

Tesi Doctoral

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic.

Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació – *"smart grid"*.

Autor: **Pep Salas Prat**

Director: Dr. Ricard Bosch i Tous

Co-tutor: Dr. Martí Rosas i Casals

Universitat: Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech

Programa: Sostenibilitat, Tecnologia i Humanisme

Data: 9 de novembre de 2014

Paraules Clau: Energia, Potència, Transició, Smart Grid, Biomimètica

Pàgines: 202

Índex de Contingut

1	Resum Executiu	8
1.1	Executive summary.....	11
1.2	Resumen ejecutivo	14
1.3	Agraïments.....	17
2	Bases Científiques Contemporànies.....	18
2.1	Superar les històries i els mites	19
2.2	El pensament mecanicista.....	20
2.2.1	Un concepte forjat en la Ciència	20
2.2.2	Projecció en les ciències socials i econòmiques.....	21
2.2.3	Una llarga ombra.....	22
2.3	Generació de coneixement: ampliant el mètode científic.....	23
2.3.1	Coneixement fonamental	23
2.3.2	Incertesa i risc	24
2.3.3	Limitacions del mètode científic	24
2.3.4	Ampliant la “Ciència Normal” cap a la “Ciència Postnormal”	25
2.4	La Terra	27
2.5	Termodinàmica Clàssica.....	28
2.5.1	Primera i Segona Llei des de diferents punts de vista	28
2.5.2	Diferents enfocaments de l'entropia	31
2.5.3	Intents fracassats de destronar l'Entropia.....	31
2.5.4	Entropia i la fletxa del temps	33
2.5.5	Entropia energètica i Entropia informacional.....	34
2.6	La Sistèmica.....	36
2.6.1	Anàlisi i síntesi de la Teoria General de Sistemes	38
2.6.2	Classificació de sistemes en funció del flux d'energia i de matèria	39
2.6.3	Sistemes lluny, a prop i a l'equilibri	39
2.6.4	Evolució de sistemes	42
2.6.5	Autocatàlisi. Retroalimentació positiva i negativa.....	45
2.7	Complexitat: cicles i xarxes	46
2.7.1	Xarxes.....	46
2.7.2	Cicles	48
2.7.3	Termodinàmica i complexitat	49
2.8	Termodinàmica del No Equilibri (NET)	50
2.8.1	La natura <i>gestiona</i> els gradients	51
2.8.2	Energia, Matèria, Informació	52
2.8.3	Potència Vs Producció d'entropia.....	55
2.8.4	La Termodinàmica de la Vida	58
2.9	Mecànica quàntica.....	60
2.9.1	Extensió de la Primera Llei de la Termodinàmica	62
2.9.2	Efecte fotoelèctric.....	63
2.10	Simbiogènesi.....	63
2.11	La tercera cultura	66
2.12	La superació de la visió mecanicista	66
2.13	Principis Biològics de gestió dels recursos.....	68

2.14	Resum d'hipòtesis de la Tesi	68
3	BASES PER A UN MODEL ENERGÈTIC CONTEMPORANI.....	72
3.1	Principis biològics de gestió dels recursos	72
3.1.1	Adaptació a l'aparició dels límits en l'explotació dels recursos.....	72
3.1.2	Principis Biològics de gestió dels recursos	76
3.2	Canvi de recurs energètic: una qüestió complexa amb implicacions en el model social i econòmic.....	77
3.2.1	Els fluxos energètics com a organitzadors socials.....	77
3.2.2	La societat fòssil	82
3.2.3	Aspectes tecnològics associats a l'ús de recursos primaris i la seva transformació	96
3.2.4	Aspectes no-tecnològics associats a l'ús de recursos primaris i la seva transformació	119
3.2.5	Cruïlla de la societat fòssil a les acaballes del recurs fòssil.....	136
3.3	SMART GRID, un catalitzador tecnològic i social de la transició energètica.....	140
3.3.1	Estratègies de transició	141
3.3.2	Smart Grid: una visió global que actua localment	152
3.3.3	Un exemple real, pràctic i quotidià: la rentadora	157
3.3.4	La transició de model energètic.....	164
3.3.5	Caracterització de la transició de model energètic.....	167
4	Conclusions.....	170
4.1	Anàlisi de les hipòtesis de treball	170
4.2	Conclusions	175
4.2.1	És raonable parlar de transició de model avui i aquí?	176
4.2.2	Smart Grid, ¿moda o necessitat?	177
4.2.3	Una transició de potència, més que d'energia	177
4.2.4	Una base ètica necessària	178
4.2.5	En futur està per escriure.....	179
4.3	Treballs futurs i noves línies d'investigació	180
4.3.1	Línies a desenvolupar de caràcter tecnològic	180
4.3.2	Línies a desenvolupar de caràcter no tecnològic.....	181
5	Annex: Activitat investigadora realitzada	182
5.1	Resum dels principals indicadors de qualitat	182
5.2	"El meu laboratori el món"	183
5.3	Activitats en R+D 2004-2014 – recull cronològic.....	185
5.3.1	Període 2004-2008 - Recerca en sistemes de seguiment solar:	185
5.3.2	Període 2003-2005 i 2008-2010- Recerca en microxarxes:	186
5.3.3	Període 2010-2012 consultor en R+D	188
5.3.4	Període 2013-: barreres socials del consumidor residencial davant l'eficiència energètica i les energies renovables	189
5.3.5	Activitats transversals	190
6	Bibliografia	193

ÍNDEX DE TAULES

TAULA 2.1: Classificació dels sistemes en funció del flux d'energia i matèria	39
TAULA 2.2: Relació de hipòtesis de la present tesi.....	68
TAULA 3.1: Rendiment teòric i comercial de les principals tecnologies de transformació d'energia primària en electricitat	108
TAULA 3.2: Densitat energètica (J/m^3) de les diferents fonts d'energia primària i tecnologies associades per la producció de treball	110
TAULA 3.3: Rang de densitat energètica (W/m^2) de les diferents fonts d'energia primària.....	110
TAULA 3.4: Taula comparativa de diferents valors d'EROI per petroli convencional i no convencional en diferents moments de la cadena de processat	113
TAULA 3.5: Tecnologies de producció d'electricitat en funció de l'arquitectura del sistema energètic.....	117
TAULA 3.6: Característiques per arquitectura del sistema energètic en funció del grau de distribució	117
TAULA 3.7: Gestionabilitat i temps de resposta de les diferents tecnologies de generació elèctrica.....	118
TAULA 3.8: Impactes principals de les diferents tecnologies de generació	119
TAULA 3.9: Noves plantes de generació d'energia elèctrica a nivell mundial des de l'any 2000	121
TAULA 3.10: Principals subsidis dels combustibles fòssils.....	127
TAULA 3.11: Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013]. Released January, 2013. Report of the US Energy Information Administration (EIA) U.S. Department of Energy (DOE)	129
TAULA 3.12: Costos de generació elèctrica per tecnologia en el mercat espanyol .	130
TAULA 3.13: Diferents mesures tecnològiques i no tecnològiques de transició de model energètic.....	142
TAULA 3.14: Caracterització de la transició de model energètic	167

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 2.1: Esquema de transició de cosmovisió	18
Figura 2.2. Diferents camps del coneixement a aplicar segons el grau d'incertesa i magnitud del fenomen en estudi	26
Figura 2.3 L'entropia és, per Lovelock, una mesura de la distància a l'equilibri	33
Figura 2.4: L'evolució de sistemes quan s'allunyen de l'equilibri poden mostrar camins no reversibles en arribar a certs valors crítics	41
Figura 2.5: Evolució d'un sistema des de l'ordre (a) al desordre (b)	42
Figura 2.6: Evolució d'un sistema des del desordre (a) a l'ordre (a)	42
Figura 2.7. Estats simètrics que es poden assolir durant l'evolució des del desordre a l'ordre d'un sistema	43
Figura 2.8: Ordre mitjançant fluctuacions	44
Figura 2.9: Esquema del <i>Mecanisme de Turing</i>	45
Figura 2.10: Formulació que descriu el <i>Mecanisme de Turing</i>	45
Figura 2.11: Cicle de realimentació. La informació interacciona en el procés de relacions causals modificant l'estat inicial, de manera que genera evolució en el temps	53
Figura 2.12: Cicle de Carnot amb rendiment màxim i a màxima potència	55
Figura 2.13: Representació gràfica del rendiment màxim i a màxima potència d'una màquina tèrmica. Es defineixen tres zones en què un sistema lluny de l'equilibri pot operar i que estan caracteritzades per una velocitat característica que en fixa el nivell d'eficiència i potència	56
Figura 3. 1: Exemple de diagrama de Sankey	78
Figura 3.2: Balanç energètic de la societat. Esquema conceptual.....	79
Figura 3.3: Diagrama de Sankey, Estats Units 2009.....	79
Figura 3.4: Diagrama de Sankey, Catalunya 2009	80
Figura 3.5: Evolució en l'ús de l'energia primària des de 1850. Impacte dels combustibles fòssils sobre el total d'energia consumida d'ençà mitjans del segle XX	82
Figura 3.6: Evolució de la població (a) i de la productivitat del panís (<i>Zea Mais</i>) en els darrers segles. Observem una tendència exponencial d'ençà mitjans del segle XX	82
Figura 3.7. PIB (GDP) Vs. energia consumida per determinades nacions i regions.....	83
Figura 3.8. Consum d'energia en termes relatius i absoluts per determinades nacions i regions.....	84
Figura 3.9: Dades del preu del barril Brent (\$) en els darrers anys. El màxim se situa el 3 de juliol de 2008 amb 143,95 \$/barril	85
Figura 3.10: Evolució històrica del preu del barril Brent des del s.XIX	86
Figura 3.11: Escenaris d'evolució de preus de petroli	88
Figura 3.12: Quantificació de recursos energètics primaris i demanda global d'energia.	96
Figura 3.13: Distribució de l'energia solar al planeta	97

Figura 3.14: Centrals termoelèctriques en operació al món (2013) d'ús civil i percentatge en el mix elèctric de l'energia nuclear per països. Catalunya esdevindria, amb un 55% de contribució en un dels 5 països més nuclearitzats del món	100
Figura 3.15: Esquema conceptual de la cadena energètica involucrada des d'obtenció del recurs primari fins a la seva transformació en les centrals de producció d'energia	104
Figura 3.16: Cadena energètica dels combustibles fòssils i nuclears davant la cadena de les energies renovables. La longitud de la cadena s'associa a una pèrdua de rendiment pel 2n Principi	104
Figura 3.17: Energia primària per combustible i energia final per sector de consum i pèrdues d'energia. S'observa que el principal sector consumidor són les pèrdues del sistema	105
Figura 3.18: Cadena energètica dels combustibles fòssils i nuclears des de la central termoelèctrica de transformació del recurs en electricitat, fins al seu ús per la realització de treball	107
Figura 3.19: Densitat de potència per fonts de generació d'electricitat i usos final.	111
Figura 3.20: Els cost energètics i els outputs energètics d'una hipotètica planta de generació d'electricitat	112
Figura 3.21: EROI de les principals tecnologies de generació d'electricitat sense comptar el cicle del combustible durant la seva vida útil	113
Figura 3.22: Distribució conceptual de les plantes de generació d'energia per potència nominal. Diferenciem la zona I: alta centralització; II: centralitzat; III: Descentralitzat	116
Figura 3.23: Potencial eòlic a Catalunya i àrees d'exclusió eòlica	123
Figura 3.24: Corba de cost dels propers 300 projectes d'inversió en petroli i gas....	124
Figura 3.25: Evolució del preu del petroli per anys. S'observa l'impacte en el preu de la 1a i de la 2a crisi del petroli	124
Figura 3.26: Percentatge anual mundial d'increment en consum de (a) petroli i (b) PIB	125
Figura 3.27: Evolució de la balança energètica comercial a l'Estat espanyol.....	127
Figura 3.28: Evolució anual de les subvencions rebudes pels combustibles fòssils. S'observa que al 2010 han superat els \$409 billion, un 25% més que el 2009.	128
Figura 3.29: Exportació per destinacions de petroli des del Pròxim Orient	135
Figura 3.30: Dependència energètica neta de gas i petroli per països actualment importadors	136
Figura 3.31: Escenaris de disposició de recursos energètics	136
Figura 3.32: Estratègia de presa de decisions quan els límits dels recursos es fan visibles.....	140
Figura 3.33: Fases de transició de potència des d'una societat fòssil a una basada en l'explotació del recurs solar	141
Figura 3.33: Procés d'anàlisi del procés energètic.....	152
Figura 3.35: Estratègies de transició basades en eficiència energètica	155
Figura 3.36: Estratègies de transició basades en canvi de recurs	156

Figura 3.37: Exemple d'Smart Grid : treball a fer	157
Figura 3.38: Exemple d'Smart Grid : Subministrament d'energia	158
Figura 3.39: Estratègia #1 : Per un mateix treball reduïm la potència necessària	158
Figura 3.40: Estratègia #2: Introduïm el factor temps per tenir informació	159
Figura 3.41: Estratègia #3: Assignem un recurs energètic segons la demanda	159
Figura 3.42: Estratègia #3b: Maximitzem l'ús de la font de generació d'alta densitat	160
Figura 3.43: Estratègia #4: Modulem el consum al perfil de la corva de demanda ..	160
Figura 3.44: Estratègia #5: redissenyem el procés de consum per introduir la producció amb les energies renovables	161
Figura 3.45: Estratègia #6: Aprofitem el calor residual per maximitzar la degradació del gradient a partir de cicles successius.....	162
Figura 3.46: Estratègia #7: Gestionem la demanda de n consumidors simultàneament	162
Figura 3.47: Estratègia #8: La freqüència en la distribució dels consums domèstics ens mostra que els equips de molt consum instantani són poc freqüents.....	163
Figura 3.48: Esquema conceptual de transició de model energètic.....	166
Figura 5.1. Imatges del Mas Roig, a Llagostera (Girona), amb el Dr. Francesc Sureda. a) vista general de la Masia; b) vista aèrea de les instal·lacions; c) detall del molí eòlic a l'àrea de l'energia; d) detall de les unitats de producció solar Font Solar Autònoma	184
Figura 5.2. Timeline de l'activitat de recerca tecnològica en el camp energètic durant el període 2004-2014.....	185

1 Resum Executiu

Amb el títol *“Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació – smart grid”* es recull la investigació transdisciplinària en el camp dels sistemes energètics que bascula al voltant de la hipòtesi de treball, falsable, d'una *“necessària transició des d'una societat altament dependent de petroli a una basada en l'aprofitament de recursos autòctons i renovables”*.

En tractar-se d'un cas d'estudi marcadament complex i de grans implicacions, el model energètic no pot investigar-se tancat al laboratori, definint unes condicions inicials i reproduint els assaigs per falsejar les diferents hipòtesis de treball. La recerca sobrepasa el marc d'anàlisi del mètode científic *normal* i fa una incursió en un nou camp epistemològic forjat en el pensament contemporani que fusiona les ciències i les humanitats i que incorpora com a subjecte d'anàlisi al conjunt d'agents involucrats i afectats per les conseqüències de, en aquest cas, el model energètic que s'acabi adoptant.

“El meu laboratori, el món”, és doncs, la màxima que ha guiat la recerca durant els darrers 10 anys i que es condensen en els *“principis biològics de gestió dels recursos”*, la base científica inspirada en com la natura gestiona els fluxos de matèria, energia i informació. Aquesta doble tasca d'anàlisi i síntesi dels principis científics es basa en les aportacions de diverses disciplines entre elles, la termodinàmica del no equilibri i dels processos irreversibles, la complexitat i la sistèmica i la simbiogènesi, tant des de la vessant tècnica com humanista. Posteriorment, en un segon bloc, s'ha objectivat aquest fonament teòric en la qüestió energètica des d'una doble dimensió. D'una banda, amb un enfoc transversal que té en consideració tant els aspectes tecnològics com els no-tecnològics, i, de l'altra, un contingut que bascula des de la teoria i els conceptes a la pràctica amb tota la potència de l'experimentació.

Durant la recerca s'ha analitzat el fet que el recurs energètic emprat per una societat donada fixa el límit del seu sistema socioeconòmic. Així, una successió de recursos amb potencial energètic creixent possibilita, com ha passat històricament, cicles econòmics expansius que s'associen amb progrés i creixement. Però, anàlogament, una transició cap a un recurs de menor densitat de potència que el fòssil, com és el renovable, implica una correcció brusca del model social i econòmic fins a adaptar-se i circumscriure's als límits físics del nou recurs i a la seva casuística tècnica, econòmica i social. Aquest fet té clares implicacions socioeconòmiques i requereix d'una nova mètrica i llenguatge en col·lapsar la del model precedent. Estem davant una singularitat històrica que requereix un procés conscient d'adaptació a un canvi de recurs que permeti abordar i catalitzar amb suficient antelació la transició de model o, altrament, el més probable és que s'arribi a un moment de no retorn on ja no es disposi ni de materials, ni d'energia, ni de temps, ni de recursos econòmics suficients per fer la transició.

Davant aquest repte conviuen diferents respostes alternatives, les noves amb les velles i les velles que també s'adapten, per exemple incrementant l'eficiència en el seu ús i cercant nous recursos primaris fòssils i la tecnologia que permeti explotar-los per així perllongar el seu domini. Sorgeixen també reticències al canvi des de grups d'interès econòmic, sovint ancorats en el model antic, però també d'amplis segments de la societat en veure qüestionar certs *privilegis energètics* assumits per la població com a "normals". És una realitat que cal afrontar intrínseca al canvi des d'un model socioeconòmic modelat amb energia pràcticament "sense límits d'accés, d'alta densitat de potència i a baix cost" a una situació amb "límits ben definits".

Aquesta dimensió socioeconòmica se solapa amb la tecnològica, que l'ha de fer possible en termes de consum i generació més eficient, però especialment, aportant la nova infraestructura necessària i facilitadora de la transició energètica a un mínim cost. Són les xarxes elèctriques intel·ligents o *smart grids*. Aquestes xarxes apropen els llocs de consum amb els de generació i porten implícit un impacte social i ecològic en el territori que cal gestionar. En aquest camp la tesi fa una proposta concreta de com tecnològicament pot fer-se a escala local, aportant criteris de disseny i el coneixement pràctic fruit d'haver dissenyat i executat una nanoxarxa inspirada en com la natura gestiona els fluxos d'energia.

La biomimètica, una disciplina incipient de gran potencial que es basa en aprendre i inspirar-se de la natura, ha servit també per desenvolupar tecnologia innovadora en el camp de l'energia solar, patentada a nivell internacional. L'experiència com a investigador d'haver dirigit tot el cicle del producte i la seva posada al mercat aporta una dimensió real que ha contribuït decisivament a l'enfocament transdisciplinari de la tesi, aportant elements de reflexió de caràcter no tecnològic sobre de la transició energètica, com són la regulació, l'acceptació per part de l'usuari i els models de negoci de les noves tecnologies energètiques. Ha estat un període cabdal en el procés de formació com a investigador, complementat l'aproximació merament tècnica, i posant de relleu la necessitat d'un enfocament des de la complexitat.

Per falsejar la hipòtesi inicial, la present tesi analitza abastament dades fonamentals a nivell macroenergètic i, fruit de la seva anàlisi, es conclou que "la transició d'un model energètic basat en els combustibles fòssils no és una decisió discrecional o ideològica, sinó una necessitat socioeconòmica". Sobretot per aquelles regions que, com Europa, però especialment Catalunya, són altament dependents del recurs fòssil i no en disposen d'autòcton, de manera que el cost d'importar combustible s'apropa ja al 5% del PIB. Un increment estructural del preu del barril de petroli en pocs anys que ha canviat les regles del joc geoestratègic. Aquesta tensió de preus colpeja les regions més sensibles i menys resilients, com la nostra, i tensiona el model socioeconòmic, amb un alt risc de fractura i conflicte social per accés als serveis bàsics. Afrontar, doncs, la transició energètica cap a una menor dependència de recursos fòssils és vital per societats com la nostra i cal fer-ho mentre en d'altres regions, competidores globals a nivell econòmic, la premura d'aquest canvi és menor. Aquest fet introdueix un nou factor socioeconòmic que té el difícil repte de saber convertir la necessitat en virtut, i poder aprofitar el període de transició per

bastir un teixit econòmic i model social adaptat a la nova situació. I tot, en un context de manca de governança global que gestioni els recursos escassos i d'una crisi econòmica persistent que ja ha colpejat àmplies capes de la societat.

Un darrer aspecte considerat, però no per això menys important, és la vessant ecològica associada al model energètic. Biodiversitat, cicles dels materials i de l'aigua o contaminació en són algunes de les implicacions. Centrant-nos en les emissions de gasos d'efecte hivernacle, ens trobem en la contradicció que el nivell de noves emissions de CO₂ equivalent que, conjuntament a tot el planeta, podem emetre per mantenir-nos probablement sota el lílindar dels 2°C d'increment mig de la temperatura a la Terra, correspon al que seria aportat per només la combustió d'un terç de les reserves totals de combustibles fòssils reconegudes actualment. I, tanmateix, les inversions per descobrir nous jaciments i tècniques no para d'incrementar-se any rere any. Aquest fet il·lustra, com cap d'altre, que la transició de model implica un alt nivell de tensió política i social que s'anirà incrementant amb l'apropament als límits físics del recurs i de l'embornal.

La tesi acaba amb un darrer apartat que recull la producció científica (articles, patents i congressos, entre d'altres resultats) durant els darrers deu anys. El resultat de tota aquesta investigació, desenvolupament, reflexió, acció, participació, i divulgació és que no s'ha pogut falsejar la hipòtesi plantejada sobre la "necessària transició de model basat en combustibles fòssils i nuclears", arribant a la conclusió que "la transició energètica és necessària per motius ecològics, econòmics i socials" i que "les *smart grid* (i per extensió les *smart cities* i l'*smart rural*), enteses com la confluència de les xarxes d'energia i informació tan a nivell tecnològic com socioeconòmic, són un instrument fonamental per mantenir la complexitat de la nostra societat i poden catalitzar la transició cap a un recurs energètic renovable". Per fer-ho possible, cal anar més enllà dels aspectes tècnics i fer un procés inclusiu del conjunt de la societat fonamentat en l'estat de coneixement actual que aporta la ciència i que objectiva la tecnologia. Cal concebre, doncs, les xarxes elèctriques intel·ligents dins els límits dels recursos energètics i materials amb les parts positives que això té, però, alhora, també afrontant les seves implicacions socials i econòmiques que sovint xoquen amb els estàndards de la societat actual. I, per fer-ho, una bona i sòlida opció és entendre i aprendre de com la natura gestiona els recursos.

L'objectiu ha sigut, doncs, el de fonamentar des de la ciència i amb una concepció transversal, el debat sobre el model energètic i no pas la concreció específica i especialista de com han de ser o no les coses, sovint massa influït pel *com voldríem que fossin*. El repte generacional és complex i té, per definició, una component d'incertesa irreductible de manera que no pot esperar-se cap proposta ni recepta màgica de caràcter determinista. Lluny del relativisme que podria convidar la dificultat del que es planteja, cal posar de relleu que el temps per actuar és limitat, i que a casa nostra és, si cap, més urgent que en d'altres indrets. Toca doncs actuar i la proposta metodològica d'aquesta tesi doctoral és fer-ho en sintonia amb la dinàmica dels ecosistemes.

1.1 Executive summary

The study entitled "Technical and socioeconomic complexity of the energy transitions. A biomimetic approach to smart grids, the intelligent networks for power and information transmission" focuses into the interdisciplinary research in the field of energy systems swinging around falsifiable working hypothesis of "a necessary transition of a society highly dependent on oil to one based on the use of local and renewable resources".

A special treatment due to its magnitude and complex implications is required. The energy model cannot be investigated in a laboratory setting where conditions are predefined and exercises reproduced to distort the different working hypothesis. The research goes beyond the standard framework of scientific analysis and makes regular incursions into new contemporary fields that blend thoughts, science and humanities. Different actors involved and affected by the consequences of the new energy model are included in this analysis.

"My laboratory, the world," is the principle that guided research over the past 10 years. This approach has been condensed in the "biological principles of resource management". This scientific basis is inspired by how nature manages flows of matter, energy and information. This dual analysis and synthesis of scientific principles is based on the contributions from various disciplines. These disciplines include, among others, thermodynamics of non-equilibrium and irreversible processes, complex systems and symbiogenesis from a technical point of view as well as humanist.

This rationale has been concretized in the energy issue in a dual dimension. On the one hand, a transversal approach takes into consideration both the technological and non-technological aspect. Secondly content shifts from theory and concepts into practice showing the power of experimentation.

The fact that energy resources used by a given society determine the limit of their socio-economic system was analysed. The increase of available power density provided by the use of a new energy resource for a certain society allows, as occurred historically, allows an expansive economic cycles, which are associated with growth and progress.

But, similarly, a transition to a resource of lower power density than fossil, such as renewable, involves a drastic modification in the existing social and economic model. This is required in order to adapt and confine to physical boundaries of the new resources and the technical, economic and social casuistry. This has clear socio-economic implications and requires new metrics and language in the collective clogging of the previous model. We are facing a historical singularity that requires a conscious process of adaptation to changing resources and catalysing processes in order to tackle with sufficient pace the energy transition. Otherwise it is likely that a point of no return is reached where materials, energy, time, or financial resources are insufficient available to make the transition.

Faced with this challenge different alternative answers coexist, old, new and adapted old alternatives. For example by increasing efficiency in the use of primary resources and the seeking of new fossils and technologies that allows exploitation and extend the domain of fossil fuels. Reluctance to change also arise from economic interest groups, often rooted in the old model, but also large sections of society do consider certain 'energy-privileges' taken by the people as "normal".

We face a new reality that must be addressed from an intrinsic change in the economic energy model. This energy model 'transits' from a virtually "unlimited access, high power density and low cost" towards a situation of "well-defined limits".

The socioeconomic dimension overlaps with the technical aspects. Technology has to contribute providing a more efficient energy consumption and generation, but most importantly, a new infrastructure needed to tackle the energy and power transition at a minimum cost, the smart grids. These networks allow high penetration of renewables and demand response strategies, for example producing energy close to consumers. Smart grids also impact at social and environmental level, which must be managed properly. The thesis provides a concrete proposal of what technologically can be done locally, providing design criteria and practical knowledge of nanogrids a result inspired by how nature manages energy and information flows.

Biomimetics, an emerging discipline of great potential based on learning and inspiration from nature, has also served to develop innovative technology in the field of solar energy, patented worldwide. My experiences as a researcher included entire product lifecycle analysis and the market introduction. This provided a real dimension contributing decisively to the trans-disciplinary nature of the thesis. This brought food for thought on the non-technological energy transition, such as regulations, acceptance by the user and the business models of new energy technologies. It was a crucial period in the formation process as a researcher, complementing the dominating technical approach and emphasizing the need for an approach based upon real life complexity.

To falsify the initial hypothesis, the thesis examines the most important data in energetic field. The result of this analysis concluded that "the transition away from an energy model based on fossil fuels is not a discretionary decision or ideological, but based upon socio-economic needs". It is true for regions such as Europe, but especially Catalonia, which is highly dependent on external fossil resources and the costs of these importations approach 5% of the GDP. A structural increase in the price of a barrel of oil in a few years has changed the geostrategic rules. This price tension hits the most sensitive and less resilient regions, such as ours, and strains the economic model with a high risk of social fracture and conflict for access to basic services. The transition to lower dependence of fossil resources is vital to our society and urgent, in comparison to those regions competing at the global economic level which are more energy-independent. This is a new socio-economic factor that includes the challenge to build a new opportunity facing the critical need of change. This is the reason why it is important to take advantage of the transition period to build an economic and social model adapted to the new situation. And all this work

must be done in the context of a lack of global governance, scarce resources and a persistent economic crisis that has hit large sections of society.

One final aspect considered, but not the least, is the ecological consequences associated with the energy model. Biodiversity, cycles of materials and water pollution are some of the implications besides greenhouse gases emissions. Focusing on it, we are in contradiction to the new level of CO₂ equivalent we can emit to stay below the threshold of 450 ppm (that gives a certain probability to remain under 2°C increase of medium temperature on Earth) is roughly one third of the total reserves of fossil fuels currently recognized. Yet investments to find new sources and techniques are steadily increasing year after year. This illustrates that the transition model involves a high level of political and social tension, which will increase with the approach the physical limits of the resource and the sink.

The thesis ends with a section containing the scientific production (articles, patents and conferences, among other results) over the past ten years. The result of all this research, development, reflection, action, participation and disclosure is unable to falsify the hypothesis of "necessary transition model based on fossil fuels and nuclear". Indeed, the thesis concluded that "the energy transition is necessary for ecological reasons, economic and social" and "smart grids (and by extension smart cities and smart rural), understood as the convergence of networks of energy, information technology and socioeconomics are a key instrument to maintain the complexity of our society and can catalyse the transition to a renewable energy resource". To make this possible we must go beyond the technical aspects and make the whole process society based using the current state of knowledge provided by science and technology. We must conceive Smart Grids within the limits of energy and material resources with the parties that have positive, but at the same time also addressing their social and economic implications, which often clash with the standards of the society. And, in order to do so, a good and insightful option is the understanding of how nature manages its resources.

The aim therefore was to provide a fundamental debate based on science and through a cross-disciplinary design about the energy model and its transition rather than specifying concretely how things should be or not, too often influenced by how we would like them to be. The energy transition challenge is complex and has by definition an irreducible element of uncertainty so one cannot expect any magic formula or proposal of a deterministic nature. Far from relativism, which could invite the difficulty arising, emphasized should be that the time to act is limited, and in our country even more urgent than in other places. It is time to act and the proposed methodology of this thesis is to do so in tune with ecosystem dynamics.

1.2 Resumén ejecutivo

Con el título "Complejidad técnica y socioeconómica de la transición del modelo energético. Una aproximación biomimética a las redes inteligentes de transmisión de energía e información - smart grid" se recoge la investigación transdisciplinar en el campo de los sistemas energéticos que bascula en torno a la hipótesis de trabajo, falsable, de una "necesaria transición desde una sociedad altamente dependiente de petróleo a una basada en el aprovechamiento de recursos autóctonos y renovables".

Al tratarse de un cuerpo de estudio marcadamente complejo y de grandes implicaciones, el modelo energético no puede investigarse solo desde el laboratorio, definiendo unas condiciones iniciales y reproduciendo los ensayos para falsear las diferentes hipótesis de trabajo. La búsqueda sobrepasa el marco de análisis del método científico normal y hace una incursión en un nuevo campo epistemológico forjado en el pensamiento contemporáneo que fusiona las ciencias y las humanidades y que incorpora como sujeto de análisis al conjunto de agentes involucrados y afectados por las consecuencias de, en este caso, el modelo energético que se acabe adoptando.

"Mi laboratorio, el mundo" es la máxima que ha guiado la investigación durante los últimos 10 años y que se condensan en los "principios biológicos de gestión de los recursos", la base científica inspirada en cómo la naturaleza gestiona los flujos de materia, energía e información. Esta doble tarea de análisis y síntesis de los principios científicos se basa en las aportaciones de diversas disciplinas, entre ellas la termodinámica del no equilibrio y de los procesos irreversibles, la complejidad, la sistémica y la simbiogénesis tanto desde una vertiente técnica como humanista. Posteriormente, en un segundo bloque, se ha objetivado este fundamento teórico en la cuestión energética desde una doble dimensión. Por un lado, con un enfoque transversal que tiene en consideración tanto los aspectos tecnológicos como los no-tecnológicos y, por otro, un contenido que bascula desde la teoría y los conceptos a la práctica con toda la potencia de la experimentación.

Durante la investigación se ha analizado el hecho de que el recurso energético utilizado por una sociedad dada fija el límite de su sistema socioeconómico. Así, una sucesión de recursos con potencial energético creciente posibilita, como ha ocurrido históricamente, ciclos económicos expansivos que se asocian con progreso y crecimiento. Pero, análogamente, una transición hacia un recurso de menor densidad de potencia que el fósil, como es el renovable, implica una corrección brusca del modelo social y económico hasta adaptarse y circunscribirse a los límites físicos del nuevo recurso y a su casuística técnica, económica y social. Este hecho tiene claras implicaciones socioeconómicas y requiere de una nueva métrica y lenguaje en colapsar la del modelo precedente. Estamos ante una singularidad histórica que requiere un proceso consciente de adaptación a un cambio de recurso que permita abordar y catalizar con suficiente antelación la transición de modelo o, en otro caso, lo más probable es que se llegue a un momento de no retorno donde

ya no se disponga ni de materiales, ni de energía, ni de tiempo, ni de recursos económicos suficientes para hacer la transición.

Ante este reto conviven diferentes respuestas alternativas, las nuevas con las viejas y las viejas que también se adaptan, por ejemplo incrementando la eficiencia y buscando aprovechar recursos primarios fósiles con nuevas técnicas que permita prolongar su dominio. Surgen también reticencias al cambio desde grupos de interés económico, a menudo anclados en el modelo antiguo, pero también de amplios segmentos de la sociedad al ver cuestionados ciertos privilegios energéticos asumidos por la población como "normales". Es una realidad que hay que afrontar intrínseca al cambio desde un modelo socioeconómico modelado con energía prácticamente "sin límites de acceso, de alta densidad de potencia y a bajo coste" a una situación con "límites bien definidos".

Esta dimensión socioeconómica se solapa con la tecnológica, que debe hacer posible un consumo y generación más eficiente, pero especialmente, aportando la nueva infraestructura necesaria y facilitadora de la transición energética a un mínimo coste. Son las redes eléctricas inteligentes o *smart grids*. Estas redes acercan los lugares de consumo con los de generación y llevan implícito un impacto social y ecológico en el territorio que hay que gestionar. En este campo la tesis hace una propuesta concreta de cómo tecnológicamente puede hacerse a escala local, aportando criterios de diseño y el conocimiento práctico fruto de haber hecho una *nanored* inspirada en cómo la naturaleza gestiona los flujos de energía.

La biomimética, una disciplina incipiente de gran potencial que se basa en aprender e inspirarse de la naturaleza, ha servido también para desarrollar tecnología innovadora en el campo de la energía solar, patentada a nivel internacional. La experiencia como investigador de haber dirigido todo el ciclo del producto y su puesta en el mercado aporta una dimensión real que ha contribuido decisivamente al enfoque transdisciplinar de la tesis, aportando elementos de reflexión de carácter no tecnológico sobre la transición energética, como son la regulación, la aceptación por parte del usuario y los modelos de negocio de las nuevas tecnologías energéticas. Ha sido un período crucial en el proceso de formación como investigador, complementado la aproximación meramente técnica, y poniendo de relieve la necesidad de un enfoque desde la complejidad.

Para intentar falsear la hipótesis inicial, se analizan en profundidad datos fundamentales a nivel macroenergético y se concluye que "la transición de un modelo energético basado en los combustibles fósiles no es una decisión discrecional o ideológica, sino una necesidad socioeconómica". Sobre todo para aquellas regiones que, como Europa, pero especialmente Catalunya, son altamente dependientes del recurso fósil y no disponen de recurso autóctono, de manera que el coste de importar combustible se acerca ya al 5% del PIB. Un incremento estructural del precio del barril de petróleo en pocos años que ha cambiado las reglas del juego geoestratégico. Esta tensión de precios golpea las regiones más sensibles y menos resilientes y tensiona el modelo socioeconómico, con un alto riesgo de fractura y conflicto social para asegurar el acceso a los servicios básicos.

Afrontar, pues, la transición energética hacia una menor dependencia de recursos fósiles es vital para sociedades como la nuestra y hay que hacerlo mientras en otras regiones, competidoras globales a nivel económico, la premura de este cambio es menor. Este hecho introduce un nuevo factor socioeconómico que tiene el difícil reto de saber convertir la necesidad en virtud, y poder aprovechar el período de transición para construir un tejido económico y modelo social adaptado a la nueva situación. Y todo, en un contexto de falta de gobernanza global que gestione los recursos escasos y de una crisis económica persistente que ya ha golpeado amplias capas de la sociedad.

Un último aspecto considerado, pero no por ello menos importante, es la vertiente ecológica asociada al modelo energético. Biodiversidad, ciclos de los materiales y del agua o contaminación son algunas de las implicaciones. Centrándonos en las emisiones de gases de efecto invernadero, nos encontramos en la contradicción que el nivel de nuevas emisiones de CO₂ equivalente que, conjuntamente en todo el planeta, podemos emitir para mantenernos probablemente bajo el umbral de los 2°C de incremento medio de la temperatura en la Tierra, corresponde a lo que sería aportado por sólo la combustión de un tercio de las reservas totales de combustibles fósiles reconocidas actualmente. Y, sin embargo, las inversiones para descubrir nuevos yacimientos y técnicas no para de incrementarse año tras año. Este hecho ilustra, como ningún otro, que la transición de modelo implica un alto nivel de tensión política y social que se irá incrementando con el acercamiento a los límites físicos del recurso y del sumidero.

La tesis acaba con un último apartado que recoge la producción científica (artículos, patentes y congresos, entre otros resultados) realizada durante los últimos diez años. El resultado de toda esta investigación, desarrollo, reflexión, acción, participación y divulgación es que no se ha podido falsear la hipótesis planteada sobre la "necesaria transición de modelo basado en combustibles fósiles y nucleares", llegando a la conclusión de que "la transición energética es necesaria por motivos ecológicos, económicos y sociales" y que "las *smart grid* (y por extensión las *smart cities* y el *smart rural*), entendidas como la confluencia de las redes de energía e información tanto a nivel tecnológico como socioeconómico, son un instrumento fundamental para mantener la complejidad de nuestra sociedad y pueden catalizar la transición hacia un recurso energético renovable ". Para hacerlo posible, hay que ir más allá de los aspectos técnicos y hacer un proceso inclusivo del conjunto de la sociedad basado en el estado de conocimiento actual que aporta la ciencia y que objetiva la tecnología. Cabe concebir, pues, las redes eléctricas inteligentes dentro de los límites de los recursos energéticos y materiales con las partes positivas que esto tiene, pero, al mismo tiempo, también afrontando sus implicaciones sociales y económicas que a menudo chocan con los estándares de la sociedad actual. Y, por ello, una buena y sólida opción es entender y aprender de cómo la naturaleza gestiona los recursos.

El objetivo ha sido, pues, el de fundamentar desde la ciencia y con una concepción transversal, el debate sobre el modelo energético y no la concreción específica y

especialista de cómo deben ser o no las cosas, a menudo demasiado influido por como *quisiéramos* que fueran. El reto generacional es complejo y tiene, por definición, una componente de incertidumbre irreducible de manera que no puede esperarse ninguna propuesta ni receta mágica de carácter determinista. Lejos del relativismo que podría invitar a la dificultad de lo que se plantea, hay que poner de relieve que el tiempo para actuar es limitado, y que en nuestro país es, si cabe, más urgente que en otros lugares. Toca pues actuar y la propuesta metodológica de esta tesis doctoral es hacerlo en sintonía con la dinámica de los ecosistemas.

1.3 Agraïments

La llista és llarga i l'agraïment sincer i profund. Per posar un ordre cronològic, vull començar pels meus pares, Josep Maria i Teresa i ma germana Teresa i acabar amb la meva *nova* família, la Gemma, els seus pares, i sobretot els nostres fills Martí i Arlet els qui, sense cap dubte, hauran d'afrontar la transició energètica fòssil durant la seva vida.

Entre mig, he tingut la sort de rebre generosament el coneixement i suport de molta gent. Destaco en Francesc de qui he après el més difícil: les ganas d'aprendre i el rigor del procés científic. Una set de coneixement que m'està acompanyant ja des de fa anys en el camí d'anar descobrint la saviesa de la natura i la importància d'associar el pensament amb l'acció. Tots els companys amb qui he compartit les vicissituds del viatge professional, en Joan, l'Hugo, en Marc, en Josep, en Ricard i, recentment, en Roger i, especialment, en Xavier per haver cregut i confiat repetidament amb mi durant aquests darrers deu anys i que m'ha permès recórrer aquest camí com a investigador independent des de l'empresa.

També a tot el teixit d'entitats i moviment social que manté la flama encesa de vindicar honestament i de cara les contradiccions del model energètic, als poetes que ho han sabut recitar i als músics que hi han posat banda sonora. Em dec a la societat i espero poder retornar-vos-ho.

No voldria acabar sense reconèixer l'impuls que ha suposat en Ricard, el director de Tesi, per no abandonar en el camí fins a concloure el doctorat. En Martí per la seva coherència i guiatge, en David per la seva generosa contribució, en Quim, en Joan i en Jordi per ser *betatesters* i llegir-se la tesi, la Teresa i l'Hugo per la correcció d'estil i traduccions.

A tots vosaltres, que us compto com a bons amics, moltes gràcies. El camí ja val la pena per haver-vos conegut.

2 Bases Científiques Contemporànies

Estem en un d'aquells moments històrics de profund canvi epistemològic. Noves aportacions científiques plantegen hipòtesis de treball disruptives de profundes implicacions que transcendeixen el propi àmbit de la ciència. Tant és així que podem afirmar que els fonaments mecanicistes que han forjat la nostra visió del món, o *cosmovisió*, des de fa més de dos segles ja no trontollen, sinó que han estat substituïts per d'altres que es corresponen millor amb l'experiència a l'hora de sotmetre les noves hipòtesis a la realitat. És qüestió de temps que arribi la influència en l'àmbit de les ciències socials i econòmiques d'aquestes noves aportacions científiques, talment ho varen fer les seves predecessores.

Tanmateix no es tracta d'un procés de canvi mecànic, reduccionista i causal, sinó d'un flux d'esdeveniments i de nous plantejaments assentats en un coneixement previ que forgen un nou substrat i posen unes bases de coneixement d'àmbit d'aplicació més general i que no han de perquè invalidar l'anterior en la seva totalitat. Aquesta situació es dona per la confluència de dos factors principals, que són l'aparició de contradiccions irresolubles a l'hora de portar a la pràctica la cosmovisió prèvia (les quals són de caràcter social, econòmic, ecològic) i l'aparició d'un nou coneixement (bàsic i aplicat). Aquest doble procés no és estanc sinó connectat pel vector temporal i espacial arreu del planeta i esdevé un repte de gran magnitud per a la generació de ciutadans que l'ha de gestionar. Una gran "crisi", que és alhora, "oportunitat" on floreixen noves circumstàncies i condicionants. Aquesta nova situació en cap cas té una única via de sortida, determinista, apriorística, i, ni tan sols, garanteix per defecte una evolució "cap a millor" -en sentit ampli-. De la capacitat de gestionar el canvi, la transició, en dependrà la viabilitat del nou sistema.

En la següent figura s'identifiquen esquemàticament les diferents fases i servirà de guió per a l'elaboració del present capítol de la Tesi "Bases Científiques".

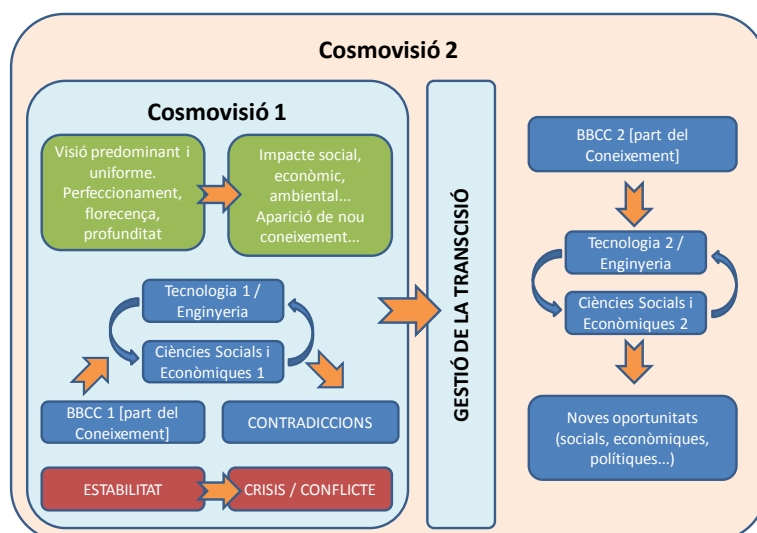


Figura 2.1: Esquema de transició de cosmovisió. FONT: elaboració pròpia

Una primera **hipòtesi #1** sosté que la crisi d'un model social donat esdevé estructural (social, ecològica, econòmica, política) quan és deguda a un canvi epistemològic de les bases que van conformar-lo. I, per tant, cal disposar de noves eines a partir del coneixement contemporani a l'hora de bastir la nova concepció del món, amb totes les seves implicacions i conseqüències socials, polítiques i econòmiques. Aquest coneixement no pot ser entès sense la combinació d'una anàlisi de les parts, de tall especialista, amb la síntesi del conjunt, amb visió transversal.

Aquest canvi ha de ser tan radical com radical sigui el canvi epistemològic, i requerirà d'una gran aportació de recursos de tot tipus, per la qual cosa, i atenent-nos al cost termodinàmic, és desitjable que sigui capaç de revertir el model anterior fent-lo *evolucionar adaptativament* cap a la nova situació per minimitzant-ne els costos socials, ecològics i econòmics.

Objectivant-ho en el model energètic, en tant que matriu bàsica de qualsevol societat, es respon afirmativament a l'existència d'una crisi estructural del sistema socioeconòmic basat en la combustió massiva de combustibles fòssils i una concepció mecanicista del món. I es fa, conseqüentment a la hipòtesi #1, una incursió en els fonaments epistemològics que han de servir per forjar la nova cosmovisió a partir d'un procés de transició social i econòmic gestionat pel conjunt de la societat, circumscrit dins els límits dels recursos energètics disponibles i portat a la pràctica per l'ús de tecnologia adequada.

Aquesta tasca es desenvolupa en el present bloc "Bases Científiques", que vol ser una breu incursió metodològica, rigorosa i sintètica en àrees de coneixement com ara són la "Incertesa i Indeterminisme", la "Complexitat i Sistèmica", la "Termodinàmica de processos irreversibles", la "Simbiogènesi", "l'Ecologia", la "Ciència estesa" i el "retrobarment de les ciències i les humanitats". Es condensen aquests principis en la teoria dels **principis biològics de gestió dels recursos**, una aproximació biomimètica al procés energètic fonamentada en la irreversibilitat, la incertesa i la complexitat i que té, entre d'altres, el propòsit d'incorporar la magnitud "informació" al binomi tradicional "matèria-energia" característic de tota activitat humana.

2.1 Superar les històries i els mites

Un mite, diu el filòsof francès Ronald Barthes (1915-1980), transforma un estat antinatural donat, nascut de la mà de l'home, en un de presumptament invariable traient-ne tota aparença de parcialitat, arbitrarietat o motivació interessada. L'estat mitològic està mancat d'alternatives i genera davant d'aquestes una qualificació d'idealisme que s'instal·la fàcilment i que les fa difícil inclús de defensar. Si bé el mite no nega necessàriament els problemes, sí que els purifica i els fa innocents. El mite posa límits a l'acció, amb una clara intenció d'immobilitzar el món (Barthes, 1957).

Així, aquestes històries o mites s'instal·len en la societat i reben categoria de dogma. Es prestigien fent-se passar per coneixement científic i actuen transversalment sobre tot allò quotidià, des d'aspectes estrictament culturals fins a aspectes ideològics, i

determinen els actes i les formes de fer de la població (comportament, pensament, etc.), talment es tractés d'un software que, instal·lat en els humans –hardware-, permet fer i desfer a gust del programador.

Per facilitar aquesta reprogramació col·lectiva es cerca un món repetitiu, que depenent de les sectes i cultures, pren una manifestació o una altra. Aquesta alteració de la capacitat de raonament humà ha estat un tema cabdal al llarg de la història de la filosofia, com per exemple, per Plató i la seva metàfora sobre la Caverna i posa en escac el principi mateix de Democràcia, en voler perpetuar un determinat model o forma d'organització social, més enllà de si es respecten o no els drets de les persones o les Lleis de la naturalesa. Es fa prevaler l'interès del lobby, disfressat d'interès general.

El debat energètic està altament condicionat per molts mites i històries, acientífics, que esbiaixen el *debat energètic* cap a posicions ideològiques. Es creen així uns marcs de referència col·lectius on la gent s'hi adscriu o no, sense més reflexió, en funció del desig o la voluntat de com siguin les coses (Smil, 2010). El present treball pretén contribuir al debat rigorós sobre la qüestió energètica com a via per ajudar a la seva correcta diagnosi i gestió.

2.2 El pensament mecanicista

El “mecanicisme” és la doctrina filosòfica que concep el món i l'Univers com una màquina o mecanisme explicat segons un model mecànic i descrit en balanços merament de matèria. Aquesta concepció afirma la possibilitat i àdhuc la necessitat de donar raó dels fenòmens naturals a partir de models mecànics. Va ser forjada a cavall del s.XVI i XVII i ha transcendit els límits de la ciència impregnant les ciències socials i econòmiques i esdevenint hegemònica fins ben entrat el segle XX. El concepte s'ha anat modelant i enriquint-se amb matisos (per exemple el dualisme ment-cos i la relació amb el materialisme filosòfic) i encara avui està al darrera de moltes decisions i enfocaments, entre d'altres, en el que fa referència al model energètic.

2.2.1 Un concepte forjat en la Ciència

El concepte mecànic sorgeix durant el s.XVII en un context cultural de superstició i es deu, en primera instància, a l'aportació d'importants científics: Copèrnic (1473-1543), Kepler (1571-1630), Galileu (1564-1642), Huygens (1629-1695) i Boyle (1627-1691). I posteriorment es consolida amb les aportacions científiques de Newton (1643-1727) i de Laplace (1749-1827).

