimality and Their Uses, American Economic Review, 67, 261-274.

Berry R.S, Salamon P., Heal G., On a relation between economic and thermodynamic optima, Resources and Energy Volume 1, Issue 2, October 1978, Pages 125-137.

Berry R.S, Andresen B., Thermodynamics constraints in economic analisys,in: W.C. Schieve and P.M. Allen,eds. University of Texas press, Austin, Texas.

Lesourd J-B., Energy and resources as production factors in process industries, Energy Economics Volume 7, Issue 3, July 1985, Pages 138-144.

Islam S., Effect of an essential input on isoquants and substitution elasticities, Energy Economics Volume 7, Issue 3, July 1985, Pages 194-196.

Mansson B.A., Optimal development with flow-based production, Resources and Energy Volume 8, Issue 2, June 1986, Pages 109-131.

Bryant J., A thermodynamic approach to economics, Energy Economics Volume 4, Issue 1, January 1982, Pages 36-50.

Ayres R.U., Nair, Thermodynamics and economics, Physics Today, Volume 37, Issue 11,1 1984.

Brillouin L., Science and Information Theory, 1956, Academic Press New York.

Clark C.W., Mathematical bioeconomics, the optimal management of renewable resources, ohn Wiley, New York. US. 1976.

Ayres R.U., Resources, environment, and economics: applications of the materials/energy balance principle, John Wiley and Sons,New York, NY, 1978.

Berndt E.R, Aggregate Energy, Efficiency and Productivity Measurement, 1978, Annual Review of Energy, 3, 225-273.

Dasgupta P.S., Heal G.M., Economic Theory and Exhaustible Resources, 1979, Cambridge University Press, Cambridge.

Daly H.E., Economic, Ecologics and Ethics, W.H. Freeman and Co., 1980, San Francisco.

Chapman P.F., Roberts F., Metal Resources and Energy, 1983, Butterworths, London.

Hall C.A.S., Cleveland C.J., Kaufmann R., Energy and Resource Quality, 1986, John Wiley & Sons, New York.

Martínez-Alier J., Ecological Economics, Basil Blackwell, 1987, Oxford.

Faber M., Entropy, Environment and Resources, Springer, 1987, Berlin.

Cleveland C.J., Biophysical Economics, 1987, Ecological Modelling,38, 47-53.

Smith A., An Inquiry into the Nature and Causes of Wealth of Nations, 1776, Penguin Books Ltd., Middlesex, England, 1979.

Ricardo D., The Principles of Political Economics and Taxation, London 1817.

Marx K., Das Kapital, 1867, vol.1.

Thomas J.A.G., 1977 ed., Energy Analysis, Westview press, Boulder, Colorado.

Gilliand J.W., 1873, Collected Works, vol.1, p.53, Yale University Press, New Haven, 1948.

Weidlich W., Haag G., Quantitative Sociology, 1983, Springer, Berlin.

Odum H.T., Environment, power, and society. [stressing energy language and energy analysis, 1971, John Wiley and Sons, Inc.,New York.

Georgescu-Roegen N.,1979, Energy Analysis and Economic Valutation, Southern Econ.J., 45, 1023-1058.

Cottrell F., 1953, Energy and Society, McGraw-Hill, New York.

Costanza R., 1980, Embodied Energy and Economic Valutation, Science, 210, 1219-1224.

Roberts P., 1982, Energy and Value, Energy Policy, 10 (september), 171-180.

Hudson D.H., 1989, The convergence of neo-Ricardian and embodied energy theories of value and price, Ecological Economics, 1, 261-281.

Eriksson et. al., 1982, A model for the cosmic creation of nuclear exergy, Nature 296, 540.

Boulding K.E., 1966, The Economics of the Coming Spaceship Earth, in Environment Quality in a Gowing Economy ed Jarret H., John Hopkins Press.

Georgescu-Roegen N.,1976, Energy and Economic Myths, Pergamon,New York.

Meadows D.H., Meadows D.L., Randers R., Behrens III, W.W., 1972, The Limits to Growth, Universe Books, New York.

Peterson F.M., Fischer A.C., 1977, The Explotaitation of Extractive Resources, Economic Journal 87, 681-721.

Smith V.K., Krutilla J.V., eds. 1982, Explorations in natural resource economics, John Hopkins University Press, Baltimore, Md.