Totes les evidències científiques durant aquest període d'un món i d'un univers irreductiblement matemàtic, predictable i determinat són perfectament descrites per filòsofs com Francis Bacon (1561-1626), Thomas Hobbes (1588-1679) i, sobretot, René Descartes (1596-1650) en postular l'axioma fonamental del paradigma mecànic: “les matemàtiques són l'instrument de coneixement més poderós, atès que és la font de totes les coses” (plantejament ja fet, en el fons, per Pitàgores i

Plató). Descartes ha aconseguit convertir tota la natura en matèria en moviment, reduint tota qualitat a quantitat, i sostenint que “només importa l'espai i la situació”. El món de Descartes és precís i harmònic, sense lloc per al caos, la confusió i la incertesa. El paradigma mecànic és, per sobre de tot, completament previsible.

Precedents necessaris, doncs, d'importants canvis en la ciència, en la filosofia i en la tecnologia durant els segles XVIII i XIX, amb noves aportacions radicals que aporten dades confirmadores i compatibles amb la nova visió del món, com ara la Màquina de Vapor de James Watt (1736-1819) i la posterior teorització de la Termodinàmica (Sadi Carnot, 1796-1832); la Teoria de l'electromagnetisme de James Maxwell (1831-1879), la Teoria de l'Evolució de les Espècies de Charles Darwin (1809-1882) i Gregor Mendel (1822-1884) en el camp de la genètica i la irrupció de l'enginyeria elèctrica amb Nikola Tesla (1856-1943) i Edison (1847-1931).

La ciència contemporània es forja en aquest context històric i social i es dota del Mètode Científic, una anàlisi que separa l'observador d'allò observat i proporciona un fòrum neutral per al desenvolupament del coneixement objectiu, que és el que ha de permetre dominar totes les coses naturals.

2.2.2 Projectió en les ciències socials i econòmiques

Tot aquest coneixement disruptiu es va traslladant progressivament i en paral·lel en àmbits humanistes sota la idea que si la societat no funciona bé, només es pot deure a que no segueix les Lleis Naturals que regeixen l'Univers i que la ciència *ja* havia descrit. En destaquen autors com John Locke (1632-1704) en allò referent a aspectes socials i Adam Smith (1723-1790) i Karl Marx (1818-1883) en aspectes econòmics.

És el període històric de la Il·lustració durant el s.XVIII sota el qual se situa la raó com a fonament d'un sistema ètic, social i polític i que dona marc històric a autors com Montesquieu (1689-1755), Rousseau (1712-1778) i Voltaire (1694-1778).

Amb ajuda de la raó, aquests autors es van proposar determinar els fonaments naturals de la societat, traient Déu del pilar de l'activitat pública, atesa la seva condició d'incognoscible. Ara, doncs, l'ésser humà ja no podia ser considerat un organisme dirigit per la Divinitat i per això homes i dones es converteixen en el mateix que, uns anys abans, havien fet de la naturalesa Bacon, Descartes i Newton: mers fenòmens físics que interactuaven amb d'altres fragments de matèria dins de l'univers mecànic.

A partir d'aquí, autors com Locke plantegen una societat, composta exclusivament d'individus que creen el seu propi significat, i on l'ordre social, garantit per l'Estat, es forja en la protecció i augment de les propietats dels seus membres a partir de l'ús de la naturalesa per la producció de riquesa. La societat esdevé materialista i individualista de ple dret perquè la raó ens porta a concloure que aquest és l'ordre natural de les coses i cal emancipar-se de les imposicions de la naturalesa per assolir el camí de la felicitat. Aquesta visió se sustenta amb una visió de recursos infinits de la natura i que no s'esgoten, de manera que el seu aprofitament no resta disponibilitat pels altres. Amb això, Locke esdevé el filòsof de la propietat privada,

l'expansió il·limitada i l'abundància material. El pensament de Locke sobre que “la terra abandonada per complert a la naturalesa és inerta i no serveix per a res; la naturalesa només és valuosa quan, gràcies als nostres esforços, la fem productiva” fonamenta la idea que quan més obtingui un individu, més se'n beneficia la col·lectivitat, el que esdevé el precedent de la “teoria del goteig” (Kuznets, 1971). L'únic límit que reconeix a l'acumulació de propietats és que “no es deixin morir o s'abandonin inútilment”. Aquest pensament marca profundament l'home modern fins als nostres dies. L'individu queda reduït a buscar el propòsit i el sentit de la vida en les activitats de producció i consum. Les necessitats i aspiracions de la gent, els seus desitjos, ..., tot queda supeditat a la recerca de l'interès material.

Aquest context cultural i científic mecanicista, determinista, materialista i reversible entra amb força en els dos corrents econòmics occidentals hegemònics durant bona part del s.XX, el capitalisme i el socialisme a partir de sengles autors, Adam Smith mitjançant la seva obra de referència, *La riquesa de les Nacions*¹, i Karl Marx i el *Manifest Comunista*². Malgrat que l'aplicació pràctica porta a sistemes d'organització social oposats, per exemple en la propietat dels mitjans de producció o el repartiment de les plusvàlues, ambdós parteixen de donar per fet que la “riquesa” ja existeix i aquesta, sens dubte, només pot provenir de l'explotació intensiva dels recursos naturals materials i, sobretot, energètics amb els emergents combustibles fòssils.

El progrés és, en conseqüència d'aquesta visió mecanicista, utilitzar el món natural per crear un valor més gran que el que té en estat original. En aquest context, la ciència és la metodologia que legitima i possibilita a l'ésser humà enumerar les característiques de la naturalesa per poder-les reduir a unes regles coherents; i la tecnologia consisteix en l'aplicació d'aquestes regles a cada cas particular, amb la finalitat de transformar parts del procés natural en formes utilitzables amb més valor, estructura i ordre dels que hi havia en el seu estat inicial.

2.2.3 Una llarga ombra

Així és com es forja i es desenvolupa la visió mecànica del món, amb conseqüències de gran abast i que entronitzen la Ciència a partir del seu èxit en descriure la natura. Cal reconèixer l'increïble tasca que això va significar i l'impacte social generat, per exemple, en l'Església i la religió en perdre la condició d'únic portador de la Veritat, malgrat defensar uns valors més enllà dels simplement econòmics i materials.

No es pot més que sentir emoció i retre homenatge a aquells homes que, contra el pensament establert, gosen descriure el món científicament. Quan hom fa l'intent de situar-se en el context d'aquell moment –i en la mesura que es va anar acceptant i difonent– el mecanicisme deuria ser la *prova definitiva*, un veritable gaudi intel·lectual, el Triomf de la raó per descriure i predir la naturalesa. Aquest món

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/The_Wealth_of_Nations (Octubre 2014)

² http://en.wikipedia.org/wiki/The_Communist_Manifesto (Octubre 2014)

matemàtic emana tanta seguretat que encara avui projecta la seva ombra. Parlem “del cos humà, la màquina més perfecta”, per exemple. Encara avui analitzem el sistema energètic com un conjunt de relacions causa-efecte. La paradoxa, i l'aprenentatge davant dels nous descobriments, és que si bé han servit per fer avançar el coneixement durant generacions, avui sabem que estan acotats a un rang d'esdeveniments: els de matèria macroscòpica en moviment, en tant que és mesurable matemàticament. Els principis originals han estat superats per noves Lleis i Hipòtesis durant el s.XX, com per exemple, la teoria de la Relativitat General d'Albert Einstein (1879-1955) i la conseqüent geometria tetradimensional de l'espai-temps en la qual els cossos celestes segueixen línies geodèsiques³.

El mecanicisme és, doncs, una visió del món feta per entendre les màquines simples, no els sistemes complexos, com la vida, els sistemes infinitament grans o infinitament petits. En separar primer i després eliminar l'anàlisi holístic, els arquitectes del paradigma mecànic ens han fet arribar un Univers format exclusivament de matèria inerta inconnexa. Una interpretació del món que no és capaç de forjar exclusivament respostes adequades als reptes actuals, com ara l'escalfament global o el model energètic.

2.3 Generació de coneixement: ampliant el mètode científic

Les hipòtesis no es demostren sinó que s'accepten o no s'accepten, i cadascuna pot ser refutada per una altra que expliqui millor els fenòmens estudiats. Així, el coneixement s'ha anat conformant de manera agregada a mesura que els límits d'aplicació precedents s'han desbordat per contradiccions lògiques, físiques, socials, econòmiques o ecològiques. D'aquesta manera s'ha generat un salt en la nostra capacitat d'interpretació del món, una de les capacitats, com deia Einstein, més extraordinàries de l'espècie humana.

2.3.1 Coneixement fonamental

Wagensberg (1985) proposa la idea que qualsevol coneixement és una composició, amb pesos específics relatius, de tres formes de coneixement fonamentals: el coneixement científic, el coneixement artístic i el coneixement revelat. Es distingeixen els uns dels altres pel mètode emprat en la seva elaboració.

El mètode científic es basa en tres principis:

1. Principi d'objectivitat: el científic conversa amb la naturalesa procurant que la manera de preguntar influeixi el mínim possible en les seves respostes.
2. Principi d'intel·ligibilitat: el científic cerca la mínima expressió de la màxima representació.

³ El *London Times* va publicar el 7 de novembre del 1919 els titulars: “Revolució a la ciència. Nova teoria de l'Univers. Les idees de Newton derrocades”.

3. Principi dialèctic: el científic enfronta la representació de la realitat amb la pròpia realitat i en resol les eventuals contradiccions.

Així, gràcies al Primer Principi, la ciència tendeix a ser universal; gràcies al Segon, la ciència tendeix a guanyar la màxima capacitat d'anticipació respecte a la incertesa; i gràcies al Tercer, la ciència canvia i, en general, progressa.

2.3.2 Incertesa i risc

Cal ara fer un breu incís per diferenciar dos adjectius molt habituals a l'hora de parlar, entre d'altres, de les qüestions energètiques: la "Incertesa" i el "risc".

Així, per "risc" entenem l'esdeveniment d'un fet de probabilitat coneguda (sovint anomenat "incertesa estadística"). Cada vegada que hom condueix un cotxe, corre el risc de patir un accident, perquè se sap que els accidents de cotxe són probables, i així és com les companyies asseguradores estableixen els seus honoraris per assegurar-se un benefici. Hi ha poca incertesa sobre els riscos d'accidents de cotxe. Contràriament, si hom viu al costat d'un abocador de productes químics "de conseqüències desconegudes" per a la salut humana, també corre un risc, però ningú sap fins a quin punt. Ni es pot conèixer "¿què pot passar?", ni la probabilitat associada a cada un dels escenaris possibles, atès que és un fenomen "incert".

Les qüestions ambientals més importants, com l'escalfament del planeta, suposen una vertadera incertesa, no només un risc. El problema rau en el caràcter irreversible d'aquests fenòmens, de manera que s'impossibilita l'experimentació (interpel·lació de les diferents hipòtesis). Per això, no sembla plausible veure la tecnologia com l'eina per "conèixer i mitigar" la incertesa, com si es tractés merament d'un fenomen determinístic i probabilístic quantificable i controlable.

Això obliga a apel·lar davant de certes actuacions o decisions d'alta incertesa i/o abast el "principi de prevenció". I fer-ho de manera diligent i sòlida. No podem portar a la pràctica *per sistema* totes les coses que científicament i tecnològica són possibles, si no són convenients per a la *salut del planeta* o la dels seus habitants, però, alhora, no és convenient aplicar el principi de precaució preventivament per sistema a l'hora d'afrontar les necessitats socials emergents. Un equilibri difícil, però necessari d'assolir.

2.3.3 Limitacions del mètode científic

En l'àmbit d'un món mecanicista, previsible i reversible, el regne del mètode científic esdevé omnipresent. Els grans èxits de la ciència moderna forjada en la Il·lustració, o *ciència normal*, han vingut de la seva capacitat de reduir la *realitat* dels fenòmens a disciplines molt especialitzades, les quals han gaudit de potents científics que han possibilitat els extraordinaris avenços en el coneixement humà a través d'un Mètode que ha assegurat la separació entre la raó i la passió, almenys formalment.

Ara bé, el preu que s'ha hagut de pagar per aquest *reduccionisme*, ha estat la pèrdua de la concepció global dels processos i la creença que qualsevol *ignorància* podrà ser

superada exclusivament pel poder de la raó. El Mètode Científic admet que podem dividir la naturalesa en components aïllats quasi estables, i que els objectes d'estudi poden ser separats del subjecte que els estudia. Això dona una ciència dividida en disciplines (que és la base de l'ensenyament acadèmic actual), quantitativa, i el mite d'una ciència neutral, lliure de valors, que legitima els experts.

L'èxit de la ciència ha donat a l'Estat modern un model legitimador en la presa de decisions *racionals* (la racionalitat és "racionalitat científica") a partir d'invocar el Mètode Científic. Però el Mètode es veu col·lapsat quan amplia el seu camp d'aplicació a entorns indeterministes on no és possible una experimentació reversible: no tot el que podem observar ho podem experimentar.

Jorge Wagensberg (1948-) ens convida d'aquesta manera a pensar sobre les limitacions del mètode científic: "L'indeterminisme és l'actitud científica compatible amb el progrés del coneixement del món, enfront del determinisme, que és l'actitud científica compatible amb la descripció del món" (Wagensberg, 1985).

Així, tot científic sap la impossibilitat d'experimentar de forma directa amb les coses infinitament petites –partícules elementals-, infinitament grans –els estels- o infinitament complexes –com la vida-. Fixem-nos en aquests darrers.

Sistemes d'un alt grau de complexitat no poden ser reduïts a les seves parts (escac al Segon Principi del Mètode Científic), no poden contrastar-se amb la realitat, ja que tenen un grau irreductible d'indeterminisme (escac al Tercer Principi) i, en el cas dels afers humans (economia, model energètic, etc.) l'observador no pot independitzar-se d'allò observat (escac al Primer Principi).

En aquest entorn, doncs, no és aplicable l'optimisme tecnològic forjat en el Mètode Científic i que tant ha marcat generacions senceres, i cal donar pas a un debat ordenat, obert i franc més enllà dels límits (auto)marcats de la ciència, que sigui capaç d'incorporar en l'anàlisi la incertesa irreductible dels fenòmens (globals, però també locals) i de veure les conseqüències socials i ambientals en l'espai i en el temps de les seves decisions.

2.3.4 Ampliant la "Ciència Normal" cap a la "Ciència Postnormal"

Si bé una concepció àmplia del Mètode Científic permetria abastar aquests fenòmens, és convenient no estirar ni forçar aquest concepte. El Mètode Científic *encara* té molta feina a fer que li és pròpia. No només continua sent vàlid, sinó que la seva contribució és també fonamental per abordar aquests casos. Però ara ja no de manera única. Per objectivar aquest plantejament previ a l'estudi de qualsevol fenomen, cal identificar-ne "el grau d'incertesa" i "la magnitud de la temàtica subjecta a estudi" (Funtowicz, S i Ravetz, J., 1993). Aquestes dues variables, independents entre elles, determinen l'àmbit d'aquell procés i, per extensió, ofereixen una visió sobre com s'han d'abordar.

- Zona I: quan ambdues dimensions són baixes estem en l'àrea de la ciència normal aplicada. Aquí dins tot pot ser previsible. És a dir, el risc és conegut.

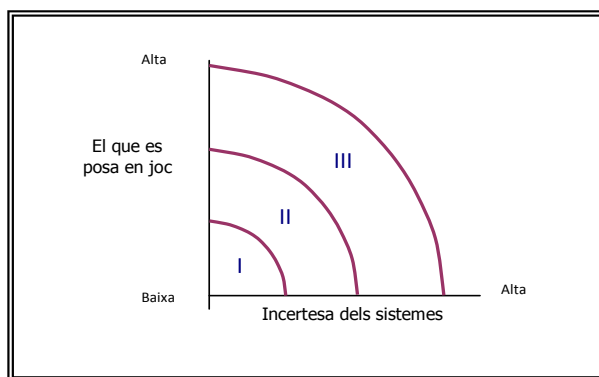


Figura 2.2. Diferents camps del coneixement a aplicar segons el grau d'incertesa i magnitud del fenomen en estudi. FONT: Funtowicz i Ravetz, 1993

- Zona II: quan una de les dimensions –o les dues- comença a créixer, entrem en l'àrea de la tècnica aplicada (Van Hauwermeiren, 1998) o de la *consultoria professional* (medicina, enginyeria, arquitectura, ...), on no hi ha una solució única, i per arribar-hi, caldrà negociar-ne els pros i contres, estant el professional subjecte a unes responsabilitats socials i penals per les conseqüències del seu treball. Són fenòmens dels quals podem conèixer els diferents estats i conseqüències que se'n derivin (risc), i/o l'àmbit on repercuteixen és relativament local.
- Zona III: és l'àmbit de la *ciència postnormal* (Funtowicz, S i Ravetz, J., 1996). Hi localitzem aquells fenòmens en què intervenen moltes variables i desconeguem, no només quines d'elles poden evolucionar, sinó la probabilitat de qualsevol previsió apriorística (incertesa), i/o estem tractant temes d'alt risc per al conjunt de la biosfera i la humanitat.

Per tant, no és lícit per a qualsevol fenomen, extrapolar linealment des de la teoria científica a les seves aplicacions tecnològiques, ni des d'aplicacions tecnològiques locals, pilots o en laboratori a l'aplicació a gran escala. Per exemple, una cosa és la teoria molecular per la qual de dues molècules d'aigua obtindrem quatre àtoms d'hidrogen i dos d'oxigen, o a la inversa. On podem, fins i tot, conèixer la probabilitat de trobar hidrogen amb dos protons. I, en qualsevol cas, portar-ho a la pràctica té unes conseqüències confinades al laboratori; i una altra és abordar el fenomen del transvasament de milions d'hectòmetres cúbics d'aigua de la conca d'un riu cap a un altre, com és el que planteja el *Plan Hidrológico Nacional*⁴, la construcció de grans embassaments a la Xina o la dessecació del Mar d'Aral (Arrojo, 2001). En aquest cas no es pot reduir la qüestió a quantificar exclusivament els "hectòmetres cúbics" involucrats, atès que és un fenomen molt complex, i per tant altament incert, amb conseqüències no conegudes i no confinades. Un fenomen que no podem experimentar de manera reversible.

La conclusió és, doncs, que si bé el mètode científic és l'adequat per abordar qüestions de la zona I de la gràfica, no ens serveix –exclusivament- per prendre

⁴ http://es.wikipedia.org/wiki/Plan_Hidrológico_Nacional (Octubre 2014)

decisions de l'àmbit III. Si al confrontar "incertesa" amb les "repercussions de la decisió" ens allunyem de l'origen de coordenades hem de fer evolucionar el mètode des de "les ciències normals aplicades" a un enfocament *indeterminista*: la ciència postnormal o "l'altra ciència" (Funtowicz i Ravetz, 1994), l'aplicació de l'essència del mètode científic a un nou territori.

El mètode caldrà que sigui simplificador, però ara dins un context d'incertesa irreductible, fins i tot acceptant la ignorància. La ciència dividida en disciplines ha de donar pas a una ciència transdisciplinària i la *raó* ha de reconciliar-se amb la *passió*, donant pas a una dialèctica creativa. El principi organitzador no és només *La Veritat*, sinó també *la Qualitat*. Integrem la deducció formalitzada dels *experts* a un diàleg interactiu entre tots els agents de la societat que són subjectes objectius (actius o passius) d'aquell problema i la seva resolució. Són els encarregats de validar els treballs d'aquests fenòmens incerts i els qui en rebran les conseqüències.

Tal com la *ciència postnormal* supera de manera integradora la *ciència normal*, la *comunitat estesa d'experts* o *peers* integra i supera la *comunitat d'experts*, encarregada en la ciència normal de jutjar la validesa d'un treball científic. Els científics són (molt) necessaris, però no suficients per afrontar fenòmens globals, com és la qüestió energètica i el canvi climàtic. El repte es presenta en la gestió d'aquest diàleg.

Una **segona hipòtesi #2** sosté que l'anàlisi del model energètic es caracteritza per un alt nivell de complexitat i incertesa, per la qual cosa requereix metodològicament d'una extensió del mètode científic clàssic per incorporar al conjunt d'agents involucrats i afectats d'una manera adequada.

2.4 La Terra

L'Univers és energia. Amb el coneixement actual, un 96% resta en estat *no conegut*, i només el 4% és acotable, i tan sols una petita part ha esdevingut matèria. Majoritàriament inorgànica, i una molt petita part, orgànica; la major part de la qual és morta, i molt poca té vida. I d'aquesta, una petita part té coneixement. Aquest darrer estat és el que ocupen els éssers humans dins de l'Univers. ¡Què poc probable és, doncs, trobar coneixement significatiu a l'Univers!

A la Terra, aquestes diverses manifestacions de l'energia no es donen aïlladament, sinó dins d'ecosistemes en interacció amb molts d'altres ecosistemes (comunitat d'organismes i medi ambient), de forma que tots ells descansen sobre la fotosíntesi, única via per la qual l'energia del Sol s'introdueix dins el sistema de la vida.

La quantitat d'energia solar que flueix dins els ecosistemes, ha estat quantificada entre 0,2 i 2% (Ponting, 1992) de tota l'energia que ens arriba, atès els límits que ofereix les lleis de la física, la quantitat d'energia i el balanç de CO₂.

En aquest context, entenem per Terra un sistema físicament limitat que està obert a un flux d'energia, amb la corresponent matèria inorgànica i orgànica (i orgànica viva conscient), i amb una propietat emergent del propi sistema: la capacitat

homeostàtica d'autoregular el clima i la composició química, independentment de les canviants condicions exteriors, de forma que l'evolució dels organismes va estretament lligada a la del medi ambient (Lovelock, 1979). Aquestes tres característiques conviden a pensar en una certa *vida* de la Terra.

Aquesta visió plantejada per James Lovelock (1919-), teoritzada des de 1965, s'ha anomenat "Hipòtesi Gaia" i ha tingut una important influència en el pensament del canvi de segle. En molts casos, però, i com reconeix el mateix Lovelock, amb una desviació metafísica molt allunyada de la voluntat de l'autor.

Fem aquí referència de la concepció més científica de la teoria, alineats amb el pensament de científics de primer ordre com Lynn Margulis (1938-2011). I, reproduïm les paraules del propi Lovelock per la seva pedagogia, simplicitat i contundència, "(...) però si fins i tot [la vida de] Gaia resulta ser finalment una metàfora, haurà pagat la pena pensar en la Terra com un sistema viu. Un model així és fructífer: ja ha proporcionat molts descobriments que la ciència convencional no hagués obtingut (...)" (Lovelock, 1987).

Si acceptem aquesta concepció holística, tenim un nou camp on aplicar el coneixement: la ciència i la tecnologia, les humanitats... prenen una nova dimensió conceptual, diferent a l'actual; no es tracta d'una involució cap a segles passats. Ans al contrari, es planteja una filosofia innovadora i moderna amb potencial per afrontar els reptes del segle XXI amb unes certes garanties per als humans, i també pels bacteris, dels quals possiblement hem evolucionat i que continuen sent imprescindibles per continuar evolucionant (Margulis, 1987).

2.5 Termodinàmica Clàssica

2.5.1 Primera i Segona Llei des de diferents punts de vista

La Termodinàmica és l'única branca de la física que es recolza completament en axiomes no demostrables a priori. Dos del més coneguts són "el contingut total d'energia a l'univers és constant", i "l'entropia és sempre creixent".

És a dir, resulta impossible crear o destruir energia. La quantitat total que n'existeix va quedar fixada des del principi dels temps i romandrà fins a la fi del temps. La Primera Llei és la de Conservació, i diu que "malgrat que l'energia no pugui ser creada ni destruïda, sí pot transformar-se i passar d'una forma a una altra". És important insistir en la impossibilitat de crear energia, fet que esdevé sorprenent quan constatem que tot està fet d'energia: un ésser humà, un gratacel, una fulla, ... tan sols són diferents estats en què s'ha transformat l'energia des d'un estat previ amb una eficiència característica. Aquesta contundència, però, cal contextualitzar-la en l'estat del coneixement actual. Així, i a escala còsmica, no sabem si el principi esmentat és correcte per l'impacte de, per exemple, l'energia fosca, que encara no coneixem prou bé tot i representar més del 70% de l'energia total en un univers que s'expandeix.

Si tan sols tinguéssim en compte la Primera Llei, no hi hauria problema a utilitzar una i altra vegada la mateixa energia; això sembla que és el que s'ha cregut fins ara. Però sabem que el món no funciona així. Quan cremem un tros de carbó l'energia es conserva, però transformada, principalment en calor, òxids sulfurosos i altres gasos que es dispersen per l'espai. Si bé és cert que no s'ha perdut l'energia, també es constata que mai més podrem tornar a cremar de nou aquell tros de carbó per obtenir-ne el mateix rendiment. L'explicació a aquest fenomen rau en la Segona Llei de la Termodinàmica, la qual ens diu que cada vegada que l'energia passa d'un estat a un altre, cal pagar un cert preu. Aquest preu és una disminució de la qualitat, això és quantitat d'energia disponible per realitzar en el futur algun tipus de treball. I aquesta disminució es mesura amb una propietat de nom "entropia".

L'entropia (multiplicada per la temperatura absoluta) és la mesura de la quantitat d'energia que ja no és susceptible de ser convertida en treball. El primer que va utilitzar aquest terme va ser Rudolf Clausius (1822-1888), quan tractava de formalitzar resultats previs de Sadi Carnot (1796-1832). Carnot, tractant d'entendre millor el funcionament de la màquina de vapor, va descobrir que la màquina rutllava perquè una part del sistema estava freda i una altra calenta. És a dir, perquè l'energia es converteixi en treball ha d'existir una diferència en les concentracions d'energia o un gradient (en aquest cas, una diferència de temperatures) entre les diverses parts del sistema. Així, el treball es realitza quan l'energia passa d'un alt nivell de concentració a un nivell inferior. Però anem més enllà: cada vegada que l'energia passa d'un nivell a un altre, queda menys energia disponible per realitzar un treball en una propera ocasió. Per exemple, l'aigua que cau des d'una presa va a parar a un llac. En caure, pot utilitzar-se per generar electricitat, fer girar una sínia, o realitzar qualsevol altra funció; però una vegada arriba al llac, ja no pot realitzar cap treball. En un pla horitzontal, doncs, l'aigua no pot fer girar ni la sínia més petita. Aquests dos estats solen anomenar-se "estats d'energia lliure o disponible", davant dels "estats d'energia no disponible". Un augment d'entropia, multiplicat per la temperatura de l'ambient, equival a una disminució de l'energia disponible. Part d'aquesta energia no disponible es converteix en contaminació, en un residu, és a dir, energia dissipada que s'acumula en l'ambient, esdevenint una certa amenaça per al mateix ecosistema que l'ha generat si s'acumula per sobre de la capacitat de càrrega de l'embornal.

Clausius va observar també que, en l'evolució d'un sistema tancat, la diferència entre nivells d'energia tendeix sempre a reduir-se. Si observem què passa en treure un ferro roent del foc, ens n'adonarem que al cap d'un temps suficient, el ferro i l'aire o aigua que l'envolta arriben a la mateixa temperatura. Diem llavors que s'ha assolit un estat d'equilibri on ja no hi ha diferències entre nivells d'energia. En aquest moment, ni el ferro refredat ni l'aigua ja no poden realitzar cap treball útil. La seva energia no és utilitzable. Això no vol dir, però, que no puguem portar de nou l'aigua del llac al capdamunt de la presa per a que torni a caure, o tornar a escalfar el ferro, però en qualsevol cas, per fer-ho, caldrà acudir a una nova font d'energia lliure o disponible, que es consumirà en el procés. És a dir, si bé és possible invertir el procés entròpic en un moment i lloc determinat, tan sols es pot aconseguir utilitzant

una energia addicional i, conseqüentment, incrementant l'entropia global del medi. Això s'ha de tenir en compte quan parlem del reciclatge. No existeix cap tecnologia actual, ni futura, que possibiliti un reciclatge del cent per cent, ja que el propi fet de reciclar requereix una despesa addicional d'energia disponible que augmenta l'entropia de l'entorn.

Per "estat d'equilibri" entenem aquell en què l'entropia ha arribat a un màxim, i per tant, ja no queda cap energia disponible per seguir realitzant treball. Clausius va resumir la Segona Llei, dient que "en el món, l'entropia (és a dir, la quantitat d'energia no disponible) tendeix sempre al màxim". Aquest procés no es pot aturar, però, mentre hi ha tecnologies que el poden incrementar ràpidament, n'hi ha d'altres que ho fan més lentament per la realització d'un mateix treball.

A la Terra disposem, a més de les forces nuclears i gravitatòries, de l'energia que procedeix del Sol i que pren diferents manifestacions a escala temporal humana i de caràcter renovable (vent, corrents marines, radiació solar visible, infraroja...) i d'escala geològica i no renovable (recursos fòssils) en forma de reserva terrestre; Aquestes diferents fonts energètiques també poden diferenciar-se segons si són reserves de baixa o alta entalpia. L'energia d'origen solar és, a escala humana, pràcticament il·limitada pel que fa a la quantitat total d'energia, però estrictament limitada respecte el flux que arriba per unitat de superfície i de temps i ve definit per la constant solar, quantificada en uns 1.350W/m^2 fora de l'atmosfera i uns 380W/m^2 de mitjana en el conjunt de la Terra. L'energia provinent del Sol es degrada a cada segon que passa en interaccionar amb els cicles materials i la seva entropia no arriba al màxim fins molt després que les reserves disponibles de la Terra s'hagin consumit. La constant solar inclou tots els tipus d'energia radiada pel Sol recollides en l'espectre electromagnètic.

Hi ha una qüestió fonamental: a la Terra l'entropia està augmentant constantment i, amb el temps, arribarà a un màxim en esgotar els recursos materials i l'energia que d'ells se'n pugui extreure. Això es deu al fet que la Terra és un sistema tancat per a la matèria en relació amb l'univers. És a dir, intercanvia energia amb el seu entorn (solar), però no matèria (tret d'algun meteorit, algun satèl·lit i la pols còsmica). Aquest fet té conseqüències a molts nivells que analitzarem al llarg de la tesi.

Ara bé, el Sol, per si mateix, no genera matèria ni vida. En cap cas es crea matèria a partir només d'energia (més aviat al revés, s'estan convertint constantment grans quantitats de matèria en energia, per exemple mitjançant la combustió). Perquè es desenvolupi vida, el Sol ha d'interactuar amb els bioelements.

Prestigiosos autors en el camp de la termodinàmica de processos irreversibles consideren que la matèria es dissipa constantment, per la qual cosa, cada vegada resta menys matèria disponible per al desenvolupament de vida en el futur. Des del 1865, tots els llibres de termodinàmica formulen que "en un sistema aïllat, l'entropia material acaba arribant a un màxim".

Quan ja no hi ha energia disponible, parlem de "mort tèrmica"; quan ja no disposem de matèria capaç de combinar-se per donar vida o per alliberar energia, utilitzem

l'expressió "caos material". En ambdós casos, el resultat és entròpic: una dispersió a l'atzar de matèria i energia que fa que es *dilueixin* i redueixin la seva concentració i gradient, perdent, per tant, capacitat per realitzar treball útil.

La llei de l'entropia no només es comprèn, sinó que també *se sent*, atès que l'essència d'aquesta llei és l'essència de la pròpia realitat. I per això fa falta una certa intuïció per entendre el seu significat. Per aquest motiu, resulta convenient contemplar la Llei de l'entropia des de diversos punts de vista.

2.5.2 Diferents enfocaments de l'entropia

Complementant la visió analitzada en el punt anterior per sistemes tancats, Josiah Willard Gibbs (1839-1903) estén la termodinàmica als sistemes oberts, que sí permeten l'intercanvi de matèria entre el sistema objecte d'estudi i el món exterior. Evoluciona també el concepte "d'entropia" pel "d'energia lliure (de Gibbs)", que seria la quantitat d'energia disponible per realitzar un treball, també anomenat "exergia" (Rant, 1956). Aquesta magnitud és proporcional als gradients que les màquines poden explotar, o que els organismes poden emprar per mantenir-se i reproduir-se (Gibbs, 1873).

Una tercera visió de l'entropia consisteix en veure-la com la declaració que tota l'energia d'un sistema aïllat es mou des d'un estat ordenat a un altre de desordenat. L'estat d'entropia mínima, on la concentració és màxima i on es té la major part d'energia disponible, és també l'estat més ordenat. I a la inversa. Així, tornar *les coses* desordenades a un estat d'ordre requereix, necessàriament, més energia que la que s'ha gastat per generar el desordre.

Fem ara un incís que mereixerà especial atenció posteriorment. Podríem involucrar la mateixa quantitat d'energia per assolir, des d'un estat desordenat *a*, un estat tampoc ordenat *b*. ¿Quina és, doncs, la diferència? L'assoliment de "l'estat ordenat" no només requereix energia, sinó que implica l'ús i el maneig intensiu d'informació. ¿*On va cada cosa?* I només si tenim aquesta informació podem realitzar treball (canvi a un estat desitjat) a un cost energètic òptim. És aquest vincle entre l'energia i la informació el que cal aplicar també als nostres artefactes i sistema energètic per conferir-li un grau de flexibilitat suficient per a l'ús òptim del recurs energètic, com posteriorment es desenvolupa a la present tesi.

2.5.3 Intents fracassats de destronar l'Entropia

Degut a la radicalitat de la Llei de l'Entropia i el seu impacte tant en la ciència com en d'altres àmbits de coneixement, s'han dedicat molts esforços per qüestionar-la i intentar vulnerar-la. El més desafiant va ser el plantejat per J.C. Maxwell (1831-1879) a finals del segle XIX. Maxwell, qui no creia en la inevitable certesa que imposa la Segona Llei, va suggerir que un ésser intel·ligent, el "dimoniet" segons William Thomson (1824-1907), i prou diminut com per treballar amb molècules individuals podria violar la Segona Llei. Concretament planteja la següent hipòtesi: prenem un recinte aïllat que conté un gas a temperatura uniforme i està dividit en dos compartiments comunicats per una porteta. Segons la Llei de l'Entropia, a

temperatura uniforme no podria realitzar-se cap treball. Maxwell va tractar d'eludir la Segona Llei posant el dimoniet a la porteta que separa ambdós compartiments. Aquest dimoniet, de vista molt aguda, es dedicarà a obrir i tancar la porta, tot permetent que les molècules amb velocitat superior a la mitjana passin d'esquerra a dreta, i les molècules amb velocitat inferior, passin de dreta a esquerra. Com que les molècules amb més velocitat corresponen a un gas amb més temperatura, el gas del compartiment de la dreta s'anirà escalfant, i el de l'esquerra, refredant. Una vegada establerta aquesta diferència de temperatures, aquest gradient podria aprofitar-se per impulsar un motor tèrmic que realitzés treball. Així, partint d'un estat d'entropia màxima, o un estat d'equilibri total i energia uniforme, Maxwell proposava una inversió del procés entròpic sense utilitzar cap energia exterior, cosa que hauria violat la Segona Llei.

Diferents raons s'oposen a l'exercici que Maxwell fa amb el *seu dimoni*. Un dels més convincents és que el dimoniet seria tan petit que interaccionaria de manera important amb les pròpies molècules entrants. D'altra banda, la "porta" que permet el pas de molècules i el manteniment del gradient absorbirà calor i començarà a vibrar tant que no podria funcionar, tesis presentades per Marian Smoluchowski (1872-1917) i per Richard Feynman (1918-1988). Finalment, Stanley Angrist i Loren Hepler (1928-) posen el dimoni a prova i descobreixen que ni tan sols *ell* podria escapar-se de la Llei de l'Entropia, ja que per poder destriar entre les diferents molècules li cal una despesa energètica en informació (Angrist, S., Hepler, L., 1967). Així, si bé el dimoniet pot augmentar l'ordre net del gas (i disminuir l'entropia total), ho fa augmentant l'entropia de l'entorn. Així, es dona un augment d'entropia del sistema, de manera que compleix la Segona Llei i s'impossibilita la màquina de moviment perpetu.

Tanmateix, el dimoniet de Maxwell aporta una potent relació entre matèria, energia i informació. La intel·ligència no ha pogut crear gradients, però sí a la inversa: en els ordinadors els gradients s'han convertit en una espècie d'intel·ligència. Va ser Leo Szilard (1898-1964) qui va advertir que la presència o no d'una partícula representa un bit d'informació i obre, d'aquesta manera, el món computacional, una espècie d'intel·ligència basada en el flux d'energia, de manera que cada bit demana una energia de l'ordre de $K_B T \ln 2$, on K_B és la Constant de Boltzmann, T la temperatura absoluta, i \ln el logaritme neperià (Szilard, 1929).

La intel·ligència, doncs, ja sigui en ordinadors inconscients o en animals conscients, està relacionada amb el processament de dades en zones amb flux d'energia. Reduïda a la seva essència és possible que la ment, més que basar-se en el cervell, està possibilitada per aquest. És contextual; ment i matèria resideixen en un mateix domini (Schneider, E., Sagan, C., 2005).

D'altra banda, Ludwig Boltzmann (1844-1906), científic molt rellevant que, entre d'altres, va teoritzar la presència dels àtoms mig segle abans de les primeres deteccions empíriques, introdueix amb la *Llei dels Grans Nombres*, la teoria de la probabilitat al nucli de la ciència. La teoria cinètica de la calor imaginada pel científic vienès amb molta anticipació és acceptada per la comunitat científica gràcies a la

prova que aporta Einstein a partir del seu treball sobre el moviment brownià. Aquesta *probabilitat*, passa de l'ostracisme a ser considerada brillant i entra amb força a la termodinàmica i a la mecànica quàntica. A través del seu "Teorema h", Boltzmann reconeix la validesa de la Segona Llei, però "fins a un cert punt", de forma que en lloc d'assegurar que en un sistema tancat l'entropia va en augment, preferia la paraula "probablement", intentant convertir la Segona Llei en una probabilitat o llei estadística.

El seu coetani Johann Josef Loschmidt (1821-1895), que va avaluar primer la dimensió dels àtoms dècades abans de cap observació, va aportar la "paradoxa de la reversibilitat": Si la transició entre dos estats es basés realment en la probabilitat, tant probable seria un augment de l'entropia com una disminució. D'aquesta manera introdueix de cop, l'asimetria entre passat i futur, i dóna un cop definitiu a la dinàmica clàssica, i la seva simetria i reversibilitat. I ens introdueix la idea de "direcció" (o fletxa) en l'evolució dels sistemes.

2.5.4 Entropia i la fletxa del temps

James Lovelock (1919-) defineix l'Entropia com "una propietat física, com la temperatura o la pressió, associada incorrectament al desordre (Lovelock, 2001). És una mesura de proximitat a l'equilibri. Totes les coses vives mostren una entropia baixa: mantenen un nivell alt de desequilibri intern i abundant informació. En altres paraules, Lovelock presenta, en la "Hipòtesi Gaia", l'entropia com la distància a la mort tèrmica i al caos material. Anàlogament ens presenta les Lleis de la Termodinàmica d'una forma singular: 1a) no pots guanyar; 2a) no pots abandonar; 3a) només pots empatar en el zero absolut.

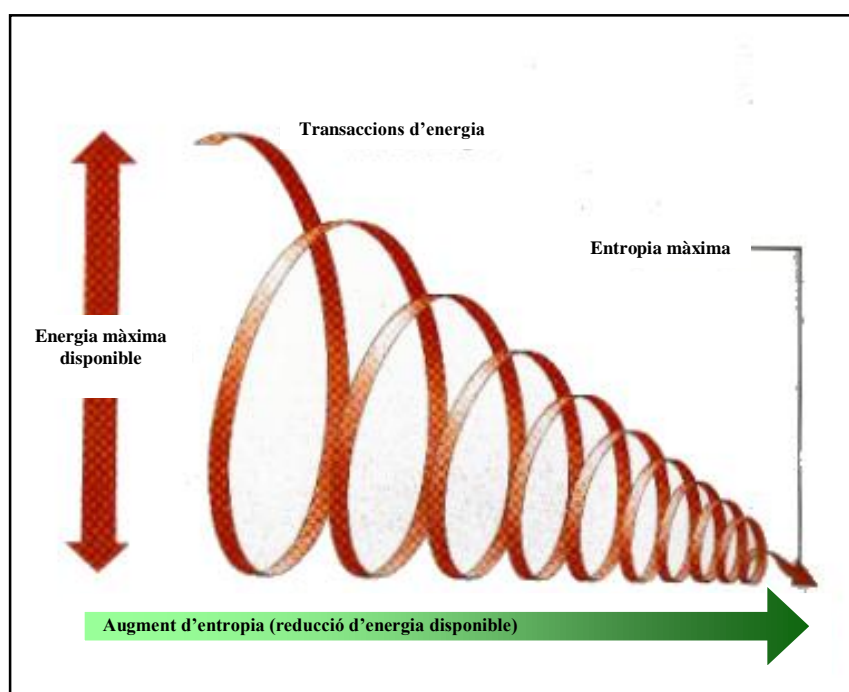


Figura 2.3 L'entropia és, per Lovelock, una mesura de la distància a l'equilibri. FONT: Lovelock, 2001

Per tant, afirma que “la quantitat d’energia útil a l’Univers té una tendència: sempre disminuir. Els processos naturals sempre evolucionen cap a l’equilibri químic; és a dir, un estat d’energia zero: quan menor sigui la seva energia, més gran serà l’entropia (...) Mantenir la vida d’un organisme requereix, per tant, l’absorció d’energia constant per *combatre* la Segona Llei. Certament, permet que tingui lloc l’autoorganització més impressionant; nosaltres som un dels seus exemples més complexos (...) Lamentar-se d’aquesta Llei seria tan insensat com utilitzar la lot durant la nit i pensar que les bateries mai s’esgotaran”.

Aquest plantejament contemporani té en Boltzmann el seu precursor. Per a ell, la baixa entropia era una propietat intrínseca de la vida. Loschmidt, a qui posteriorment dóna la raó Einstein, aporta una visió diferent en introduir el concepte de “condicions inicials” en els processos productors d’entropia. Els raonaments de Loschmidt, i per extensió els de Boltzmann, es veuen recolzats pel “teorema de recurrència” de Poincaré, segons el qual, “en un temps infinit, tot el que *pugui* passar, passarà”. Tanmateix, el mateix Boltzmann va acceptar que “la percepció del temps lineal no és més que una *il·lusió* d’alguns dels éssers d’alguna regió de l’univers” per poder fer compatible la Segona Llei sense invocar un canvi unidireccional de l’Univers des d’un estat inicial definit a un de final.

Aquesta visió aplicada a sistemes tancats genera perplexitat en observar, com fem, l’envelliment a mesura que passa el temps. La “interpretació de Copenhage”, promoguda principalment per Max Born (1882-1970), Werner Heisenberg (1901-1976) i Niels Bohr (1885-1962), aporta una visió pragmàtica respecte la visió termodinàmica de la mecànica quàntica: “les coses són així i podem descriure-les d’una manera matemàticament elegant, malgrat que les nostres ments, massa humanes, no siguin capaces d’abastar el marc de totes les connexions” (Wimmel, 1992).

Massa interrogants resten encara. Per exemple, si l’univers tingués, sense saber-ho, un exterior, aleshores podria comportar-se com un sistema obert i recuperar nivells de complexitat inicials. ¿Pot aquesta “font d’energia i, ahora, embornal” estar localitzada en els confins de l’Univers? ¿Quines *sorpreses* ens depara el 96% de l’energia de l’Univers no coneguda?

En la present tesi s’accepta la hipòtesi de la “fletxa del temps” en el rang d’aplicació del repte energètic actual a escala terrestre. I, parafrasejant a Lovelock, *fins i tot si no fos cert, aporta una metodologia d’anàlisi altament fructífera*.

2.5.5 Entropia energètica i Entropia informacional

La relació entre la informació i l’entropia no és trivial, i té especial rellevància. Per això, cal clarificar-ne alguns aspectes bàsics. Com hem vist, “Entropia” és un terme fonamental per a la Termodinàmica, però no només: també ho és en la Teoria de la Informació. En ambdós casos hi ha una gran similitud en la seva formulació matemàtica. Tanmateix, però, no hi ha un vincle entre ambdós més enllà del nom.

La Teoria de la Informació és una branca de la teoria matemàtica i de l'enginyeria elèctrica involucrada en la quantificació de la informació. Fou iniciada per Claude E Shannon (1916 - 2001) i ens permet trobar els límits fonamentals de les operacions de processament de senyal, com ara la compressió de dades de forma fiable i l'emmagatzematge i comunicació de dades. A efectes pràctics, doncs, permet valorar la capacitat de transmetre informació per un canal de comunicació d'acord amb el seu ample de banda i la relació entre senyal i soroll. La informació és tractada, doncs, com una magnitud física i John Von Neumann (1903-1957) introdueix el terme "entropia" per referir-se a la informació continguda en un flux de dades.

L'entropia informacional descriu la incertesa associada als caràcters dels missatges enviats. La unitat de mesura és el "bit" que és la informació continguda en un escenari conformat per dos estats amb probabilitat 0,5 per cadascun (com seria el llançament d'una moneda). I el "byte" és la unitat mínima amb significat (constituït per un nombre limitat de bits). Per a la termodinàmica, però, "l'Entropia" mesura un procés irreversible, de decreixement natural de la qualitat de l'energia a mesura que la matèria adopta distribucions cada vegada més probables que ja no són susceptibles de convertir-se en treball o estructura sense una nova aportació d'energia.

En general, l'entropia termodinàmica fa referència a la distribució d'energia a nivell atòmic i molecular. Així, una habitació ben ordenada no ha de tenir *necessàriament* menys entropia termodinàmica que la mateixa habitació desordenada. Això és així perquè l'entropia termodinàmica no té a veure amb els objectes macroscòpics, sinó amb les mesures microscòpiques mesurades per la temperatura. Per descomptat, ordenar l'habitació faria augmentar la temperatura ambiental, per la qual cosa, l'increment de temperatura sí que es relacionaria amb l'ordenació dels objectes macroscòpics; però es consumiria la mateixa energia si en lloc d'ordenar-se, es canviessin de lloc els objectes aleatòriament. En aquest cas, però, no *hi hauria treball útil* (ordenar), perquè l'estat final seria equivalent a l'inicial.

Així, doncs, la relació entre informació i energia genera avui molt de debat. Si bé és cert que, al menys, per esborrar un bit es requereix una certa quantitat d'energia, la producció d'un bit pot requerir a voltes una quantitat relativament gran d'energia, però en d'altres pot ser suficient un ínfim procés quàntic.

Acceptem la reflexió que fan els autors Schneider i Sagan (2001) "(...) els processos vitals, oberts a l'entorn, generen complexitat, concentren informació i intercanvien dades a mesura que s'amplia el domini de les seves operacions energètiques, afegint caos a l'entorn del qual depenen". I afegeixen "(...) La vida no és una mera entitat genètica; els gens per sí sols no fan més que cristalls de sal. La vida és un sistema obert i cíclic, organitzat per les lleis termodinàmiques. I no és l'únic".

Una **tercera hipòtesi** #3 de la Tesi sosté que la informació és la magnitud necessària, però no suficient, per governar la degradació del gradient energètic que maximitzi, en combinació amb els recursos materials, el treball realitzat per una mateixa producció d'entropia a partir de desenvolupar estratègies cícliques d'anticipació i

oportunitat. Aquest és un aprenentatge de com la natura gestiona els fluxos d'energia i matèria i ha d'incorporar-se als sistemes socials i tècnics construïts i configurats per la societat.

Així passa a la natura, on la vida es manté a un nivell baix d'entropia i desenvolupa cicles materials de degradació energètica en combinar de manera adequada (per tant, amb el concurs de la magnitud "informació") els bioelements (matèria) amb la radiació solar (energia) per produir un increment de biomassa (treball).

D'aquesta manera, l'eficàcia de la degradació del gradient energètic que representa la radiació solar interaccionant sobre un ecosistema dependrà de la complexitat material d'aquest ecosistema i, per tant, del seu grau d'informació. Un desert conté menys informació que la selva tropical i per això la selva és més eficient degradant el gradient solar (major increment de biomassa per unitat d'energia rebuda i menor temperatura residual). I d'aquest procedir, se'n pot aprendre per definir el model energètic de la societat.

Una altra manera de veure-ho és que "la informació aporta *qualitat* a l'energia lliure". La "informació" és la responsable d'alentir la fletxa del temps, de manera que per a un treball donat, a més "informació qualificada, menys energia es requereix" per realitzar un determinat treball. D'aquesta manera poden facilitar-se cicles successius de degradació de gradients que maximitzin el treball realitzat.

2.6 La Sistèmica

Arreu podem observar sistemes: un arbre, una comunitat humana, són exemples de sistemes, propers i, alhora, allunyats de la nostra interpretació del món, puix la ciència, fins ara, ha intentat abordar-ne l'estudi des d'una perspectiva reduccionista, a partir de l'estudi exclusiu de les seves parts. Antagònicament a aquesta concepció mecanicista, hi ha una altra interpretació física dels sistemes associada a la termodinàmica, que considera els sistemes com una entitat en sí, caracteritzada per magnituds que es refereixen a la seva totalitat (pressió, temperatura...) i no exclusivament a les parts que el componen.

Els sistemes són objectes complexos formats per parts en interacció mútua i articulats harmoniosament mitjançant una trama adequada de relacions que els doten de la seva entitat substantiva (Aracil, 1986). Un sistema concret està format per parts caracteritzades per una sèrie de magnituds a les quals s'associen unes variables x_1, x_2, \dots, x_n , cadascuna de les quals representa un determinat atribut, qualitat, propietat o característica del sistema i que, a més, és susceptible que se li assigni un valor numèric. Per això, les matemàtiques són les encarregades de subministrar el llenguatge que permet representar-los, aportant, a més, la seva capacitat deductiva.

També permeten estudiar el comportament del sistema en el temps, la seva evolució, és a dir, com se'n surt de les diferents situacions en què es pot trobar. Aquest coneixement ve donat pel registre de l'evolució de totes les magnituds rellevants que conformen, així, la *història del sistema*, és a dir, una descripció

externa que es pregunta sobre “el què”, sense qüestionar-se “el com”, talment fos una caixa negra.

Per estudiar la descripció interna del sistema, hem d'acudir als *models*. La construcció de models esdevé, per tant, el mètode que el sistemista utilitza per estudiar els sistemes. A l'hora de confeccionar-los, cal diferenciar entre aquells que parteixen de sistemes pertanyents al domini de les ciències físiques, i els que pertanyen a altres dominis del coneixement, com són els socials o humans. Els primers es basteixen d'un seguit de lleis físiques conegudes que possibiliten que el model sigui una representació més o menys fidel de la realitat i pugui, per tant, fer prediccions de gran precisió; en l'àmbit *humanista*, però, el model s'haurà de conformar a oferir suggeriments plausibles, mai prediccions, respecte el comportament de la realitat modelada. En aquest cas, el model en sí té encara més valor atès que és generador de coneixement pel fet d'integrar, en la seva gènesi, elements dispersos de la nostra experiència.

Per a qualsevol sistema, l'estructura que adopta és fonamental, atès que en determina el comportament. Principalment, parlem d'*estructures de realimentació i estructures jerarquitzades*. La primera es mostra en dues formes: realimentació negativa, relacionada amb els comportaments “propositius” o autoregulats; i realimentació positiva, que dóna comptes dels processos autocatalítics o de creixement. D'altra banda, les estructures jerarquitzades permeten organitzar estructures complexes mitjançant subestructures de diferents nivells de complexitat per on flueix la matèria i l'energia, cosa que permet simplificar molt la consideració d'un sistema complex.

A més d'aquestes aportacions, en gran mesura lligades a la tècnica, n'hi ha una altra que cal citar en aquest context, pel seu singular interès: són les estructures de reacció-difusió, que subministren mecanismes de processos aparentment “antientròpics”, com, per exemple, processos morfogenètics, on es forma ordre a partir d'un sistema prèviament homogeni i indiferenciat.

A part d'aquestes estructures bàsiques, la sistèmica matemàtica dota el modelista de tot un repertori de tècniques de tipus matemàtic –relacionades especialment amb les equacions diferencials- i informàtic, per mitjà de les quals construeix i analitza els models amb què el sistemista estudia la realitat. En totes aquestes tècniques juga un paper primordial l'ús del computador, que subministra el suport físic perquè el model –en principi matemàtic i abstracte- adquireixi una realitat física i concreta que en permeti l'experimentació exhaustiva.

En aquest ràpid repàs pels trets més característics de la sistèmica, cal indicar que la seva pretensió, en quant a mètode per a l'anàlisi de la realitat, és arribar a desenvolupar eines útils amb què pugui estudiar les propietats que mostren els *objectes* reals en tant que poden ser considerats “sistemes”. En aquest sentit, no es pretén la substitució d'un *tot*, el de la ciència reduccionista, per un altre *tot*, el de la perspectiva sistèmica; sinó que el canvi metodològic es basa en un intent d'afrontar problemes relacionats amb la complexitat dels sistemes, combinant la visió global

amb el coneixement de la ciència clàssica de tall reduccionista. La teoria de sistemes integra i supera l'anàlisi científica clàssica, donant un nou marc per analitzar els sistemes. Aquesta metodologia serà la que aplicarem al Sistema Energètic. Tan importants seran les parts com el tot, ja sigui des de la vessant conceptual i d'anàlisi, com tecnològica.

2.6.1 Anàlisi i síntesi de la Teoria General de Sistemes

L'actitud filosòfica, el punt de vista o el *principi d'explicació* (Morin, 1982) dominant en l'activitat científica clàssica (és a dir, en els darrers segles), es basa en l'aplicació sistemàtica d'un criteri de simplificació en què es conjuguen la disjunció i la reducció. La primera aïlla els objectes, no només entre ells, sinó també amb el seu entorn i l'observador. Anàlogament, el pensament disjuntiu aïlla les disciplines entre elles i origina la insularització de les ciències; d'altra volta, la reducció cerca allò elemental o comú a una classe variada de problemes, i així unifica el que és divers o múltiple. El pensament reduccionista fixa la seva atenció en els elements i no en les totalitats.

Aquest esquema ha portat, en els darrers cinc segles, a descobriments i fites admirables, però es mostra limitat a l'estudi de sistemes complexos, com els socials o els éssers vius. Qualsevol *nou* mètode d'explicació caldrà que integri "l'anàlisi" entesa des del punt de vista clàssic, però, alhora, cal que el superi. Ve a compte ara, reproduir unes paraules de Blaise Pascal (1623-1662), que constitueixen una de les formulacions més lúcides, i difícilment superables, del pensament sistèmic: "(...) per tant, essent totes les coses causades i causants, ajudades i ajudants, mediatas i immediates, i mantenint-se totes per un llaç natural i insensible que lliga les més allunyades i les més diferents, tinc per impossible conèixer les parts sense conèixer el tot, així com conèixer el tot sense conèixer particularment les parts" (Pascal, B. Trad. Zubiri, 2004).

És a dir, no es tracta d'explicar el tot, el sistema, mitjançant el coneixement de les parts, com pretén el reduccionisme amb preponderància d'allò analític; ni al contrari, explicar les parts a partir del coneixement del tot, pretensió de l'holisme, amb dominància d'allò sintètic; sinó més aviat de l'adopció d'un mètode que incorpori harmoniosament les dues opcions analítica i sintètica.

El mètode del sistemista no reposa amb exclusivitat sobre cap dels dos punts de vista, sinó sobre ambdós alhora, cercant la complementarietat sense anul·lar els antagonismes. Així, quan analitza, descendeix d'allò global a allò parcial, però sense perdre de vista el conjunt; quan sintetitza, ascendeix de les parts al tot, intentant no oblidar els elements bàsics. En aquest doble moviment d'anàlisi i síntesi trobem l'essència del mètode sistèmic.

Aquesta doble acció integradora s'ha de fer amb ajuda d'instruments formals adequats, com els que subministra la teoria matemàtica de sistemes, per a la construcció, per exemple, dels models.

2.6.2 Classificació de sistemes en funció del flux d'energia i de matèria

Per caracteritzar un procés ja hem vist com cal tenir en compte tant les seves parts fonamentals, com la seva globalitat. I, especialment important, és la interrelació amb el seu entorn immediat, que serà també un element definitori essencial a partir dels fluxos de matèria, energia i informació que s'estableixin. D'acord amb això, diferenciem (Taula 2.1) entre sistemes oberts (intercanvi d'energia i matèria), tancats (només d'energia) i aïllats (no hi ha intercanvi).

TAULA 2.1: Classificació dels sistemes en funció del flux d'energia i matèria. FONT: Elaboració pròpia

Sistema	Flux energia	Flux matèria
OBERT	SI	SI
TANCAT	SI	NO
AÏLLAT	NO	NO

Com hem vist i, d'acord amb la teoria clàssica de l'equilibri, l'evolució d'un sistema aïllat és una successió d'estats d'entropia creixent. L'augment de l'entropia pot interpretar-se, intuïtivament, com l'augment del desordre, és a dir, la pèrdua de diferenciació en el sí del sistema, l'evolució cap a l'homogeneïtat, la desaparició dels gradients. Per aquest motiu, l'aparent increment de complexitat que s'observa en alguns sistemes, com ara els vius, semblava "no acollir-s'hi". Aquest fet primer va servir per acotar el domini de la termodinàmica, però va acabar, finalment, esdevenint un cas de no-falsació i, per tant, de validació i universalització de la Segona Llei.

Alfred Lotka (1880-1949), un dels pioners en la termodinàmica dels sistemes vius, va suggerir que la vida era un "procés metastable" (Lotka, 1922), donant-li atribucions de "procés". La matèria viva es troba en un flux continu apartat de l'equilibri gràcies a l'energia solar. Posteriorment Lars Onsager (1903-1976) va evolucionar-ne el concepte contribuint a establir-ne les bases teòriques (Onsager, 1931). Una altra aportació fonamental va ser la del físic belga Ilya Prigogine i la seva escola, qui va constatar que cap sistema subjecte a un flux continuat de matèria i energia pot arribar a l'equilibri (Prigogine, 1977). Estan, doncs, posades les bases per estudiar els estats estables fora de l'equilibri.

2.6.3 Sistemes lluny, a prop i a l'equilibri

Un sistema a l'equilibri és, per definició, un sistema *mort tèrmicament*, atès que no hi ha gradients a explotar. Tot sistema aïllat tendeix a aquest equilibri, d'acord amb el segon principi.

Tanmateix, com hem vist, els sistemes vius, i alguns de no vius, presenten no només reticència a l'equilibri, sinó que fins i tot n'incrementen el gradient i augmenten la seva complexitat. Són sistemes que es mantenen en estats lluny de l'equilibri, i en funció de com de lluny n'estan, presenten escenaris d'evolució particulars. La frontera s'estableix en l'anomenada "regió d'Onsager" (op.cit).

Tal i com va establir Prigogine, quan les condicions de contorn impedeixen que un sistema arribi a l'equilibri, aquest s'instal·la en un estat de mínima producció d'entropia, això és, el més proper possible a l'equilibri possible. Aquests sistemes mantenen el seu estat estable de baixa entropia a partir d'importar i exportar matèria i energia a través de les seves fronteres. Són anomenats "sistemes dissipatius" i es defineixen com sistemes dinàmics de no equilibri, oberts i amb gradients interns. Degraden energia i disposen de cicles materials i energètics interns. Les estructures dissipatives assoleixen complexitat mitjançant l'exportació – dissipació- d'entropia a l'entorn.

Tanmateix, Prigogine identifica que, a mesura que el sistema s'allunya de l'equilibri i surt de la regió d'Onsager, experimenta canvis d'organització impredecibles, a voltes sobtats. Aquestes transicions ingovernables o bifurcacions en el territori de la no linealitat, augmenten amb la distància a l'equilibri fins arribar a un moment en què el sistema s'instal·la en zones de turbulència aleatòria i, fins i tot, en estats dinàmics macroscòpics estables.

Tanmateix, hi ha certa controvèrsia en quantificar la *llunyania* a l'equilibri. Prigogine no ho va concretar i autors prestigiosos com Eugene Yates i Arthur Peacocke (1924-2006) sostenen que tota la vida es troba en la regió termodinàmica propera a l'equilibri (Yates, 1987). De fet, hi pot haver sistemes propers a l'equilibri pel que fa a la distribució local de matèria, però allunyats de l'equilibri pel que fa a les reaccions químiques. L'atmosfera n'és un exemple, ja que la proporció d'oxigen està lluny de la que correspondria a un estat d'equilibri.

Aquesta discussió és aplicable a les diferents fonts energètiques que explotem per les nostres activitats socioeconòmiques. El gradient que proporciona el petroli mesurat en densitat d'energia per unitat de volum (MJ/l), combinat amb la seva disponibilitat percebuda com il·limitada i sense conseqüències mesurables durant bona part del s.XX ha possibilitat un desenvolupament socioeconòmic sense precedents a partir d'explotar tot el seu potencial amb tecnologia apropiada. La qüestió apareix si pensem en un substitut d'aquest recurs (ja sigui per esgotament de la font o de la saturació de l'embornal) que no té el mateix gradient per explotar. És el cas de, per exemple, l'energia solar, amb una densitat energètica molt menor, per bé que amb la propietat d'una gran ubiqüitat arreu del territori, una renovació anual i una minimització de generació de residus a la Terra atès que el seu origen és fora del nostre planeta. Un aprofitament d'un recurs de menys gradient portarà a una redefinició del ritme de les activitats socioeconòmiques que tendirà a una major harmonització amb els ritmes biològics que emprin aquell mateix recurs. És a dir, si associem l'ús de l'energia solar com quelcom més sostenible amb els ritmes de la natura es per la confluència de recurs energètic a explotar i, per tant, d'una mateixa llunyania a l'equilibri. Aquest concepte és clau per entendre la successió de les civilitzacions al llarg de la història. Així, fins avui, sempre s'ha passat d'un recurs de menor potencial energètic a un de major, essent-ne el màxim representant l'Era del Petroli. I el repte actual és gestionar una transició cap a l'explotació d'un recurs solar de menor gradient energètic.

La quarta **hipòtesi #4** de la Tesi posa de relleu que el recurs natural que una societat explota per mitjans tècnics en caracteritza el seu model socioeconòmic i organització, i no a la inversa. La Terra és un sistema tancat per la matèria i obert per l'energia, d'origen solar. La societat en el seu conjunt, com la resta d'ecosistemes, tendeix a maximitzar la seva complexitat a partir del màxim aprofitament del recurs energètic que explota en combinació amb els recursos materials disponibles amb un nivell d'eficiència creixent si disposa d'un període de temps suficient. La nostra civilització s'ha especialitzat en l'ús dels combustibles fòssils, de gran densitat de potència, però que l'ha fet comportar-se amb trets de sistema aïllat, apareixent no només límits de disponibilitat (en tractar-se d'una *reserva*, el seu ús implica la seva disminució), sinó també de capacitat d'embornal per la gestió dels residus generats. Tornar a comportar-se com a sistema obert per l'energia implica adaptar-se al flux solar i circumscriure l'activitat socioeconòmica al nou nivell de densitat de potència, sensiblement menor. D'acord amb aquest plantejament, la viabilitat del sistema en el temps (mantenir-lo amb un cert grau de complexitat i lluny de l'equilibri tèrmic), només pot assolir-se si es gestiona la transició cap al nou recurs a partir d'adaptar-ne l'activitat socioeconòmica abans del col·lapse de l'embornal o esgotament del recurs precedent. Es tracta, per tant, d'una transició en termes d'energia, però sobretot en termes de potència.

Aquest canvi pot gestionar-se amb anticipació i predicció o precipitar-se de manera inexorable i radical atès un esgotament sobtat ja sigui del recurs (esgotament de recursos no renovables a baix cost) o de l'embornal associat (capacitat d'absorció de CO₂, increment de temperatura, etc.). El repte és doncs, gestionar la transició de recurs a explotar. Aquest procés, però, no és lineal ni reversible. La dificultat de la situació pot ser compresa a partir de la següent figura 2.4, on veiem que durant l'evolució d'un sistema podem tenir diferents nivells de "guanys" per un mateix "cost" atès la irreversibilitat del procés quan s'arriba a certs nivells de criticitat:

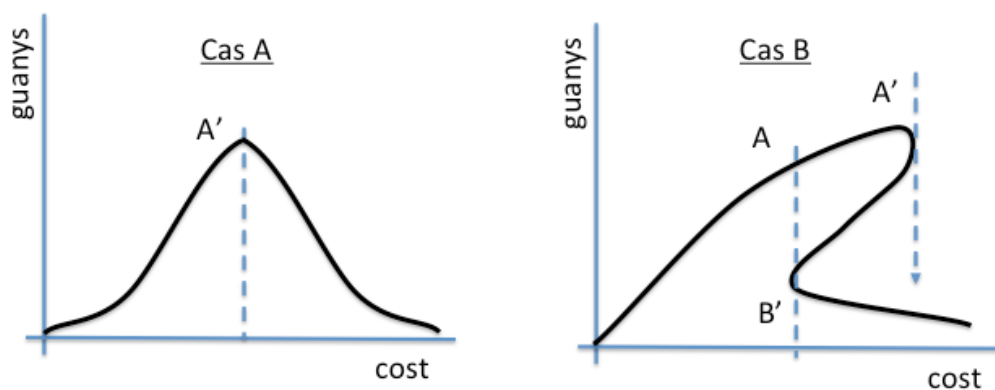


Figura 2.4: L'evolució de sistemes quan s'allunyen de l'equilibri poden mostrar camins no reversibles en arribar a certs valors crítics. FONT: Elaboració pròpia

2.6.4 Evolució de sistemes

Per continuar aprofundint en la sistèmica, seria convenient analitzar a continuació els diferents tipus d'estructura abans referenciats. Ens centrem a estudiar les estructures de reacció-difusió, atès els seus plantejaments innovadors i, especialment, la seva importància conceptual, que ha influït en la present tesi.

Com hem vist anteriorment, la física clàssica *condemna* un sistema aïllat a un augment d'entropia; el qual pot interpretar-se, intuïtivament, com la pèrdua de diferenciació en el sí del sistema, l'evolució cap a l'homogeneïtat, la desaparició dels gradients. Però és important assenyalar que aquesta situació es dona en sistemes aïllats. Podem il·lustrar aquest procés, de forma simplificada, en la següent Figura 2.5 on es representa un sistema amb dos recipients connectats per un petit orifici. En un d'ells hi trobem inicialment les molècules que podem anomenar "cercles", mentre que a l'altre hi trobem "creus". Aquesta situació inicial representa un estat "ordenat" de les molècules. Malgrat això, però, si es deixa evolucionar el sistema, al cap de poc temps tindrem la situació representada a la Figura 2.5.b L'ordenament inicial s'ha perdut, i s'ha arribat a una situació en què en cada recipient hi ha tants "cercles" com "creus", és a dir, una situació desordenada, homogènia. Observis com s'associa "homogeneïtat" amb "desordre" i "heterogeneïtat" amb "ordre", en contrast amb la idea intuïtiva. Aquest procés il·lustra, de forma elemental, el segon principi de la termodinàmica: augment d'entropia –desordre- en tot sistema aïllat, neutralització del gradient.

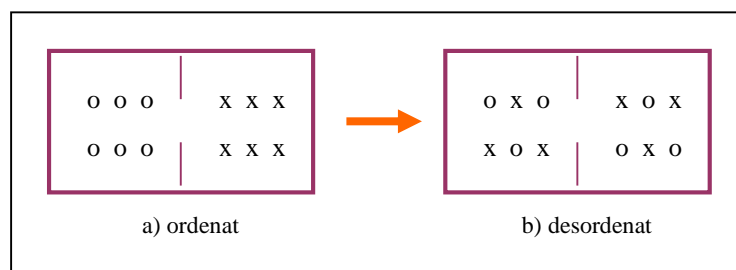


Figura 2.5: Evolució d'un sistema des de l'ordre (a) al desordre (b). FONT: Aracil

Malgrat això, en la naturalesa i altres sistemes amb alts nivells d'organització -éssers vius i sistemes socials- es manifesten processos en sentit oposat a l'anterior. És a dir, situacions que partint d'una homogeneïtat, en desordre, s'arriba a una situació final de cert ordre o heterogeneïtat i de manteniment de gradients. Aquest procés pot veure's, anàlogament, en la següent Figura 2.6:

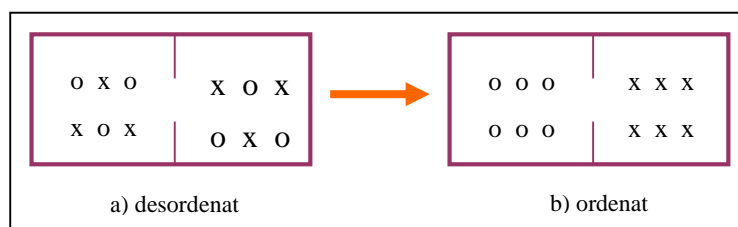


Figura 2.6: Evolució d'un sistema des del desordre (a) a l'ordre (b). FONT: Aracil

La qüestió que va plantejar Prigogine va ser: és possible establir un procés segons el qual es produeixi una evolució des del desordre a l'ordre? Que expliqui per què les "creus" van totes a un recipient, i els "cercles" a l'altre? i en aquest cas, a quin dels dos recipients aniran les "creus" i a quin els "cercles"? Plantejament que es recull en la Figura 2.7.

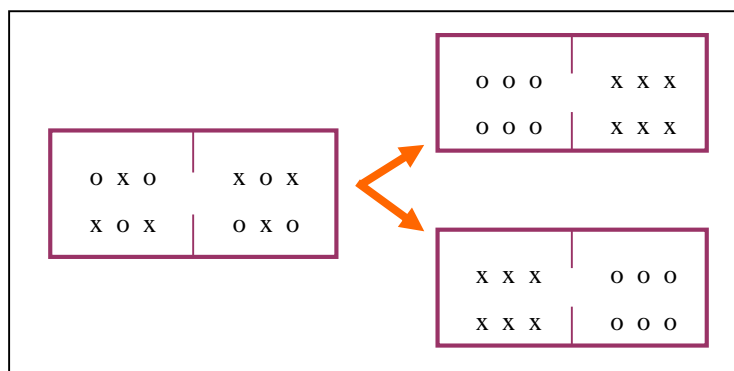


Figura 2.7. Estats simètrics que es poden assolir durant l'evolució des del desordre a l'ordre d'un sistema. FONT: Aracil

Per respondre a aquestes qüestions, Prigogine s'enfronta al problema d'establir les circumstàncies en què un sistema inicialment homogeni pot arribar a ser inestable, de forma que aquesta inestabilitat permeti que una fluctuació s'amplifiqui i el sistema evolucioni cap a una nova posició caracteritzada per la falta d'homogeneïtat.

El primer que constata el fisicoquímic belga és que aquests sistemes (sistemes vius) són termodinàmicament oberts, és a dir, estan en intercanvi constant de matèria i energia amb l'entorn, es troben lluny de l'equilibri (mort tèrmica) i presenten una situació estable, és a dir, un estat estacionari (estabilitat fora de l'equilibri). Observa que en aquestes condicions, es produeix certa *entropia positiva* que es dissipa a l'entorn, de forma que la variació total d'entropia del sistema en estudi és nul·la, mantenint la seva estructura. Així, si aïllem a un ésser viu privant-lo de l'intercanvi d'energia i matèria amb l'entorn, aquest organisme va cap a l'estat d'equilibri, sinònim de mort biològica (Luvie, 1979).

En aquestes condicions, s'obtenen el que Prigogine va anomenar "inestabilitats que trenquen la simetria". Prigogine, generalitzant idees d'Alan Turing (1912-1954), va estudiar els aspectes termodinàmics d'aquest problema i va establir les condicions sota les quals es dona, entre les quals hi juga un paper fonamental el fet que el sistema es trobi fora de l'equilibri termodinàmic (més lluny o més a prop, és una altra qüestió, com hem vist), és a dir, que disposi d'un gradient per explotar.

Al procés de generació d'un ordre espacial –o *espacio-temporal*–, Prigogine l'ha batejat com "ordre mitjançant fluctuacions". En efecte, des d'una situació inicial d'homogeneïtat, qualsevol fluctuació pot amplificar-se i fer evolucionar el sistema cap a un nou estat d'equilibri que comporti una certa ordenació espacial. Aquesta amplificació de la fluctuació està associada als bucles de realimentació positiva.

Per poder qüestionar-nos diferents estats d'equilibri, partim de la base que el procés ha de ser no lineal, atès que només aquests sistemes poden tenir diferents estats estacionaris. L'exemple estudiat en té, com a mínim dos de possibles: un d'estable i un altre d'instable. En realitat, però, n'hi ha com a mínim tres: dos d'estables i un d'instable, de forma que els dos estats estables són simètrics entre ells.

La simetria dels estats estacionaris és molt important, atès que ambdós tenen les mateixes possibilitats d'esdevenir el "nou estat estacionari". A quin d'ells evolucionarà el sistema dependrà del sentit de la fluctuació inicial, és a dir, un caos creador pel qual es crea ordre a partir del desordre (Prigogine, 1984).

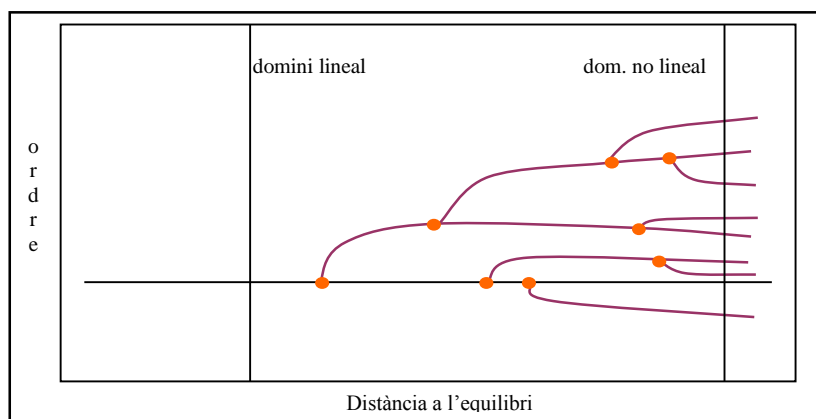


Figura 2.8: Ordre mitjançant fluctuacions. FONT: Prigogine, 1984

D'aquesta forma es combinen dos processos: un de naturalesa essencialment estocàstica, que dóna lloc a una fluctuació; i un altre essencialment determinista que, a partir de les condicions inicials determinades per la fluctuació, fan evolucionar el sistema cap a un determinat estat final. Així, en l'*ordre mitjançant fluctuacions* de Prigogine, tenim una fusió de processos deterministes i aleatoris, en què podem veure un mecanisme sintètic en què actuen, de forma alternativa, i parafrasejant Jacques Monod (1910-1976), *l'atzar i la necessitat* (Monod, 1971).

Les formes d'ordenament o estructuració que resulten dels mecanismes d'instabilitat que acabem de descriure, han estat anomenades per Prigogine, com "Estructures Dissipatives". Amb aquesta denominació, Prigogine ha volgut posar de manifest que aquestes estructures tan sols poden donar-se en sistemes oberts dissipatius. L'estructura dissipativa es manifesta com una fluctuació amplificada i estabilitzada pels mecanismes d'interacció amb el medi, que es manifesta com roman alimentada contínuament per fluxos de matèria i d'energia, essent seu de processos dissipatius.

En les estructures dissipatives de Prigogine (com en la morfogènesi *de Turing*, que no s'ha explicat, però és un procés anàleg a on en lloc de formar-se "ordre" es crea "forma") es dóna un procés anomenat, genèricament, de *reacció-difusió*, en què es posa de manifest un mecanisme pel qual es pot crear "ordre" o "forma" a partir

d'una situació inicial d'homogeneïtat o caos. Com veurem posteriorment, aquesta idea serà aplicable al model energètic.

2.6.5 Autocatàlisi. Retroalimentació positiva i negativa

En el mecanisme de Turing ens proposa el recipient anterior caracteritzat per dues concentracions de X en el compartiment 1 i el 2.

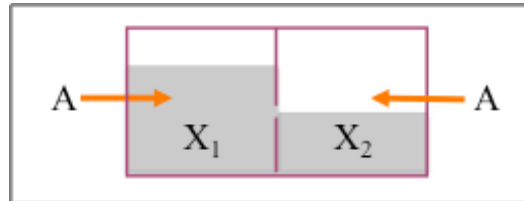


Figura 2.9: Esquema del *Mecanisme de Turing*. FONT: Elaboració pròpia

D és el coeficient que descriu la difusió de X des de la zona de més concentració a la de menys concentració, i que es poden expressar en les tres equacions següents, recollides en la Figura 2.10.

$$\frac{dX_2}{dt} = +D(X_1 - X_2) + aX_2^2A$$

$$\frac{dX_1}{dt} = -D(X_1 - X_2) + aX_1^2A$$

$$\frac{d(X_1 - X_2)}{dt} = -2D(X_1 - X_2) + aA(X_1 - X_2)(X_1 + X_2)$$

Figura 2.10: Formulació que descriu el *Mecanisme de Turing*. FONT: Elaboració pròpia

Els termes AX_1^2 responen al ritme de la reacció $A+2X \rightarrow 3X$, que és una reacció autocatalítica, en què la substància A es transforma en X quan està en contacte amb X_1 com més gran la concentració de X, més ràpidament es produeix X. Per tant el terme en D afavoreix l'homogeneïtat i el terme en A, la inhomogeneïtat. La frontera entre el predomini de D i el d'A ve donat per

$$A_{\text{crític}} = \frac{D}{a(X_1 - X_2)}$$

si $A < A_{\text{crític}}$, guanya l'homogeneïtat

si $A > A_{\text{crític}}$, guanya l'heterogeneïtat

Aquesta competició pot referir-se a molècules, però també a "capitals" (on 1 i 2 serien dos països o dues empreses), però també a "votants" (i en aquest cas 1 i 2 serien dos partits). Anàlogament, doncs, si $A > A_{\text{crític}}$, els capitals tendeixen a

acumular-se en un lloc en detriment de l'altre. Aquí, doncs, A representaria la distància a l'equilibri (en l'equilibri correspondria $A=0$); en $A = A_{\text{crític}}$ hi hauria un salt qualitatiu des de l'homogeneïtat a l'estructura.

2.7 Complexitat: cicles i xarxes

La complexitat ens envolta. Cap enfora i cap a dins, som sistemes complexos per on flueix matèria, energia i informació. Afecta en menor o major grau tant als sistemes naturals com als artificials i, podríem dir que el grau de complexitat juga un paper fonamental per la viabilitat en el temps d'un sistema.

D'acord amb Ricard Solé (1962-), la complexitat és un ordre irreductible forjat en la interrelació entre els elements que conformen el sistema, amb propietats emergents no explicables des de l'anàlisi aïllada de les parts, i certa invariància del tot malgrat els canvis i fluctuacions en les seves parts, de manera que les propietats i la identitat com a sistema perduren (Solé, 2008). Això fa que un sistema complex tingui més a veure amb la naturalesa de les interrelacions que amb la naturalesa dels objectes que interaccionen, malgrat que aquests darrers imposen algunes limitacions sobre el que pot ocórrer o no al nivell següent.

2.7.1 Xarxes

Les xarxes o els "grafs" han estat matèria d'investigació pels matemàtics. Durant segles se n'han estudiat les propietats en cerca de teories unificadores. Un graf és una representació abstracta d'un sistema qualsevol, en el qual els elements del sistema o nodes es relacionen entre sí mitjançant connexions que representen la presència d'una interacció.

D'aquesta estructura se'n deriven paràmetres característics molt importants per analitzar el propi sistema i la seva resistència a modificacions. Així per exemple, serà important per a un sistema qualsevol conèixer la freqüència amb què trobem nodes amb 1, 2, 3... connexions, és a dir, la "distribució de les connexions".

D'entre els principals investigadors trobem Paul Erdős (1913-1996), conjuntament amb Alfred Renyi (1921-1970), els quals treballant amb grafs aleatoris van descobrir que hi ha un nombre crític de connexions per sota del qual el sistema està fragmentat en petits subgrafs: el llindar de percolació; i, anàlogament, per sobre d'aquest llindar tots aquests sistemes tendeixen bruscament a unir-se, formant una gran xarxa. Aquesta "transició de fase" ens indica una frontera basada en el nombre de connexions que separa l'absència d'un Sistema a gran escala de la seva presència, és a dir, situacions o *fases* qualitativament molt diferents.

Stanley Milgram (1933-1984) aporta un dels primers indicis que ens descobreixen un fet percebut per tothom: el món és petit. Aquesta característica, inexistente en el cas de grafs aleatoris, implica que *tothom estigui més proper de tothom*. Va teoritzar el que s'ha conegut com "Sis graus de separació" que vindria a ser la *distància* entre dues persones qualssevol (Milgram, 1967). Un fenomen fonamental en aquestes xarxes no aleatòries, com ara serien les xarxes socials (ens relacionem entre

persones –*també*– de manera *no aleatòria*), és l'aparició d'un gran nombre de triangles, això és, interaccions tancades entre els nodes (ex. Tenim les connexions A-C, A-B i tanca el triangle la connexió B-C) (Travers, Milgram, 1969). Aquest fet dota el Sistema d'una gran estabilitat davant de canvis a l'atzar. Aquesta intuïció va ser corroborada per part de Watts i Strogatz (1998) i el seu model de món-petit. Van identificar que si sobre una xarxa ordenada es realitzaven certes reconexions a l'atzar o “dreces” la xarxa ordenada esdevenia un “món petit”, és a dir, les distàncies entre nodes aparentment molt allunyats es reduïen enormement.

Amb aquestes aportacions es va establir un criteri per saber si una xarxa era un “món petit” primer cal que la distància entre dos elements qualssevol fora similar a la que esperem d'una xarxa aleatòria com la d'Erdős-Renyi; la segona, que la freqüència de triangles fos molt més gran que la que esperaríem de la mateixa xarxa aleatòria. Aquesta aportació va obrir el món de la *cartografia de la complexitat*, que va permetre estudiar analogies entre sistemes naturals, socials i artificials. El “món petit” ha resultat ser una propietat universal de la complexitat de moltes xarxes reals. D'aquesta manera, un canvi en qualsevol element pot afectar, i fer-ho de manera molt ràpida, qualsevol altre element. Així, si bé permet transferir ràpidament una informació o un avenç, també ho pot fer un virus. Les nostres accions, malgrat que es realitzin a petita escala, poden afectar tot el sistema. I la nostra societat en xarxa ho possibilita cada vegada més.

Al mateix temps, la realitat es mostra amb una arquitectura de xarxes altament heterogènia: la gran majoria d'elements pràcticament no estan connectats; però a la vegada, uns pocs presenten un gran nombre de connexions. El grau d'heterogeneïtat pot mesurar-se determinant el nombre d'elements $N(k)$ del sistema que posseeixen 1, 2 o, en general k connexions. Si dibuixem la gràfica de $N(k)$ enfrontada a k , obtenim una visió estadística del sistema dominada per un màxim pels elements connectats només una vegada, seguits pels connectats dues vegades i així successivament. També és característic tenir a la gràfica una “llarga cua”, és a dir, molt pocs, però existents, nodes amb un alt grau de connectivitat.

Aquestes xarxes s'anomenen de “xarxes lliures d'escala” donat que la llei matemàtica que descriu la distribució de probabilitat de la seva connectivitat (o grau) és una llei potencial, amb mitjana matemàticament no definible. En aquestes xarxes, els connectors desenvolupen un paper especialment important, atès que són els que permeten la gran eficiència.

El coneixement de les xarxes va rebre un important impuls durant la Guerra Freda, ja que es volia crear una xarxa de comunicacions fiable i segura fins i tot a un atac nuclear. D'aquesta època en destaca la contribució de Paul Baran (1926-2011), pare de les xarxes de commutació de paquets i precursor d'Internet (Veà, 2013). Va contribuir també a conceptualitzar les *xarxes jeràrquiques* o centralitzades, les quals, en ser molt dependents de nodes altament connectats entre sí, són molt eficients, però fràgils, mentre que una *xarxa distribuïda*, on tots els nodes estiguessin més o menys igual de connectats als veïns, és la més estable. A mig camí, trobem les *xarxes*

descentralitzades, que combinen elements d'ambdós sistemes, i es mostren eficient i objectivament segures alhora (Baran, 1964).

Aquesta teoria de xarxes és aplicable a un rang de casos, des de la complexitat del cervell, a l'evolució, a sistemes tecnològics com internet o les xarxes elèctriques, a sistemes socials com l'economia i la governabilitat.

La xarxa elèctrica característica dels sistemes energètics fòssil i nuclear té una arquitectura de xarxa jerarquitzada, de manera que, si bé són altament eficients, tenen un alt risc. Són xarxes sense estructura lliure d'escala (no hi ha elements amb moltes connexions), però són un món petit amb el risc de col·lapse per la pèrdua d'algun dels nodes o *hubs* més connectats. L'evolució d'aquests sistemes, amb la contribució de les energies renovables, és esdevenir xarxes distribuïdes per mantenir alts nivells d'eficiència i de resiliència.

La pregunta clau en el món de les xarxes és ¿com s'origina aquesta estructura? Els físics Laszlo Barabási (1967-) i Reka Albert (1972-) van proposar un mecanisme de funcionament de la xarxa basat en un *procés d'amplificació*, de manera que qui té més connexions, té més possibilitats de generar més connexions (Barabási, L. Albert, R., 1999).

Aquest mecanisme genera xarxes lliures d'escala: amb el temps, la xarxa creix i els elements més connectats guanyen noves interaccions amb rapidesa i esdevenen connectors principals (o *hubs*) del sistema. El procés amplificador crea xarxes complexes a partir de regles molt simples. El problema, però, és que la desaparició d'algun d'aquests hubs pot comprometre la viabilitat de tot el sistema.

Un altre desenvolupament d'interès en la teoria de xarxes és l'anomenat *constructal principle* (Bejan, Lorente, 2006). Aquests autors partien de xarxes de distribució de fluids en organismes biològics: distribució de saba en les fulles dels arbres, distribució de sang en el sistema circulatori, distribució de l'aire en els bronquis i bronquiols... En aquests sistemes es tracta de veure com van variant els radis dels conductes en les bifurcacions successives, a mesura que la xarxa va esdevenint més densa i de vasos més fins. Un vas r es bifurca en dos vasos de radis r_2 i r_3 . A la pràctica es troba que el radi varia segons una llei de potències en funció del nombre de divisions que han experimentat els vasos per arribar fins al vas considerat. En les bifurcacions se satisfà que $r_1^3 = r_2^3 + r_3^3$

Aquestes lleis optimitzen el cabal de fluid a una dissipació d'energia donada. Es creu que s'ha arribat a aquestes lleis evolutivament, tot modificant l'acció dels gens que regulen la divisió dels vasos.

2.7.2 Cicles

Alfred Lotka (1880-1949) fou el primer científic que analitza l'autoperpetuació que opera en un cicle natural. Va ser el precursor de l'estudi de xarxes actuals, on els elements que les conformen es connecten mitjançant sistemes cíclics.

Harold Morowitz (1927-) enunciava el que podria ser la nova Llei de la Termodinàmica: en els sistemes en estat estacionari, el flux d'energia a través del sistema des d'una font fins a l'embornal, generarà almenys un cicle en el sistema (Morowitz, 1968).

D'acord amb Scheider i Sagan (op.cit) aquest enunciat connecta allò viu amb allò no viu. En incorporar complexitat en el temps, els cicles energèticament impulsats incorporen una memòria natural, un record dels seus estats passats.

El "metabolisme recapitula la biogènesi" diu Morowitz, és a dir, els cicles bioquímics de les cèl·lules actuals poden contenir reminiscències, no només dels seus avantpassats bacterians, sinó també dels cicles termodinàmics a partir dels quals van evolucionar les pròpies bactèries (més de 3.500 milions d'anys). Som pols d'estels i cascades d'energia.

Hi ha molts tipus de cicles, naturals i artificials, vius i morts. El cicle dia-nit, per exemple, exerceix la seva influència des de l'origen de la Terra, tot i que allargant lentament la seva durada a mesura que la Terra va alentint la seva rotació. Hi ha cicles amb propietats particulars com ara la "retroalimentació positiva": quan més A hi ha, més A es genera; i "retroalimentació negativa": la generació de B, inhibeix B.

En tots els casos, la sortida d'un procés representa l'entrada/inici d'un altre. Un residu esdevé substrat d'un nou procés. Així es creen xarxes autocatalítiques que, quan importen més energia i matèria de la que retornen, creixen. Els cicles, doncs, permeten incorporar *nous* elements a la nostra naturalesa, entre ells, contaminants, els quals assimilarem internament amb conseqüències impredecibles. Poden generar un salt evolutiu o la mort. I si els integrem, els mantindrem per molts d'anys, cosa que fa que cadascuna de les nostres cèl·lules sigui un autèntic museu vivent. Lotka (1922) formula matemàticament l'autocatàlisi, connectant la vida física i la química de manera innovadora i definitiva.

Aplicat a l'ecologia, Robert Ulanowicz (1943-) afirma que, si bé la Segona Llei genera complexitat en la natura, l'autocatàlisi és el factor que selecciona quina d'entre les noves combinacions seguiran formant part del sistema en evolució. És la seva noció "d'ascendència", la qual depèn del flux d'energia i de les connexions entre les parts del sistema, la que mesura el rendiment efectiu del sistema (Ulanowicz, 1981).

L'obra d'Ulanowicz suggereix que hem de contemplar-nos a nosaltres no només com a individus, o com a membres de la societat, sinó també com a part d'una xarxa autoreforçant. I això és aplicable tant als cicles cel·lulars que transcorren al nostre interior, com als cicles ecosistèmics que ens envolten. Aquesta idea té força a l'hora d'avaluar els aspectes socioeconòmics del model energètic.

2.7.3 Termodinàmica i complexitat

Jeffrey Wicken (1942-2002) evoluciona i integra els treballs de Lotka i Schrödinger respecte de la naturalesa termodinàmica de la vida. Va revelar les connexions existents entre l'autocatàlisi (xarxes connectades que s'autoperpetuen) i la termodinàmica tant en l'origen de la vida, com en la reproducció i l'evolució. Definia

els sistemes vius com “organitzacions autocatalítiques informades” (Wicken, 1987). L'establiment d'aquestes organitzacions autocatalítiques a tots els nivells de la vida (des de les seqüències d'ARN fins els ecosistemes), requereix del potencial termodinàmic i la complexitat molecular per a treure'n tot el partit. La tesi de Wickens és que la termodinàmica satura la biologia a tots els nivells. La Segona Llei, combinada amb els gradients imposats, proporciona a la vida el seu rumb a partir de les condicions inicials donades. Des de l'origen de la Vida fins als ecosistemes i la biosfera, inclosa la tecnociència humana, la vida és un procés impulsat, promogut, per la Segona Llei. Els fluxos d'energia successius i en cascada, combinats amb els cicles dels recursos materials i governats per la informació creen complexitat fora de l'equilibri, la mantenen i en fixen l'evolució en funció de les condicions de l'entorn i de la disponibilitat d'embornal que absorbeix el desordre generat.

Sobre aquest coneixement s'estableix la cinquena **#5 hipòtesi**, segons la qual per assolir alts nivells de resiliència i d'eficiència, les xarxes de distribució d'energia, en tant que xarxes, han de seguir models descentralitzats d'organització amb especial atenció a la naturalesa de les interconnexions entre els nodes de generació i consum que possibilitin la màxima eficiència, el manteniment de la inèrcia del sistema i la capacitat de resiliència. Aquesta “infraestructura facilitadora” és necessària i prèvia al desplegament de les energies renovables i genera impactes en el territori que forja un nou model de relació urbà-rural, en tant el potencial de l'aprofitament del recurs renovable és, en darrera instància, una funció del temps i de la superfície (o volum) disponible.

2.8 Termodinàmica del No Equilibri (NET)

Estudia la manera com els fluxos d'energia es relacionen amb les inhomogeneïtats del sistema i com donen lloc a estructures complexes, és a dir, a estructures que semblen diferenciar-se del seu entorn, en les quals es produeixen cicles interns dels fluids de què estan compostes, i que tendeixen a canviar i a créixer. Aquestes estructures inclouen els éssers vius i anomenarem “Termodinàmica de la Vida” (Schneider, Sagan, 2005).

Al voltant d'aquests gradients energètics, diferències naturals de temperatura, pressió i potencial químic, s'organitzen els ecosistemes, les economies, les reaccions químiques i els sistemes solars. La neutralització i la gestió que fa la natura dels gradients, traducció de “*nature abhors gradients*”, (op.cit.) implica que aquests tendiran espontàniament a desaparèixer, de manera especialment espectacular per l'acció de sistemes complexos autoorganitzats, que n'acceleren la reducció.

Històricament la NET s'ha estudiat com una ampliació de la termodinàmica tradicional, malgrat que, atès que els sistemes estudiats per ella estan oberts a un flux d'energia, pot afirmar-se que la ciència més bàsica i general és la NTE, i que la Termodinàmica Clàssica, n'és un cas particular on el flux d'energia és zero.

2.8.1 La natura gestiona els gradients

Sumades a les aproximacions *històriques*, trobem aportacions clau a la Segona Llei de la Termodinàmica fins als dies d'avui i esdevenen un filó per continuar explotant. És el cas del matemàtic alemany Constantin Carathéodory (1873-1950) qui demostra matemàticament el concepte “tots els fenòmens naturals són irreversibles (...) independentment de la naturalesa del sistema i de conceptes com entropia i temperatura”, formulació que es pot verificar a partir dels experiments inicials de Joule (Mikulecky, 1993).

Des de l'òptica de Carathéodory, l'experiment de Joule revela també un altre principi termodinàmic de gran importància: la diferència entre la memòria cíclica dels sistemes complexos i “l'oblit” de les condicions inicials per part dels sistemes aïllats.

Al 1965, George Hatsopoulos (1926-) i Joseph Henry Keenan (1900-1977) recullen les idees de Gibbs sobre el principi que integra les Lleis Zero, Primera i Segona de la Termodinàmica: La Llei de l'Equilibri Estable: “quan en un sistema aïllat té lloc un procés, després de la supressió de certs lligams interns, el sistema sempre assoleix un únic estat d'equilibri. Aquest estat d'equilibri és independent de l'ordre en què se suprimeixen els lligams i està caracteritzat per un valor màxim d'entropia”. Un enunciat similar al d'irreversibilitat, és el proposat per Joseph Kestin (1913-1993) com a “Principi unificat de la Termodinàmica” (Kestin, 1966).

Com apunten Scheider i Sagan (op.cit.) aquests enunciats formals de la Segona Llei inclouen l'entropia sense anomenar-la. Assenyalen una direcció i un estat final d'equilibri per a tots els processos, i esdevenen, per a aquests autors, l'avantsala de la seva pròpia aproximació a la Segona Llei (i que fem nostra): La natura *neutralitza* els gradients de magnituds intensives (com per exemple, la Temperatura, la pressió o el potencial químic).

El manteniment d'un sistema lluny de l'equilibri requereix més energia com més fort sigui el gradient tèrmic a mantenir, és a dir, com més lluny estiguem de l'equilibri tèrmic. Un exemple és l'explotació dels recursos fòssils, capaç de crear un gran gradient que ha permès un cicle expansiu de la societat que l'ha situat a un punt llunyà de l'equilibri i que, per tant, genera una gran demanda de recurs per mantenir-se. Contràriament, els gradients biològics, com el cos humà, són capaços de desenvolupar treball amb un salt tèrmic menor (ex. de 36°C). Aquest fet és fonamental perquè la resiliència d'un sistema és inversament proporcional al gradient que sustenta.

Entre les vies disponibles per contrarestar els gradients, trobem el desenvolupament d'estructures i processos altament organitzats. Amb connotació paradoxal, a partir d'anar-se organitzant internament, els processos complexos redueixen amb més eficàcia els gradients del seu entorn.

Malgrat la tendència espontània a degradar gradients, la natura té diversos recursos per produir i mantenir gradients, i gràcies a ells és possible la vida. Quan l'Univers tenia només tres minuts, era un gas homogeni d'hidrogen i heli. Els altres nuclis han estat produïts a les estrelles. Les estrelles -que suposen grans gradients de

temperatura i pressió- s'han format gràcies al treball del camp gravitatori. Més a prop de la vida, les membranes semipermeables poden produir gradients de pressió i de potencial elèctric gràcies a inhomogeneïtats en la concentració, però a partir d'una inversió energètica major que la que se'n podrà obtenir.

L'essencial de la vida és la producció, manteniment i aprofitament de gradients de potencial químic i elèctric. És aquesta una formulació elegant, simple i de conseqüències no trivials que afloren quan hom analitza la realitat sota el prisma de la reducció irreversible dels gradients, i permet una anàlisi més completa dels sistemes i del Món que no pas exclusivament amb balanços d'entropia.

2.8.2 Energia, Matèria, Informació

La gran capacitat de la Vida per mantenir-se viva amb un cost òptim de recursos energètics i materials ha despertat l'interès de molts científics, d'entre els quals cal destacar Nobert Wiener (1894-1964), fundador de la cibernètica, matemàtic de formació i molt influenciat per la biologia. S'hi sumen els treballs del fisiòleg W.B. Cannon (1871-1975) qui havia constatat la *capacitat homeostàtica* dels éssers vius, entesa com la capacitat d'aconseguir una successió d'estats d'equilibri fisicoquímics gràcies a processos o activitats oposades que s'equilibren recíprocament.

No és fins les aportacions d'aquests científics –entre d'altres-, que avui podem interpretar el caràcter *antientròpic* i la capacitat *homeostàtica* dels éssers vius a partir del flux d'energia solar i de matèries amb l'entorn, i a la presència d'estructures de realimentació.

L'energia solar a la Terra ha permès que la vida hagi assolit alts graus de complexitat, diferenciació i organització a partir d'aportar l'energia des de l'*exterior*, tot i ser de baix gradient. D'aquesta manera la Terra es comporta com un sistema tancat per a la matèria i obert per a l'energia i possibilita als éssers vius resistir la tendència *natural* a la degradació amb un alt grau de resiliència davant les pertorbacions de l'entorn.

D'altra banda, la recepció de l'energia de la radiació amb un espectre corresponent a uns 6.000K i temperatura aproximada de la superfície del Sol, i la seva emissió amb un espectre corresponent a 300K, produeix molta entropia, ja que per cada fotó que arriba del Sol, la Terra en re-emet vint, cadascun d'ells amb una vintena part de l'energia del fotó incident. Aquesta relació és conseqüència de la relació entre temperatures absolutes a les superfícies del Sol (6.000K) i la Terra (300K).

L'energia mitjana d'un fotó és $K_B T$, on K_B és la constant de Boltzmann. Com que la variació total d'entropia a l'univers ha de ser positiva, i com que l'organització dels sistemes vivents suposa una variació negativa d'entropia (ja que correspon a un augment de l'ordre), la producció positiva d'entropia que compensi la reducció entròpica de l'organització és una condició necessària per a la vida.

Respecte els materials, és especialment interessant com es van succeint cíclicament a través de les cadenes tròfiques, de forma que la Terra no coneix els *residus*, atès que cada *residu* és, alhora, substrat d'un altre procés. Aquesta alta eficiència és, sens dubte, fruit de l'especialització i la complexitat del Sistema, i per tant, en cap cas pot

estudiar-se des de la vessant de la mecànica clàssica. Els processos que es donen no són ni conservatius, ni reversibles, ni determinats i estan governats per un ús intensiu d'informació. També juga un paper fonamental en els sistemes de realimentació. Se'n mostra la seva estructura bàsica en el Figura 2.11.

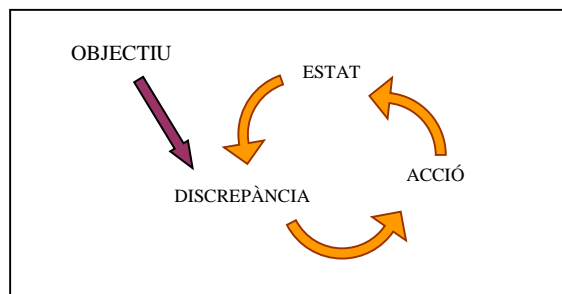


Figura 2.11: Cicle de realimentació. La informació interacciona en el procés de relacions causals modificant l'estat inicial, de manera que genera evolució en el temps. FONT: Elaboració pròpia

Observant aquesta figura ens adonem, primer de tot, que es tracta d'un cicle, és a dir d'una cadena tancada de relacions causals. Aquesta és una característica enormement important dels mecanismes de regulació.

En segon lloc, observem que el resultat de l'acció és una modificació de l'estat, del qual es requereix informació per saber si la *discrepància persisteix*. És aquí on la informació desenvolupa la seva tasca dins el procés: l'etapa que va des de l'estat a l'acció.

El procés funciona retroalimentant contínuament informació dels resultats de les accions per ajustar les accions futures a les necessitats que deriven de les modificacions resultants de les accions passades. Es tracta d'un procés cíclic, continu, al qual es pot associar una imatge en espiral, més que pròpiament circular, per destacar-ne el caràcter essencialment dinàmic. Tenim així un mecanisme causal circular que presenta una estructura més complexa que el mecanisme causa-efecte unidireccional considerat tradicionalment en les relacions causals simples, i les característiques més notables del qual són que la retroalimentació de la informació resulta afectada per l'actuació que aquesta mateixa informació desencadena; i que el caràcter circular de la cadena de relacions causals dóna lloc a importants problemes d'estabilitat.

En aquest context de prestigiar la "informació", Wiener (1948) posa de manifest que la informació i la comunicació són susceptibles de tractament matemàtic amb un rigor anàleg al de la física. Aquesta aportació teòrica manté connexions amb els treballs del contemporani Claude Elwood Shannon (1916-2001), que definien la Teoria de la Comunicació, en la qual es dóna una formalització matemàtica del procés de transmissió d'informació (Shannon, 1948).

Amb aquestes eines (termodinàmica, sistèmica, informació), Norbert Wiener (1894-1964) està en posició de manifestar que la regulació mitjançant retroalimentació

d'informació tracta, de fet, de lluitar contra la tendència de la naturalesa a la degradació d'allò ordenat, és a dir, la tendència d'augmentar l'entropia. L'entropia és una mesura de la desorganització, mentre que la informació subministra, mitjançant un conjunt de missatges, un mitjà (en el sentit d'instrument) per a l'organització. Per això, proposa considerar la informació com "l'entropia canviada de signe": com més probable és un missatge, menys informació conté.

Per tant, podem concloure que l'alta eficiència termodinàmica que presenten els sistemes biològics és deguda al seu comportament com a sistema. En paraules de Wiener, "els organismes, la vida i la ment no poden ser descrits adequadament en termes físics tradicionals de matèria i energia, sinó que requereixen el concurs dels conceptes addicionals de "control", "informació" i "retroalimentació". Només tenint-los en compte és possible assolir una descripció científica més completa (sense, en canvi, pretendre que l'esgoti) d'un organisme viu" (Wiener, 1961).

2.8.2.1 Llei de la Mínima Producció d'Entropia

En aquest procés gestionat per la informació, els organismes vius són capaços de desenvolupar diferents estratègies de funcionament. Una de les més importants és la que respon a la "Llei de la Mínima Producció d'Entropia", que ha estat teoritzada per Prigogine (1945, 1947), i afirma que tot sistema biològic termodinàmicament obert per la transferència d'energia i mantingut en un estat fora de l'equilibri té una mínima producció d'entropia quan se situa en estat estacionari (Struchtrup, 1998) mantenint la compatibilitat amb la viabilitat d'aquest sistema (Tschoegl, 2000).

Aquesta situació només pot entendre's amb un intercanvi permanent d'informació entre el sistema i l'entorn a partir de quantificar la incertesa, la complexitat, l'anticipació i la sensibilitat. Així, quan un sistema se situa en un estat estacionari presenta resistència a les modificacions, tot amortint les alteracions: si l'entorn esdevé més incert, el sistema actua fent-se més complex. Aquesta propietat resilient, però, pot veure's compromesa davant l'ampliació de certes fluctuacions, i que fan que el sistema s'allunyi de l'equilibri i entri en una situació de més desordre, desencadenant un nou ordre a partir del caos, és a dir, un desordre creador (Kondepudi, 1998). Són les estructures dissipatives, que es troben en l'origen dels estudis de sistemes complexos. Una altra possibilitat d'evolució d'aquests sistemes oberts és l'equilibri tèrmic, és a dir, la mort biològica, davant el col·lapse de l'embornal del que *roben* ordre per eliminació dels fluxos.

La Llei de Mínima Producció d'Entropia que actua a la natura és útil en aplicar-la a sistemes socials complexos. Per assolir un màxim d'eficiència en l'ús del recurs energètic disponible per una societat, en funció de les condicions de l'entorn, cal situar-se en un estat estacionari fora –però a prop– de l'equilibri, mantenint els fluxos de recursos i residus i augmentant la capacitat de resiliència evitant evolucions no predictibles en moments molt allunyats de l'equilibri i promoguts per fluctuacions inicials.

2.8.2.2 Llei de Màxima Energia

Però els sistemes biològics transiten des d'aquests estats estacionaris de mínima producció d'entropia a estats que gestionen processos i fenòmens que han de ser fets en un període de temps acotat, i per tant, cal que es desenvolupin amb tota la potència disponible (Paltridge, 1979). Aquesta aportació va representar un avanç teòric molt important en bioenergètica. Prové d'Alfred Lotka (1880-1949), qui va formular la *Llei de la Màxima Energia* (1925), segons la qual per al creixement, reproducció, manteniment i interrelació amb el medi de la biota no és tant important la màxima eficiència en la conversió energètica, és a dir l'eficiència, sinó el major flux d'energia útil, és a dir, la màxima obtenció de potència. Conseqüentment els organismes vius i els ecosistemes no transformen l'energia *només* seguint un criteri de màxima eficiència, sinó que optimitzen el sistema per assolir la màxima potència de sortida. Howard T. Odum (1924-2002) va proposar la Llei de Màxima Potència com a Quarta Llei dels sistemes energètics termodinàmicament oberts. Odum i Pikerton (1955) van demostrar posteriorment que les eficiències de la biota són sempre menors que la màxima possible en no superar mai el 50% del rati ideal.

2.8.2.3 Principi de mínima dissipació

Un altre dels principis de la termodinàmica del no equilibri és el Principi de Mínima Dissipació (Onsager i Machlup, 1953). Aquest principi planteja que la probabilitat d'una successió d'estats fora de l'equilibri per una fluctuació espontània es governa per les lleis dels processos irreversibles, sempre que les variables macroscòpiques que defineixen un estat siguin variables aleatòries gaussianes. Aquesta probabilitat pot ser expressada en termes de la funció de dissipació. La relació resultant, que és una extensió del principi de Boltzmann, mostra la significació estadística de la funció de dissipació.

2.8.3 Potència Vs Producció d'entropia

Un tema essencial en termodinàmica és el compromís entre potència i eficiència (Lebon, Jou, Casas-Vázquez, 2008). La dialèctica entre la Llei de Mínima Producció d'Entropia i la Llei de Màxima Potència ens defineix diferents escenaris on se situen tant els organismes vius com els artefactes que creem (des de les màquines tèrmiques que transformen energia als equips de consum).

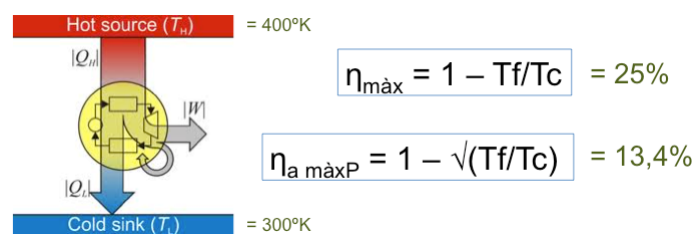


Figura 2.12: Cicle de Carnot amb rendiment màxim i a màxima potència. FONT: Elaboració pròpia

Sadi Carnot (1796-1832) aporta un límit per a l'eficiència de les màquines tèrmiques que s'assoleix per a processos reversibles, que són processos infinitament lents i, per tant, els correspon potència nul·la. Una anàlisi termodinàmica d'una màquina

tèrmica donada a partir de les equacions de Carnot⁵ permet definir el rendiment màxim teòric (o de Carnot) i el rendiment quan la màquina desenvolupa màxima potència (Carnot, 1824). Ho podem veure representat a la Figura 2.12.

Pel cas concret que el focus calent fos a 400K i el focus fred a temperatura ambient, 300K, les fórmules ens donen efectivament un rendiment màxim del 25% molt superior al rendiment del 13,4%, quan el sistema desenvolupa màxima potència.

Aquest fet ens introdueix un aspecte clau de la termodinàmica de processos irreversibles: el conflicte, per un sistema donat, de desenvolupar màxima potència o màxim rendiment (Smil, 2010).

Òbviament no és això el que volem, ja que necessitem l'aportació de treball de la màquina en un temps finit. Ara bé, com més ràpid és un procés, més entropia produeix i, per tant, més reduïda és la seva eficiència. En efecte, una producció $(\Delta S)_{irr}$ irreversible d'entropia implica desaprofitar un treball $W_{desaprofitat}$.

$$W(\text{desaprofitat}) = T_f (\Delta S)_{irr}$$

On T_f és la temperatura de la font freda de la màquina tèrmica.

Trobem, doncs, un conflicte entre eficiència i potència que expressem en la següent figura:

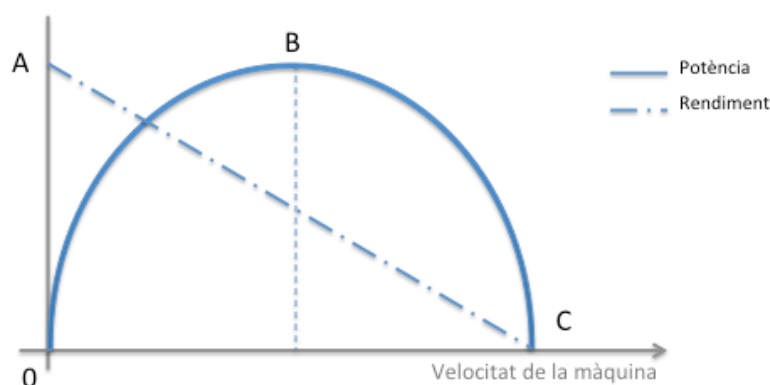


Figura 2.13: Representació gràfica del rendiment màxim i a màxima potència d'una màquina tèrmica. Es defineixen tres zones en què un sistema lluny de l'equilibri pot operar i que estan caracteritzades per una velocitat característica que en fixa el nivell d'eficiència i potència. FONT: Elaboració pròpia

Distingim dues zones: AB i BC. El punt A és teòric és el de "màxima eficiència" i correspon al cicle reversible, infinitament lent: té, doncs, velocitat 0, potència 0 i eficiència màxima. És a dir, aprofita al màxim el combustible i deixa el mínim de residus, però no produeix treball per tenir temps igual a zero. La situació B és la de "màxima potència", l'eficiència ha disminuït, es desaprofita treball i combustible i es

⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle (Octubre, 2014)

produeixen més residus, però aconseguim treball en un temps determinat. En les situacions reals es treballa entre A i B. Si el combustible és molt car i el preu a què es ven el treball és baix, convé treballar prop d'A; però si el combustible és barat i el preu a què venem el treball és alt, convé treballar prop de B. La situació "A" és la més "ecològica" i la situació "B" és la que produeix més benefici per unitat de temps.

En moments de bonança econòmica, d'especulació i de menyspreu a l'ambient i al futur, es treballa prop de B. També es treballa prop de B en temps de guerra, quan la potència és imprescindible per a la supervivència. En temps de crisi econòmica, de poc combustible o d'alentiment de l'economia, es treballa prop d'A. La zona BC reflecteix incompetència tècnica: augmentar la velocitat, redueix no tan sols l'eficiència, sinó també la potència. És una situació ruïnosa sense cap avantatge, duu irreversiblement a una crisi econòmica. Finalment, el punt "C" representa el col·lapse: córrer molt per a no anar enlloc, dissipació pura.

Veiem, doncs, que un ritme social massa ràpid duu a una situació energèticament problemàtica, de dilapidació irreversible de recursos a un ritme ràpid.

Els sistemes biològics acostumen a treballar entre A i B. L'estratègia A, per exemple, correspon a les espècies que produeixen pocs descendents, però en tenen molta cura, de manera que la taxa de supervivència és molt elevada, L'estratègia "B" correspon, en canvi, a espècies que produeixen molts descendents, però en no tenen cura, en sobreviuen pocs. Biològicament treballar en el punt "C" pot tenir interès en situacions en què l'organisme necessita calor, però no pas treball: és el cas d'animals que dormen durant l'hivern. En l'estat de letargia no tenen necessitat de fer treball (no corren, no cacen, no mengen, ... només bombegen un cabal baix de sang), però sí tenen necessitat de calor.

Veiem, doncs, que en considerar la termodinàmica de no equilibri –és a dir, de ritmes no nuls, de velocitats no nul·les- se'ns obra una nova visió. Ara, el criteri ja no és la "mínima producció d'entropia" o "màxima eficiència", sinó un compromís entre la potència màxima i la producció d'entropia mínima. En termes formals, el criteri seria:

$\text{maximitzar } \Phi \approx \text{Potència} - T_2 (\text{producció d'entropia})$

on Φ és entropia i T_2 la temperatura del procés.

Quan les necessitats de potència són petites, predomina la minimització de producció d'entropia, però quan són grans, la termodinàmica ja no és capaç de decidir per sí sola quina és la situació en què cal treballar. Això dependrà també de factors no termodinàmics, com ara el preu del combustible, el preu del treball, el preu del processament dels residus, el tant per cent de les taxes d'interès bancari a aplicar a les inversions necessàries per construir la central.

Observem, en conseqüència que ni la ciència ni la tècnica per elles mateixes tenen la capacitat de resoldre el problema de decidir el punt òptim de treball: hi intervé l'economia, la geopolítica dels combustibles, i les prioritats socials. Són aquests

factors científicament imponderables que fan totalment il·lusòria la idea que el problema energètic sigui exclusivament tècnic.

Una sisena **#6 hipòtesi** de la Tesi es fonamenta en l'observació que la natura bascula entre estats on desenvolupa màxima potència i d'altres de major eficiència per adaptar-se a les disponibilitats de recurs i incertesa de l'entorn. Tanmateix, l'economia fòssil s'ha instal·lat en un escenari permanent d'alta velocitat que requereix desenvolupar màxima potència. Però la percepció de límits en l'ús dels combustibles fòssils i el seu increment de cost fa necessària la translació cap a una situació de major eficiència i, per tant menor velocitat, que li confereixi major resiliència. Resoldre on situar-se com a societat dins el rang potència-eficiència que ens descriu i fixa la física pel cas dels combustibles fòssils depèn, en darrera instància, del model socioeconòmic que la societat es vol dotar. D'aquesta manera, no es pot deslligar el debat energètic de caràcter tècnic, del social i econòmic, ni en la seva anàlisi, ni en la seva gestió.

2.8.4 La Termodinàmica de la Vida

La Vida, com altres sistemes complexos energèticament organitzats, té com a funcions transformar matèria, energia i informació per tal de mantenir-se, realitzar treball i reproduir-se. L'evolució a formes complexes de vida i intel·ligents pot explicar-se per l'eficàcia de la vida com a sistema cíclic per optimitzar la reducció del gradient solar (o un altre gradient ambiental) tot a partir de mantenir i augmentar la seva "diferència de potencial" (incrementar, doncs, el gradient localment), amb l'efecte net d'alentir la fletxa del temps.

Tot sistema obert reflecteix no només la seva pròpia naturalesa, sinó també la de l'entorn amb què està connectat i del qual en depèn. Així la Vida no pot entendre's sense un flux constant d'energia, matèria i informació des de i cap al seu entorn.

A diferència d'un coet, on l'hidrogen reacciona violentament amb l'oxigen, el metabolisme de la vida canalitza aquesta reacció a partir de bucles retroactius autoregulats, és a dir, de manera més semblant a les piles de combustible. L'energia de l'hidrogen, per exemple, és aprofitada en el flux de protons a través de màquines moleculars situades en membranes on el gradient de potencial elèctric és molt elevat –de l'ordre d'un milió de volts per metre-. En passar d'un potencial elevat a un potencial baix, els protons cedeixen energia, que és aprofitada, per exemple, en l'ATP-asa mitocondrial per tal de fosforilar l'ADP (és a dir, combinar-ho amb un fofat i passar-ho a ATP), i acumular així energia. Si el gradient de potencial desapareix, per exemple perquè es fa un forat a la membrana mitocondrial on hi ha aquests motors, els protons ja no poden cedir més energia i la cèl·lula es mor. És un exemple de com la vida és possible explotant uns gradients de potencial elèctric i de potencial químic.

L'entropia, doncs, ens *amenaça* constantment i no ens esfumem, literalment, gràcies a l'energia d'activació, E_0 , que no permet a la segona llei trencar la força de l'enllaç molecular i, així, mantenir el gradient. Aquests tords, quan esdevenen cíclics, permeten el funcionament dels sistemes complexos, com és la Vida. No obstant, si

bé l'organisme no pot escapar-se'n, la Vida, com a entitat pròpia, ha trobat la manera d'escapolir-se'n: la reproducció. La "generació" de nous metabolismes capaços de complexar-se i autoorganitzar-se localment a partir d'aprofitar el gradient disponible.

En el nostre cas, el Sol, en les diferents manifestacions, és el proveïdor del gradient que permet mantenir la vida complexa com a sistema termodinàmic obert per a l'energia i tancat per a la matèria (tret d'intercanvis còsmics minoritaris d'influència molt limitada quantitativament però qui sap si qualitativa). Aquest fet es contraposa als combustibles fòssils que, en haver-se acumulat durant milions d'anys poden ser considerats recursos energètics propis del sistema Terra i que, per tant, la seva explotació, si fos "exclusiva", faria que la Terra es comportés com un "sistema aïllat", és a dir, tancat per l'energia i la matèria, i, per tant, col·lapsés. El problema que apareix en els darrers dos-cents anys és que l'ús del petroli malgrat no ser exclusiu ni majoritari, és tan intensiu que en un període de temps molt curt pot portar també a la no viabilitat del sistema per la incapacitat d'exportar l'entropia que genera – manca d'embornals-.

L'energia solar ens arriba amb una densitat coneguda i constant $1353\text{W}/\text{m}^2$ fora l'atmosfera i, en combinació amb els bioelements, genera cicles químics que metabolitzen aquest gradient i donen lloc a totes les formes de vida, sistemes termodinàmics no lineals allunyats de l'equilibri. La mort apareix quan el sistema ja no pot gestionar aquesta energia externa i el sistema evoluciona cap a l'equilibri tèrmic amb l'entorn.

Tanmateix, malgrat la mort tèrmica, encara queda una tasca primordial que realitzarà l'ecosistema: el reciclatge impecable de la matèria del cadàver (que es farà a diferents velocitats, per exemple, els ossos tarden molt a descomposar-se). Tot es reutilitza perquè l'entorn material de la vida és limitat. L'energia flueix, la matèria es recicla. La informació es manté i s'agrega en el flux de la història en forma de memòria. És el que alguns autors consideren la Quarta Llei de la Termodinàmica del no equilibri (Morowitz, 1968): en les regions de flux d'energia, la matèria descriu com a mínim un cicle. Aquests cicles, visibles en les estructures complexes naturals, com les vives, esdevenen el vehicle per a l'exportació de l'entropia

Com hem analitzat, quan s'imposa un gradient a un sistema, aquest seguirà diferents vies per a degradar-lo. Com és ben sabut, la radiació imposada a la Terra permet l'ús de l'energia lliure (la captura de fotons) per construir estructures complexes a través de l'autocatàlisi. L'energia capturada es dissipa en processos ulteriors: reproducció, fisiologia i comportament. A diferència dels combustibles fòssils, l'energia solar aporta un gradient acotat que permet crear complexitat molt a prop de l'equilibri (el cos humà, per exemple, està en estat estacionari a 36°C).

El biòleg i Premi Nobel Albert von Nagyrpold Szent-Györgyi (1893-1986) explica com és la captació d'energia electromagnètica per la matèria viva: "s'eleva un electró a un nivell superior. Aquest estat excitat té una durada curta, de manera que l'electró torna a caure al seu estat fonamental en 10^{-7} ó 10^{-8} segons, alliberant la

seva energia d'una manera o una altra (...). “(...) La vida ha après a atrapar l'electró en l'estat excitat, desacoblar-lo de la seva parella i fer-lo caure fins a l'estat fonamental a través del seu sistema biològic, utilitzant l'excés d'energia per als processos de la vida” (Szent-Györgyi Von Nagypold, 1960).

Aproximadament un de cada cinc-cents fotons que incideixen sobre la Terra esdevenen, a través de les bactèries, les algues i les plantes, energia química de la matèria orgànica (dada que coincideix amb la donada per Clive Pointing).

La setena **hipòtesi #7**, forjada a partir de l'aprenentatge de com gestiona la vida els recursos, planteja que la globalització socioeconòmica en el conjunt del planeta pot ser viable en el temps només si és capaç de comportar-se com un sistema obert per l'energia i tancat per la matèria. És a dir, no és ja qüestió d'utilitzar més eficientment els recursos fòssils, sinó que cal passar a aprofitar els fluxos d'energia provinents de fora el sistema Terra (el Sol) de manera passiva i activa, reciclar els materials i mantenir els embornals sota el seu nivell de saturació per poder exportar l'entropia. La gestió és possible per la contribució de les tecnologies de la informació i la comunicació i el control esdevé distribuït entre els diferents nodes del sistema. D'aquesta manera, el sistema socioeconòmic ha de, a més de bascular entre màxima potència i major eficiència en funció de la informació disponible de l'entorn i de les prioritats socials, adaptar-se a les característiques físiques, com és la densitat de potència, dels recursos energètics d'origen solar.

2.9 Mecànica quàntica

Al tombant de segle XIX cap al XX es viu una època especialment fructífera en el camp del coneixement que portarà canvis estructurals a la concepció del món, en la seva accepció més àmplia. A partir d'aquest moment la natura deixa de ser el mecanisme absolutament predictable suggerit per les Lleis de Newton. Sense pretendre, com marca l'estil d'aquest treball, entrar-hi a fons, sí cal referenciar-ne algunes de les principals idees.

Max Planck (1858-1947) exposa la Llei de Planck (1900), segons la qual un cos calent emet llum a totes les freqüències (o colors) en una proporció molt diferent de la predita per la física clàssica. Planck va proposar que, per a cada freqüència, la llum no era emesa de forma continua, sinó discreta, en múltiples d'una quantitat donada per “ hf ” (H: constant de Planck; i f: freqüència). Combinant aquesta idea amb els mètodes estadístics de Boltzmann aconseguí descriure la radiació del cos negre.

L'any 1905 Albert Einstein (1879-1955) postula el comportament corpuscular de la llum que, incloïa entre altres, l'efecte fotoelèctric o capacitat de la llum per alliberar electrons d'una superfície metàl·lica segons la longitud d'ona incident, la qual cosa li va merèixer, el 1921, el Premi Nobel de Física⁶.

⁶ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/ (Octubre, 2014)

Al 1926, Erwin Schrödinger (1887-1961) publica quatre articles que canvien el món de la física, tot aportant els fonaments matemàtics de la mecànica quàntica. L'equació d'Schrödinger regeix l'evolució de la funció d'ona del sistema. Aquesta funció descriu la probabilitat que, en fer una mesura, obtinguem un cert valor numèric per al resultat. Ara bé, el valor *probabilístic quàntic* és més subtil que el clàssic. En quàntica, el sistema es troba simultàniament en tots els estats possibles, i és en fer la mesura que passa tan sols a l'estat observat (el qual és, d'altra banda, indeterminat a priori).

Posteriorment Werner Heisenberg (1901-1976), que també havia proposat independentment de Schrödinger un formalisme fonamental per a la mecànica quàntica (la mecànica matricial) postula el "Principi d'incertesa de Heisenberg" (Heisenberg, 1927), segons el qual a escala subatòmica no es pot saber simultàniament i amb total precisió el valor de certs paràmetres, com ara la velocitat i la posició d'una partícula, degut al fet que el procés de mesura interfereix irremediament amb l'objecte mesurat.

El caràcter paradoxal de la probabilitat quàntica, tan diferent de la clàssica, queda molt ben il·lustrat per Schrödinger amb la metàfora del "Gat d'Schrödinger" (Schrödinger, 1935), un gat hipotètic tancat dins d'una caixa on un procés de mesura determina que es dispari o no un verí. El gat es troba en un univers probabilístic perquè està connectat a un aparell executor connectat, alhora, a partícules quàntiques que, abans de l'observació, es troben simultàniament en diversos estats. Per tant, caldria considerar-lo simultàniament "viu i mort", o "ni una cosa ni l'altra", abans no es realitzi la mesura⁷.

S'introdueix la idea –intel·ligible d'altra banda– que l'observador humà, per més objectiu que sigui, forma part del sistema físic que està observant i, per tant, la pròpia observació modifica allò observat. Com va senyalar Einstein, "el més misteriós de l'univers és que el puguem comprendre", "(...) Formem part de l'estructura que intentem observar, de manera que tan sols podem aspirar a una representació parcial d'ella: si l'entendem en un sentit pot ser que haguem de renunciar a conèixer-la en un altre" (Einstein, 1936).

De la coexistència de la mecànica quàntica i la termodinàmica sorgeix el que s'ha anomenat com a "paradoxa d'Schrödinger": ¿com poden els organismes perpetuar-se (i fins i tot incrementar) la seva organització en un univers regit per la Segona Llei? La resolució és simple: els organismes continuen existint i desenvolupant-se a base d'importar energia d'alta qualitat. S'alimenten del que Schrödinger va anomenar "entropia negativa", és a dir, de l'organització superior dels quanta de llum solar o de molècules llargues que, en ser trencades en el metabolisme, donen un increment d'entropia molt considerable. Atès que els organismes no són sistemes aïllats, ni tan sols tancats, incrementen la seva organització a expenses de l'augment d'entropia

⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Schrödinger's_cat (Octubre 2014)

del seu entorn. Té, doncs una connotació de context i jerarquia: la matèria i l'energia es transfereixen d'un nivell jeràrquic a un altre.

Aquesta idea té un precedent en Ludwig Boltzmann (1844-1906) quan va suggerir que "el gradient d'energia imposat pel Sol sobre el nostre planeta impulsa els processos de la Vida" (Boltzmann, 1886). La intuïció de Boltzmann el va portar a postular l'existència entre els organismes vius d'una competència, a l'estil darwiniana, per l'entropia que, amb l'aportació de Gibbs (1839-1903) caldria substituir per "l'energia lliure". Aquesta lluita porta els organismes a voltes a col·laborar entre ells i a unir-se per accedir millor a l'energia lliure. Sempre ha d'haver-hi energia lliure per mantenir la vida i també "informació" per poder qualificar-la. Aquests sistemes s'encarreguen d'extreure l'energia necessària per al seu propi funcionament. Aquestes "organitzacions funcionals" redueixen gradients, ja siguin aus, abelles, bacteris o internautes. Que els sistemes oberts persisteixin i augmentin en complexitat reflecteix la seva capacitat de gestionar i qualificar informació per obtenir energia. I, afegim, que els sistemes vius maximitzin l'eficàcia en la reducció del gradient reflecteix la seva capacitat d'adquirir, comunicar i processar informació.

D'aquesta manera, si bé és prou sabut abans de les aportacions de Schrödinger que l'entropia augmenta en sistemes aïllats, però no en sistemes tancats, ni en els oberts (a costa d'augmentar l'entropia del medi), amb ell es consolida la contemplació de la vida des d'una perspectiva termodinàmica, concepció que ha conformat el que ara coneixem com Termodinàmica del No Equilibri.

2.9.1 Extensió de la Primera Llei de la Termodinàmica

L'aportació d'Albert Einstein representa una extensió fonamental de la Primera Llei de la Termodinàmica. Einstein manifesta que "el Principi de Relativitat, conjuntament amb les Lleis Fonamentals de Maxwell, fan necessari que la massa d'un cos sigui una mesura directa del seu contingut energètic (la llum transfereix massa)". Durant els següents anys, Einstein formalitza aquest pensament "divertit i atractiu" (Einstein, op.cit) en una sèrie d'articles on s'estableix l'equivalència entre massa i energia, segons la fórmula $E=mc^2$

I fa notar que "aquest resultat és d'excepcional importància teòrica perquè la massa inercial d'un sistema físic i l'energia que conté esdevenen el mateix. Una massa inercial μ és equivalent al contingut energètic μc^2 " (Einstein, 1907). D'aquesta manera, qualsevol massa que esdevingui energia, ha de disminuir. Aquest fet no té importància en reaccions químiques (1 kg de carbó requereix de 3 kg d'O₂ per generar uns 30 MJ d'energia i, en aquest procés, la massa d'ambdós reactius es redueix *només* 10⁻¹⁰ kg). Contràriament, en les reaccions nuclears, la reducció és molt rellevant i, per tant, més fàcil de demostrar atesa la gran quantitat d'energia lliure. La fissió de 1 kg d'U²³⁵ genera sobre 8,2 TJ d'energia (unes 270.000 vegades més que la mateixa massa de carbó) i disminueix la massa en 1 gram, és a dir, un 0,1%

2.9.2 Efecte fotoelèctric

També molt rellevant, i motiu de rebre el Premi Nobel de Física l'any 1921, va ser l'aportació d'Albert Einstein en descriure matemàticament les quanta de llum o "Fotons". En un article publicat a la revista *Annalen der Physik* hi proposa una descripció matemàtica sobre la naturalesa discreta de la llum, constituïda per "quanta de llum" o, com va acabar anomenant-se, "fotons". Amb aquesta demostració es podia explicar l'efecte fotoelèctric i la presència d'una freqüència característica per cada material per sota de la qual no es produeix cap efecte.

Afegim com a vuitena **hipòtesi #8** sosté que d'entre les tecnologies disponibles per generar electricitat a partir de l'energia solar, el principi fotoelèctric (tecnologia fotovoltaica) és la forma més eficient de transformació atès ho fa de manera electrònica, sense necessitat de consumibles ni reposicions i amb poc manteniment. D'aquesta manera pot treure el màxim profit del recurs solar, ja de per sí amb clars avantatges com la seva ubicïtat, una taxa de renovació diària i una potència coneguda i regular.

2.10 Simbiogènesi

Una altra de les noves aportacions científiques contemporànies significatives per a la comprensió del món és, sens dubte, la Teoria de la Simbiogènesi, la qual té, en la investigadora Lynn Margulis (1938-2011) el seu màxim exponent. És una línia d'investigació forjada des de dècades amb, per exemple, les aportacions d'Ivan E. Wallin (1883-1969), que va explicar amb rigor el paper de la simbiosi en l'evolució. Un altre autor important és Jan Sapp (1954-), que en descriu la història des d'una vessant intel·lectual.

"Simbiosi" és el terme aportat pel botànic Anton de Bary (1831-1888) definit com "la vida en comú de tipus molt diferents d'organismes" (Bary, 1879). Avui, se sap que les cèl·lules animals i vegetals s'originaren per processos de simbiosi i com aquest procés explica la discontinuïtat en el registre fòssil. Tanmateix, l'impacte complet de la visió simbiòtica en la història de l'evolució, i especialment el seu impacte futur, encara no ha aflorat (Margulis, 2002).

La simbiogènesi és el canvi evolutiu mitjançant l'herència de conjunts de gens adquirits (Margulis, 1991) La simbiosi genera, per tant, novetat en el procés evolutiu. Desplaça conceptes tan arrelats com la "genètica de poblacions" i les seves derivades neodarwinistes "càrrega mutacional", "aptitud" o "coeficient de selecció" –entre d'altres-; qüestiona la mateixa "taxonomia", de manera que la divisió animal-vegetal, que preval des d'abans d'Aristòtil, s'està difuminant a que els animals i les plantes són molt més similars entre sí que amb tota la resta de tipus de vida terrestre, cosa que porta, avui, a una revisió del sistema de classificació basat en el criteri de l'evolució; així com posa en escac altres conceptes de la "Teoria Cromosòmica" com ara que "els gens estan en els cromosomes", quan avui se sap que els gens no han d'estar *necessàriament* en el nucli i que, tant les mitocòndries com els cloroplasts tenen també els seus propis gens.

Lynn Margulis fa evolucionar aquesta línia d'investigació amb l'anomenada "Teoria de l'Endosimbiosi en Sèrie (*SET – Serial Endosymbiosis Theory*)", la tesi central de la qual és que "l'origen de les cèl·lules amb nucli es correspon exactament amb la integració evolutiva de comunitats bacterianes simbiòtiques" (Sagan-Margulis, 1967) (Margulis, 1970). La primera publicació data del 1967 a la revista *Journal of Theoretical Biology* (sota el nom de casada Lynn Sagan).

La SET és, d'acord amb Lynn Margulis, "una teoria de reunions, de mescla de cèl·lules amb diferents històries i capacitats (...) una mena de sexe de fusió cel·lular (...) altament improbable, fins i tot més que l'existència dels seus progenitors" (...) "Però la simbiogènesi és molt més esplèndida que el sexe com a generadora de novetat evolutiva".

En terme "en sèrie" o "serial" en el nom de la teoria fa referència a l'ordre específic, avui ja conegut, en què quatre bactèries ancestrals es van fusionar per esdevenir la cèl·lula algal verda. La substància base de les cèl·lules, el nucleocitoplasma, descendeix dels arqueobacteris (fermentadors o termoacidòfils) [pas 1] i va representar la primera fusió potser farà 2.000 milions d'anys; els mitocondris respiradors d'oxigen evolucionaren a partir de simbionts bacterians (bacteris porpra o protobacteris) [pas 3]. Els cloroplasts provenen dels cianobacteris fotosintètics de vida lliure [pas 4]. Mentre hi ha un cert consens en aquests tres passos (1r, 3r, 4t), el [pas 2] referent als cilis –apèndixs nedadors-, resta encara avui en discussió. La interpretació majoritària és la de la "teoria de ramificació" no simbiòtica de Tom Cavalier-Smith (1942-), entre d'altres. Tanmateix, Lynn Margulis i col·laboradors, sostenen que durant la propera dècada, s'acceptarà la hipòtesi segons la qual tant les protuberàncies sensorials com molts d'altres apèndixs de les cèl·lules nucleades sorgeixen de la fusió original d'un arqueobacteri amb un bacteri nedador.

Moltes evidències científiques sostenen la SET, com ara les provinents de l'anàlisi de les pistes que els bacteris fusionats deixen a la cèl·lula actual de la seva anterior independència, per exemple, la forma i la mida; un estil i organització clarament bacterianes; i la seva presència discontinua dins la cèl·lula (les trobem massivament al citoplasma, però no al nucli); l'extraordinària similitud entre els gens d'ADN dels ribosomes dels mitocondris amb els dels bacteris respiradors d'oxigen que trobem encara avui vivint independentment, així com la gran similitud de l'ADN del cloroplast amb l'ADN del cianobacteri i com ambdós disten molt de l'ADN del nucli de la cèl·lula algal.

La SET, doncs, explica el salt discontinu en l'evolució, sense estadis intermedis ni progressius i en representa una innovació crucial per entendre l'evolució de la vida sobre la Terra. Queda, però, encara plantejada la gran pregunta: ¿com es va originar la vida? La cadena de la vida mai no s'ha trencat ni una vegada des de la seva formació. Abans de les cèl·lules hi havia sistemes similars a elles, una forma de pre-vida que, amb una font adequada d'energia dins una membrana lipídica, creixien en complexitat química i desenvolupaven mecanismes d'automanteniment (Morowitz, 1985).

Sota el regnat termodinàmic, el flux d'energia provinent de gradients (surgències volcàniques submarines a més de deu mil metres sota l'aigua, reaccions químiques amb les parets de les roques, radiació solar) va generar individualitat i diferenciació, i, per atzar, es va iniciar l'intercanvi de *parts* amb el seu entorn, la qual cosa va generar una (auto)evolució metabòlica (¿pot ser dins la membrana lipídica?) que va desenvolupar la capacitat per replicar-se i esdevenir, així, precursor de la vida cel·lular, tal com les molècules d'ARN evolucionen en el tub d'assaig, suggerint que l'evolució bioquímica podria haver precedit la vida. Les cèl·lules d'avui són, com diu Morowitz, “vertaders fòssils”.

Atenent al “principi de continuïtat”, Morowitz considera els eutòtrofs –bacteris que fan el seu propi aliment i generen la seva pròpia energia a partir de materials inorgànics- les primeres cèl·lules limitades per membranes, i postula que la forma quimioautotròfica de la Vida precedeix a la fotoautotròfica.

La Vida preserva un passat químic, i és el llenguatge de la química del carboni amb què està escrit el llibre de la Vida (Margulis, Op.cit.). I parafrasejant, afegiríem *la Vida te un futur indèstriablement unit també a la química del carboni* amb reptes com les emissions de CO₂ i la capacitat d'embornal.

Atenent als registres fòssils millor conservat de bacteris (croesferes), provinents del Sud d'Àfrica fa prop de 3.500 milions d'anys, ens indica que *només* van caldre 1.100 milions d'anys d'ençà que la Terra s'originés com un cos rocós amb atmosfera i oceans per a que la vida comencés a desenvolupar-se, reproduint-se i creixent. Si datem l'origen de l'Univers a partir de la singularitat del Big Bang farà entre 12 i 15.000 milions d'anys, suggereix la presència de la vida en el darrer quart de l'existència de l'univers farà uns 3.500 milions d'anys, el gènere Homo 2 milions d'anys (*Homo Habilis*) i l'espècie Homo Sapiens amb uns 150.000 anys.

La SET ens reposiciona a l'Univers. Els nostres ancestres, els gèrmens, eren bacteris. El bacteri més diminut i senzill s'assembla molt a nosaltres: metabolitza sense parar emprant els mateixos components: proteïnes, greixos, vitamines, àcids nucleics, sucres i altres carbohidrats. El bacteri més simple és molt complex.

Els processos de col·laboració, doncs, s'han mostrat cabdals per assolir l'èxit humà, especialment en els salts més significatius. També la competència ha estat un generador d'evolució, però en un entorn acotat, seleccionant entre un marasme d'oportunitats. No es pot, doncs, pensar el futur sense la contribució d'ambdós principis. Una novena **hipòtesi #9** sosté que els nous coneixements sobre la simbiosi i la cooperació i la seva contribució a l'evolució de les espècies alternant-se amb períodes de competència i de selecció natural, ens mostren com les dues estratègies poden ser també útils per la societat contemporània. D'una banda, la discontinuïtat en els processos evolutius convida a acceptar una ignorància irreductible dins qualsevol pretensió d'anàlisi del futur, i d'altra; la importància d'estratègies de col·laboració i simbiogènesi per assolir nivells superiors de complexitat que són més eficaços en la degradació del gradient energètic disponible.

2.11 La tercera cultura

La complexitat, la confluència de la ciència amb el seu entorn, és, probablement l'aportació més important de la sistèmica al coneixement, en tant que proporciona un nou paradigma on s'integren les ciències amb les humanitats. Aquesta nova visió va ser anomenada "tercera cultura" per C.P. Snow (1905-1980) com a pont i síntesi d'aquelles *dues cultures* força desconnectades que eren, en el seu cas, la cultura literària i la científica (Snow, 1959).

Posteriorment, Prigogine va adoptar aquest concepte, estenent l'aliança entre les matemàtiques i la física d'una banda, i les humanitats de l'altra (Prigogine, 1983). Parla de la "tercera cultura" com el medi on pot realitzar-se el diàleg indispensable entre els progressos realitzats en el model matemàtic i l'experiència conceptual i pràctica d'economistes, biòlegs, filòsofs, sociòlegs, demògrafs, metges, ... que tractin de descriure la societat humana amb la seva complexitat.

Afegiríem que, atès l'àmbit d'aplicació d'incertesa irreductible i d'abast global, la Tercera Cultura no només ha d'integrar les ciències i les humanitats, sinó també ha de significar la integració social, fent possible la suma de científics i experts al conjunt de la societat subjecte de la tecnologia.

La desena **hipòtesi #10** sosté que un canvi de model energètic necessita un canvi epistemològic que superi l'atomització del coneixement i la separació de disciplines que ha portat la ultra especialització actual. Només amb una concepció de l'activitat humana dins els ecosistemes, que combini l'anàlisi del tot i de les parts de manera integradora i aportï una nova mètrica d'avaluació del progrés social i de la economia es podrà bastir el debat sobre el canvi de model energètic i les conseqüències socials, ecològiques i econòmiques.

2.12 La superació de la visió mecanicista

La visió mecanicista del món ha estat explicada anteriorment. Hem analitzat l'obsolescència d'aquesta concepció com a explicació de *tots* els fenòmens. És, doncs, necessari oblidar-nos-en en aquells àmbits d'aplicació fora del seu domini. Les característiques fonamentals del mecanicisme són el *determinisme*, els *sistemes conservatius* i la *reversibilitat*. Aquests elements porten, segons es creia, a la "raó", i fan que el racionalisme esdevingui la ideologia de l'època. És la Il·lustració, o el *segle de les llums* (s.XVIII). Això, que ha anat molt bé per assolir molts avanços, és inviable per estudiar, entre d'altres, fenòmens altament complexos, atès que no es poden experimentar de manera reversible, col·lapsant el propi Mètode Científic.

El primer punt que va qüestionar aquesta visió mecànica del món, va ser la consideració dels xocs inelàstics entre partícules. Un altre punt de consideració va ser la irreversibilitat que es manifesta inherent a qualsevol fenomen físic. Però la principal ruptura amb l'esquema de la mecànica clàssica, prové de la pròpia física. Primer, la termodinàmica neix associada a una nova tipologia de màquines: les màquines tèrmiques, que tanta importància tingueren per a la naixent Revolució

Industrial, especialment, la màquina de vapor, els precursors de la qual foren Thomas Newcomen (1663-1729) i James Watt (1736-1819).

Aviat es va veure que la mecànica clàssica no podia tractar aquests progressos. En aquest moment, s'assenten els principis de la termodinàmica clàssica per acció de l'enginyer francès Sadi Carnot. En les màquines tèrmiques es genera moviment a costa de la transformació de l'energia tèrmica –calor- en energia mecànica. Però aquest procés és, de per sí, irreversible i origina l'aparició d'una nova magnitud: l'entropia. A la natura, qualsevol fenomen origina l'increment d'aquesta magnitud física i s'estableix, així, una direcció única en el temps, que ja *mai més tornarà a ser simètric*, per la qual discorren els fenòmens naturals i que els aboquen a l'equilibri tèrmic -mort-. L'augment d'entropia d'un sistema aïllat subministra un indicador del sentit d'evolució del fenomen.

Posteriorment, aquesta “Termodinàmica clàssica” s'ha considerat un cas particular de la “Termodinàmica del No Equilibri (NET)”, on el flux d'energia amb l'entorn és zero. Aquí rau la importància de la termodinàmica dels processos irreversibles fora de l'equilibri per entendre l'evolució dels sistemes complexos, com ara la Vida. I, finalment, el cop definitiu al mecanicisme ve propiciat per la Mecànica Quàntica.

El determinisme ens serveix per descriure el món, però no per crear coneixement. La seva superació porta de la mà nous dispositius tecnològics per aprofitar els recursos energètics renovables i requereix d'enterrar la pretensió antropocèntrica de controlar i preveure la naturalesa de manera certa, per esdevenir una societat conscient del seu rol i responsabilitat dins els ecosistemes.

“Déu no juga als daus”. Aquesta lapidària sentència d'Einstein dirigida a Max Born està forjada per la seva fe en el determinisme. Però, tal i com indiquen Schneider i Sagan (op.cit.), “Déu no només juga als daus en el casino còsmic de la realitat material, sinó que és un jugador compulsiu”.

La biologia evolutiva, la termodinàmica (del No Equilibri) i la mecànica quàntica integren l'atzar en les seves visions del món. Pot ser que això sigui un reflex de la nostra ignorància, la nostra incapacitat per trobar la raó real que s'amaga darrera dels fenòmens; o pot ser que l'atzar sigui irreductible, real i primari.

A tall de resum, podem dir que la cosmovisió mecanicista nascuda de la Il·lustració legitima l'explotació màxima dels recursos energètics i materials i ha forjat la societat occidental, aportant un model epistemològic d'èxit basat en el mètode científic. Ara ha entrat en crisi social, econòmica i ecològica estructural i de matriu energètica. La seva superació requereix d'una nova cosmovisió que només pot estar basada en, com va ser el seu moment la Il·lustració, els principis científics contemporanis, recollits en els Principis Biològics de Gestió dels Recursos, i que integren la incertesa irreductible del coneixement, la irreversibilitat dels processos, l'entropia energètica i material i la complexitat social, econòmica i ecològica d'un món circumscrit en els límits dels recursos disponibles, que utilitza tecnologia adequada per la seva transformació i adequació i que ha de comptar i integrar tots els agents afectats per la decisió que es prengui. És necessària la transició des d'una

societat altament dependent de petroli a una basada en l'aprofitament de recursos autòctons i renovables. I la biomimètica, és una eina de treball sobre la qual basar les propostes tecnològiques i socioeconòmiques de la transició.

2.13 Principis Biològics de gestió dels recursos

Definim en el marc de la tesi els Principis Biològics de Gestió dels Recursos aplicat al model energètic com la formació d'estructures complexes (societat i model socioeconòmic) en un estat estacionari fora, però a prop de l'equilibri tèrmic a partir de, com a mínim, un cicle de degradació del gradient energètic solar incident (d'origen de fora del Sistema) i de la seva interacció amb els recursos materials (orgànics vius, orgànics morts i inorgànics) finits i reciclables (disponibles a dins el Sistema) a partir de la gestió i la mediació de fluxos d'informació durant un període de temps suficientment llarg. El Sistema resultant desenvolupa propietats emergents i estratègies d'anticipació i oportunitat per evolucionar adaptativament davant la incertesa de l'entorn, augmentar la seva resiliència i, així, afavorir la seva viabilitat en el temps obtenint el màxim treball resultant possible, a una velocitat i eficiència apropiada i variable –segons les condicions de l'entorn–, reduint l'energia residual emesa i minimitzant la generació de residus materials i, per tant, amb una menor necessitat d'embornal.

Aquest aprenentatge fruit de l'observació de com la natura gestiona els recursos energètics, materials i d'informació és la base per afrontar la qüestió energètica i definir, anàlogament en el marc de la tesi, les *Smart Grid* o *Smart Cities*, com la formació de ciutats i societats complexes viables, integrades amb els ecosistemes a què pertanyen, a partir de l'ús dels fluxos d'energia renovable i la seva interacció amb els materials disponibles en un procés gestionat per fluxos d'informació actius (sensors, tractament de dades, actuació) i passius (comportament humà) que li permetin adaptar-se evolutivament a la incertesa de l'entorn local i global canviant, apareixent propietats emergents i desenvolupant estratègies d'anticipació i oportunitat per afavorir la seva viabilitat en el temps obtenint un màxim de productivitat, a una velocitat i eficiència apropiada i variable i minimitzant la generació de residus i la necessitat d'embornal.

2.14 Resum d'hipòtesis de la Tesi

Al llarg d'aquesta primera part s'han anat assenyalant els principals components del coneixement contemporani que superen la visió mecanicista del món i aporten la base conceptual per bastir la resposta a la complexa qüestió energètica.

La tesi principal és “la necessària transició des d'una societat altament dependent de petroli a una basada en l'aprofitament de recursos autòctons i renovables”. I es desgrana en diferents hipòtesis que permeten afrontar la qüestió des de diferents àmbits. Es recull a continuació i en forma de resum les hipòtesis plantejades per la seva acceptació o refús.

TAULA 2.2: Relació de hipòtesis de la present tesi. FONT: Elaboració pròpia

Nu.	Pàg	Hipòtesi
#1	19	Una primera hipòtesi #1 sosté que la crisi d'un model social donat esdevé estructural (social, ecològica, econòmica, política) quan és deguda a un canvi epistemològic de les bases que van conformar-lo. I, per tant, cal disposar de noves eines a partir del coneixement contemporani a l'hora de bastir la nova concepció del món, amb totes les seves implicacions i conseqüències socials, polítiques i econòmiques. Aquest coneixement no pot ser entès sense la combinació d'una anàlisi de les parts, de tall especialista, amb la síntesi del conjunt, amb visió transversal
#2	27	Una segona hipòtesi #2 sosté que l'anàlisi del model energètic es caracteritza per un alt nivell de complexitat i incertesa, per la qual cosa requereix metodològicament d'una extensió del mètode científic clàssic per incorporar al conjunt d'agents involucrats i afectats d'una manera adequada.
#3	35	Una tercera hipòtesi #3 de la Tesi sosté que la informació és la magnitud necessària, però no suficient, per governar la degradació del gradient energètic que maximitzi, en combinació amb els recursos materials, el treball realitzat per una mateixa producció d'entropia a partir de desenvolupar estratègies cícliques d'anticipació i oportunitat. Aquest és un aprenentatge de com la natura gestiona els fluxos d'energia i matèria i ha d'incorporar-se als sistemes socials i tècnics construïts i configurats per la societat.
#4	41	La quarta hipòtesi #4 de la Tesi posa de relleu que el recurs natural que una societat explota per mitjans tècnics en caracteritza el seu model socioeconòmic i organització, i no a la inversa. La Terra és un sistema tancat per la matèria i obert per l'energia, d'origen solar. La societat en el seu conjunt, com la resta d'ecosistemes, tendeix a maximitzar la seva complexitat a partir del màxim aprofitament del recurs energètic que explota en combinació amb els recursos materials disponibles amb un nivell d'eficiència creixent si disposa d'un període de temps suficient. La nostra civilització s'ha especialitzat en l'ús dels combustibles fòssils, de gran densitat de potència, però que l'ha fet comportar-se amb trets de sistema aïllat, apareixent no només límits de disponibilitat (en tractar-se d'una reserva, el seu ús implica la seva disminució), sinó també de capacitat d'embornal per la gestió dels residus generats. Tornar a comportar-se com a sistema obert per l'energia implica adaptar-se al flux solar i circumscriure l'activitat socioeconòmica al nou nivell de densitat de potència, sensiblement menor. D'acord amb aquest plantejament, la viabilitat del sistema en el temps (mantenir-lo amb un cert grau de complexitat i lluny de l'equilibri tèrmic), només pot assolir-se si es gestiona la transició cap al nou recurs a partir d'adaptar-ne l'activitat socioeconòmica abans del col·lapse de l'embornal o esgotament del

		recurs precedent. Es tracta, per tant, d'una transició en termes d'energia, però sobretot en termes de potència.
#5	50	Sobre aquest coneixement s'estableix la cinquena #5 hipòtesi, segons la qual per assolir alts nivells de resiliència i d'eficiència, les xarxes de distribució d'energia, en tant que xarxes, han de seguir models descentralitzats d'organització amb especial atenció a la naturalesa de les interconnexions entre els nodes de generació i consum que possibilitin la màxima eficiència, el manteniment de la inèrcia del sistema i la capacitat de resiliència. Aquesta "infraestructura facilitadora" és necessària i prèvia al desplegament de les energies renovables i genera impactes en el territori que forja un nou model de relació urbà-rural, en tant el potencial de l'aprofitament del recurs renovable és, en darrera instància, una funció del temps i de la superfície (o volum) disponible.
#6	58	Una sisena #6 hipòtesi de la Tesi es fonamenta en l'observació que la natura bascula entre estats on desenvolupa màxima potència i d'altres de major eficiència per adaptar-se a les disponibilitats de recurs i incertesa de l'entorn. Tanmateix, l'economia fòssil s'ha instal·lat en un escenari permanent d'alta velocitat que requereix desenvolupar màxima potència. Però la percepció de límits en l'ús dels combustibles fòssils i el seu increment de cost fa necessària la translació cap a una situació de major eficiència i, per tant menor velocitat, que li confereixi major resiliència. Resoldre on situar-se com a societat dins el rang potència-eficiència que ens descriu i fixa la física pel cas dels combustibles fòssils depèn, en darrera instància, del model socioeconòmic que la societat es vol dotar. D'aquesta manera, no es pot deslligar el debat energètic de caràcter tècnic, del social i econòmic, ni en la seva anàlisi, ni en la seva gestió.
#7	60	La setena hipòtesi #7, forjada a partir de l'aprenentatge de com gestiona la vida els recursos, planteja que la globalització socioeconòmica en el conjunt del planeta pot ser viable en el temps només si és capaç de comportar-se com un sistema obert per l'energia i tancat per la matèria. És a dir, no és ja qüestió d'utilitzar més eficientment els recursos fòssils, sinó que cal passar a aprofitar els fluxos d'energia provinents de fora el sistema Terra (el Sol) de manera passiva i activa, reciclar els materials i mantenir els embornals sota el seu nivell de saturació per poder exportar l'entropia. La gestió és possible per la contribució de les tecnologies de la informació i la comunicació i el control esdevé distribuït entre els diferents nodes del sistema. D'aquesta manera, el sistema socioeconòmic ha de, a més de bascular entre màxima potència i major eficiència en funció de la informació disponible de l'entorn i de les prioritats socials, adaptar-se a les característiques físiques, com és la densitat de potència, dels recursos energètics d'origen solar.
#8	63	Afegim com a vuitena hipòtesi #8 sosté que d'entre les tecnologies

		disponibles per generar electricitat a partir de l'energia solar, el principi fotoelèctric (tecnologia fotovoltaica) és la forma més eficient de transformació atès ho fa de manera electrònica, sense necessitat de consumibles ni reposicions i amb poc manteniment. D'aquesta manera pot treure el màxim profit del recurs solar, ja de per sí amb clars avantatges com la seva ubiqüitat, una taxa de renovació diària i una potència coneguda i regular.
#9	65	Una novena hipòtesi #9 sosté que els nous coneixements sobre la simbiosi i la cooperació i la seva contribució a l'evolució de les espècies alternant-se amb períodes de competència i de selecció natural, ens mostren com les dues estratègies poden ser també útils per la societat contemporània. D'una banda, la discontinuïtat en els processos evolutius convida a acceptar una ignorància irreductible dins qualsevol pretensió d'anàlisi del futur, i d'altra; la importància d'estratègies de col·laboració i simbiogènesi per assolir nivells superiors de complexitat que són més eficaços en la degradació del gradient energètic disponible.
#10	66	La desena hipòtesi #10 sosté que un canvi de model energètic necessita un canvi epistemològic que superi l'atomització del coneixement i la separació de disciplines que ha portat la ultra especialització actual. Només amb una concepció de l'activitat humana dins els ecosistemes, que combini l'anàlisi del tot i de les parts de manera integradora i aporti una nova mètrica d'avaluació del progrés social i de la economia es podrà bastir el debat sobre el canvi de model energètic i les conseqüències socials, ecològiques i econòmiques.

3 BASES PER A UN MODEL ENERGÈTIC CONTEMPORANI

3.1 Principis biològics de gestió dels recursos

3.1.1 Adaptació a l'aparició dels límits en l'explotació dels recursos

Durant els darrers 200 anys hem “construït” un món sota la idea de “recursos energètics i materials il·limitats” que ens ha portat a un desenvolupament material i de qualitat de vida sense precedents (Riba, 2011); però alhora, ha lligat el nostre destí com a civilització a la disponibilitat –i cost- del recurs. Ara, quan les limitacions es fan evidents, ja sigui per estat de reserves, disponibilitat, embornal, cost energètic, econòmic o social, es presenta un dels reptes tecnològics, però també socials, econòmics i polítics de major envergadura: la transició cap a un nou recurs. Es posa en escac el manteniment de les condicions que possibiliten tot el sistema que gaudim i cal actuar amb celeritat i amb encert.

Històricament no ha calgut que un recurs s'esgotés pròpiament per adquirir i adoptar-ne un de nou de manera hegemònica. És el cas del petroli davant del carbó, per exemple. En part ha estat així perquè el nou recurs ha disposat successivament d'un nivell energètic major. És a dir, l'aparició un nou recurs energètic de major potència i la disposició de la tecnologia per aprofitar-lo s'ha adoptat amb rapidesa, perquè ha possibilitat una acceleració del cicle econòmic, un procés expansiu que, en termes del sistema econòmic occidental, s'ha associat a la idea de progrés. Aquest fet es posa de manifest quan analitzem la correlació positiva entre l'ús de recursos energètics i qualsevol dels indicadors socials (creixement de la població, producció agrícola, etc.) que han caracteritzat el segle XX.

Avui, però, no tenim cap recurs de major potencial energètic que permeti seguir aquesta successió històrica. Tot just ens debatem entre l'ús del recurs fòssil existent (extret per tècniques convencionals i no convencionals), l'energia nuclear (amb els riscos i incertesa intrínsecs a la seva gestió) i l'aprofitament dels recursos energètics renovables (solar, eòlic, biomassa, hidràulic...), els quals, si bé presenten molts avantatges (no s'esgoten, certa ubiqüitat, origen no terrestre -solar-, mínima generació de residus, ...), tenen unes característiques termodinàmiques diferents a les del petroli i, concretament, quantitativament menors en termes d'intensitat i potència. La limitació en potència del recurs solar condiona les activitats que pot energitzar i, per tant, el seu ús predominant obliga a un replantejament de les activitats socioeconòmiques tal i com les coneixem.

Davant la constatació de les limitacions del recurs fòssil, la societat reacciona desorientada entre una posició basada en “l'optimisme tecnològic” que planteja una solució tècnica per tots i cadascun dels problemes que tenim (fusió nuclear, energies renovables, etc.), a l'extrem contrari, una visió catastrofista de fi de civilització. Lluny d'ambdues posicions, el debat cal forjar-lo en l'estat actual del coneixement científic i tecnològic i fer propostes circumscrites dins els límits dels recursos.

L'adaptació a una situació de limitació de recursos tindrà diferent ritme i urgència dependent de cada regió (en funció del balanç entre recursos propis i necessitats) i

serà possible actuar durant un període finit de temps durant perquè encara es disposarà de recurs energètic, material i econòmic. Altrament, hi ha el risc real d'haver superat un punt de no retorn on la infraestructura creada ja no pugui desmantellar-se en condicions òptimes de temps, cost i respecte ambiental per manca de recursos. Un cicle de retroalimentació negativa característic d'economies amb rendiments energètics decreixents, que, en confirmar-se, ens portaria el pitjor dels escenaris perquè podria comprometre la pròpia transició del sistema. Seria aquest el cas de col·lapse socioeconòmic per nivells "imposats" de manca de recurs energètic i/o impossibilitat de pagar-los, amb greus conseqüències socials (Tainter, 1990, 1995).

Davant d'això, les primeres accions d'adaptació tenen matriu tecnològica. L'eficiència energètica apareix com una primera resposta, de contenció immediata, que intenta compaginar el creixement econòmic, alentint les conseqüències de l'esgotament del recurs energètic: produir el doble amb la meitat dels recursos⁸. Un pas necessari, però no suficient: si bé ens permet guanyar temps, i això és fonamental per gestionar el canvi, no ens evita la fi del petroli barat tal i com l'hem conegut i emprat.

També del tot necessari, però no suficient, és la millora tecnològica de les energies renovables (l'energia solar fotovoltaica i l'aprofitament eòlic, principalment) i l'emmagatzematge elèctric, que han fet realitat el que abans era just una promesa.

Però aquestes primeres accions tècniques fan visible amb força la contradicció i els límits de voler aportar energia i potència a una societat fòssil a partir d'un recurs renovable amb propietats termodinàmiques diferents. La inèrcia de la societat fòssil fa que aquesta no vulgui canviar i davant d'aquesta situació hi ha la temptació de fer plantejaments poc rigorosos i simplistes sobre canviar de recurs, tot assimilant el vell i el nou a una mera unitat energètica del Sistema Internacional intercanviable, per exemple MJ, creant la il·lusió de plantejar la substitució 1:1 fòssil:renovable. Però la realitat no és aquesta. No podem assimilar les propietats qualitatives de recursos diferents, com el renovable i el petroli. Concretament la densitat de potència que pot desenvolupar, ni tan sols incrementant la densitat energètica disponible del recurs solar (densitat constant de 1000W/m² a les nostres latituds) per mitjans tecnològics, per exemple:

- **emmagatzematge:** desacoblant el moment de generació i de consum podem canviar el rati temps 1:1 característic del consum instantani i augmentar, d'aquesta manera, el "temps" de captació del recurs renovable per després poder aportar l'energia acumulada en molt poca estona, és a dir, desenvolupar major potència. Tanmateix tenim el limitant termodinàmic de les pèrdues per emmagatzemament associades.
- **incrementant la superfície de captació** per disposar de major potència instantània. Podria implicar a gran escala inclús l'ocupació de territoris de

⁸ Club de Roma

tercers (com seria el cas del Projecte Desertec⁹) i entrar en competència amb altres usos del sòl (Turney, 2011).

Aquestes mesures són del tot raonables en una concepció de model energètic basat en els recursos fòssils amb una certa participació de les energies renovables, però no per pretendre la substitució integral del recurs fòssil. Davant la contradicció lògica d'un model energètic més sostenible, continuar amb els barems socioeconòmics actuals (com el creixement del PIB per avaluar la riquesa d'un país) continua reduint la qüestió energètica a un fet merament tècnic, a l'espera d'un "nou recurs energètic" o d'una "nova tecnologia". El problema té arrels molt profundes.

L'increment del preu del recurs limitant desencadena nous processos d'extracció del recurs, ja siguin o no coneguts fins la data, que poden estendre el període d'ús del recurs a un preu major tot mantenint el model socioeconòmic. És el cas de les tècniques no convencionals d'extracció dels combustibles fòssils, que emergeixen amb força, d'entre les quals en destaca el *shale gas*, o gas d'esquitx, que s'obté en fragmentar amplis estrats geològics per fer emergir el gas i el petroli retingut en la porositat de les roques, procés conegut com "fractura hidràulica". L'èxit comercial d'aquesta tecnologia és espectacular els darrers anys en aquells països que en disposen reserves i és tan important en l'economia regional que es desenvolupa a una velocitat que ni tan sols permet avaluar el seu alt cost mediambiental (com seria, per exemple, la contaminació d'aigües freàtiques) i sobre la salut de les persones (precursor de càncer per ús de benzè i disruptors hormonals) (Sovacool, 2014).

Tanmateix, en les regions que no disposen de recurs a explotar, el debat que es deriva d'emprar la nova tècnica és del tot estèril. Aquestes societats, com la nostra, veuen accelerar la seva crisi econòmica per un excés de dependència als recursos fòssils i veuen, impotents, l'encariment de l'accés al recurs. Dins aquesta voluntat d'explotar nous recursos per garantir la seguretat de subministrament, hem de situar les inversions multimilionàries en tecnologies nuclears de fissió de 3a generació (Finlàndia) i les de fusió (com el projecte ITER). Tanmateix no semblen tenir tan èxit com estava previst, ni econòmicament (encariment per nous nivells de seguretat, increment del cost del finançament per percepció de risc molt elevat i retards sobre previsions) (Mari, 2013), ni pel rebuig social a l'energia nuclear (accentuat per l'accident de Fukushima l'11 de març de 2011) (Siegrist, 2012). Sembla, doncs, que l'energia nuclear no és un candidat a curt termini ni a gran escala capaç de substituir els combustibles fòssils, ni tan sols la promesa de reactors de IV generació (Kessides, 2012).

Hom podria pensar que la combinació de tot el que hem esmentat és el que ha de possibilitar conjuntament la transició de model energètic (eficiència energètica, recursos fòssils convencionals i no convencionals, energies renovables, energia nuclear). I, si bé a escala global serà així per fets consumats, cada regió i territori haurà d'adaptar-se a les seves possibilitats reals a nivell ecològic, geològic, social i

⁹ <http://www.desertec.org>

http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/DESERTEC-WhiteBook_en_small.pdf (Octubre 2014)

econòmic, tot responent a preguntes fonamentals ¿com tinc recurs? ¿el puc comprar? ¿per fer què?. Tanmateix, la decisió de com avancem en l'estructura energètica del planeta no és només tecnològica ni econòmica. Els límits ecològics dels ecosistemes comencen a veure's seriosament afectats (Rockström, J. 2009), per exemple a conseqüència de l'escalfament global, i la fractura social per l'accés a l'energia és una realitat preocupant ja en països desenvolupats que tot just sembla començar si ens fixem amb les dades de, per exemple, la pobresa energètica a Catalunya (Generalitat de Catalunya, 2013).

Estem, doncs, en un escenari de confrontació a dos nivells: tots els països davant el canvi climàtic i l'escalfament global (amb l'agreujant que qui pot ser contribuent d'emissions pot no patir-ne les conseqüències en el seu territori, i a l'inversa); i d'altra banda, la competència entre les diferents regions per liderar un nou equilibri de forces mundial basat en el nou escenari energètic caracteritzat per la fi del petroli barat i a on cadascú segueix estratègies diferents.

Davant d'aquest escenari sembla raonable dotar-nos de mecanismes de governança (en una concepció general) a escala global per gestionar els pocs recursos que queden i lluitar coordinadament contra les implicacions mediambientals que estem causant. Però la realitat imposa els interessos particulars i ni tan sols les Cimeres del Clima no aconsegueixen acordar objectius mínims de manera generalitzada¹⁰.

El debat sobre el model energètic es col·lapsa per la velocitat de les economies. Senzillament no hi ha debat i sí fets consumats. En aquesta cursa la transició des del recurs fòssil cap a un recurs renovable apareix com una opció costosa i d'alt impacte macroeconòmic en aquelles societats que l'adopten. Però aquest fet té una singularitat. Les regions que no disposen de recursos fòssils (ni convencionals, ni no convencionals) tenen un deute econòmic molt gran, i incrementant-se, cap als països exportadors amb un escenari de preus sostinguts del barril al voltant de 100\$. En el cas de l'Estat espanyol, per exemple, aquesta situació es tradueix ja en un partida pressupostaria de l'Estat del 4,5% del PIB. Aquestes societats no tenen més opció que fer una transició energètica cap a una descarbonització de l'economia que els permeti reduir la dependència per reduir la factura energètica. I més, quan qualsevol transició implica la inversió de grans quantitats de diners, d'energia, de materials i un cert temps per poder-se dur a terme. Alemanya, Dinamarca i d'altres països amb impacte sobre el PIB menor que el català ja ho estan fent en major o menor mesura a partir de plans estatals. L'Estat espanyol, però, no disposa d'aquesta visió estratègica i, malgrat haver assolit alts nivells de penetració d'energies renovables durant la primera dècada del segle XXI, actualment està en un procés d'aturada total i retrocés (impediments a les energies renovables en la nova Llei Elèctrica del Sector Elèctric RD23/2013). Aquest fet, combinat amb un nivell de dependència fòssil superior al 80%, planteja un risc seriós de crisi econòmica i social de matriu energètica. Catalunya consumeix el 20% de tota l'energia de l'Estat i té un escenari de més dependència de combustibles importats perquè només produeix un 8% amb renovables. Però com que contribueix a sufragar-les proporcionalment al seu pes

¹⁰ <http://news.bbc.co.uk/2/hi/8426835.stm> (Octubre 2014)

genera un dèficit anual de prop de 800 M€ (abans de les retallades que ha sofert la retribució a aquestes tecnologies). Per tant té un llarg camí a recórrer amb tecnologies renovables molt més madures i menys costoses que podrien finançar-se amb el que cada any paga i no gaudeix. Afegit, disposa d'una diversificació de fonts per la contribució de l'energia nuclear i la no utilització de carbó (malgrat que en paga proporcionalment els subsidis que rep). Però no disposa de competències polítiques per governar el seu model energètic, arrossegant lògiques i hipoteques del model estatal (alt cost de renovables, menor contribució de nuclear, subsidi del carbó nacional, manca d'aposta per l'eficiència energètica). Això demana incorporar en qualsevol proposta de futur de país un debat sobre si seguim el model de descarbonització de l'economia (com el cas alemany i nòrdic) o, pel contrari, ens deixem endur per un sistema energètic ineficient i altament dependent de les importacions de petroli (com el cas espanyol).

L'atzucac és de gran dimensió, pot ser un dels reptes generacionals més importants a què mai ens hem afrontat. Les implicacions econòmiques, socials i ambientals són de gran magnitud i afecten de manera diferent a cada territori i regió, però, alhora, al conjunt del planeta Terra. Tenim la responsabilitat davant la societat actual i futura d'afrontar amb celeritat aquest debat i actuar.

Tanmateix, no podem esperar receptes màgiques ni solucions perfectes. Cal anar a cercar els fonaments i els principis bàsics sobre els quals començar a bastir un nou model i que han d'integrar tant qüestions tecnològiques (tecnologies, arquitectura de distribució...), com d'altres no tecnològiques (barreres socials, legals, econòmiques). Per "Principis Biològics de la Gestió dels Recursos" es condensa la recerca feta i recollida en la present tesi i pretén aportar una síntesi de les bases que han de sustentar aquestes respostes sobre un model socioeconòmic que s'ha de circumscriure dins els límits dels recursos.

Es mostra a continuació un resum de l'anàlisi de l'estat del coneixement fet a la primera part i que dona context a la segona part, centrat en l'aplicació d'aquests principis al model energètic.

3.1.2 Principis Biològics de gestió dels recursos

Definim en el marc de la tesi els Principis Biològics de Gestió dels Recursos aplicats al model energètic com la formació d'estructures complexes (model socioeconòmic) en un estat estacionari fora, però prop de l'equilibri tèrmic a partir de, com a mínim, un cicle de degradació del gradient energètic solar incident (d'origen de fora del sistema) i de la seva interacció amb els recursos materials (orgànics vius, orgànics morts i inorgànics) finits i reciclables (disponibles a dins el sistema) a partir de la gestió i la mediació de fluxos d'informació. El sistema resultant desenvolupa propietats emergents i estratègies d'anticipació i oportunitat per evolucionar adaptativament davant la incertesa de l'entorn, augmentar la seva resiliència i, així, afavorir la seva viabilitat en el temps obtenint el màxim treball resultant possible, a una velocitat i eficiència apropiada i variable –segons les condicions de l'entorn–, reduint l'energia residual emesa i minimitzant la generació de residus materials i, per tant, amb una menor necessitat d'embornal.

Aquest aprenentatge fruit de l'observació i de l'anàlisi de com la natura gestiona els recursos energètics, materials i d'informació és la base per afrontar la qüestió energètica i definir, anàlogament en el marc de la tesi, les *Smart Grid* o *Smart Cities*, com la formació de ciutats i societats complexes viables, integrades amb els ecosistemes a què pertanyen, a partir de l'ús dels fluxos d'energia renovable i la seva interacció amb els materials disponibles en un procés gestionat per fluxos d'informació actius (senyors, tractament de dades, actuació) i passius (comportament humà) que li permetin adaptar-se evolutivament a la incertesa de l'entorn local i global canviant, apareixent propietats emergents i desenvolupant estratègies d'anticipació i oportunitat per afavorir la seva viabilitat en el temps obtenint un màxim de productivitat, a una velocitat i eficiència apropiada i variable i minimitzant la generació de residus i la necessitat d'embornal.

3.2 Canvi de recurs energètic: una qüestió complexa amb implicacions en el model social i econòmic

3.2.1 Els fluxos energètics com a organitzadors socials

La dependència dels combustibles fòssils al llarg de la història és un fenomen abastament estudiat (Salvador, 2005). Un dels aprenentatges és que els models energètics no canvien d'un dia per l'altre, ni a tot arreu simultàniament, ni de manera determinista (Scheffer, 2009). Així, en períodes de transició, les societats pioneres en l'ús de nous recursos energètics i materials millors s'han anat imposant. Per aquest motiu, enlloc de parlar de "nou model energètic" ens hi referim com a "model energètic contemporani" entès com a l'evolució i transformació del model que tenim amb l'estat del coneixement, la tècnica i demandes socials actuals per un lloc i moment concret. Una segona conclusió de l'anàlisi històric és que tota substitució de recurs implica un canvi del model socioeconòmic fins adaptar-se a la nova disponibilitat d'energia i potència (Smil, 2010).

La societat com a cos definit en un lloc i en un moment determinat, per exemple Catalunya avui, es comporta com un sistema obert per la matèria i obert per l'energia gràcies al flux solar i a la importació de recursos energètics i materials. De la mateixa manera, genera uns residus (sòlids, líquids, gasos) parcialment gestionats en el territori, però també exportats cap a l'exterior. Aquesta dinàmica de fluxos (quantitativa i qualitativa) genera impactes de diferent ordre i assoleix un equilibri dinàmic que possibilita la creació i manteniment de la complexitat necessària tant pel funcionament dels ecosistemes i les funcions vitals del *biota* (subjecte), com de l'organització socioeconòmica (objecte, tot allò *què fem*) de què ens hem dotat (Bardi, 2011).

És important insistir en el fet que el recurs energètic que una societat explota fixa els límits del que es pot fer i del que no en termes d'energia i de potència, i no a la inversa. D'aquesta manera, la successió d'explotació de recursos de potencial major ha possibilitat períodes socioeconòmics expansius, associant la idea que l'increment de l'ús d'energia implica progrés i millora.

Aquesta dinàmica possibilitadora, però, presenta un *taló d'Aquil·les* quan alguns dels fluxos es veuen alterats ja sigui per motius purament físics (esgotament de recurs o embornal), ambientals (col·lapse del propi ecosistema), socials (canvi *democràtic* del model energètic) o polítics (sabotejant l'entrada de recursos fòssils, per exemple). Un cas paradigmàtic pot ser el procés sobiranista a Catalunya davant l'Estat espanyol, que podria portar a una reducció de la resiliència per alteració dels fluxos d'importació de recursos (Rosas, 2014).

Una manera gràfica de mostrar els fluxos d'energia són els Diagrames de Sankey on l'amplada de les fletxes és proporcional al flux quantitatiu dels diferents elements.

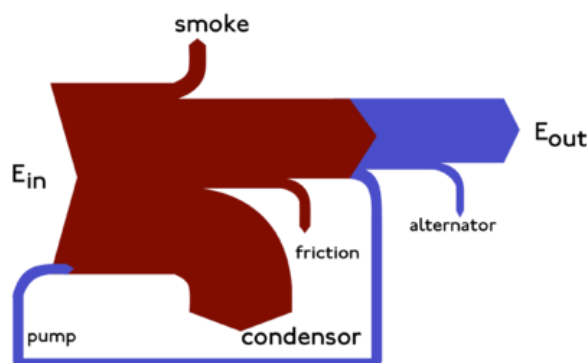


Figura 3. 1: Exemple de diagrama de Sankey. FONT: Wikipedia

Trobem d'altres maneres, purament més descriptives, com el que ens mostra el "Sistema Energètic de Catalunya 2009" publicat pel Pla d'Energia i Canvi Climàtic de Catalunya PECAC 2020¹¹. Arran del fet del límit físic que fixa el recurs que una societat explota, apareixen dos nivells d'anàlisi que cal saber diferenciar i no barrejar a l'hora de plantejar el canvi en el model energètic:

1. ESTAT 1: Activitat "interna" del sistema: tenim seguretat del manteniment dels fluxos amb "l'univers", tant d'entrada com de sortida. El debat social, tècnic i polític pot centrar-se en com organitzar els factors de producció, com repartir la riquesa, quin ha de ser el nivell de "benestar" de la població.
2. ESTAT 2: Davant dels riscos associats al manteniment dels fluxos, els debats propis de l'Estat 1 esdevenen menors. Cal centrar tots els esforços en el manteniment o substitució dels fluxos que possibiliten la complexitat de la societat. Aquests esforços, requeriran d'un consum energètic i material específic per afavorir la transició cap a un nou sistema de fluxos que serà viable si, i només si, el balanç és possible. El moment en què l'esforç energètic per mantenir els nous fluxos sigui major que el saldo net d'obtenir-los, el sistema entrarà en una dinàmica de rendiments decreixents que accelerarà el col·lapse de manera irreversible (Diamond, 2005). Anàlogament, si l'explotació d'un nou flux confereix rendiments molt favorables (ex.

11

<http://www20.gencat.cat/portal/site/icaen/menuitem.897a4be85d3b580ec644968bb0c0e1a0/?vgnextoid=4e2bad73a2ba6310VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextchannel=4e2bad73a2ba6310VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD> (Octubre 2014)

substitució del carbó pel petroli), l'Estat 2 possibilitarà un període socioeconòmic expansiu de l'Estat 1. (Flannery, 2005)

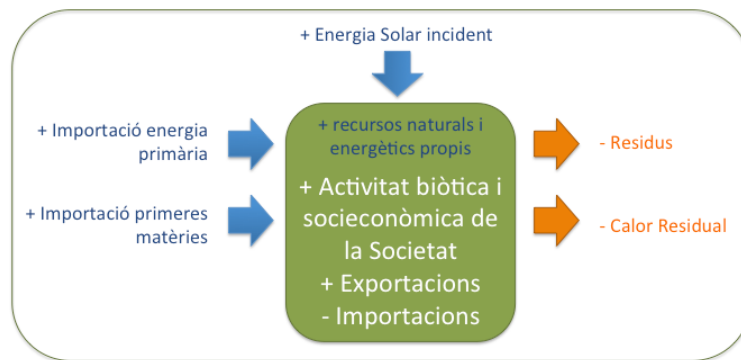


Figura 3.2: Balanç energètic de la societat. Esquema conceptual. FONT: Elaboració pròpia

Aquesta distinció és fonamental per entendre la jerarquia de les mesures i estratègies que cal adoptar en cada regió i període històric. Si tenim estabilitat macroenergètica, podem focalitzar a nivell intern; però si el que perilla són les entrades o sortides dels fluxos energètics, les prioritats i intensitats de les mesures a adoptar hauran de ser unes altres.

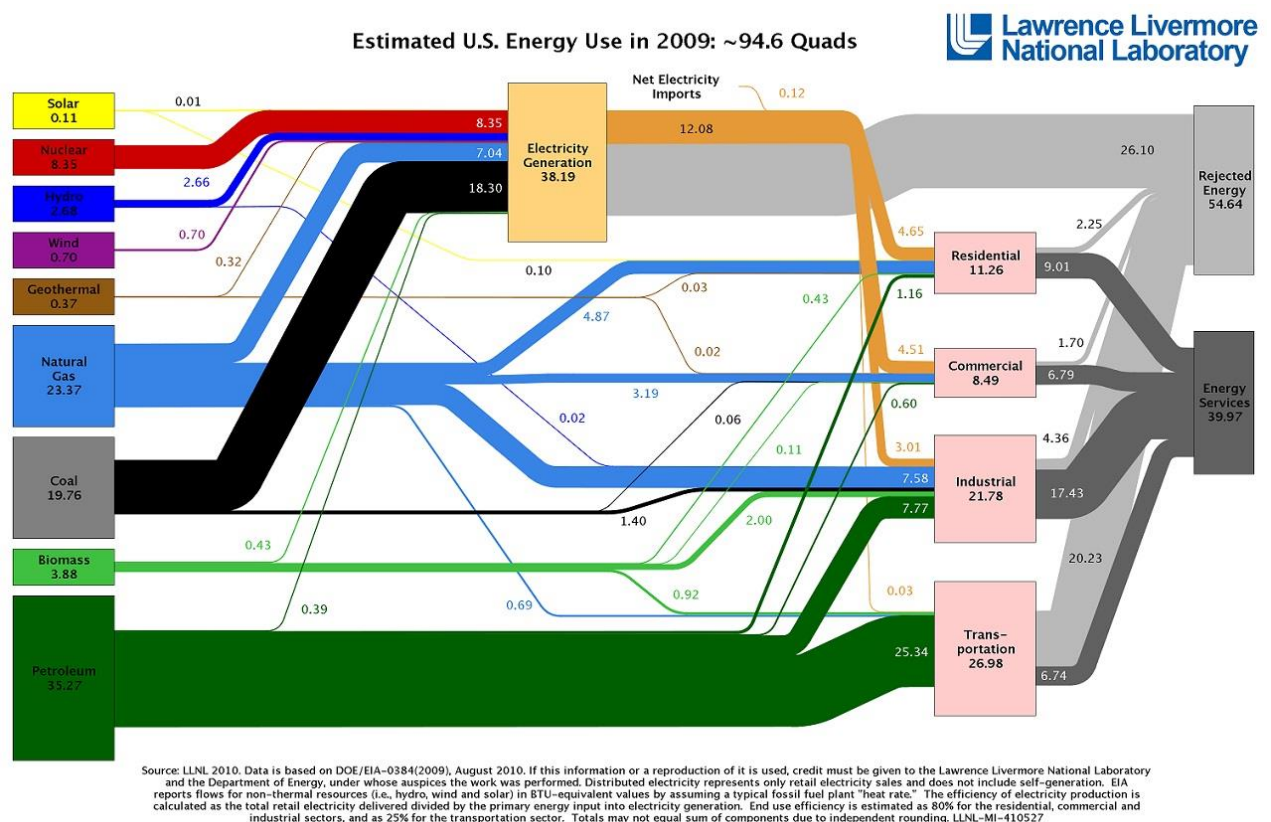


Figura 3.3: Diagrama de Sankey, Estats Units 2009. FONT: Lawrence Livermore National Laboratory

Aquesta anàlisi enllaça amb el concepte ecològic de la "resiliència", que és la capacitat d'un ecosistema per respondre davant una pertorbació, resistir el dany i

recuperar-se ràpidament (Walker, 2004). Aquestes pertorbacions poden respondre a esdeveniments puntuals (incendis, inundacions, tempestes de vent...), però també a alteracions més permanents (com la desforestació o la introducció d'espècies de plantes o animals exòtics) (Gunderson, 2000). En funció de la magnitud i durada de les pertorbacions l'afectació en els ecosistemes pot ser més intensa i irreversible o menys, arribant a punts de no retorn on ja no es pot recuperar l'estat anterior a l'alteració (Berkes, 1998).

Els diagrames de Sankey són, doncs, una eina analítica potent que ens permet sintetitzar ràpidament la situació energètica d'una regió i obtenir-ne conclusions macroenergètiques. Per exemple, el diagrama del Lawrence Berkeley Laboratory, Figura 3.3, mostra que els US en el 2009 tenen més pèrdues energètiques i ineficiències (54,64 Quads) que no pas l'energia que utilitzen (39,97Q). Com va fer notar CNET el 2007, aquest 62% d'energia consumida per pèrdues equival a més del 650% més d'energia perduda que la generada per les centrals nuclears, 280% del carbó i 235% de gas (incloent el *fracking*) i el 150% més que la generada per altres productes petrolers.

La crítica principal als diagrames Sankey és que només es mostren els fluxos quantitius d'energia i no la potència involucrada en els mateixos.

EL SISTEMA ENERGETIC DE CATALUNYA AL 2009: subministrament d'energia primària, transformació, distribució, ús final

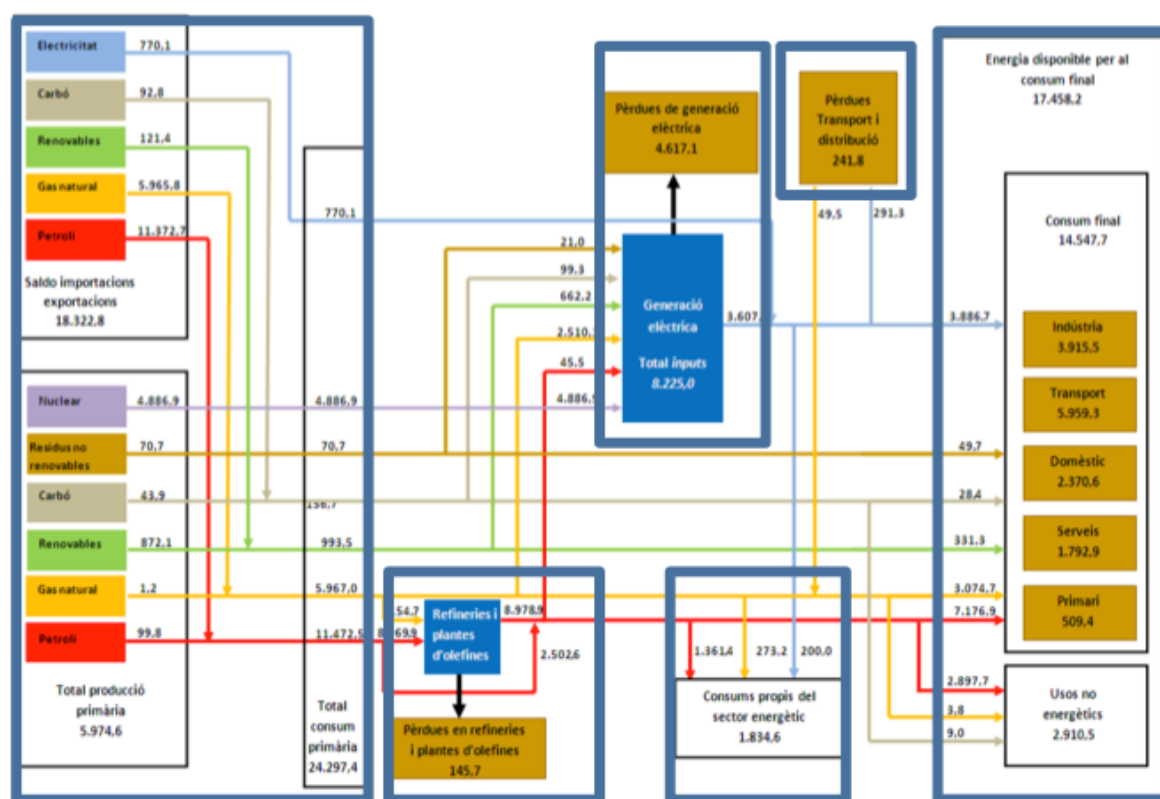


Figura 3.4: Diagrama de Sankey, Catalunya 2009. FONT: ICAEN

Una de les diferències entre les accions a prendre segons l'Estat 1 o l'Estat 2 rau que mentre en el primer cas tenen un marcat caràcter tècnic, en el segon parlem d'accions molt més globals i de naturalesa complexa ja que entren en joc aspectes com la disponibilitat de recurs, cost, accessibilitat, acceptació social, impacte en els ecosistemes, limitació del model socioeconòmic, entre d'altres. És per tant important saber a quin àmbit pertanyen les problemàtiques que afrontem. Si la pertorbació és severa i afecta al subministrament dels fluxos d'energia des de l'entorn cap a dins el sistema, no podem pensar que amb una acció tecnològica, per exemple, incrementar l'eficiència energètica, n'hi haurà prou. I si aleshores cal plantejar una substitució de recurs, a més dels aspectes merament tecnològics, cal considerar les implicacions que imposarà al model socioeconòmic. Concretament, si el nou recurs és més limitant en termes d'energia i/o potència que l'anterior, la seva utilització portarà limitacions insalvables a les quals el model socioeconòmic haurà de circumscriure's-hi, és a dir, una limitació a la capacitat de produir béns i serveis amb una eficiència característica i, per tant, una limitació de la producció econòmica que hem mesurat fins a la data segons el *Producte Interior Brut*, PIB (sense entrar ara en la seva idoneïtat), terme que permet mesurar monetàriament el valor afegit produït per una societat en un període determinat.

Tradicionalment, el sistema econòmic actual ha associat el creixement anual del PIB amb un increment proporcional dels fluxos. "A més llenya, més potencial tèrmic i, per tant, més potencial energètic per fer treball" podríem simplificar. Aquesta visió "d'optimisme en disponibilitat de recursos i tecnologies" a baix cost es forja en l'experiència de les darreres dècades, especialment d'ençà la Segona Guerra Mundial, període en què realment sí hi ha hagut una correlació positiva d'ambdós paràmetres. Tanmateix, la percepció dels límits es va posar de manifest arran de la primera crisi del petroli (finals dels 70) i va posar l'accent en l'eficiència per "poder fer més amb menys". És el "Factor 4" del Club de Roma (Meadows, 1972).

Mentre ens moguem dins l'Estat 1, les solucions tecnològiques com ara l'eficiència energètica o una certa penetració de les energies renovables serviran i seran importants per reduir la dependència dels fluxos, però mai serà una estratègia vàlida per compensar la manca d'un flux (Estat 2). Una dificultat afegida és que si el recurs a substituir ha durat prou com per crear un corpus socioeconòmic propi, per exemple amb estadístiques específiques per a la seva avaluació (ex. PIB), caldrà tenir present que el nou recurs, sobretot en el cas que sigui de menor potència, no podrà ser avaluat amb el mateix sistema econòmic. El conflicte social està servit quan la lògica econòmica fòssil es vegi desbordada per les característiques físiques del recurs renovable, les quals requeriran d'un nou sistema d'avaluació i, per tant, d'un canvi de valors de la societat, fet que pot representar una barrera insalvable. La matriu epistemològica de la qüestió apareix en tota la seva magnitud i, en aquest cas, el criteri ha de ser en bona part científic. Les disciplines econòmiques no poden posar-se al mateix nivell jeràrquic que la física. L'economia no pot pretendre desbancar la termodinàmica sinó relacionar-s'hi íntimament i circumscriure-s'hi. La "transició energètica i de potència" de la societat que, com la nostra, no pot assumir el cost d'importar massivament recursos fòssils implicarà un canvi de model socioeconòmic si vol ser completa i aprofitar totes les oportunitats dels nous recursos.

3.2.2 La societat fòssil

El nostre món industrialitzat contemporani s'ha configurat amb i pel aprofitament dels recursos energètics fòssils i ha permès l'estat actual de la tècnica, l'agricultura, el transport, la indústria, la gestió dels residus, les tecnologies de la informació i la comunicació... Tanmateix, l'ús creixent de l'energia d'ençà la Revolució Industrial també ha comportat nous problemes com la contaminació i l'escalfament global, amb potencials riscos per al planeta, i un desequilibri molt accentuat entre els qui han tingut accés als recursos fòssils i els qui no.

Aquesta explotació de recursos a través de la tecnologia ha fet possible una veritable revolució en tots els paràmetres de la societat que n'ha gaudit en els darrers 200 anys en llocs com Europa. Veiem a continuació com la irrupció del petroli i el seu ús massiu esdevé exponencial a mitjans del segle XX i com aquest fet porta correlacionat, amb algunes dècades de desfasament, una corba exponencial simètrica de creixement de la població i de rendiment de l'agricultura intensiva, per agafar només dos exemples:

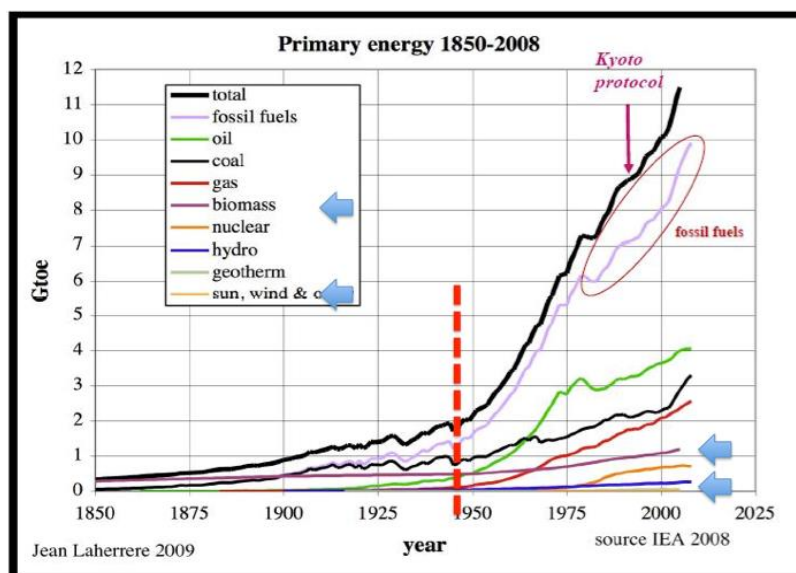


Figura 3.5: Evolució en l'ús de l'energia primària des de 1850. Impacte dels combustibles fòssils sobre el total d'energia consumida d'ençà mitjans del segle XX. Font: Laherre, 2009

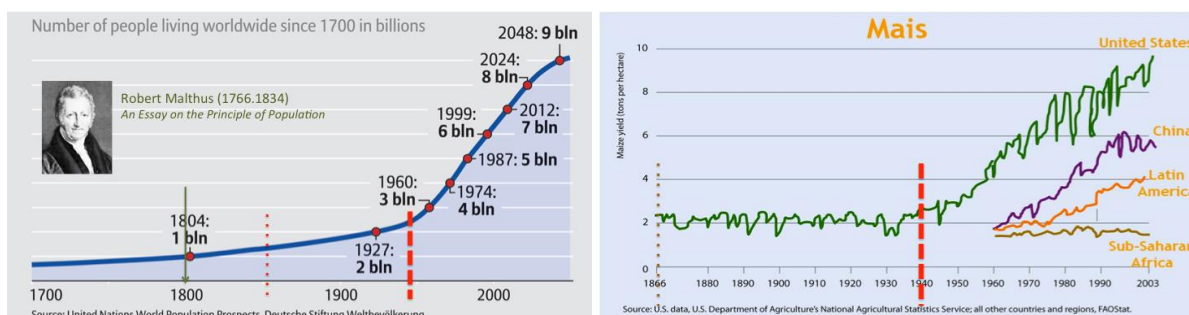


Figura 3.6: Evolució de la població (a) i de la productivitat del panís (*Zea Mais*) en els darrers segles. Observem una tendència exponencial d'ençà mitjans del segle XX. FONT: Adaptació de Nacions Unides

a) L'Era Fòssil, però només per a una part del món...

Aquesta “revolució” socioeconòmica impulsada pel recurs fòssil i la tecnologia es forja ja fa més de dos segles sota una concepció mecanicista del món, un context en què amb l'ús de la raó i el mètode científic es van realitzar aportacions fonamentals en la concepció i interpretació del Món que encara perduren avui (Hawking, 2004). Agafant com a referència la màquina de vapor, primer impulsada per carbó i després per petroli, veiem com el seu ús va accelerar la Revolució Industrial i Agrària des de finals del s.XVIII primer a Anglaterra, a d'altres països europeus i als Estats Units. I com aquest procés va fer néixer la societat industrial sota dos models socioeconòmics hegemònics i contraposats en molts aspectes: el capitalisme i el comunisme, els quals discrepen sobre “com controlar i repartir la riquesa”, però no de l'existència de la pròpia “riquesa” que és, en el fons, una conseqüència del nou recurs fòssil que s'explota amb mitjans tècnics. La disponibilitat del recurs energètic precedeix la tecnologia per aprofitar-lo i, aquesta, el model socioeconòmic que el gestionarà i que s'adaptarà dins el rang de les seves característiques físiques.

Ja des de l'inici, però, el model social legitimador de l'ús dels recursos energètics es circumscriu en unes societats molt determinades (Europa) que els confereix una potència militar sense precedents històrics i, que només durant el segle XX comença a estendre's a d'altres àrees com EUA, Japó i l'actual Rússia. És entre aquestes regions que es produeixen els principals conflictes bèl·lics del s.XX. La Primera i Segona Guerra Mundials són la manifestació més clara de la potència militar que confereix l'explotació en l'ús dels combustibles fòssils i el seu desenllaç marca la geopolítica en l'ús dels recursos energètics i materials i la potència econòmica fins ben entrats al segle XXI.

Veiem que el flux d'energia ha permès a les societats que ho han aprofitat incrementar la seva complexitat i esdevenir hegemòniques (en termes econòmics i militars). Aquest fet es pot apreciar quan analitzem la riquesa de les nacions, mesurada en termes de PIB (ó GDP) davant el consum de recursos energètics. Sense excepció (tret de Rússia per la gran diferència interna d'aquesta gran regió euroasiàtica), tots els països amb major ús de recursos que la mitjana mundial tenen riquesa també superior a la mitjana. Un fet que es retroalimenta atès que, en tenir major riquesa i aprofitar els recursos energètics, desenvolupen major potencial militar i garantir-se el repartiment dels escassos recursos materials del món.

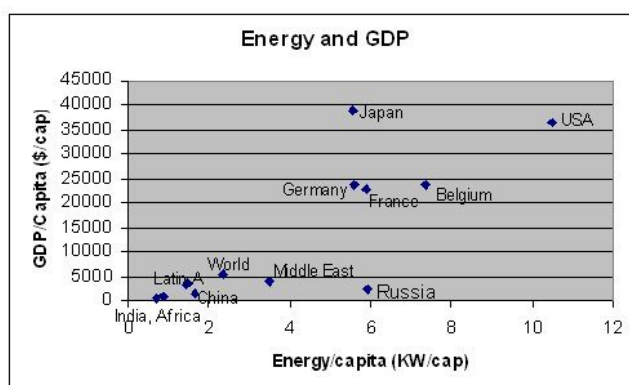


Figura 3.7. PIB (GDP) Vs. energia consumida per determinades nacions i regions. FONT: [2006 International Energy Agency](#)

En destaca que el 80% de l'energia primària es consumeix pel 30% de la població. I d'entre aquests, n'hi ha que ho fan a diferents nivells d'eficiència (ex. Japó, amb una riquesa equivalent a la dels EUA, consumeix pràcticament la meitat). La part positiva d'això és que hi ha un llarg recorregut en la millora de l'eficiència per part dels països més industrialitzats.

D'altra banda, és important fer aquesta anàlisi en termes relatius i absoluts:

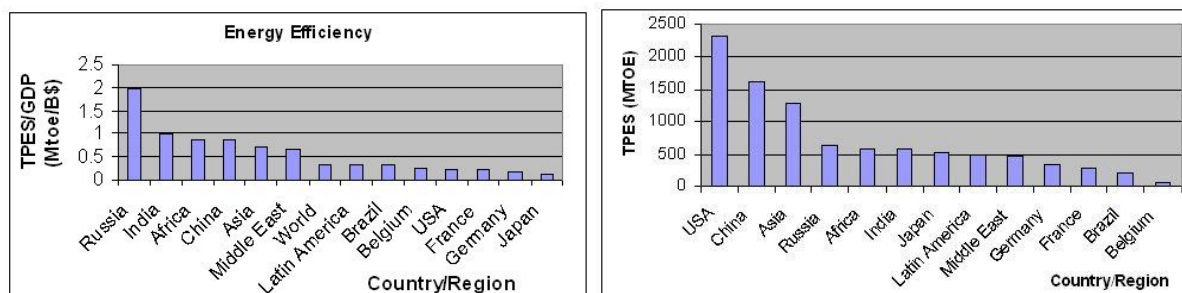


Figura 3.8. Consum d'energia en termes relatius i absoluts per determinades nacions i regions. FONT: [2006 Report of the International Energy Agency](#)

Veiem que:

- malgrat tot, l'ús de recursos energètics intensivament mostra una correlació positiva en l'eficiència de l'aprofitament. Fins i tot els EUA, que té la posició més extrema en consum energètic, presenta una ràtio Mtoe/B\$ millor que la mitjana mundial.
- Però aquest fet es contraresta quan prenem consciència de l'impacte net en l'ús absolut de recursos energètics i emissions derivades.

Si els països en vies d'un ús creixent de recursos han de passar a nivells de consum equivalents als de les regions més industrialitzades, però amb baixos índexs d'eficiència, combinat amb un escenari de disponibilitat de recursos i embornal limitat, ens n'adonem que és físicament impossible sinó va acompanyat d'una redistribució en els fluxos d'energia i matèria primària caracteritzat per:

- impacte regional de l'aprofitament de nous recursos (*shale gas*)
- implicacions socioeconòmiques en els països que deixin de consumir per a que els nous països tinguin accés
- nivell d'eficiència -des de l'inici- dels països que accedeixen a nivells creixents de consum
- Influència del factor preu en l'accés als recursos energètics en els països emergents i en les societats industrialitzades.
- Aspectes geopolítics (aliances i guerres)
- Aspectes econòmics (transferència de renda entre països productors i consumidors, finançament de la transició energètica, ...)
- Impacte sobre els ecosistemes

La conclusió és que l'accés a un recurs energètic d'alta densitat i baix cost permet energitzar una economia expansiva que maximitzi la producció de PIB i la potència de les nacions que l'empren, estenent el seu control i dominació sobre la resta que no l'utilitzen. Per això el s.XX s'ha caracteritzat per la geopolítica de control de

recursos. La qüestió que emergeix en un escenari de limitació de recurs barat i abundant és doble: d'una banda ¿què passarà quan el recurs no sigui (tan) accessible per alguna de les economies que fins ara n'han gaudit, per exemple per un factor preu i manca de recursos propis? I, d'altra ¿com incorporem les societats que fins ara no han gaudit dels recursos energètics per les seves economies en un món de recursos finits?

b) Evolució dels preus del petroli

Analitzant l'evolució de preus dels darrers anys, ens n'adonem d'importants canvis durant els primers anys del s.XXI. Les reserves disponibles, per més o menys temps, són cada vegada més difícils d'explotar (per la profunditat o tecnologia) i una més que limitada capacitat d'embornal, manifestat amb l'increment de temperatura per gasos d'efecte hivernacle, porta a un increment sensible de preu del recurs que, amb certes oscil·lacions, presenta actualment uns valors quatre o cinc vegades superiors als valors de primers del s.XXI. Aquest factor preu redimensiona el debat energètic a escala global i genera oportunitats i reptes a cada regió en funció de si són exportadors o importadors de petroli.

Fins al 2000, teníem uns preus continguts, aproximadament per sota els 20\$. Una tendència que s'incrementa linealment fins al llindar dels 50\$ al 2005 i, posteriorment, té un increment exponencial fins als quasi 150\$ al 2008.

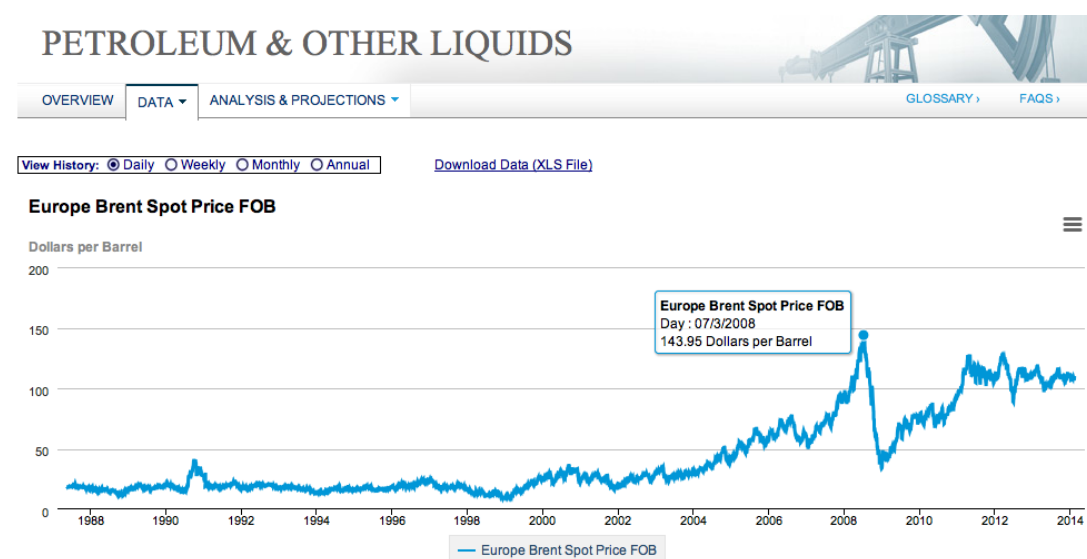


Figura 3.9: Dades del preu del barril Brent (\$) en els darrers anys. El màxim se situa el 3 de juliol de 2008 amb 143,95 \$/barril.
FONT: U.S. Energy Information Administration¹²

¹² <http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=p&s=rbrte&f=d>

De fet, si estenem l'anàlisi als darrers 150 anys trobem la següent evolució de preus:

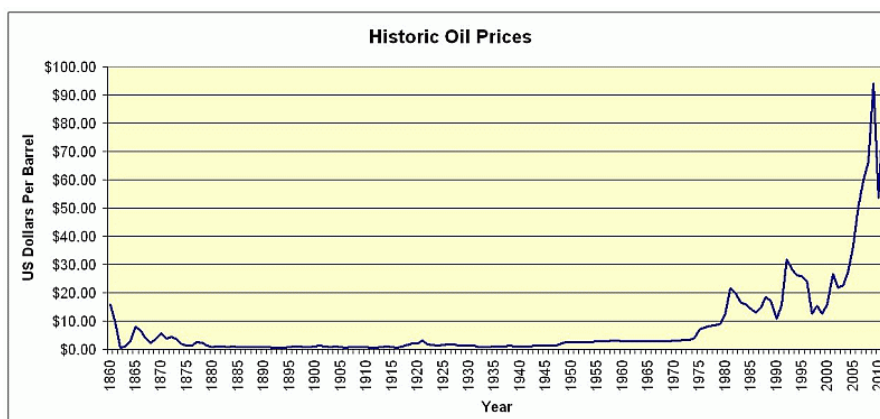


Figura 3.10: Evolució històrica del preu del barril Brent des del s.XIX. FONT: IEA

Detectem:

- un període d'alta volatilitat a l'inici que, en el context macroeconòmic del moment, deuria tenir un alt impacte en l'economia occidental.
- un preu molt baix, prop de zero, des de 1880 fins 1950, caracteritzat per l'explotació en règim monopolista del recurs per part de l'empresa americana Standard Oil, constituïda a Ohio pels germans John D. i William Rockefeller, entre d'altres. Un monopoli oficialment dissolt al 1911 atenent a la llei anti-monipoli, coneguda com *Sherman Antitrust Act*¹³.
- Un repunt entre 1950 i finals dels 70s coincidint amb l'increment dels paràmetres que abans hem vist de PIB, població i altres indicadors. Possiblement, degut a l'impacte tecnològic rebut durant la Segona Guerra Mundial i el nou equilibri mundial.
- La primera crisi del petroli que porta els preus per sobre els 20\$, preu pel qual es justifica noves inversions en nous pous i aprofitaments tecnològics.
- Un nou pic de preu durant el 1993, fins als 30\$, moment que també coincideix amb una crisi econòmica important, amb especial importància en països com l'Estat espanyol, assolint alts nivells d'atur i recessió.
- Però res comparable a nivell de magnitud amb l'increment de preus a partir del 2000, ascendint linealment fins als 2006 i exponencialment a l'agost de 2008, pocs dies abans de la caiguda de Lehman Brothers.
- Un període de molta volatilitat els anys posteriors.
- Una estabilització per sota dels 100\$ que impacten en un cost del Barril Brent de referència per sobre dels 100\$.
- Malgrat aquest increment en el preu de mercat, els costos d'extracció de barril en jaciments convencionals continuen mantenint-se constants des de fa anys.

¹³ http://en.wikipedia.org/wiki/Sherman_Antitrust_Act (Octubre 2014)

c) 100\$ barril de petroli: Noves regles de joc i geopolítica emergent

L'increment de 25\$ a 100\$ per barril en només 6 anys ha fet quadruplicar els ingressos dels països productors de petroli, arribant als 700 \$Bilion el 2007 i ha fet empobrir als països importadors.

Aquesta transferència de riquesa està causant un canvi estructural en l'economia global, caracteritzada per:

- alt poder de liquiditat dels països productors (ex. Pròxim Orient, com Qatar¹⁴). Aquests països entren a l'escena mundial amb alts valors de renda per càpita i consum d'energia primària.
- política de diversificacions i inversions arreu del món. A tall d'exemple, a 100\$ la OPEP podria potencialment comprar el Banc d'Amèrica en dos mesos de plena producció, Apple Computers en dues setmanes i GM en només 6 dies (Luft, 2008).
- Aposta per les energies renovables en aquests països, com el complex de Masdar¹⁵, una ciutat "ecològica" que pretén ser autosuficient a Abu Dhabi. Un motiu pot raure en el cost d'oportunitat del recurs fòssil que poden vendre a alt preu sense dificultats en el mercat mundial.
- Alt impacte en economies dependents del petroli i que no disposen de recursos propis, com per exemple, l'Estat espanyol, que hi dedica quasi un 5% del PIB.
- Alt impacte en les economies en desenvolupament, que no tenen accés al recurs a aquest preu. Concretament països com la Xina poden veure capat el seu potencial de creixement i, per tant, de domini econòmic per la manca de recurs energètic. Potser aquest és un motiu del lideratge mundial de la Xina amb producció de panells solars, esdevenint el principal productor i la seva estratègia d'aliances internacionals amb àmplies regions del món, com ara és l'Àfrica, així com un retorn al carbó (per cost i disponibilitat) (GTM Research, 2012).
- Modificació de les regles de comerç internacional, amb l'entrada a l'Organització Mundial del Comerç, OMC, de països com l'Aràbia Saudita al 2006 amb l'aval dels EUA, malgrat tenir pràctiques contraries al mercat lliure.

Paradoxalment, i com ja hem vist anteriorment, la nova situació a nivell macroenergètic situa a regions com Europa en una difícil posició. Sense recurs fòssil disponible i un teixit socioeconòmic altament dependent i adaptat al petroli abundant i barat, es troba amb la necessitat d'encetar una transició ràpida per evitar una descapitalització creixent degut a la importació de "l'or negre", sobretot d'aquells països sense recursos fòssils propis a explotar (recordem que, per exemple, a Alemanya el carbó autòcton és la principal font de generació d'electricitat cosa que, malgrat l'alt nivell d'emissions de CO₂, li permet cert nivell d'independència energètica a les importacions amb una menor afectació macroeconòmica).

¹⁴ EIA/countries analysis <http://www.eia.gov/countries/index.cfm?topL=exp> (Octubre 2014)

¹⁵ <http://www.masdar.ae/en/> (Octubre 2014)

L'Agència Internacional de l'Energia, segons el director d'afers econòmics i màxim responsable del World Energy Outlook¹⁶, Fatih Birol, parla que la dependència econòmica a la importació de combustible fòssil d'una societat esdevé insuportable per les finances d'un estat quan supera el 5% del PIB. I, com hem vist, nosaltres hi estem molt a prop, al voltant del 4,5%, similar a la dependència de països com Malàisia (també al 4,5%), tot i que n'hi ha d'altres amb factures molt més elevades, com Egipte que arriba fins al 14% del seu PIB.

La situació a l'Estat i a Catalunya por veure's agreujada per un afebliment de l'euro davant del dòlar, per una crisi econòmica encara més severa que faci reduir el PIB o que el preu del petroli pugui augmentar fins, per exemple, al voltant de 125\$ el barril, fet, d'altra banda, que és previst d'assolir per la mateixa IEA abans del 2020.

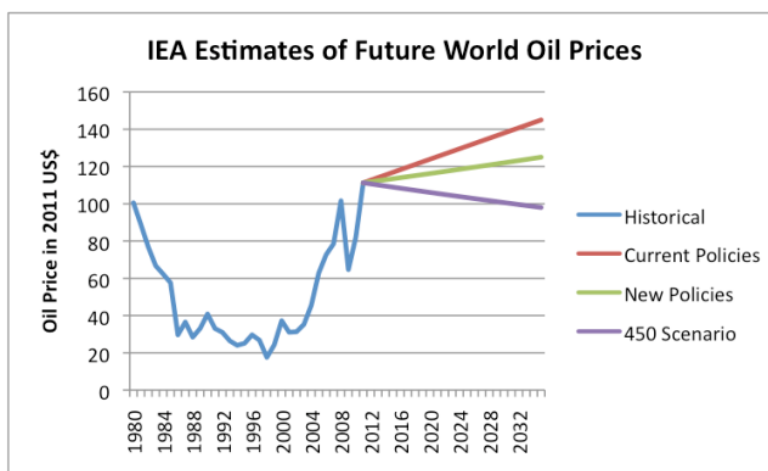


Figura 3.11: Escenaris d'evolució de preus de petroli. FONT: www.ourfinetworld.com¹⁷ basat en dades de l'IEA - 2012 WEO report. Les dades històriques es basen en el BP 2012 Statistical Review of World Energy.

d) Adaptar-se a l'escenari post-petroli: un canvi de recurs sense precedents

Si fins ara la qüestió històrica més determinant ha estat qui ha explotat el recurs (un canvi en el control dels recursos, implica un canvi d'equilibris entre nacions del món), en el futur serà qüestió de "qui pugui adaptar-se millor" al recurs existent i disponible (de matriu solar a mig-llarg termini). Les diferents societats han de veure quin recurs disposen i actuar en conseqüència.

En funció d'aquest fet podem diferenciar entre:

- Regions històricament explotadores del combustible fòssil amb recurs propi (EUA, Rússia, certes regions d'Europa –Alemanya-)

¹⁶ <http://www.worldenergyoutlook.org> (Octubre 2014)

¹⁷ <http://ourfinetworld.com/2012/11/13/iea-oil-forecast-unrealistically-high-misses-diminishing-returns/> (Octubre 2014)

- Regions històricament explotadores del combustible fòssil sense recurs propi (Regions d'Europa com l'Estat espanyol i Catalunya)
- Regions productores de recurs fòssil, però amb societats no industrialitzades (OPEP)
- Regions sense recursos energètics fòssils propis ni importats

Per tant, sembla raonable que cada regió prendrà posicions i decisions estratègiques adaptades a la seva nova situació de disponibilitat de recursos. Aquelles sense accés a recursos fòssils se'ls presenta un dilema a resoldre: continuar sent altament importadores d'un recurs que no tenen i que han de pagar molt i molt car, hipotecant la seva economia; o fer una transició cap a recursos autòctons que, si bé a curt termini pot suposar una pèrdua de lideratge econòmic en el context global, ha de permetre augmentar la resiliència i anticipar-se a l'escenari post petroli. Aquest fet, però, compta amb dues puntualitzacions: els països productors convencionals disposen de fluxos monetaris ingents que els poden permetre liderar les noves tecnologies; l'impacte ambiental de les emissions de CO₂ afectaran al planeta en el seu conjunt, no només al productor/consumidor de fòssils.

Tanmateix, la transició energètica no és trivial. "100% renovables", a voltes es diu, com a hipòtesi que podem mantenir el model socioeconòmic actual, amb un procés intensiu d'eficiència energètica i proveint-nos al 100% d'energia renovable (Scheer, 2012). S'han publicat estudis, com el IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, que mostren el potencial de cada tecnologia renovable per cobrir les necessitats totals d'electricitat, calor i energia primària a nivell global (Lund, 2009). S'afirma que podem garantir la nostra qualitat de vida tot evitant canvis ambientals catastròfics amb un correcte ús de les tecnologies actuals (Pacala, 2004). Tanmateix, trobem visions més crítiques, com les de Vaclav Smil o E. Hansen basant-se en estudis dels fluxos energètics i mostrant limitants físics associats al canvi de recurs (Smil, 2010).

En el que sí que sembla haver-hi consens és que pot arribar-se amb energia eòlica, solar i hidroelèctrica a cobrir un potencial molt major que l'actual en l'horitzó 2050, (National Research Council, 2010) descarbonitzant l'economia¹⁸ a un cost competitiu (Lovins, 2011) i a on les barreres per arribar-hi són també socials i polítiques, a més de tecnològiques (Delucchi, 2011).

Hi ha països que, com Alemanya, malgrat que encara tenen el carbó com a principal combustible, han iniciat el camí de la transició energètica (*energiewende*). Però les conseqüències en l'organització social són de primer ordre de magnitud, hi ha molt en joc i el procés no està exempt d'anades i tornades. La qüestió sobrepassa d'un plantejament merament tecnològic i/o científic i fa necessària la integració de tots els agents que, de manera directa o indirecta, reben el resultat de les decisions resultants de la presa de decisió.

¹⁸ http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm (Octubre 2014)

La singularitat històrica del moment actual rau en el fet que la transició de recurs implica per primera vegada uns nous límits tècnics, com la densitat energètica inferior de les energies renovables. Contràriament, al llarg de la història la successió en l'explotació de recursos s'ha vist sempre afavorit per un major potencial energètic que ha associat el canvi de recurs amb períodes d'expansió socioeconòmica, la qual cosa ha facilitat que, senzillament, *hagi passat*, en períodes més o menys llargs de maduració tecnològica per l'obtenció i adequació del recurs en forma massiva. Més, doncs, per "fets consumats" que no pas com a resultat d'una reflexió social, científica i política. Davant l'oportunitat de gaudir d'un recurs de major potencial per fer treball, les societats no han discutit si aprofitar-ho i adaptar-s'hi o no. Senzillament ho han fet i han *gaudit* d'un període de creixement i millora de les condicions de vida. És el que ha passat històricament amb la successió de combustibles basats en el Carboni (llenya → carbó → petroli) (Sanchez, 2012). I és interessant reflexionar com aquesta successió de combustibles emprats segueix una lògica de descarbonització del combustible, és dir, una relació entre àtoms de carboni i d'hidrogen (C:H) dels diferents combustibles cada vegada menor fins arribar a l'hidrogen molecular sense carboni. O, dit d'una altra manera, un procés de concentració energètica creixent (Steinberg, 1999).

Aquesta major densitat permet una reducció d'emissions per canvi de recurs en termes relatius. Tanmateix, el fet de poder aprofitar un recurs millor porta associat un increment en el consum, de manera que en valor absolut, les emissions poden, fins i tot, incrementar-se. És el que es coneix com a la Paradoxa de Jevons (Giampietro, 2008).

D'altra banda, mostra que el camí de la descarbonització té un límit clar: l'Hidrogen. Tanmateix, aquest gas no es troba en forma atòmica (H^+) lliure a l'atmosfera ni acumulat a nivell molecular en processos biogeològics de milions d'anys, per la qual cosa el seu ús massiu implica un consum energètic i de recursos *en temps real*, un límit físic (obtenció i emmagatzematge) marcat pel recurs energètic emprat (per exemple utilitzant energies renovables per hidrolitzar l'aigua).

Tanmateix, emprar H_2 provinent dels combustibles fòssils sí que esdevé un exemple de canvi de recurs motivat per un millor rendiment termodinàmic i un manteniment del potencial o gradient tèrmic del recurs anterior. Per tant, la descarbonització dels combustibles fòssils no redueix el potencial energètic que explota la societat, ans al contrari, permetria expandir el model socioeconòmic en el qual es dona, però continua cal atendre al balanç energètic i la gestió de les emissions de carboni, que, en tot cas, caldria confinar aprofitant que es generen de manera localitzada. De nou, doncs, ens n'adonem que el factor clau és el recurs energètic primari.

Anàlogament al fet que en aixecar-se el sostre (potencial energètic) del que podem fer gràcies al nou recurs explotat (des d'un punt de vista de disponibilitat de recurs associat a la seva potència) l'activitat socioeconòmica s'expandeix com aquell gas a pressió que, de sobte, troba un volum major on residir, fer una successió cap a un recurs de menor gradient energètic implica un reajust del model socioeconòmic fòssil que, aquest cop, serà difícil que *passi per sí sol*. Semblen dibuixar-se dos escenaris extrems: gestionar una transició "contraintuïtiva" sense una voluntat al

darrera sociopolítica clara; o no fer res, minimitzar el risc i reaccionar davant el col·lapse, si aquest arriba. La resposta esdevé encara més complexa pel fet que la tensió associada a la fi en la disponibilitat de recurs fòssil arribarà en moments diferents segons les regions del món, essent més crític en aquelles més dependents i sense recursos propis, com la nostra. Per tant, el col·lapse no serà de la civilització fòssil. Serà de la nostra societat concreta.

e) Segona Crisi de Petroli: Una nova oportunitat.

La Revolució Científica i la Il·lustració posa les bases per una societat sedent de recurs energètic que no perdrà l'oportunitat d'accelerar el ritme i la intensitat en el consum de recursos si aquests estan en disposició a un preu que el sistema (o part d'ell) pot pagar. Així, la societat contemporània tendeix, tard o d'hora, a aprofitar tot el recurs del que disposa, percebent com una pèrdua d'oportunitat i una ineficiència econòmica no treure rendiment productiu i a curt termini de cada pam de terra o gota de petroli. Hi ha, doncs, un rerefons cultural i, fins i tot ideològic, en la concepció occidental de l'ús dels recursos, que no trobem, però, en d'altres societats. I que, probablement es superarà en paral·lel al canvi de recurs. Un exemple clar són les estadístiques macroenergètiques, com el Producte Interior Brut, PIB. El dogma que sempre s'ha de créixer sobre una base de recursos finits és falsa i perniciosa per la societat que l'adopta. Genera un principi organitzador exitós a curt termini (per exemple, associant-ho als llocs de treball, a la riquesa de les famílies i a l'estat del benestar) amb suports incondicionals sense veure que són índexs de acotats a un context de disponibilitat creixent i a baix cost de recurs en quantitat i intensitat i, per la qual cosa, estan invalidats per avaluar un altre model social.

Apareix aquí un element clau: ¿des d'una visió antropològica i cultural la voluntat de consumir més i més ràpid respon a una interpretació materialista i productivista de l'economia forjada en el context dels darrers segles? O, pel contrari, ¿en un altre context epistemològic que valorés les implicacions econòmiques, socials i ambientals de la sobreexplotació d'un recurs predominant, per més necessari i dependent que en fòssim, podria decidir-se a canviar el recurs a explotar de manera progressiva, fins a trobar un nou punt de (des)equilibri?

Per exemple, la primera crisi del petroli a finals dels 70 hagués pogut generar una oportunitat per anar deixant progressivament la dependència del recurs fòssil i transitar cap a les energies renovables. Però no va ser així. I no perquè no hi hagués coneixement contemporani que alertés de la situació i, fins i tot, tecnologia que ho possibilités (Schumacher, 1974). Sinó per un conjunt de motius sociopolítics, com és l'escenari mundial de "guerra freda", amb dos bàndols que, malgrat que diferien de models d'organització social, eren coincidents en la importància de l'explotació dels recursos i, sobretot, eren dependents de la potència militar que l'ús dels combustibles fòssils i nuclears els conferia.

I és que la supremacia militar i econòmica d'occident davant la resta del món s'ha basat en el control i l'explotació del potencial energètic dels recursos energètics i materials. Fins i tot no sent-ne productors. Un èxit de la geopolítica occidental que ha marcat, sens dubte l'esdevenir del segle XX i primers anys del XXI i, molt

concretament, el període des de la Segona Guerra Mundial fins als nostres dies (Smil, 2004).

Avui se'ns interpel·la de nou amb la mateixa pregunta: després de quasi 50 anys de la Primera Crisi Energètica estem patint la Segona Crisi del Petroli i les seves conseqüències, caracteritzada per la inflació d'un ordre de magnitud en els preus del cru, de manera que justifica noves inversions en accés a recursos més costosos i l'impacte ambiental irreversible ¿és plausible construir un canvi voluntari i conscient de model energètic, malgrat que confereixi modificar el model socioeconòmic?

La Segona Crisi del Petroli ens renova l'oportunitat per, o bé reflexionar i, ara sí, decidir l'inici d'una transició de recurs que vagi coexistent de manera decreixent amb el recurs fòssil que resta, o bé de fer-ne cas omís i continuar com si res fins a la propera crisi (econòmica, social, de disponibilitat de recurs o ambiental). De fet, fins i tot sense l'amenaça de col·lapse podria ser planteable i recomanable una transició energètica ara que encara (sembla) disposem d'energia, materials i recursos econòmics per fer el canvi.

La resposta a aquesta pregunta, però no és "lliure". Hi ha una sèrie de restriccions que la condicionen i amb resposta diferent segons fem l'anàlisi a escala global o regional.

- *¿Tenim un recurs substitutiu a nivell global? i Regional?* La inflació del preu del cru ha permès iniciar noves inversions per accedir a un recurs cada vegada més difícil de trobar. Per exemple, les bosses de petroli en les profunditats marines, les arenas bituminoses d'Alaska, o el *shale gas*. Sembla que dels tres exemples, el que està tenint més èxit és el *shale gas* que, a Estats Units, ha modificat els fluxos d'importació de combustibles, havent aconseguit al 2013 autoproduir més que no pas importar, però per exemple, no està sent reeixit de moment a Europa, tant per escassetat de recurs com de contestació social per una major densitat de població. Aquest fet crea un greuge econòmic a nivell de costos que accentua l'actual crisi financera en països sense recurs autòcton, com el nostre. Alternativament, a escala global el carbó es manté com a principal font de generació elèctrica a nivell global (EIA, 2013) per la seva major disponibilitat regional i menor cost, malgrat els impactes ambientals i socials relacionats. Per tant, a aquesta primera pregunta, podem dir que "sí", de recurs n'hi ha per anys a escala global, però "no" en regions fins ara líders com és Europa.
- *¿És a cost raonable?* aquest "nou" recurs fòssil requereix d'unes inversions majors per la seva obtenció. Per tant, fins i tot sense arribar a curt termini als valors superiors projectats pels principals centres d'estudi en matèria energètica (EIA, 2013), que parlen de 150\$/barril pel 2020 i 200\$ el 2040, podem acceptar com a hipòtesi que "sí". El cost del mercat internacional permetrà a les economies que disposen del recurs per exportar importants ingressos de divises i/o desenvolupar economies internes molt més competitives en veure's reduït proporcionalment l'impacte del cost energètic en la seva estructura de costos (per exemple els EUA davant la UE). Anàlogament, en les economies sense recurs fòssil (com la UE), la situació

esdevindrà a la inversa, no podent assumir la pèrdua de competitivitat pels costos energètics i l'impacte sobre la balança de pagaments esdevindrà "no assumible", cosa que accentuarà el deute extern, l'estructura de finançament del país i afectarà la competitivitat de la indústria i l'economia, especialment d'aquella més intensiva en l'ús de l'energia que competeix en el mercat internacional i que, a més, depengui en major mesura d'importacions del recurs fòssil.

- *¿Disposem d'un embornal suficientment dimensionat que pugui continuar absorbint els residus (per exemple CO₂) sense alterar de manera irreversible els cicles ecològics?* Si acceptem com a límit d'emissions els 450ppm de CO₂ equivalent a l'atmosfera (probabilitat de no augmentar la temperatura mitjana per sobre de 2°C), aquí la resposta és "no" (Hansen, 2008). Ni a escala regional ni global. Les conseqüències són per definició no previsibles, incertes i irreversibles sobre el planeta i la biota. Com a dada contundent, si es vol mantenir aquest límit dels 450ppm a l'atmosfera implica que només podrien cremar-se un terç de les reserves actuals declarades (Carbon Tracker, 2012).
- *¿ho vol la societat?* Possiblement "no". La tradició econòmica forjada amb la riquesa que va propiciar el control dels recursos naturals sota la cosmovisió de la il·lustració i el mètode científic està fortament arrelada i, malgrat les contradiccions cada vegada més evidents, hi ha reticències, no només dels grups amb interessos econòmics directes, sinó també del conjunt de la societat que ha gaudit de privilegis fòssils i als que no està disposat a renunciar. El canvi de recurs necessita una modulació de la consciència social, de profundes arrels antropològiques, i una nova epistemologia que posi les condicions necessàries per la transició de model. Si bé tenim literatura i coneixement científic suficient per forjar aquesta nova visió, i per descomptat cal temps per forjar el canvi (un temps menor per l'ús intensiu de les tecnologies de la informació i la comunicació), el principal problema amb què ens podem trobar és que el canvi sigui a escala regional de manera que aquells pioners que l'iniciïn pateixin a curt termini una pèrdua de posicions en termes econòmics clàssics davant d'aquelles societats productores amb recursos fòssils autòctons o amb capacitat per comprar-los que els permetin continuar, sinó fins i tot accelerar, l'economia intensiva en ús de recursos. Fet que donaria arguments, paradoxalment, als que s'oposen al canvi de recurs, malgrat estiguin en l'error a mig o llarg termini.

f) Paradoxa social: ¿Convé la transició energètica?

El conflicte d'interessos està servit. I no sembla de fàcil resolució. Estem en la cruïlla històrica de canvi de recurs i de batalla pel que en queda intra i inter països. La tecnologia ofereix alternatives d'explotació de recursos a gran escala, que són diferents per regió en funció de quins recursos disposa. ¿Els països amb recurs fòssil no convencional acceptaran no utilitzar-lo pels impactes mediambientals derivats? ¿els països sense recurs fòssil han de continuar pagant factures inassumibles que

hipotequen llurs economies? I si decideixen canviar al recurs renovable, ¿estan disposats a amollar el seu model socioeconòmic? ¿Tenen alternativa a no fer-ho?

Fixant-nos en Catalunya i en Europa, i amb els barems occidentals de mesura de l'èxit i el progrés, fer una transició a recursos energètics renovables a gran escala implica, per definició i radicalitat física, un menor potencial aprofitable del recurs energètic que es tradueix amb un menor potencial militar i econòmic. Per això sovint s'associa "a un retorn al passat" quan, en realitat, segurament és l'única manera per garantir l'energia pel desenvolupament de llurs societats a mig i llarg termini, malgrat el "peatge" inicial associat a un canvi de model econòmic.

La paradoxa social està servida. Abandonar progressivament el model energètic fòssil pot portar a no poder seguir el ritme d'una economia mesurada en termes de PIB (llocs de treball, estat del benestar, entre d'altres) i més quan regions com els Estats Units poden explotar el recurs del *shale gas* per mantenir el seu ritme industrial i econòmic. Per tant, ¿per què ens hem de plantejar fer una transició cap a recursos no fòssils? Doncs en el cas d'Europa molt clar: no en disposa i no els pot pagar. Per tant, el fet de decidir fer una transició energètica aquí és, en realitat, una necessitat i, per compensar l'impacte socioeconòmic cal, sense ser cap garantia, fer el canvi progressivament i liderar el model econòmic descarbonitzat per quan la resta de societats s'hi afrontin. I així anar substituint progressivament la rigidesa d'un model econòmic i teixit industrial intensiu en consum energètic sustentat a base de consumir energia fòssil abundant i barata. No actuar porta a agreujar la crisi econòmica i la pobresa dels ciutadans europeus, especialment d'aquells amb economies més dependents (com la nostra), desballestant l'estat del benestar, incrementant la conflictivitat social i limitant l'accés als recursos i dels beneficis del sistema a les classes dominants. Una tempesta perfecta que apunta a una crisi social sense precedents de la qual en comencem a veure els efectes en temes com la transferència de renda domèstica al proveïment de serveis bàsics, del que n'és un cas extrem la "pobresa energètica", la deslocalització d'indústries globals i altament intensives en consum d'energia, com la química, que veu com els costos energètics d'operar a Europa s'enfilen davant els competidors americans que, per l'efecte del *shale gas*, poden accedir a una energia molt més barata (Aguilera, 2013) i, per analogia, demanen aquí poder fer el mateix obviant, però, que de recurs no convencional no en tenim. Aquesta paradoxa social descrita (necessitat d'actuar, però amb conseqüències econòmiques negatives a curt) porta que a nivell polític no es prenguin les decisions dràstiques necessàries per la transició de recurs. Una altra cosa és que, com passa ara a l'Estat espanyol, no només no es promogui l'eficiència energètica i les fonts renovables, sinó que s'està retrocedint (per exemple amb la penalització de l'autoconsum en la nova Llei del Sector Elèctric). Gestionar la transició energètica requerirà temps, diners i energia. I autonomia política. Per tant, el moment de prendre decisions és ara.

g) L'energia solar, una possibilitat per sortir-se'n, però a alt cost: la complexitat del model energètic contemporani

En aquest context de conflicte per l'ús dels recursos, tenim, però una porta de sortida on aferrar-nos: la Terra és un sistema obert a l'energia i tancat per la matèria.

És a dir, disposem d'un recurs disponible, el solar (energia electromagnètica) d'origen extraterrestre, que, lluny de si ens agrada més o menys, de quines limitacions té, etc. el tenim a disposició per a ser utilitzat i renovat diàriament. És un recurs que, com tots, té les seves propietats i característiques físiques que no podem vulnerar i que ens marquen, òbviament, els límits del seu aprofitament tecnològic. És el recurs que ha emprat la natura al llarg de tota la història i al que s'hi ha adaptat, desenvolupant múltiples estratègies d'aprofitament que cal conèixer i reproduir. De manera que s'ha mostrat altament efectiu i eficaç per crear complexitat viable al llarg de les generacions a partir de combinar-se amb recursos materials a la Terra i gestionant-se amb l'ús de la informació, generant complexos processos com la fotosíntesi i el cicle de Krebs (per anomenar-ne dos) caracteritzats per un ús intensiu de la informació, cicles successius de degradació del potencial energètic del recurs i reciclatge dels recursos materials (fer del residu un nou recurs).

Això que ja ha fet la natura, la societat, l'*homo faber*, ja ha sigut capaç de copiar-ho i reproduir-ho amb la tecnologia (Carbonell, 2000), però no ho ha utilitzat massivament perquè no li ha calgut. El somni fòssil ha sigut bonic, però ara ens despertem amb el regust d'un malson que ens interpel·la. Tenim el recurs i la tecnologia. Sobre les bases teòriques que li van significar el Premi Nobel de Física a Albert Einstein¹⁹ (1921) s'ha desenvolupat una tecnologia i una indústria fotovoltaica que permet transformar –cada vegada amb major rendiment– aquest recurs primari electromagnètic en electricitat. Ara toca aplicar-ho. Aquest fet posa de relleu la importància de l'horitzó temporal de l'anàlisi sobre els recursos, l'àmbit geogràfic, la limitació del model d'avaluació monetari d'allò que és convenient o no, i la necessitat d'una governança global que limiti les accions unilaterals en l'ús de recursos naturals escassos i que la seva explotació tingui afectacions globals. Si tothom actua maximitzant el seu benefici a curt, el resultat pot ser nefast per l'interès global, generant conflicte social en una triple dimensió:

- Atur i desocupació per alentiments dels cicles econòmics propiciats per la reducció en l'ús de combustibles fòssils en aquelles societats que no tenen recurs energètic ni recursos per comprar-lo i genera, entre d'altres, la deslocalització d'empreses per la inflació en el preu energètic i la pèrdua de llocs de treball.
- Poder adquisitiu decreixent de la majoria de la població europea que limita l'accés als recursos energètics, produint-se una fractura social entre qui té capacitat d'accedir a l'energia i qui no (per exemple, si la benzina estigués a 5€ el litre, continuarien havent tot terrenys de consum 15l/100km, però no hi hauria trànsit). Afegit a una transferència de renda domèstica cap a la cobertura de serveis bàsics (aigua, energia, aliments).
- Impacte macroeconòmic, com un endeutament creixent dels estats que no poden fer front a la factura energètica de la importació dels recursos fòssils energètics i materials necessaris pel manteniment de les infraestructures creades, que en el cas de l'Estat espanyol s'apropa al 4,5% del PIB.

¹⁹ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/ (Octubre 2014)

L'Estat espanyol està especialment mal parat atès que no disposa de recursos fòssils propis, té una dependència al voltant del 80% (molt superior a la mitjana europea, a prop del 50%) i un nivell d'infraestructures (exemple, km de trens d'alta velocitat o d'autopistes) molt superiors a la mitjana d'un país de la seva riquesa que genera un alt cost econòmic i energètic d'operació i manteniment. Tots aquests aspectes són pinzellades de la complexitat intrínseca del canvi de recurs energètic. La transició cap al recurs solar no és qüestió purament tecnològica. Les implicacions socials obliguen a un enfocament metodològic nou i global. La complexitat rau en això i en aquest apartat intentarem desgranar les variables a considerar per una correcta anàlisi, diagnòsi i, posteriorment, proposta de bases de la transició energètica.

3.2.3 Aspectes tecnològics associats a l'ús de recursos primaris i la seva transformació

La Primera Llei de la Termodinàmica ens acota que "l'energia no es crea ni es destrueix", per tant, la disponibilitat d'energia primària vindrà determinada per, o bé la concentració de recurs solar i el seu emmagatzematge en forma de combustible fòssil al llarg de milions d'anys (considerant que és energia primària a escala humana d'origen solar acumulada durant un temps tècnicament infinit), per la disposició de nuclis d'Urani des dels orígens dels temps, pel gradient gravitacional o pel flux d'energia en temps real procedent de fora del sistema Terra, en aquest cas, de l'energia Solar i els diferents aprofitaments derivats (vent, biomassa...).

La següent figura mostra en termes absoluts i relatius la quantificació de reserva de recursos energètics primaris. Si només tenim en compte el flux d'energia en termes quantitativs, constatem que l'energia solar que arriba a la Terra és més de dues mil vegades superior a la del consum global. Tanmateix, seria erroni extreure d'aquí que el problema energètic està resolt, ateses les característiques pròpies de cada recurs (per exemple densitat energètica) i la tecnologia vinculada a l'explotació de cada recurs, que en condiciona l'aprofitament a l'hora de realitzar treball útil.

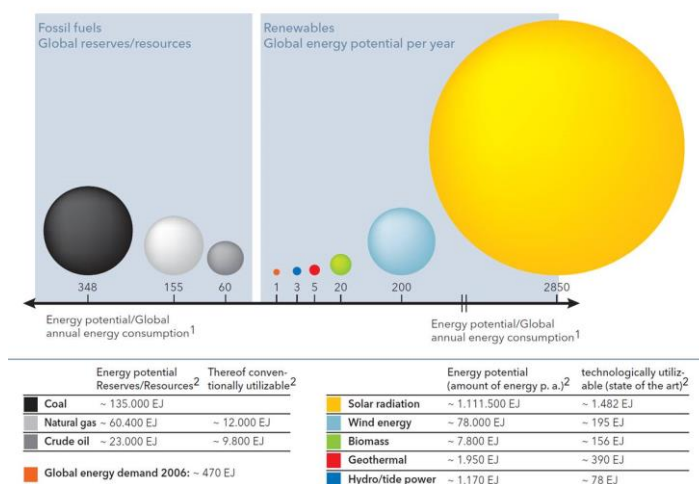


Figura 3.12: Quantificació de recursos energètics primaris i demanda global d'energia. FONT: Hessen-Nanotech (2008) *Global energy resources*²⁰.

²⁰ <http://www.utwente.nl/mesaplus/nme/Introduction/>

a) Recursos energètics

Energia Solar

Podem observar com l'energia solar és quantitativament major que totes les altres juntes. A això s'hi afegeix que la seva distribució és força ubiqua. A partir de la constant solar $K=1353\text{W/m}^2$ que es rep a l'estratosfera per segon, el recurs finalment incident sobre la superfície de la Terra assoleix diferències màximes del 50% entre els indrets més i menys assolellats d'Europa (La Velleja-Malta i Edimburg, Escòcia, respectivament). Per la latitud de Barcelona, podem estar rebent al voltant de 1000W/m^2 (Scharmer, 2000).

A continuació veiem la distribució per les diferents zones del Planeta:

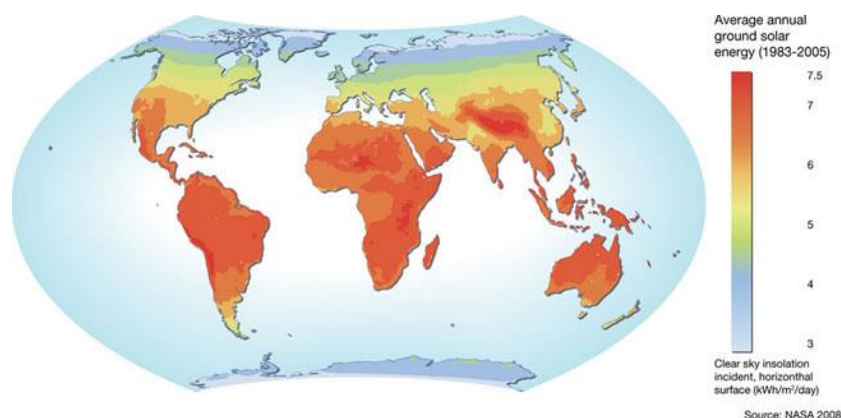


Figura 3.13: Distribució de l'energia solar al planeta. FONT: NASA, 2008

Els sistemes d'aprofitament de l'energia del Sol són múltiples, malgrat que només quedin registrats a les estadístiques aquells que d'alguna manera passen per un procés de comptatge (comptador). Una primera classificació permet separar entre:

A) Aprofitaments a escala temporal humana

- aprofitaments passius: són aquells que permeten aprofitar l'energia que rebem del Sol sense la intervenció de l'home. Han estat els recursos energètics de les societats pre-industrials. Podem diferenciar, alhora, un aprofitament
 - bioquímic (sol → energia química): cicles biològics vegetals i animals (cicle del carboni).
 - tèrmic (sol/infraroig → energia tèrmica): escalfament natural de l'atmosfera i ecosistemes (cicle de l'aigua). Col·labora a la capacitat homeostàtica de la Terra aportant energia i capacitat resilient.
 - lumínic (sol/fotons → energia lumínica): il·luminació natural de dia (i durant la nit, la lluna).
- aprofitaments actius: a través de la tecnologia, l'home actua per obtenir o optimitzar l'aprofitament de l'energia solar. Diferenciem entre sistemes directes i indirectes.

- aprofitament actiu directe: la transformació de l'energia solar en una altra forma energètica susceptible de fer treball es compon d'una sola etapa:
 - Elèctric: efecte fotovoltaic
 - Bioquímic: cicle de Krebs → biomassa vegetal. Cultius
 - Tèrmic: baixa temperatura per aprofitaments a mitja i alta T^a
 - Lumínic: potenciació de sistemes d'il·luminació natural. Arquitectura bioclimàtica
- aprofitament actiu indirecte: la transformació de l'energia solar en una altra forma energètica susceptible de fer treball es compon de dues etapes:
 - elèctric: energia eòlica (sol→vent→energia mecànica) i energia tèrmica a alta temperatura (sol→calor→vapor→turbinat) per generar electricitat. Biomassa (sol→biomassa→energia tèrmica→vapor→turbinat). Hidràulica (sol→energia potencial→turbinat)
 - mecànic: eòlica de bombeig (sol→vent→energia mecànica), biocombustibles (sol→energia química→biocombustibles)
 - tèrmic: biomassa (sol→biomassa→energia tèrmica)

B) Aprofitaments a escala temporal geològica (que podem considerar com Energia Primària a escala temporal humana):

- Combustibles fòssils

NOTA: en queden a fora els recursos de potencial nuclear i l'energia geotèrmica de baixa i alta entalpia.

Cas: Fòssils

Ja hem vist com l'aprofitament tecnològic dels recursos fòssils ha capgirat els darrers 200 anys de la història de la humanitat. La disponibilitat del recurs, però, està acotada a certs llocs concrets d'on cal extreure'l. La localització d'aquests emplaçaments i la quantificació de les seves reserves han esdevingut un dels àmbits de recerca més importants de la indústria petrolera i a on s'hi aboquen importants inversions anualment²¹. Tanmateix, el concepte "reserva" és controvertit per sí mateix, ja que no és equivalent a disponibilitat real i en les condicions de servei necessàries (com la intensitat del flux) per les limitacions tècniques, termodinàmiques i econòmiques associades a la seva explotació (Tverberg, 2008). Finalment, si considerem el límit d'emissions de CO₂ equivalent que puguin generar amb una alta probabilitat un increment màxim de 2°C la temperatura de la Terra, ens trobem que fins a un 45% del total de reserves no haurien de cremar-se (McGlade, 2014), malgrat que tinguin fàcil accés i transformació a un cost viable.

Mostrem a continuació dades representatives (BP, 2013) de les reserves previstes de recursos fòssils extrets per tècniques convencionals i per les noves tècniques no

²¹ <http://www.reuters.com/article/2014/07/10/oil-explorers-idUSL6N0PL2VD20140710> (Octubre 2014)

convencionals (*shale oil* i *shale gas*), malgrat la dificultat en trobar dades actualitzades i contrastades atès l'intens ritme de desenvolupament d'aquesta tecnologia.

- **Petroli:** Les reserves mundials provades de petroli a finals de 2013 (EIA, 2014) van arribar a 1.645.980.000.000 barrils, cosa que representa un increment del 26% en la darrera dècada. De les reserves provades, un 72,6% es concentren a l'OPEP. El comerç mundial de petroli el 2012 va créixer un 1,3%. Els fluxos importació-exportació involucren el 62% del consum mundial, enfront del 57% de fa una dècada i amaga grans canvis de poder regionals. Als Estats Units les importacions netes van caure uns 930.000 barrils/dia, cosa que representa un 36% per sota del seu màxim al 2005. Per contra, les importacions netes de petroli de la Xina van créixer en 610.000 b/d, i només això representa el 86% de l'increment global.
- **Gas natural:** Les reserves provades de gas natural al món a finals de 2012 es van situar en 187.300.000.000.000 metres cúbics, suficient per satisfer 55,7 anys de producció mundial.
- **Carbó:** les reserves provades de carbó el 2012 eren suficients per complir 109 anys de la producció mundial, la major cobertura d'entre tots els fòssils. Europa i Euràsia posseeix les majors reserves regionals, malgrat que els Estats Units són el país amb major reserves, seguit per Rússia i la Xina.
- **Shale Oil:** segons les darreres estimacions fetes per *US Energy Information Administration* (EIA, 2013), les reserves mundials de *shale oil* tècnicament recuperable són de 345.000.000.000 barrils, cosa que representa un 20% de les reserves de petroli convencional. Tanmateix, el ritme de nous descobriments i la seva publicació creix exponencialment. Per exemple, la mateixa agència estimava només uns anys abans una xifra 10 vegades menor. Els cinc països amb major reserves provades són, per aquest ordre, Rússia, EUA, Xina, Argentina i Líbia.
- **Shale Gas:** les reserves provades són sensiblement superiors a les de *shale oil*. D'acord amb la mateixa agència americana (EIA, 2013) se situen en 206.680.000.000.000 metres cúbics, que serien del mateix ordre de magnitud que les reserves de gas natural, inclús lleugerament superiors. Per països, els cinc principals són Xina, Argentina, Algèria, EUA i Canadà.

Cas: Nuclears

L'urani és un element relativament comú en l'escorça de la Terra (WNA, 2014), tan com l'estany o el zinc, i és un constituent de la majoria de les roques, malgrat que la seva concentració és molt variable i, per tant, la decisió d'invertir en els diferents orígens depèn del preu en el mercat. Veiem a continuació les reserves conegudes en valor absolut i en funció del preu en el mercat internacional (OECD, 2012).

L'ús actual (2011) abans de l'accident de Fukushima (11 de març de 2011) és d'aproximadament 68.000 tU/any i els principals consumidors són 21ktU a Europa occidental, 19 ktU als Estats Units i 10ktU al Japó. És a dir, els consumidors de quasi el 75% de tot l'urani no en són productors.

Per altra banda, la producció minera el 2010 és de 53.700 tU/any (la resta s'obté de fonts secundàries -existències comercials, arsenals d'armes nuclears, el plutoni reciclat i urani de reprocessament de combustible utilitzat, entre d'altres-), del qual el 85% prové només de 6 països, el 75% de només 20 mines i el 72% està controlat només per 6 grans empreses (WNA, 2014).

Atès que les reserves totals s'estimen en 5,3 Mt, a un rang de costos al voltant dels actuals preus i comptant que s'utilitza només en els reactors convencionals, tenim recurs per durar uns 80 anys al ritme actual d'utilització (unes reserves superiors a la d'altres recursos minerals), xifra que podria augmentar amb un preu superior ja que, com ha passat històricament un preu més alt al mercat justifica noves inversions que permetran explotar una major quantitat de recurs.

Malgrat cert ressorgiment de la tecnologia termonuclear en països com Xina, Índia, i fins i tot dins la UE, a Finlàndia i el Regne Unit, la contribució de l'energia nuclear en la producció d'electricitat segueix disminuint, segons l'Informe Estat de la Indústria Nuclear Mundial (Schneider, M., 2011). El nombre de reactors va assolir el seu màxim el 2002, amb 444 plantes, davant les 427 al 2011. El percentatge d'electricitat màxim va ser del 17% el 1993, un segon pic del 12% al 2006 i, actualment, en gran part a causa dels tancaments de post-Fukushima al Japó, ha caigut al 10%.

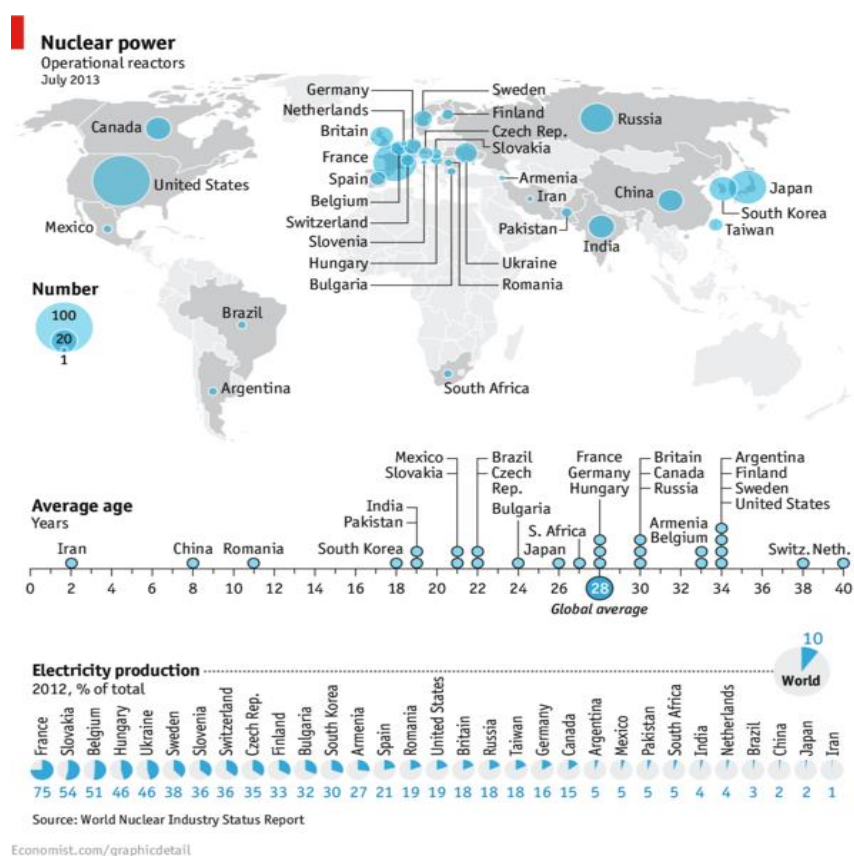


Figura 3.14: Centrals termoelèctriques en operació al món (2013) d'ús civil i percentatge en el mix elèctric de l'energia nuclear per països. Catalunya esdevindria, amb un 55% de contribució en un dels 5 països més nuclearitzats del món. FONT: The Economist

Una darrera dada és que l'edat mitjana del parc de plantes en operació va en augment, amb més de 31 amb més de 40 anys d'edat (2011). Aquest percentatge varia segons els països, segons veiem a la Figura 3.14. Cal fer notar que Catalunya, amb més del 55% de contribució nuclear, se situaria com a segon país més nuclearitzat del món i amb un parc antic, lleugerament superior a la mitjana.

L'ús de l'energia nuclear com a recurs energètic és, doncs, limitat en disponibilitat, d'implicacions militars (proliferació d'armes nuclears), d'un alt impacte ambiental i social davant dels accidents i la gestió dels residus i d'alts costos si es considera la totalitat del cicle de vida d'una planta nuclear.

b) La cadena energètica: des de la disponibilitat de recurs energètic a la realització de treball

La Segona Llei de la Termodinàmica ens diu que “en cada transformació energètica, una part deixa de ser útil per generar treball”. És a dir, no existeix el moviment perpetu i sempre hem d'invertir certa quantitat d'energia per poder adequar el recurs per al seu ús. La cadena energètica correspon a tots els estadis d'adequació i ús del recurs, des de l'energia pròpia d'extracció, de condicionament, de transformació en energia secundària, transport i distribució de la mateixa fins a poder realitzar treball i a la gestió dels residus generats.

Aquesta relació “energia invertida Vs energia disponible” ha de ser <1 ja que altrament estarem en rendiments decreixents, moment en que el sistema s'autocol·lapsaria. És a dir, necessitaríem més energia en el procés d'obtenció i d'adequació per fer aprofitable un recurs que el propi recurs net obtingut. És el fenomen que pot visitar-se a les mines de carbó de Cercs²², al Berguedà, Barcelona.

Dues observacions importants. Primer, cal tenir en compte que poden donar-se canvis entre la qualitat de l'energia invertida i l'obtinguda. En aquest cas, la comparativa no pot ser només quantitativa, sinó també ha d'incloure una anàlisi qualitativa. Seria el cas de la conversió de calor en electricitat mitjançant un motor de combustió extern o motor Stirling²³.

D'altra banda, en l'anàlisi no es comptabilitza l'energia pròpia involucrada en disposar del recurs. És a dir, en el cas de l'energia solar, el recurs el disposem per acció del Sol, sense comptabilitzar l'energia invertida en les reaccions nuclears de fusió que s'hi donen. I en el cas dels combustibles fòssils, l'energia solar involucrada en la transformació de la matèria orgànica morta i en l'assoliment de les condicions necessàries (manca d'oxigen, pressió i temperatura) necessàries per l'obtenció de combustible fòssil durant un període de temps geològic suficient (fixem-nos que, al capdavant, els recursos fòssils són una concentració de l'energia solar que n'ha augmentat la densitat energètica per unitat de volum).

Per tant, quan parlem de cadena energètica i de rendiments decreixents, acceptem la hipòtesi que el recurs ja existeix i ens centrem exclusivament en el procés de com

²² <http://www.mmcercs.cat/> (Octubre 2014)

²³ http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine (Octubre 2014)

aprofitar-lo. Per això és molt útil per comparar tecnologies d'aprofitament d'un mateix recurs, per exemple "l'extracció del petroli" en funció de les característiques de l'emplaçament i les tecnologies emprades. No és el mateix extreure'l de pous aeris a l'Àrabia Saudita, que a 6.000 metres de profunditat marina, com el cas de la plataforma Deepwater de BP²⁴ accidentada al Golf de Mèxic. Com no és el mateix l'obtenció del gas natural per mètodes convencionals que per mètodes no convencionals, com ara la fractura hidràulica. Anàlogament les diferents tècniques de condicionament i adequació i la seva localització, tenen una incidència cabdal en el rendiment global.

Aquest fet té una traducció també econòmica. A mesura que l'obtenció neta d'un recurs (posem per exemple m³ de gas natural) és més complexa, requereix de més inversió econòmica que en justifiqui el seu aprofitament i, una tècnica nova possiblement requerirà d'un escenari mínim de preus que en justifiqui financerament la seva explotació. L'error potencial que podem cometre és confondre l'economia amb la física. Mentre el rendiment termodinàmic de la cadena energètica pot ser molt negatiu, si no internalitzem tots els costos incorreguts, podem tenir la il·lusió que "continua sent econòmicament rendible" aquella manera de procedir. Per aquest motiu, comptabilitzar tots els costos associats al procés energètic hauria d'ajudar a una confluència entre límits físics i econòmics.

Cadenes fòssil i nuclear

Ja hem vist que els jaciments de petroli cru i la seva extracció (primera baula) es concentren en uns pocs països. Les tecnologies involucrades han anat millorant progressivament, esdevenint un sector altament intensiu en capital, sobretot a mesura que el jaciment es va esgotant (recuperació secundària) quan s'arriba a la fase d'extracció de les quantitats residuals a partir de mètodes com les inundacions dels pous amb polímers, diòxid de carboni o solucions càustiques. Posteriorment segueix el transport (segona baula) fins a les refineries en els països industrialitzats, situats a milers de quilòmetres i amb un risc implícit de contaminació en cas d'accident (per exemple l'accident del Prestige²⁵) i fins i tot per operacions habituals (transvasament, neteja de tancs, entre d'altres). Aleshores, a les refineries (tercera baula) el cru és fraccionat i transformat en energia útil i en derivats per la indústria química. Aquets procés té un fort impacte ambiental per emissió d'hidrocarburs, monòxids de sofre, de nitrogen i de carboni, aigües residuals i residus sòlids. La gestió d'aquests residus (quarta baula) esdevé un nou procés que consumeix energia. D'altra banda, els derivats del refinament (cinquena baula) han de ser emmagatzemats i posteriorment transportats (sisena baula) fins a les benzineres o el lloc de la nova transformació (setena baula) dels productes obtinguts, ja sigui en motors, instal·lacions de combustió, centrals elèctriques o indústria química.

El gas natural, per la seva banda, també presenta un esquema similar. L'obtenció del gas per mètodes convencionals es limita a certes àrees del planeta i durant la seva

²⁴ <http://www.bp.com/en/global/corporate/gulf-of-mexico-restoration/deepwater-horizon-accident-and-response.html> (Octubre 2014)

²⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Desastre_del_Prestige (Octubre 2014)

extracció (primera baula), el gas ha de ser comprimit (segona) i refinat (tercera) per adequar-lo al transport. Durant aquest procés se'n separen el sofre i els fertilitzants i, segons la destinació, s'haurà de líquuefactar (quarta baula) a temperatures sota zero de -162°C per reduir el seu volum fins a una seixantena part. Posteriorment s'haurà de transportar (cinquena baula) milers de quilòmetres per gasoductes fins a estacions compresores i dipòsits soterrats (amb alts requeriments energètics per mantenir temperatures tan baixes). Posteriorment s'ha de distribuir (sisena baula) fins als consumidors finals, siguin domèstics, productors d'electricitat o la indústria, on es produeix la darrera transformació en forma de calor (setena baula).

El gas extret per mètodes no convencionals fa més complexa la fase primera d'extracció incrementant-ne el cost econòmic, energètic i ambiental. Modifica les capes geològiques i requereix d'un ús intensiu d'aigua i productes químics, fent-se necessari el tractament dels efluent líquids i implica un nivell alt d'incertesa i de risc de contaminació creuada de vetes i reservoris d'aigua potable.

Respecte el carbó, en tenir una distribució major arreu sovint permet un consum local, per la qual cosa la baula corresponent al transport pot reduir-se significativament. Tanmateix, és un recurs molt heterogeni en composició i, per tant, de qualitat, de manera que durant la seva extracció (primera baula) sigui aèria o en mina, en funció de la seva composició (lignit, hulla, ...) requerirà d'un procés de refinat (segona baula) altament tecnificat i més o menys complex (separació del carbó brut, eliminació de cossos estranys, trituració, homogeneïtzació, garbellat, deshidratació –des del 50% fins a valors entre 10 i 20% en el cas del lignit- i briquetejat), sent un procés gran consumidor d'energia i aigua i generador de residus sòlids i líquids que cal tractar (tercera baula). Com a resultat del refinat, tindrem o bé carbó llest per ser transportat (quarta baula) als consumidors domèstics o a les centrals de generació elèctrica, o bé preparació de coc per als alts forns.

El combustible nuclear no només no és aliè a llargues cadenes de transformació, sinó que esdevé la més complexa de totes ja que el seu procés d'extracció i processament és altament difícil per raons de protecció contra la radiació. Així, després de l'extracció (primera baula), el combustible mineral es transporta a les plantes molturadores (segona) on l'urani natural es sotmet a un procés de refinat (tercera baula) per ser convertit en òxid d'urani o "pastís groc". Posteriorment s'ha de transportar als centres de producció (quarta) i tractament (cinquena) per esdevenir hexafluorur d'urani. Posteriorment es transporta de nou (sisena baula) fins a la planta d'enriquiment d'urani on s'elabora (setena baula) el combustible pròpiament dit. Tanca la cadena el seu transport (vuitena) fins a la planta generadora d'electricitat, on servirà per generar vapor a alta temperatura. Cada pas donat requereix d'una alta sofisticació, un alt consum energètic i un alt impacte sobre la natura amb riscos ambientals associats a possibles fugues de material radioactiu.

- Una raó molt potent: la Cadena Energètica!!

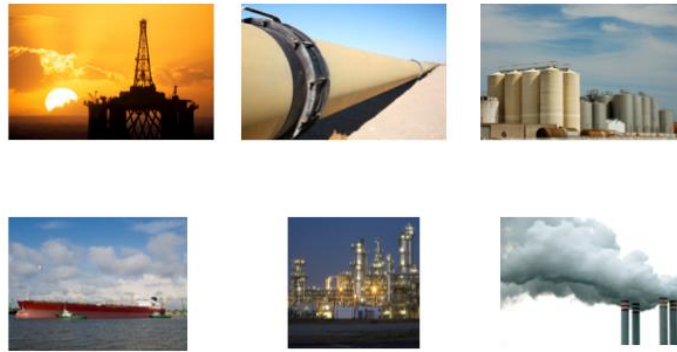


Figura 3.15: Esquema conceptual de la cadena energètica involucrada des d'obtenció del recurs primari fins a la seva transformació en les centrals de producció d'energia. FONT: elaboració pròpia

Cadena energètica de les energies renovables

Aquesta realitat contrasta amb les curtes cadenes energètiques associades als recursos energètics naturals. Si bé es requereix de processos industrials més o menys complexos per la fabricació de les tecnologies de conversió de l'energia primària (silici solar i mòdul solar, pales eòliques, etc.), com passa també amb els requeriments materials propis de les tecnologies de transformació de recursos fòssils (formigó de les centrals nuclears, turbines, ...), el que es constata és que el pas de l'energia primària del sol a la possibilitat de realitzar treball és immediat, amb un sol pas o baula de la cadena.

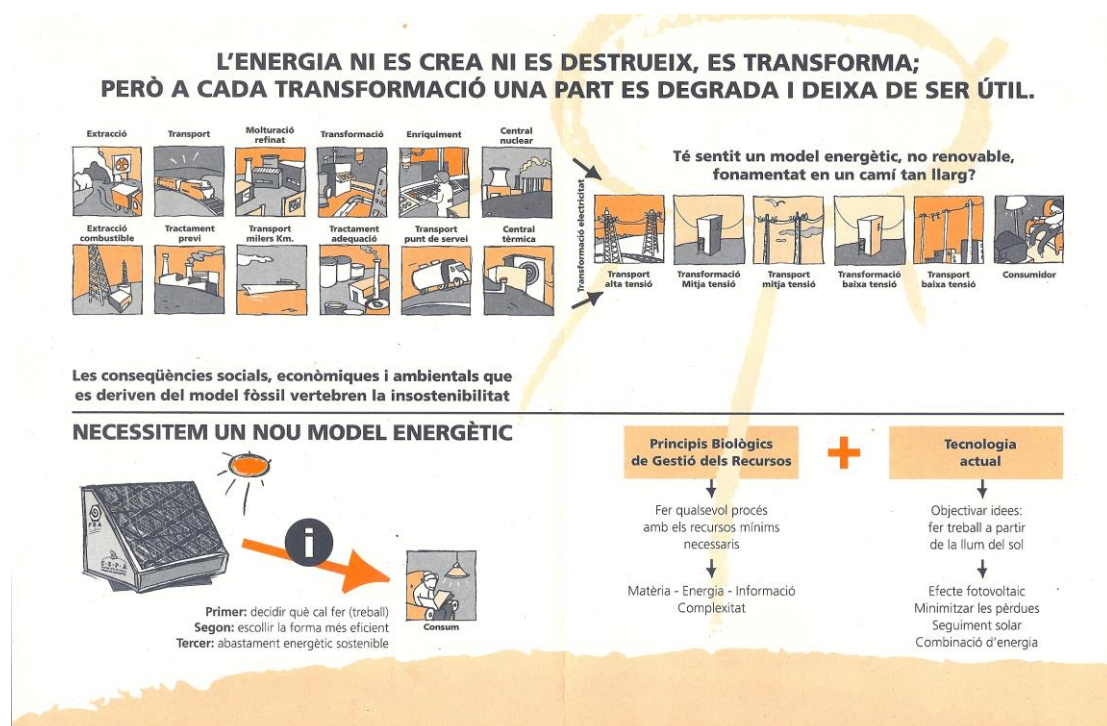


Figura 3.16: Cadena energètica dels combustibles fòssils i nuclears davant la cadena de les energies renovables. La longitud de la cadena s'associa a una pèrdua de rendiment pel 2n Principi. FONT: Font Solar Autònoma, Francesc Sureda, 2001

El sector elèctric. Prolongació de les cadenes energètiques.

El procés de generació d'electricitat per sistemes termoelèctrics té un rendiment màxim fixat pel cycle de Carnot i que se situa al voltant del 33% en cycles simples i fins al 55% en cycles combinats. Així doncs, no només és altament ineficient i costós portar combustible fins a les centrals de producció d'energia, sinó que un cop allà es crema (cas dels combustibles fòssils) o reacciona (energia nuclear) per escalfar aigua (primera baula) i obtenir vapor a alta temperatura que cal gestionar (segona) fins arribar al cycle de turbinat (tercera baula). Posteriorment, i aquí sí que depèn de la tecnologia, gestionar els residus sòlids, líquids i gasosos (diferents baules) fins a poder disposar de tensió elèctrica en alterna que s'eleva a alta tensió (nova baula) per la seva transmissió (nova baula) fins a subestacions per baixar la tensió (nova baula) i arribar, o directament a consumidors industrials, o bé fins a centres de transformació per passar des de mitja a baixa tensió i fer-la apta pel seu consum en el sector residencial, industrial i terciari.

Les pèrdues mitjanes associades a la generació pròpia a les centrals de producció d'electricitat, transformació, transport i distribució de l'energia elèctrica a la Unió Europea són, d'acord amb les dades publicades per l'Agència Europea del Medi Ambient²⁶, del 28,6% (EEA, 2009). És tant important la magnitud d'aquest impacte en termes energètics que esdevé el principal sector consumidor d'energia, tal i com es veu en la següent gràfica, seguit de la indústria (22,0%), el transport (16,9%) i el consum en el sector residencial (15,9%):

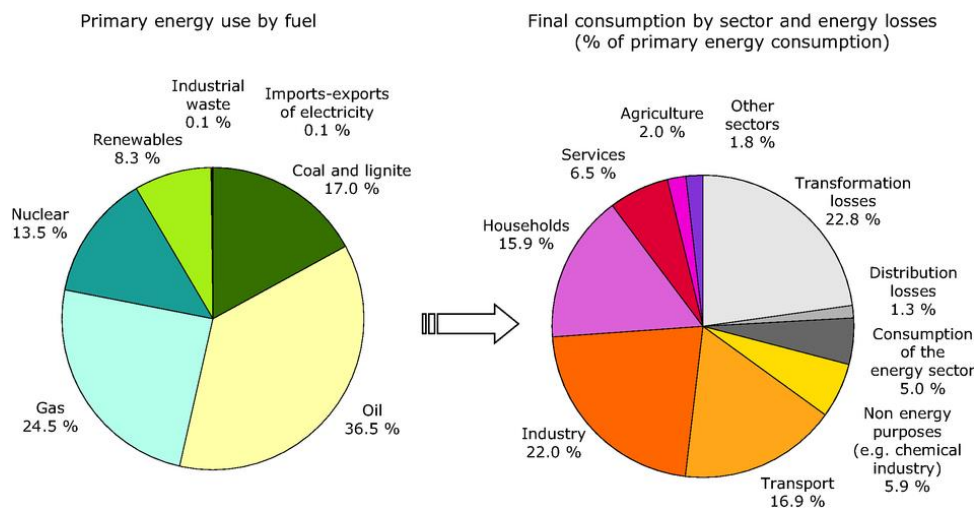


Figura 3.17: Energia primària per combustible i energia final per sector de consum i pèrdues d'energia. S'observa que el principal sector consumidor són les pèrdues del sistema. FONT: Agència Europea del Medi Ambient a partir de dades de l'Eurostat²⁷

²⁶ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/energy-losses-and-energy-availability-1> (Octubre 2014)

²⁷ http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en (Octubre 2014)

Cadenes materials i dels combustibles

Un darrer aspecte, però no menys important, és la reflexió que la cadena dels combustibles fòssils és anual. És a dir, cada any cal que es refaci tot el cycle per poder proveir de manera regular energia a la societat. En canvi, en el cas de les energies renovables, la cadena energètica no està associada a la renovació del recurs, ja que aquest està disponible a l'emplaçament del seu aprofitament. L'energia "natural" necessària per a posar-lo a disposició no es comptabilitza (portar el vent al cim de la muntanya), però òbviament, forma part del macrobalanç energètic de la Terra com a sistema tancat per la matèria i obert per l'energia (en darrera instància d'origen solar). D'aquesta manera, els requeriments materials associats a les tecnologies que permeten transformar els recursos energètics primaris no renovables en treball útil esdevenen menors davant dels recursos emprats en la disponibilitat del recurs (per exemple, el confinament del reactor nuclear) davant els 40 anys d'explotació.

Tanmateix, aquests costos materials involucrats en la transformació són els pràcticament únics i principals en el cas de les energies renovables. És aquesta una avantatge competitiu molt important associada a uns menors costos d'explotació de les diferents tecnologies energètiques, especialment en un entorn d'alta volatilitat del preu del combustible que pateixen les energies no renovables.

En ambdós casos, caldria tenir en compte també els processos d'operació i manteniment intrínsecs de cada tecnologia com a consumidors d'energia i materials. I que, per definició, esdevenen molt menors en el cas de les energies renovables.

Aquest fet, però, a voltes no es veu reflectit en la mesura del Període de Retorn Energètic, EROI, de cada tecnologia, de manera que es fa necessari saber què i com s'ha comptabilitzat aquest paràmetre abans de poder donar fiabilitat a una comparació de diferents valors d'EROI per tecnologia.

La importància de l'eficiència energètica en el consum

Tot aquest procés de desenes de passos entremitjos (baules) necessaris associat a les cadenes energètiques serveix per, una vegada a casa o a l'oficina, encendre la bombeta, fer anar l'aire condicionat o, si pensem en la mobilitat, moure 1000 quilograms de pes (930 de ferralla del cotxe i 70 del conductor) per fer sovint distàncies molt curtes. És a dir, quan entenem les pèrdues i el cost que implica tenir l'energia llesta per a ser consumida i realitzar treball, és quan ens n'adonem de l'alt potencial de l'eficiència energètica. Fer un mal ús en el moment de realitzar el treball ens multiplica per diverses unitats tot l'impacte econòmic, social i ambiental de les llargues cadenes energètiques, sense aportar cap valor. Per exemple, si substituïm una cosa tan simple com una bombeta incandescent per una de baix consum, el seu consum 5 vegades menor fa que tot aquest procés de desenes de baules es divideixi per 5. Tan simple i tan radical.

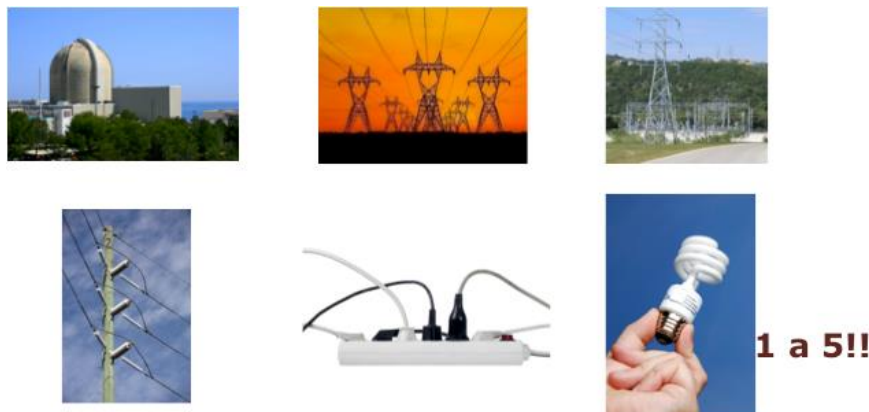


Figura 3.18: Cadena energètica dels combustibles fòssils i nuclears des de la central termoelèctrica de transformació del recurs en electricitat, fins al seu ús per la realització de treball. FONT: elaboració pròpia

c) Consideracions tècniques sobre l'exploració dels recursos energètics

Taxa de renovació de recurs

És el període de regeneració del recurs primari per al seu ús a la Terra. Tenint en compte la Primera Llei, distingim entre els

- recursos fòssils: entre 200 i 500 milions d'anys. A escala humana es pot considerar que no es renoven
- recursos nuclears: no es renoven
- recursos renovables: renovació periòdica i cíclica en períodes d'ordre de magnitud de la vida humana (dies, mesos, anys)

Donada una quantitat determinada de recurs, la seva explotació sostenible ha de ser inferior a la seva taxa de renovació. Aquest fet és d'especial interès per l'aprofitament de recursos com la biomassa forestal, que pot tenir taxes de renovació de 50 anys i, per tant, el seu potencial d'aprofitament energètic ha d'anar molt lligat a la disponibilitat local de recurs.

Rendiment termodinàmic màxim d'aprofitament del recurs

El recurs primari s'ha de poder transformar tecnològicament en energia útil per poder realitzar treball. Aquelles tecnologies termoenergètiques, és a dir, que passen per un procés tèrmic, estaran sempre limitades pel rendiment del Cicle de Carnot, que determina un màxim teòric en funció de la velocitat a què es desenvolupa el procés. Hem vist anteriorment la descripció matemàtica del rendiment i els conceptes de Densitat Energètica i de Potència.

Altres tecnologies, com la fotovoltaica amb una conversió electrònica des de l'energia primària (fotó) amb la secundària (electricitat), tenen un límit termodinàmic per tecnologia de cèl·lula solar conegut (Giebink, 2011), (Shockley, 1961), (Brendel, 1996):

- Unions individuals \approx el 31%
- Triple-unió i impurs \approx 50%

- Dispositius basats ionització en calent \approx 54-68%
- Cèl·lula que opera l'espectre AM 1,5 i amb 2eV bandgap \approx 50,7%
- Cèl·lules solars Excitonic i inorgànic \approx 31%
- Cèl·lules solars basades en polímers \approx 4,4% (Gang Li, 2005)
- Límit d'eficiència per una cèl·lula solar que capta la radiació directa del Sol equivalent a la d'un cos negre \approx 43%
- Límit d'eficiència per una cèl·lula solar que capta la radiació concentrada del Sol \approx 85% (Marti, 1996)

Actualment l'eficiència dels mòduls comercials oscil·la entre 12-21%, xifra que augmenta per sobre del 30% en tecnologia comercial de concentració, CPV.

D'altra banda, tenim les tecnologies electromecàniques, com seria la conversió de l'energia cinètica del vent a electricitat. L'eficiència màxima teòrica d'una turbina eòlica és donada pel Límit de Betz (teoritzat el 1919) i ronda el 59% (Betz, 1967). Segons la llei de Betz, cap turbina pot capturar més de 16/27 (59,3%) de l'energia cinètica del vent. El factor de 16/27 (0,593) es coneix com a *Coefficient de Betz*. A la pràctica, i dependent de cada tecnologia, podem considerar un màxim entre el 75% i el 80% del límit de Betz (Ragheb, 2011).

Finalment, per les turbines hidroelèctriques podem tenir rendiments màxims teòrics del 95%. A efectes pràctics hi ha diferents factors que influeixen, com ara les pèrdues mecàniques per fregament i el cabal que hi circuli (per una alçada fixe). En destaca les turbines Pelton (cabal entre el 30 i el 100% i altures superiors a 100m), les Kaplan (igual rang de cabals, però alçades inferiors a 60m) i les Francis (cabals superiors al 60% i alçades fins a 500m)

En la següent Taula 3.1 es resumeix el rendiment per cada tecnologia de transformació i font energètica primària:

TAULA 3.1: Rendiment teòric i comercial de les principals tecnologies de transformació d'energia primària en electricitat.
FONT: elaboració pròpia

Tecnologia	Energia primària	Rendiment	Valor (teòric/comercial)
Termoenergètica	Calor	Cicle Carnot	33%
Fotovoltaica	Fotó	Sense Concentració	43% / 18%
Fotovoltaica	Fotó	Concentració Solar	85% / 30%
Eòlica	(Tèrmica)/Cinètica	Límit de Betz	59,23% / 45%
Hidràulica	(Tèrmica)/Gravetat		95%

Densitats energètica i densitat de potència

Amb el focus posat en l'energia (Wh) i en les emissions de CO₂ equivalents que se'n deriven, sovint ens oblidem de la importància de la densitat energètica i de potència i les seves implicacions en el repte que suposa per la transició a una economia de baixa intensitat de Carboni (Bucio, 2012). La *densitat energètica* és un concepte amb

rigor científic fàcil de definir com la quantitat d'energia per unitat de pes (J/g ó MJ/kg ó GJ/t) ó volum (J/cm³ ó MJ/L ó GJ/m³).

La *densitat de potència* és més complicat de definir i compta amb múltiples accepcions. Històricament s'ha emprat en el camp de les telecomunicacions (W/m²) i en electrònica de potència, per exemple per mesurar bateries (en aquest cas emprant la unitat W/dm³ ó W/kg) i també en la indústria nuclear. També pot fer referència a la relació entre un flux d'energia i la superfície incident. Un cas típic és l'àrea d'escombrada dels aerogeneradors (W/m²). Cal, per tant, homogeneïtzar les magnituds a l'hora de poder fer comparacions. I una de les propostes més reeixides és mesurar el flux energètic en W/m² horitzontals de terra o mar implicats en la generació del flux (Smil, 2008). D'aquesta manera podem utilitzar-ho com a terme relatiu per comparar diferents "categories" energètiques dels recursos, dels combustibles i del consum. La història de les societats se'ns revela nova si l'analitzem des del punt de vista del poder calorífic o densitat energètica dels successius combustibles que cada període històric ha consumit i que, gràcies a això, ha pogut arribar a determinats nivells de desenvolupament i poder (inclòs el militar).

Fins el segle XVII la societat s'havia basat en combustible de baixa densitat, com la llenya i la fitomassa, al voltant de 4,4 kWh/kg. Tanmateix, l'estil de vida de les societats modernes és només explicable pel predomini de combustible fòssil barat amb densitats al voltant de 12 kWh/kg i superior. En aquest context, pensar en la substitució dels combustibles fòssils per energies renovables implicarà canvis a gran escala que ens tornaran a entorns de baixa densitat. Aquest fet té implicacions socioeconòmiques de primer ordre que cal que siguin considerades en els escenaris de transició energètica, com la necessitat de noves infraestructures o la limitació de certes activitats altament intensives en consum d'energia i potència.

En la següent taula (Layton, 2008) veiem les densitats característiques per cada recurs normalitzades a un mateix valor d'energia-unitat-volum per facilitar-ne la comparació. Independentment de la forma energètica (química, elèctrica, mecànica, tèrmica, nuclear), es considera la quantitat que resideix en una mateixa àrea de l'espai, ex. els fotons (cas de l'energia radiant de la llum) que es contenen en un m³. Sumem la densitat energètica per un volum donat per cada tipus d'energia *natural* i una tecnologia apropiada per extreure-la. A partir d'aquí es poden fer altres anàlisis, com el cost econòmic (a partir del cost de la tecnologia), la necessitat de sistemes auxiliars per la transformació i adequació de l'energia transformada, o el balanç energètic, EROI (Taula 3.2).

Com a conclusió podem afirmar que la densitat energètica és una característica important de cada recurs energètic i s'ha de tenir en compte en qualsevol proposta de canvi de recurs. Això no significa que sigui l'únic aspecte, al contrari. La densitat energètica pot amagar altres propietats dels recursos que cal també analitzar en una anàlisi de múltiples factors.

De totes maneres, però, la gran diferència entre la densitat del recurs fòssil i el de l'energia solar, per exemple, ens mostra que allò que es pot fer amb cada recurs és diferent i, per tant, el canvi de recurs implica un canvi de les activitats que poden ser energitzades i de la infraestructura associada.

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

TAULA 3.2: Densitat energètica (J/m³) de les diferents fonts d'energia primària i tecnologies associades per la producció de treball. FONT: <http://www.drexel.edu>²⁸

Source	Joules per cubic meter
Solar	0.0000015
Geothermal	0.05
Wind at 10 mph (5m/s)	7
Tidal water	0.5–50
Human	1,000
Oil	45,000,000,000
Gasoline	10,000,000,000
Automobile occupied (5800 lbs)	40,000,000
Automobile unoccupied (5000 lbs)	40,000,000
Natural gas	40,000,000
Fat (food)	30,000,000

³ The best endurance athletes can produce 400 to 600 watts for periods of minutes to hours.

⁴ Kinetic energy (human) = $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \times 50 \text{ kg} \times (2 \text{ m/s})^2 = 100 \text{ joules}$.

⁵ This calculation is equivalent to determining the energy density of a slave or unskilled manual laborer.

Densitat de potència de la generació elèctrica

Un cas particular del que hem vist és en la conversió des del recurs energètic a electricitat, el vector universal que permet desenvolupar moviment, transmissió d'informació, i la resta de serveis energètics de la societat actual. Agafant la metodologia de flux d'energia per unitat de superfície horitzontal involucrada (Smil, 2008), tenim el següent recull de densitats per tecnologia (Smil, 2010):

TAULA 3.3: Rang de densitat energètica (W/m²) de les diferents fonts d'energia primària. FONT: Smil, 2010

Tecnologia	Rang Inferior (W/m ²)	Rang Superior (W/m ²)
Gas natural	200	2000
Carbó	100	1000
Solar fotovoltaic (PV)	4	9
Solar concentració (CSP)	4	10
Vent	0,5	1,5
Biomassa	0,5	0,6

Les implicacions d'aquest fet tecnològic són de gran transcendència, en la mateixa direcció del que s'ha apuntat anteriorment. Canviar la densitat de potència determina la infraestructura del sistema energètic. I canviar el que hem construït durant els darrers cent anys no és impossible, però tampoc fàcil per les implicacions socioeconòmiques de primer ordre que implica.

Fins ara la lògica ha sigut dissenyar sistemes de generació d'electricitat dos o tres ordres de magnitud superior a les necessàries en els punts de consum (ciutats,

²⁸ http://www.drexel.edu/~media/Files/greatworks/pdf_sum10/WK8_Layton_EnergyDensities.ash (Octubre 14)

fàbriques, i altres). La disponibilitat abundant i a baix preu de recursos fòssil ho ha permès. Però això no podrà ser replicat pels sistemes basats en recursos i tecnologies de menor densitat, senzillament, perquè no existeix la possibilitat d'assumir aquest nivell de minves en el procés de subministrament.

A més, per compensar la menor densitat (W/m^2) els nous sistemes energètics requeriran de major superfície de generació, transport i distribució, entrant en competència amb d'altres usos (agricultura, activitats humanes, etc.) i amb el compromís d'haver d'augmentar la concentració (densitat) per poder salvar les pèrdues de transmissió fins als llocs de consum.

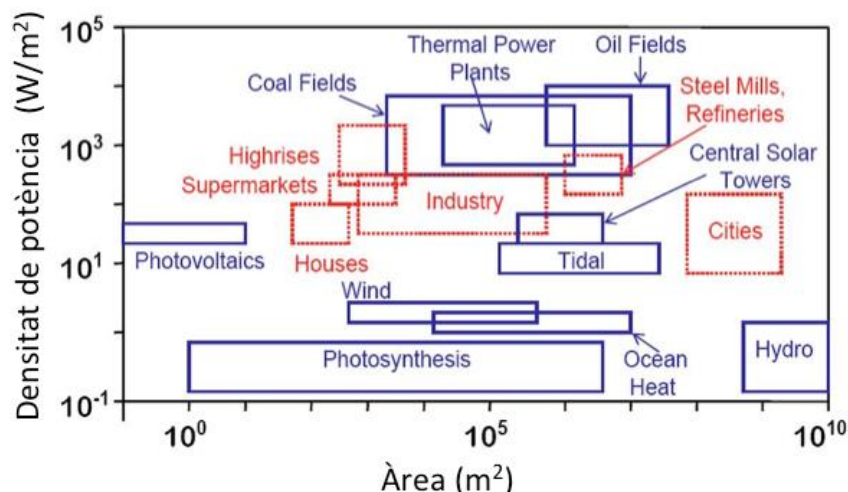


Figura 3.19: Densitat de potència per fonts de generació d'electricitat i usos finals. FONT: Smil, 1991

Observem que el recurs i la tecnologia de conversió han de disposar sempre d'un nivell de densitat energètica superior al consum que hem de satisfer. Això és fonamental per adaptar el consum (amb tota la seva diversitat) a un recurs de menor densitat i impossibilita poder fer un canvi merament de recurs sense incidir de manera dràstica en l'arquitectura de tot el sistema de generació-transmissió-distribució i de consum (Smil, 2010). D'aquí s'obtenen diferents indicacions fonamentals per la transició energètica. D'una banda augmentar la densitat energètica dels recursos renovables (incidint en l'eficiència de la tecnologia de conversió i aprofitant sistemes de concentració ja sigui per major espai o major temps, és a dir, emmagatzematge). D'altra banda, reduir les demandes de potència del consum d'energia, que implica, entre d'altres, redisseny de processos que alenteixin els processos i permetin major eficiència. Finalment, una tercera conclusió basada en la necessitat d'una nova manera de casar la demanda i la generació més enllà del sistema actual que es basa en un sobredimensionament estructural.

Energy Return Of Investment, EROI

Pot definir-se el concepte EROI com "la ràtio entre l'energia obtinguda que podem emprar respecte la invertida per aconseguir aquesta quantitat d'energia disponible".

$$EROI = \text{energia aconseguida} / \text{energia invertida} \quad (1)$$

En relació al concepte de cadena energètica explicat anteriorment, l'EROI és la seva inversa matemàtica presentant valors >1 . El seu àmbit d'utilització ens serveix per

comparar entre les diferents alternatives tecnològiques d'aprofitament i transformació dels recursos. Tanmateix, quan es cerca bibliografia sobre aquest concepte, existeixen diferents mètodes de càlcul de l'energia involucrada (Cleveland, 1984, & 1992) (Gever, 1986). D'aquesta manera es fa difícil un debat transparent que permeti una comparació sense més.

En el cas de la generació d'electricitat, l'EROI implica la comparació de l'electricitat generada amb la quantitat d'energia primària utilitzada en la fabricació, el transport, la construcció, operació, clausura, i altres etapes del cicle de vida de la instal·lació, però no del cicle del combustible. Tampoc es considera el cost de mitigar les externalitats (socials, ambientals, ...) ocasionades per la tecnologia en qüestió.

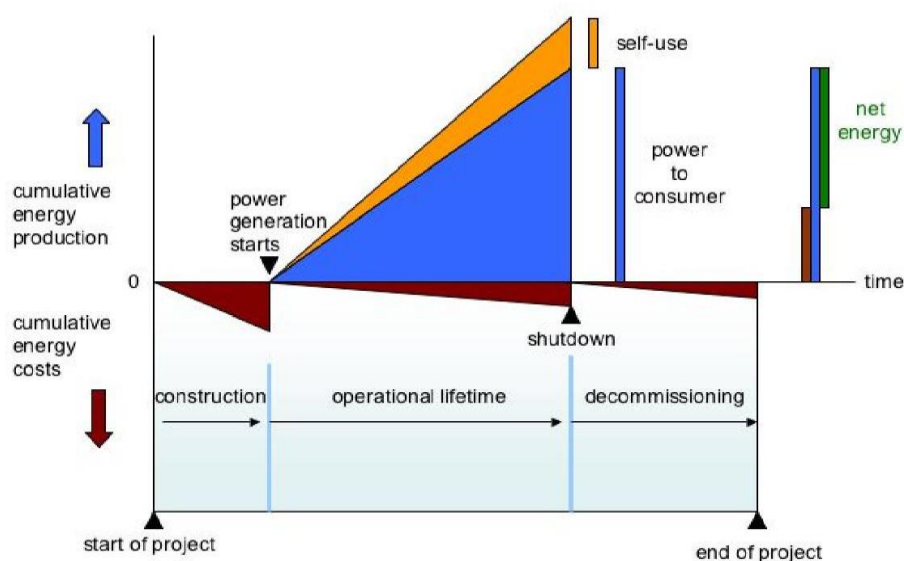


Figura 3.20: Els cost energètics i els outputs energètics d'una hipotètica planta de generació d'electricitat. FONT: Cleveland (2011)

Per exemple, Ruppert (2003) ens mostra com històricament el petroli ha tingut un EROI relativament gran, malgrat les diferents tècniques d'extracció. I, d'altra banda, les energies renovables (vent i solar), han mostrat valors típics baixos i fins i tot negatius inicialment, degut a la relativa baixa densitat energètica d'aquests recursos (Hall, 2014). Tanmateix, aquests estudis no es fan considerant tota la vida útil de les diferents tecnologies de generació, de manera que no es consideren els costos de subministrar regularment combustible i la seva incertesa associada.

Un altre aspecte que es posa de relleu amb l'anàlisi de l'EROI és la importància de la millora tecnològica en l'evolució de l'EROI d'un determinat recurs. Per exemple, una millor tecnologia d'extracció de recursos fòssil o de conversió de la cèl·lula fotovoltaica permet augmentar els EROI progressivament. I, alhora, una menor disponibilitat del recurs no renovable pot portar a una disminució dràstica de l'EROI en el moment que passem de reserves fàcils d'obtenir a d'altres difícils.

Així, la millora tecnològica pot veure's contrarestatada per un canvi en la disponibilitat del recurs primari, entrant en un cicle decreixent on cada vegada l'impacte tecnològic és de menor importància.

I aquest fet també passa, això sí, en menor grau, amb les energies renovables. La ubiqüitat del recurs solar i la seva regularitat fan que l'efecte de millora tecnològic porti progressivament a un millor retorn. Tanmateix, per exemple en l'aprofitament eòlic, l'ocupació de les àrees més ventoses i, per tant, la necessitat d'anar a indrets més remots implicaria un empitjorament del valor de l'EROI.

Cleveland (1956-) ha calculat l'evolució des dels 70 de l'EROI dels combustibles fòssils extrets als Estats Units i constata que han passat de 25:1 a 15:1. (Cleveland, 1997). Concretament, i segons el criteri de comptabilització de l'energia indirecta involucrada en l'extracció del petroli i del *shale oil*, tenim els següents valors:

TAULA 3.4: Taula comparativa de diferents valors d'EROI per petroli convencional i no convencional en diferents moments de la cadena de processat. FONT: elaboració pròpia a partir de Cleveland (2011)

	EROI (boca del pou)	EROI (refinat)
Delucchi (1991)	43,4	4,5
Delucchi (2003)	22,4	4,2
Cleveland (2005)	18,0	-
Brandt (2008)	1,8	1,4
Brandt (2009)	2,0	1,4

Un altre exemple són les sorres bituminoses de Canadà, amb un EROI de 4:1 degut l'alt consum d'energia necessari per a convertir-lo en petroli apte per a ser emprat (Hall, 2014). I els combustibles extrets per tècniques no convencionals (shale gas & oil) (Cleveland, 2011). En la gràfica següent es mostren alguns valors característics de l'EROI per tecnologia (Cleveland, 2005) que no comptabilitzen el cicle del combustible, ni les externalitats ocasionades.

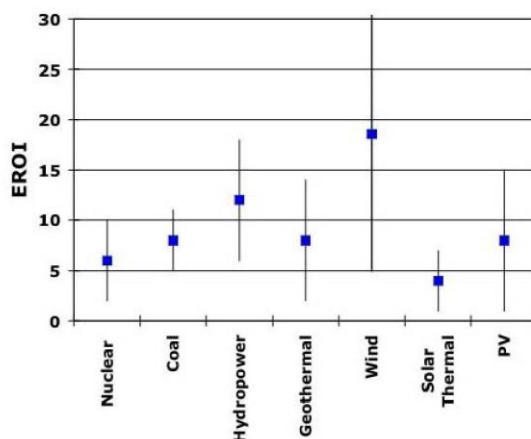


Figura 3.21: EROI de les principals tecnologies de generació d'electricitat sense comptar el cicle del combustible durant la seva vida útil. FONT: Cleveland (2005)

Hi ha estudis en profunditat sobre l'EROI²⁹, que permeten entendre la lògica dels combustibles i les fonts d'energia primària i veure'n les seves relacions de dependència i substitució. Així, la dificultat de substituir recursos primaris no només està en funció de com (energèticament) n'és de fàcil o difícil, sinó també de la totalitat i densitat energètica del mateix.

Cal també entendre les diferents implicacions del concepte d'EROI segons s'aplica a recursos renovables o no (Kessides, 2011). En el primer cas, independentment del balanç energètic en valor absolut, el recurs en qüestió (per exemple, sol o vent) existeix independentment que s'empri o no, per tant el seu cost d'oportunitat és molt baix. Contràriament, quan ens referim a recursos no renovables (fòssils i nuclears) tenen un alt cost d'oportunitat en ser finits i no substituïbles.

Podem concloure que el terme EROI per sí sol és controvertit i caldria no només associar-hi la dada quantitativa amb la qualitativa sinó també complementar-lo amb conceptes com Energy Pay-Back, l'Anàlisi del Cicle de Vida i el "doubling time" (el temps necessari per acumular energia excedentària suficient per desenvolupar una nova infraestructura que dobli la potència/energia disponible) per un coneixement més profund de les implicacions en el canvi de recursos (Weißbach, 2013).

d) Sistemes d'acumulació d'energia

L'acumulació d'energia desenvoluparà un rol fonamental com a vector energètic en la modernització dels sistemes energètics (IEA, 2014), bàsicament perquè permet:

1. **Mobilitat:** el transport representa un dels àmbits de consum més importants i més inflexibles a l'hora de plantejar alternatives als combustibles fòssils. La possibilitat d'electrificar la mobilitat, ja sigui amb sistemes de transport comunitari (tren, tramvia, entre d'altres), particulars (vehicle híbrid i/o elèctric) o de distribució (flotes de distribució en ciutats, ...) obre la possibilitat de substituir un recurs fòssil per electricitat que, potencialment, pot ser d'origen renovable. Els limitants principals són a nivell de densitat energètica de les bateries (Ah per kg) i temps de recàrrega.
2. **Augmentar la flexibilitat en l'equació oferta-demanda:** si podem introduir sistemes d'emmagatzematge d'energia quan ens sobra recurs renovable i el podem oferir a la xarxa en moments de pics de demanda aconseguim equalitzar l'operació de la xarxa. D'aquesta manera, guanyem un grau de llibertat que permet ajustar millor el conjunt del sistema i reduir els costos d'operació. Aquesta aplicació requereix oferir cicles de càrrega i descàrrega de poques hores i pot tenir format de sistemes des de gran potència (associats, per exemple a parcs eòlics i centrals hidràuliques reversibles) fins a poca potència i descentralitzada (a nivell de microxarxa o nanoxarxa, fins i tot a nivell domèstic). D'aquesta manera s'afavoreix un increment major de la instal·lació de potència renovable, una millor integració facilitant l'operació.
3. **Incrementar la densitat energètica del recurs renovable:** una de les diferències principals entre els recursos renovables i els fòssils és que aquests

²⁹ https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/New_Studies_EROI (Octubre 2014)

darrers han actuat com un sistema biològic d'acumulació i concentració d'energia solar i materials orgànics durant milers de milions d'anys. Tanmateix, l'aprofitament dels recursos renovables és en temps real i a densitat fixada. Per tant, l'única manera d'augmentar la densitat de, per exemple, l'energia solar fotovoltaica és disposar d'un sistema de bateries que aporti capacitat de curtcircuit per poder donar resposta a consums pic i estabilitzar tot el sistema. Aquest fet, però, té els factors limitants del temps i la superfície (quants m² i durant quantes hores s'ha generat energia per a ser emmagatzemada), i els tecnològics propis del rendiment en la conversió (de l'electricitat a energia acumulada i de nou en electricitat) i del transport i distribució a llargues distàncies.

4. **Millora de la qualitat i la seguretat de subministrament:** els sistemes de bateries associats als punts de consum i/o a la darrera fase de transformació a baixa tensió poden ser la darrera aportació tecnològica per millorar la qualitat i seguretat de subministrament en els llocs de consum. Com si es tractés d'un gran sistema d'alimentació ininterromput (SAI ó UPS), la bateria pot permetre neutralitzar tots els microtalls i oscil·lacions de la xarxa. Especialment interessant per emplaçaments rurals i finals de línia.

Cada una d'aquestes funcionalitats porta associada una o unes tecnologies d'emmagatzemament pròpies, amb les seves característiques físico-químiques, materials, densitats de potència, temps de càrrega i descàrrega característics i aplicacions (IEA, 2014) i que diferents empreses estan aportant al mercat en diferents graus de desenvolupament³⁰.

e) Arquitectura de producció i consum. Sistemes centralitzats Vs descentralitzats.

A més dels aspectes vinculats al rendiment energètic propis de la cadena energètica i les tecnologies de transformació i adequació, és molt important entendre les diferents tecnologies des del punt de vista de l'arquitectura del seu aprofitament. Com a principi general, si la producció s'apropa al lloc de consum, les cadenes energètiques s'escurcen i se'n millora l'eficiència total.

Però això no sempre és possible. Hi ha tecnologies que requereixen de models marcadament centralitzats per poder-se instal·lar i escalar. Seria el cas de grans plantes nuclears, tèrmiques convencionals i cicle combinat, caracteritzades per altes densitats de potència i dependència de proveïment de recursos fòssils i nuclears.

Altres tecnologies incorporen un cert requeriment de centralització per poder adaptar-se i aprofitar les concentracions de recurs primari renovable, com podrien ser les grans hidràuliques i les eòliques.

En l'altre sentit, trobem tecnologies que, o bé per la ubiqüitat en la distribució del recurs primari (ex. solar) o del consumidor (cogeneració), necessiten d'una distribució en el territori.

³⁰ <http://www.greentechmedia.com/research/report/grid-scale-energy-storage-in-north-america-2013> (Octubre 2014)

L'arquitectura resultant, doncs, introduirà uns requisits determinats de transport amb implicació tecnològica i ambiental. Quan més distribuït sigui el sistema, més penetració d'energies renovables i de tecnologies eficients, però també més xarxes elèctriques de distribució a baixa i mitja tensió arreu del territori (actualment a l'Estat espanyol aproximadament la meitat de l'energia elèctrica s'injecta ja a nivell de mitja tensió). Una capil·laritat telecoenergètica que interpel·larà el paisatge i influirà en l'equilibri territorial. A més, els centres de transformació i les subestacions hauran d'estar preparades per incorporar nivells alts d'automatització i sistemes de seguretat bidireccionals. En una concepció desitjable del sistema en termes de qualitat i seguretat del subministrament, fins i tot seria necessària la capacitat de poder operar en illa segments del territori basant-se en recursos locals (per exemple, com serien les microxarxes). Això, però implica un seguit d'infraestructura energètica associada que representa avui un repte tecnològic per poder oferir una implantació a gran escala (Galvin, 2008). Actualment s'estan realitzant a Catalunya projectes d'aquestes característiques, com ara el Rural Smart Grid, impulsat per Estabanell i Pahisa Energia³¹. En aquest context pren sentit la jerarquitització de càrregues per poder desconnectar-ne selectivament segons necessitats d'operació, evolucionant el paper de la companyia distribuïdora cap a gestor de la xarxa i microxarxa fent d'agregador que s'encarregui dels intercanvis físics i virtuals d'energia entre consumidors i xarxa, aigües amunt.

Anàlogament, un sistema centralitzat requereix d'infraestructura de transport a molt alta tensió (MAT) que, si bé implica un alt impacte visual en el territori quan són xarxes aèries, també aporten nivells d'interconnexió interregional que milloren la inèrcia del sistema i la seva gestibilitat davant nivells molt alts de penetració de tecnologies altament rígides, com serien l'energia eòlica o la nuclear (escenari a Catalunya en els propers anys). Sota aquesta concepció, els nivells inferiors de distribució han de vetllar bàsicament per mantenir la tensió dins els marges normals d'operació.

Podríem graficar-ho, qualitativament, de la següent manera:

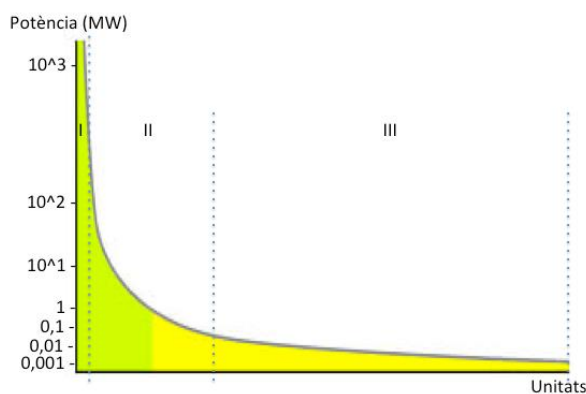


Figura 3.22: Distribució conceptual de les plantes de generació d'energia per potència nominal. Diferenciem la zona I: alta centralització; II: centralitzat; III: Descentralitzat. FONT: Elaboració pròpia

³¹ <http://smarruralgrid.eu> (Octubre 2014)

Per tant, a més de l'eix renovable/no renovable, cal incorporar l'arquitectura de la xarxa per poder tenir una visió completa del potencial de les diferents tecnologies:

TAULA 3.5: Tecnologies de producció d'electricitat en funció de l'arquitectura del sistema energètic. FONT: elaboració pròpia

	Tecnologies basades en recursos NO renovables	Tecnologies basades en recursos renovables
Arquitectura altament Centralitzada	<ul style="list-style-type: none"> - 10³ MW - Termoenergètica nuclear - Termoenergètica fòssil (gas, carbó, fuel) 	<ul style="list-style-type: none"> - Gran hidràulica (>50MW)
Arquitectura Centralitzada	<ul style="list-style-type: none"> - 10² MW - Cogeneració 	<ul style="list-style-type: none"> - Eòlica (fins 50MW) - Hidràulica (fins 50MW) - CSP (<50MW) amb emmagatzematge i/o híbrids - plantes grans de CPV i PV (>10MW)
Arquitectura Descentralitzada	<ul style="list-style-type: none"> - Cogeneració - microturbines 	<ul style="list-style-type: none"> - solar PV - eòlica de petita i mitjana potència - Biomassa

En la taula 3.6 es resumeixen alguns dels trets característics entre ambdós models.

TAULA 3.6: Característiques per arquitectura del sistema energètic en funció del grau de distribució. FONT: elaboració pròpia

	Generació Distribuïda	Centralitzada
Producció de calor	Micro-generació (micro-CHP) per calefacció a nivell domèstic o de barri, <i>district heating</i>	A escala industrial pot aprofitar-se (cogeneració ó <i>combined heat and power</i> (CHP))
Pèrdues per transmissió	Cadena energètica molt curta amb pèrdues molt petites	Mitjana a la UE en el 28% (EEA, 2009)
Xarxa	Redueix l'energia que circula per la xarxa, però requereix de major nombre de nodes i connexions (infraestructura de distribució) i bidireccionalitat	Requereix de major infraestructura de transport unidireccional. A nivell de distribució requereix sovint duplicar-se per augmentar qualitat de subministrament.
Resposta davant d'una fallada de la xarxa	L'electricitat pot continuar estant disponible si es permet treballar en illa	L'electricitat no està disponible davant de fallades
Consumidors	Es pot escollir el recurs i el model tecnològic	Com a molt es pot escollir la companyia subministradora
Fiabilitat i Manteniment	Tecnologies molt fiables (ex. fotovoltaica) amb nivells molt baixos de manteniment	Gestionat per empreses molt especialitzades i professionalitzades en el sector elèctric.
Economia d'escala	Possibilita assolir massa crítica que generi un impacte col·lectiu a nivell tècnic i un menor cost econòmic. Requereix de nous models de negoci.	Economia d'escala des de l'inici a nivell de costos de construcció (una altra cosa és l'accés al combustible i les necessitats de finançament - sovint amb garantia pública.-)
Estructura de costos	Principalment inversió	Inversió, combustible i Operació i Manteniment

Si analitzem la història de la tecnologia elèctrica (Alayo, 2003), ens n'adonem que en un principi el sistema era altament distribuït en funció d'on es disposava el recurs primari (per exemple, els salts d'aigua al llarg del curs d'un riu), de manera que al seu voltant s'hi desplegava la indústria i una societat expansiva (amb la dialèctica social pròpia del segle XX sobre el repartiment de la riquesa i de les plusvàlues). Progressivament, les possibilitats tecnològiques de transmissió de l'energia a llargues distàncies i l'escalabilitat de la generació termoenergètica concentrada basada en combustibles fòssils permet una centralització incremental del sistema que ha caracteritzat el model dominant al canvi de segle.

Actualment estem assistint a una coexistència d'ambdós sistemes amb diferents graus de centralització gràcies a la penetració de les energies renovables i cogeneració a un cost competitiu i malgrat una regulació no favorable a l'Estat com, per exemple, la manca d'un marc legal pel balanç net³² o el canvi retroactiu en la retribució dels projectes de generació renovable que ha generat manca de seguretat jurídica i desconfiança en nous models de negoci (com podrien ser els agregadors o les empreses de serveis energètics, ESE ó ESCO³³) i inversions en noves propostes tecnològiques (microxarxes, emmagatzemament, *smart metering*, entre d'altres).

Flexibilitat i gestionabilitat de les diferents tecnologies

Un altre criteri bàsic a l'hora de classificar les diferents tecnologies de transformació energètica és la seva capacitat de regular el flux d'energia i potència en funció de la demanda variant. L'energia elèctrica flueix i en temps real sempre ha de complir que la generació ha d'igualar la demanda. Independentment de la capacitat de gestionar el consum d'energia i de jugar amb sistemes d'emmagatzemament, al final sempre hi ha una demanda d'energia per cada *dt* que cal satisfer amb el parc de generació i emmagatzematge disponible i els intercanvis internacionals. Per donar-hi resposta cal aprofitar la flexibilitat de càrrega i el grau de gestionabilitat de cada tecnologia:

TAULA 3.7: Gestionabilitat i temps de resposta de les diferents tecnologies de generació elèctrica. FONT: elaboració pròpia

Tecnologia	Gestionabilitat	Temps de resposta
Termoenergètica amb combustibles fòssils	Molt alta	Immediata (10 seg. grup emergència dièsel; 30 min. del cycle combinat – fins tenir vapor de qualitat a la 2a turbina-; 4 h. en tèrmiques de fuel.
Termoenergètica amb nuclear	Molt baixa	48 h
Energia solar fotovoltaica	Molt baixa	Desconnectant unitats de generació
Termosolar CSP amb emmagatzemament, ex. sals, o plantes híbrides.	Alta. Entre 7 i 24 hores de gestionabilitat.	Hora
Energia eòlica	Molt baixa	Desconnectant unitats de generació
Energia Undomotriu	Molt baixa	Desconnectant unitats de generació

³² http://en.wikipedia.org/wiki/Net_metering (Octubre 2014)

³³ http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_service_company (Octubre 2014)

3.2.4 Aspectes no-tecnològics associats a l'ús de recursos primaris i la seva transformació

3.2.4.1 Impacte ambiental

Un aspecte cabdal a l'hora d'avaluar les diferents tecnologies ha de ser l'impacte en el temps i en l'espai de tota la cadena energètica associada a l'explotació dels recursos energètics i les tecnologies associades sobre els ecosistemes i la salut de les persones. La ponderació de la seva importància i el grau d'influència en la presa de decisions dependrà dels valors de la societat, però, en qualsevol cas, cal considerar-los i no poden obviar-se, si l'anàlisi es pretén rigorós. En aquest sentit cal recuperar els conceptes introduïts anteriorment sobre les diferències entre "risc" i "incertesa" d'aquets impactes. Mentre el primer correspon a quelcom mitigable i en certa mesura previsible i gestionable a un cert cost, la "incertesa" no depèn del coneixement o no del que pot passar, sinó que està associada a una ignorància irreductible, motivada, en part, per l'impacte de perturbacions inicials en sistemes complexos que poden desencadenar evolucions no previstes de la dinàmica del clima, dels ecosistemes (per exemple la selva o ecosistemes marins) o les cadenes tròfiques. Es relacionen a continuació els principals impactes per cada tecnologia:

TAULA 3.8: Impactes principals de les diferents tecnologies de generació elèctrica. FONT: elaboració pròpia

Tecnologia	Tipus d'impacte	Afectació	Temps i espai
Termoenergètica nuclear			
Extracció i Condicionament	Radioactivitat	Contaminació ecosistemes i sobre la salut (mort)	Llarg termini, local
	Visual	Modificació del paisatge	Local mig termini
Transport	Radioactivitat	Contaminació per accident	Llarg termini
Transformació	Radioactivitat	Contaminació irreversible del medi i els ecosistemes	Milions d'anys a escala estatal
	Increment de Temperatura	Embornal/Medi absorbidor (atmosfera, aigua, ...)	Local/Global, curt/llarg termini
Residus	Radioactivitat	Contaminació irreversible del medi i els ecosistemes	Milions d'anys a escala global
Altres	Bomba Nuclear / Guerra	Contaminació irreversible del medi i els ecosistemes	Milions d'any, global
Termoenergètica fòssils			
Extracció i Condicionament	Residus sòlids, líquids i gasosos	Modificació d'ecosistemes	Local, mig/llarg termini
	Visual	Modificació del paisatge	Local mig termini
Transport	Residus sòlids, líquids	Modificació d'ecosistemes vius	Local, mig termini
Transformació	Emissions Gasos d'Efecte hivernacle	Increment de la T ^a	A llarg termini a escala global

Tecnologia	Tipus d'impacte	Afectació	Temps i espai
Transformació	Emissions d'altres Gasos i contaminants	Contaminació ecosistemes (ex. pluja àcida...) i sobre la salut humana (partícules sòlides)	Escala humana a escala local
	Increment de Temperatura	Atmosfera	Global, llarg termini
Residus	Cendres	Ecosistemes	Local, llarg termini
Altres			
Energies renovables			
Extracció i Condicionament	Visual	Modificació del paisatge	Local, reversible, mig termini.
Transport	-	-	-
Transformació	-	-	-
Residus	-	-	-
Altres	Territori	Ocupació i competència amb d'altres usos del sòl	Local, mig termini

a) Emissions de CO₂ i combustibles fòssils

Les emissions de CO₂ equivalents (en estat gasós) i partícules sòlides són un dels residus de la combustió dels fòssils. Els darrers anys s'ha posat de relleu l'impacte negatiu sobre el medi un excés de concentració de CO₂, tant per l'increment de la T^a com per l'afectació a diferents ecosistemes, com és l'acidificació dels oceans i les conseqüències que se'n deriven en tota la cadena tròfica.

Emissions de CO₂ del sector energètic

El sector energètic és un dels principals responsables globals de l'emissió de gasos d'efecte hivernacle (IEA, 2009), representant el 46,3% al 2007 i seguit pel transport (22,9% al 2007), altres sectors econòmics (residencial, indústria, comerç) i emissions d'origen no energètic (agricultura, gestió de residus, canvis en l'ús del sòl, entre d'altres). Aquesta situació s'ha anat conformant especialment durant els darrers anys puix una incorporació massiva de noves centrals de generació d'electricitat a nivell mundial des de l'any 2000³⁴, com resumeix la Taula 3.9. La Unió Europea no només és altament dependent de la producció d'electricitat amb recursos fòssils, sinó que utilitza en molts casos combustibles sòlids amb una major emissió de gasos d'efecte hivernacle, GHG, per unitat d'energia produïda (100,2 tnCO₂/TJ) fins quasi representar el 33% del total d'emissions directes (European Commission, 2013). La substitució progressiva per combustibles fòssils gasosos (amb una contribució menor en termes relatius d'emissió de gasos d'efecte hivernacle, GHG, per unitat d'energia generada), mostra una de les vies de com aconseguir una reducció de les emissions del sector elèctric, seguint una lògica de descarbonització dels combustibles.

³⁴ <http://www.platts.com/products/world-electric-power-plants-database>

TAULA 3.9: Noves plantes de generació d'energia elèctrica a nivell mundial des de l'any 2000. FONT: World electric power plants data base³⁵.

Tecnologia	Potència (GW)	%	Vida útil mitjana*
Carbó	416,3	31,4%	38,6
Gas natural	449,1	33,9%	35,8
Petroli	47,5	3,6%	33,8
Nuclear	29,5	2,2%	
Altres lliures de Carboni	231,0	17,4%	
Altres	153,3	11,6%	
Total	1326,7		

* Estudiant la mitjana de 4.573 plantes de generació a nivell mundial (IEA, 2009)

Un segon factor determinant és el rendiment de la tecnologia de transformació. Si la mitjana de tot el sistema se situa al voltant del 50%, les plantes de cogeneració d'electricitat i calor tenen un rendiment que pot voltar el 75%, mentre que les tèrmiques convencionals estan per sota del 35%. Sembla doncs necessari per reduir les emissions, un canvi cap als sistemes més eficients.

Aquesta gran dependència entre les emissions de CO₂ i la producció d'energia, però, no es veu prou internalitzada en els costos de les diferents tecnologies i caldria tenir-ho en compte, per exemple, a l'hora d'avaluar el programa ETS³⁶ (European Union Emission Trading Scheme) que es va posar en marxa el gener de 2005.

Escenaris d'emissions

Davant aquest fet estudiat per la comunitat científica d'arreu sota el paraigües del *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC³⁷, s'han fixat límits d'emissions correlacionats amb la probabilitat d'un increment global de temperatura del planeta que desencadenés efectes irreversibles i no desitjables. Concretament s'ha acceptat per la comunitat internacional, el darrer esdeveniment ha sigut la Cimera sobre el Clima de Copenhague³⁸, no sobrepassar els 450ppm de CO₂ a l'atmosfera per mantenir-se en una probabilitat d'increment màxim de temperatura de 2°C (Azar, 1997). Assolir-ho és difícil per la dinàmica de consum creixent i implica a tots els països combinant mesures que inclouen canvis en el model de producció i consum (eficiència energètica, renovables, i combustibles amb menys emissions) i mesures polítiques que fixin de manera vinculant objectius clars de reducció i facilitin els instruments econòmics (finançament, fiscalitat, entre d'altres) i socials necessaris.

Les conseqüències d'aquest límit, però, són radicals si tenim en compte que la limitació a 450 ppm de CO₂ implica la combustió màxima d'un terç de les reserves provades de combustibles fòssils, que vindrien a ser, en grans números, 1.000 GT

³⁵ <http://www.platts.com/products/world-electric-power-plants-database> (Octubre 2014)

³⁶ http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm (Octubre 2014)

³⁷ <http://www.ipcc.ch> (Octubre 2014)

³⁸ Copenhagen Accord http://unfccc.int/files/meetings/cop_15/application/pdf/cop15_cph_auv.pdf (Octubre 14)

CO₂ (Carbon Tracker, 2012) sobre les reserves provades de 2.860 GigaTones de CO₂ (IEA, 2014). Tanmateix, es continua invertint per trobar més reserves (més de \$672 *bilion* al 2013 i que creix fins a \$1 *trilion* el 2017³⁹). Tenim més petroli que el que podem cremar amb el criteri de 450ppm de CO₂ equivalent a l'atmosfera i això té conseqüències econòmiques de primera magnitud que demanen una gestió multilateral que no existeix. Per exemple, les corporacions energètiques (moltes d'elles estatals) perden part del seu valor borsari, amb el risc d'esclatar la bombolla financera associada als recursos fòssils.

b) Risc i Incertesa de l'energia nuclear

Les conseqüències en els ecosistemes de l'energia nuclear estan identificades i són dràstiques. Tota esperança es posa en el fet que la tecnologia és prou madura com per evitar els desastres i els accidents. La realitat, però, ens mostra que no és així arran de diferents accidents, el darrer el de Fukushima⁴⁰ al Japó l'11 de març de 2011. I, malgrat que ha generat nous estàndards de seguretat que, alhora, generen un increment del cost d'aquesta tecnologia, no es pot descartar amb certesa un nou accident. Afegit al risc d'accident de plantes en operació, trobem la problemàtica de la gestió dels residus nuclears que, per centenars de milers d'anys, esdevenen una herència difícil de gestionar per les generacions futures i altament costosa.

Estem, doncs, davant de les limitacions que la física i la tècnica imposen a l'explotació dels recursos. Si bé aporta una generació elèctrica d'alt potencial i de menor impacte en emissions de CO₂, en no basar-se en la combustió de combustibles fòssils –i això és bo a curt termini- la incertesa associada al seu ús posa en un difícil compromís les societats occidentals altament dependents de grans quantitats d'energia i de potència.

c) Impacte en el territori de les energies renovables

Les energies renovables tenen també impactes sobre el territori i el medi. Tanmateix són de caràcter més lleu, acotat en el territori i de major reversibilitat. Un exemple és el potencial eòlic a Catalunya. Malgrat disposar de dues àrees amb òptimes condicions de vent, estan en ecosistemes molt sensibles de manera que una part important del potencial aprofitament resta exclòs per criteris de preservació natural, tal i com es veu en la següent Figura 3.23. És el que podem anomenar "Paradoxa Renewable": malgrat que l'impacte global sigui menor, l'impacte local pot augmentar, fins i tot a nivells que generin el rebuig de la població i el territori. El que caldrà veure és com es resol aquesta dicotomia en l'ús dels recursos per donar resposta a una alta dependència energètica a un cost cada vegada major d'accés als combustibles fòssils que empobreix les societats per no poder pagar la factura energètica als països productors, i l'alternativa de les energies renovables i el seu impacte en el territori.

³⁹ <http://www.reuters.com/article/2014/07/10/oil-explorers-idUSL6N0PL2VD20140710>

⁴⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster

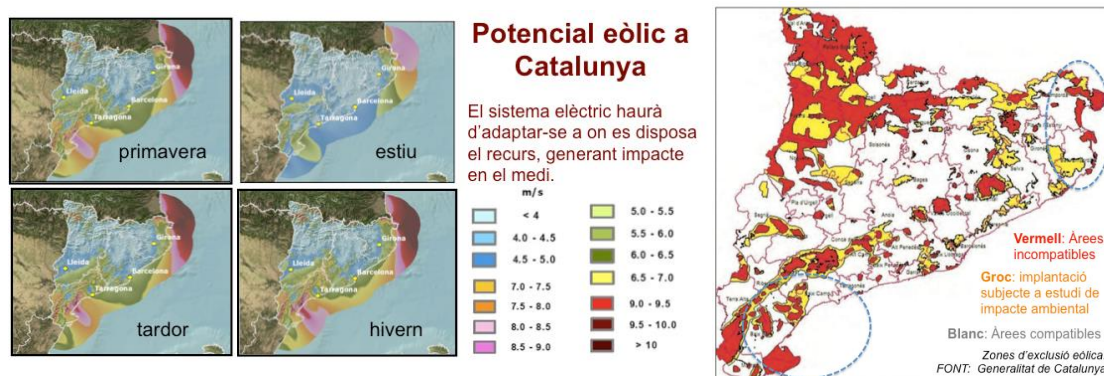


Figura 3.23: Potencial eòlic a Catalunya i àrees d'exclusió eòlica. FONT: Smartgrid.cat sobre dades de l'Institut Català de l'Energia, Generalitat de Catalunya

3.2.4.2 Impactes econòmics

a) Explotació dels recursos energètics

La política energètica comunitària⁴¹ es basa en tres pilars: màxima qualitat i seguretat de subministrament, mínim cost i mínim impacte ambiental. Com tot trilema, no es pot maximitzar tots tres factors a l'hora. Ni tan sols fent la *trampa* de considerar només el cost de generació d'energia resultant de la cassació al mercat marginalista, és a dir, sense considerar els altres costos de la cadena energètica (des de l'extracció fins a la gestió dels residus). Davant d'aquesta realitat hi ha dues propostes metodològiques. D'una banda, l'economia ambiental intenta quantificar els impactes ambientals, incorporar-los d'alguna manera i aplicar fiscalitat –o altres mesures- específiques que intentin posar de relleu aquests costos. Per exemple, el mercat de CO₂ seria un mecanisme de mercat que pretén anar corregint aquestes desviacions. I de l'altra, s'hi contraposa l'economia ecològica (Martínez Alier, 1995), d'arrel científica, que proposa incorporar les Lleis físiques i naturals dins el procés econòmic, per exemple, les Lleis de la Termodinàmica (Georgescu-Roegen, 1986).

b) Disponibilitat de recursos en funció del preu del mercat

Un dels aspectes que s'ha posat de relleu amb l'anàlisi de la història dels recursos naturals és que el finançament per l'explotació de certs recursos i les tecnologies associades es desencadenen quan hi ha senyals de mercat suficients com per garantir el retorn de la inversió associada i necessària per a fer-ho possible. És a dir, de diners n'hi ha i molts. Millores tecnològiques associades a l'explotació del gas per mitjans no convencionals (*shale gas*) desencadenen inversions multimilionàries que, sota la lògica capitalista, esperaran el seu retorn econòmic. El desenvolupament de l'energia nuclear segurament no hauria sigut possible sense la seva dimensió d'ús militar, sota el paraigua del qual, s'han fet inversions sense límit, sobretot durant la Guerra Freda, on l'important era la supremacia militar. Per tant, és molt revelador analitzar les operacions d'inversió en recursos fòssils en funció del preu de venda del recurs una vegada obtingut. El preu actual del barril vora els 100\$ i està per quedar-se, redimensionant aspectes com el límit d'emissions, la viabilitat econòmica de les

⁴¹ http://ec.europa.eu/energy/index_en.htm

renovables (especialment en aquells països que han de comprar el petroli), el potencial d'altres tecnologies (com la nuclear post-Fukushima), l'impacte econòmic de l'energia en la comptabilitat nacional i l'equilibri geopolític mundial.

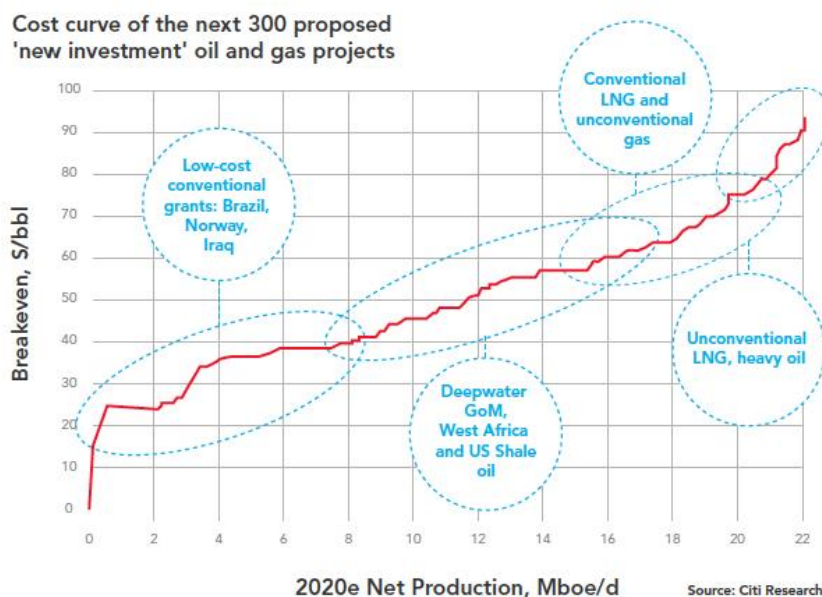


Figura 3.24: Corba de cost dels propers 300 projectes d'inversió en petroli i gas. FONT: Unburnable Carbon 2013, Carbon Tracker Initiative and Grantham Research Institute of Climate Change and the Environment

c) Petroli i PIB: una estreta relació

Fixem-nos com en els dos moments històrics caracteritzats per un increment sobtat i ràpid del preu del combustible fòssil (Figura 3.25) se succeeix un període de recessió econòmica global immediata (Figura 3.26) (Tverberg, 2012). Després de la Primera Crisi hi ha una recuperació basada en una estabilització del preu, que s'allarga fins a tombant del segle XX, i que és fruit d'un increment en el preu mig del petroli que permet de nou l'explotació de recus fòssil en condicions d'abundància.

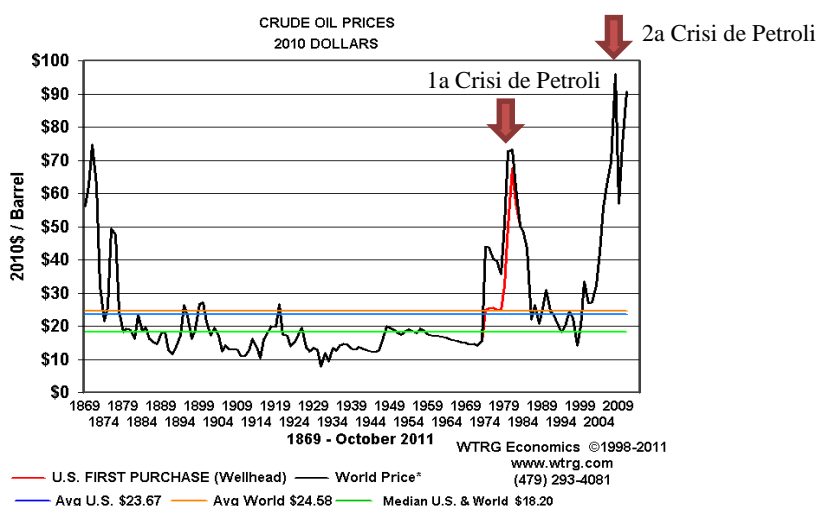


Figura 3.25: Evolució del preu del petroli per anys. S'observa l'impacte en el preu de la 1a i de la 2a crisis del petroli. FONT: <http://www.wtrg.com>⁴²

⁴² http://www.wtrg.com/oil_graphs/oilprice1869.gif (Octubre 2014)

Veiem també en la següent figura la correlació entre l'evolució en l'ús dels recursos fòssils i el PIB (ó GDP), a escala mundial.

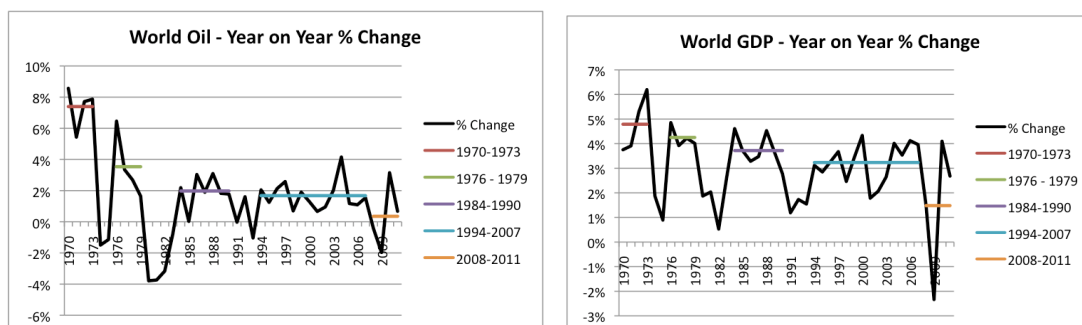


Figura 3.26: Percentatge anual mundial d'increment en consum de (a) petroli i (b) PIB. FONT: www.ourfinitemworld.com⁴³

Actualment, el preu mig de petroli s'ha situat al voltant de 100\$/barril, preu que pot permetre un nou equilibri en haver pogut invertir en prospecció i en tècniques d'explotació de recursos no convencionals, com el *shale gas*, de manera que, aparentment, podem tornar a tenir una font abundant i d'alta potència per la recuperació econòmica a nivell global, però, això sí, amb impactes regionals diferents que canvien els equilibris geoestratègics.

d) Impacte socioeconòmic de l'encariment del petroli a Europa i Catalunya

Europa en el seu conjunt, però amb intensitat diferent segons la dependència de les importacions en cada estat i regió, ha entrat en una situació crítica dins el nou paradigma de combustibles fòssils a alt preu per dos motius principals:

1. No disposa de recursos fòssils propis (ni amb tècniques no convencionals), de manera que ha d'accedir als mercats internacionals a comprar-los cars.
2. Té una economia molt dependent dels recursos fòssils abundants, amb una alta inelasticitat al preu.

D'aquesta manera, es veu abocada a una posició molt dèbil a nivell geoestratègic, perdent, a més, l'aliat tradicional dels Estats Units a l'hora de mantenir el domini polític i militar en regions clau com el Pròxim Orient i, afegit, depenent d'un proveïdor com Rússia que ja veiem que utilitza el factor energètic com a clau de la negociació en conflictes territorials (Ucraïna) i polítics.

En xifres econòmiques, això ha representat una factura energètica de més de USD500 bilion el 2012⁴⁴ (per contextualitzar-ho, és més gran que tot el deute Grec, que és de USD370 bilion). Aquesta factura està incrementant any rere any des del 2000 a un ritme mig de 182USD\$ bilion per any i una situació de debilitat de l'euro davant del dòlar fa augmentar encara més la xifra total. Tot i així, molts països europeus utilitzen fonts fòssils autòctones, com el cas alemany, on el carbó és el principal combustible per la generació d'electricitat⁴⁵. Això fa que en el conjunt de la

⁴³ <http://ourfinitemworld.com/2012/07/18/how-much-oil-growth-do-we-need-to-support-world-gdp-growth> (Octubre 2014)

⁴⁴ <http://www.reuters.com/article/2012/03/27/iea-oil-bills-idUSL6E8ER8CF20120327> (Octubre 2014)

⁴⁵ <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart> (Octubre 2014)

UE la factura de les importacions de petroli sigui d'uns US\$500 bilion sobre un total del PIB de *US\$12.894.000 bilion*, cosa que representa menys del 0,004%.

La situació comença a ser difícil de sostenir econòmicament i, en paraules de la pròpia Directora Executiva de l'Agència Internacional de l'Energia, Maria Van der Hoeven⁴⁶, "(...) cal reduir els subsidis als combustibles fòssils, accelerar l'eficiència energètica i incrementar l'aportació de les energies renovables ja no per motius ambientals (que també), sinó per mantenir el sistema econòmic".

e) Balança comercial de l'Estat espanyol

A Catalunya trobem l'efecte d'aquesta pinça (alta dependència i sense recursos fòssils propis) amb la singularitat que no tenim dependència del gas rus, però sí del Nord d'Àfrica, d'on som corredor natural per la seva connexió a Europa a través de la connexió, d'alta prioritat per la UE, MIDCAT⁴⁷. La situació, però, és molt més greu atès que, com el conjunt de l'Estat espanyol, tenim una dependència de l'exterior del 75,6% (2011)⁴⁸ i la factura energètica no ha fet més que pujar fins a arribar a un balanç negatiu de 45.696 milions d'Euros el 2012. Aquesta xifra, sobre el PIB de l'Estat⁴⁹ del mateix any de 1.029.002 milions d'euros, representa un 4,44% (un percentatge més de 1.300 vegades superior al de la mitjana europea). L'any 2013 va tancar-se amb una balança comercial deficitària de 16.000M€ i la Secretaria d'Estat de Comerç calcula que sense el cost energètic, hauria sigut de 25.000M€ positiu. És a dir, s'estima que el dèficit per la compra d'energia ha sigut d'uns 41.000M€, cosa que representa un 4% sobre un PIB-2013 de 1.016.653M€ (un 1,2% de caiguda de PIB respecte l'any 2012).

És interessant veure que el preu mig del barril Brent va tancar a 111,96\$ el 2012 i a 108,85\$ el 2013, cosa que representa una caiguda del 2,78%. Però si tenim en compte el canvi dòlar a euros, el preu mig va variar des de 87,04 € (2012) a 81,96 (2013), és a dir, una reducció neta del 5,84%.

Fent una regla de tres, si $(87,04-81,96) = 5,08$ euros representen 4.000 M€ (diferència entre dèficit comercial per energia 2013 Vs 2012, considerant un PIB pràcticament constant), tenim que una variació d'1€ en el preu del petroli al preu de canvi €/€ té una influència en la balança de pagaments d'una mica més de 780 M€, aproximadament un 0,075% del PIB. Si hi sumem el dèficit tarifari elèctric de més de 30.000 milions d'euros i els interessos anuals generats (al voltant de 3.000 milions anuals), ens situem per sobre el 5% del PIB, una llosa que cap economia desenvolupada pot aguantar gaire temps i, si bé pot estabilitzar-se lleugerament a la baixa si el preu del petroli resta per sota de 100\$/barril, factors externs com un conflicte internacional o una davallada de la fortalesa de l'euro davant la divisa nord americana, pot incrementar-ne l'efecte pervers.

⁴⁶<http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2012/may/europesoilbillissettoeachusd500billionin2012.html>

⁴⁷ http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/pci/doc/2013_pci_projects_country.pdf

⁴⁸ <http://www.minetur.gob.es>

⁴⁹ <http://www.ine.es>

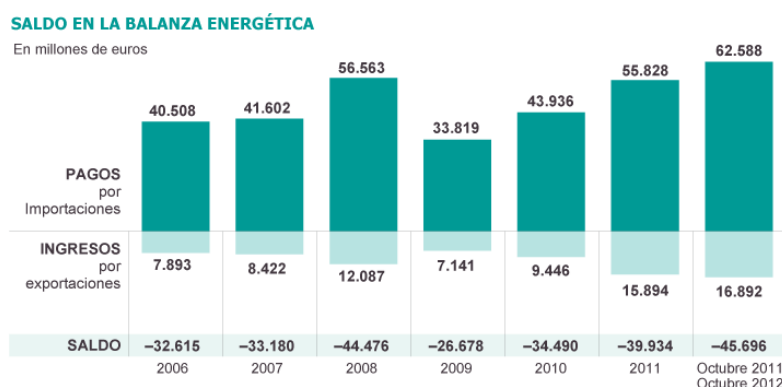


Figura 3.27: Evolució de la balança energètica comercial a l'Estat espanyol. FONT: El País, adaptat del *Ministerio de Industria, Energía y Turismo*

Aquesta dependència té un alt impacte a nivell macroeconòmic del país a més d'esdevenir un punt feble de cara al futur. No es pot influir en el preu del petroli en el mercat internacional, de manera, que l'alta dependència pot llastrar l'economia del país, especialment crític en un moment com l'actual. Tanmateix, en el que portem d'any 2014, i degut a disposar d'un euro fort en el mercat de divises, el barril Brent s'ha situat a una mitjana de 79,10 €/barril, mentre que pel mateix període del 2013, el preu era de 85,5. Una rebaixa de 6,4 euros que implica un estalvi aproximat de 5.000 M€ i que pot donar compte de les previsions macroeconòmiques del país.

f) L'energia un sector altament subvencionat

Una de les característiques pròpies del sector energètic és el seu caràcter estratègic. Això ha fet que els ajuts públics dels governs i les diferents regions amb interessos econòmics compartits hagin intervingut des de l'inici de l'explotació dels recursos fòssils i nuclears. Segons l'Agència Internacional de l'Energia, conjuntament amb l'OCDE⁵⁰ i el Banc Mundial, han relacionat els principals fons d'ajuda (IEA, 2010, 2011):

TAULA 3.10: Principals subsidis dels combustibles fòssils. FONT: OCDE⁵¹

Tipus	Descripció	Exemples
Instruments comercials	Quotes, Restriccions Comercials, tarifes	Tarifes d'importació de petroli cru i derivats
Regulacions	Control de preus, demanda garantida i obligatòria, restriccions d'accés al mercat, planificació preferencial, facilitar l'accés a recursos	Preus de la gasolina, prioritització del carbó local per generació elèctrica
Exempcions d'impostos	Reducció de royalties, de gravàmens als productors i impostos sobre beneficis. Crèdits fiscals i deduccions per depreciació accelerada. Reemborsaments, devolucions o exempcions en matèria d'impostos	Deduccions fiscals favorables per depreciació. Inversions en els jaciments de petroli i gas i els dipòsits de carbó. Exempcions especials sobre els combustibles utilitzats en transport aeri

⁵⁰ <http://www.oecd.org/site/tadffss/> (Octubre 2014)

⁵¹ <http://www.oecd.org/site/tadffss/> (Octubre 2014)

	d'energia i els impostos de CO ₂ o de l'energia en els impostos generals de consum	internacional, ferrocarril o el transport marítim
Crèdit	Interessos baixos i preferencials per crèdits al productors	Avals i garanties per finançar la infraestructura energètica
Transferència directa de capital	Subvencions als productors i als consumidors	Programes socials destinats al pagament de l'electricitat i la calor
Transferència de risc	Limitació de la responsabilitat financera	Assegurances i cobertura d'indemnitzacions als productors fòssils per sota dels nivells de mercat
Serveis energètics proveïts pel govern sota preu	Inversió directa en infraestructura energètica. Finançament públic de la recerca i desenvolupament	Provisió de dades sísmiques per l'exploració de petroli i gas. Finançament del govern per seguretat en mines de carbó i carbó net.

Totes aquestes partides no estan quantificades en els costos del sistema energètic fòssil i nuclear. Segons l'Agència Internacional de l'Energia (IEA, 2011), les subvencions als recursos fòssils són econòmicament ineficients, creen distorsió als mercats i repercuteixen només en els països rics. Mesurats en \$409 bilion (2010) representen \$110 bilion més respecte el 2009.

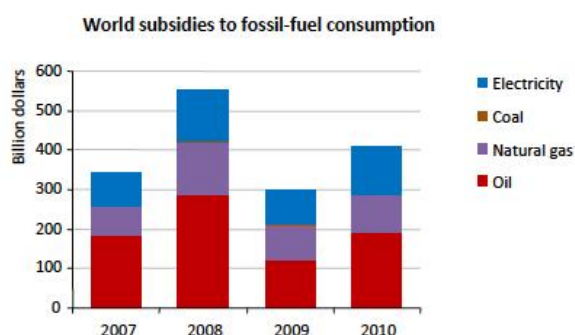


Figura 3.28: Evolució anual de les subvencions rebudes pels combustibles fòssils. S'observa que al 2010 han superat els \$409 bilion, un 25% més que el 2009. FONT: IEA – WEO, 2011

El G20 va acceptar al 2009 anar retallant progressivament les subvencions als combustibles fòssils per reduir el malbaratament en el consum d'energia, augmentar la seguretat en el subministrament i lluitar contra el canvi climàtic (IEA, 2012), malgrat que després no s'ha pogut objectivar en mesures concretes⁵².

g) Preu de l'energia LCoE – Levelized Cost of Energy

El cost de l'electricitat o *Levelized Cost of Energy*⁵³ (c€/MWh, c\$/MWh) és el càlcul del cost de la generació d'electricitat en el punt de connexió. Inclou el capital inicial,

⁵² <http://www.theguardian.com/environment/2013/nov/07/fossil-fuel-subsidies-green-energy> (Octubre 2014)

⁵³ http://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source (Octubre 2014)

la taxa de descompte, els costos d'operació i manteniment i el combustible. En queden exclosos les externalitats, factors del sistema (ex. les pèrdues per transport i distribució). És una dada important tant a nivell de valor absolut, com relatiu per fer comparació entre tecnologies. Tanmateix, cal tenir en compte les visions crítiques del mateix (Awerbuch, 2006), per exemple associat a la taxa de descompte (sobretot en els casos de grans inversions inicials) i a la no incorporació del factor risc en el cost del combustible a futurs. D'aquesta manera, les tecnologies renovables amb una major contribució del cost d'inversió (CAPEX) enlloc del d'operació i manteniment i accés de combustible (OPEX), presenten major seguretat i, en tot cas, una previsió de reducció del cost en el futur atès el canvi tecnològic. Contràriament, les tecnologies dependents de combustibles de tercers països, poden experimentar un increment de cost important a futurs per inversions fetes a dia d'avui. És, doncs, un indicador més que cal contextualitzar amb d'altres dades i considerar-ho sempre per cada país en concret a l'hora de prendre decisions.

Per norma general, hi ha dificultats en trobar costos de generació per tecnologia, ja que és una informació restringida a l'activitat privada dels operadors de les diferents plantes. Hi ha diferents estudis sobre aquesta qüestió (UKERC, 2007), (Fraunhofer, 2013), (IER, 2014). En destaca el fet pel Departament d'Energia dels EUA on trobem les següents dades en la Taula 3.11:

TAULA 3.11: Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013. Released January, 2013. FONT: Report of the US Energy Information Administration (EIA) U.S. Department of Energy (DOE)

Plant type	Capacity factor (%)	U.S. average levelized costs (2011 \$/megawatthour) for plants entering service in 2018				
		Levelized capital cost	Fixed O&M	Variable O&M (including fuel)	Transmission investment	Total system levelized cost
Dispatchable Technologies						
Conventional Coal	85	65.7	4.1	29.2	1.2	100.1
Advanced Coal	85	84.4	6.8	30.7	1.2	123.0
Advanced Coal with CCS	85	88.4	8.8	37.2	1.2	135.5
Natural Gas-fired						
Conventional Combined Cycle	87	15.8	1.7	48.4	1.2	67.1
Advanced Combined Cycle	87	17.4	2.0	45.0	1.2	65.6
Advanced CC with CCS	87	34.0	4.1	54.1	1.2	93.4
Conventional Combustion Turbine	30	44.2	2.7	80.0	3.4	130.3
Advanced Combustion Turbine	30	30.4	2.6	68.2	3.4	104.6
Advanced Nuclear	90	83.4	11.6	12.3	1.1	108.4
Geothermal	92	76.2	12.0	0.0	1.4	89.6
Biomass	83	53.2	14.3	42.3	1.2	111.0
Non-Dispatchable Technologies						
Wind	34	70.3	13.1	0.0	3.2	86.6
Wind - Offshore	37	193.4	22.4	0.0	5.7	221.5
Solar PV ¹	25	130.4	9.9	0.0	4.0	144.3
Solar Thermal	20	214.2	41.4	0.0	5.9	261.5
Hydro ²	52	78.1	4.1	6.1	2.0	90.3

Tot això fa que hi hagi un impacte fonamental de la regulació a l'hora de relacionar el cost real al preu que paguem en la factura i els costos que s'assumeixen en d'altres partides (com el dèficit comercial). Una regulació que anés incorporant les externalitzacions ajudaria a una major transparència del mercat i una millor presa de decisió.

h) Costos de generació elèctrica per tecnologia a l'Estat

En el cas de l'Estat espanyol tampoc hi ha dades oficials. Les darreres fetes públiques a l'Estat són de la CNE (2008) i pel darrer trimestre del 2008. No tenim informació ni tan sols acotant el problema al procés de transformació energètica en la central. La manera d'assignació de preus en el mercat, ja sigui basat en costos marginals per MWh o per una retribució fixada, no ajuda a una correcta transparència dels costos ni a promoure les tecnologies més eficients, atès que posa de relleu el preu de venda al mercat, no el cost, restant aquest en l'estricta esfera de l'empresa privada gestora de la planta.

Cal destacar l'esforç i rigor del treball de l'enginyer i empresari Joan Vila (PIMEC, 2014) sobre estimació de costos de generació d'energia a l'Estat espanyol basant-se en l'estructura de mercat estatal i que es resumeix a continuació en la Taula 3.12:

TAULA 3.12: Costos de generació elèctrica per tecnologia en el mercat espanyol. FONT: Joan Vila, 2014

Tecnologia	Cost tota Vila	Cost total CNE	Diferencial
Nuclear actual	28.00 €	44.37 €	158.5%
Hidràulica	46.50 €	39.00 €	83.9%
Cicle combinat	104.50 €	68.64 €	65.7%
Carbó	52.90 €	71.83 €	135.8%
Eòlica	73.90 €		
Solar fotovoltaica	270.90 €		
Solar termoelèctrica	200.50 €		
Cogeneració	59.90 €		
Minihidràulica	85.00 €		
Residus	66.00 €		
Biomassa	94.30 €		
Total sistema	67.30 €		

Aquesta manca de dades distorsiona el mercat en no traslladar al preu real de cada tecnologia i tampoc ajuda al debat sobre el model energètic en no avaluar, per exemple, la millora en termes de costos de generació si l'Estat deixa de cremar carbó estatal i que segons Vila (op.cit.) permetria baixar un 6% el preu de generació del MWh fins a 63,2 €/MWh, cosa que suposaria un estalvi de més de 1.000 milions d'euros cada any.

i) R+D en el sector energètic

Un altre aspecte relacionat és la inversió en R+D pel desenvolupament de les diferents tecnologies. D'acord amb l'Agència Internacional de l'Energia⁵⁴, la R&D energètica cobreix les activitats de recerca bàsica, aplicada, desenvolupament experimental i demostració. En queden descartats els desplegaments a escala comercial i tasques d'educació, divulgació, accions de suport de l'administració, entre d'altres (IEA, 2013).

Igualment l'agència disposa d'una gran quantitat de dades consultables sobre inversió en R+D en el camp energètic que és la base sobre l'informe de la "UE Energy R&D Statistics in the European Research Area" (European Commission, 2005). També es disposa de dades estadístiques per part de l'OCDE/Eurostat, ja siguin seguint la metodologia NABS (Nomenclature for the Analysis and Comparison of Scientific Programmes and Budgets) amb l'estadística coneguda com GBAORD – Government Budget Appropriations or Outlays of Research and Development); o bé seguint la classificació institucional per sector, coneguda com GERD (Gross Domestic Expenditure on R&D).

Es mostren a continuació algunes conclusions interessants que ajuden a entendre l'actual model energètic.

- L'increment de preus de petroli fa augmentar la inversió en energies renovables, tot i que els darrers anys, la intensitat és menor (Goldthau, 2010)
- Als EUA, la R+D predominantment ha sigut en eficiència energètica i en combustibles fòssils, mentre que a Europa ha sigut, globalment, prioritària l'energia nuclear (IEA, 2013).
- A la UE, la inversió predominant ha sigut en energia nuclear de fissió i fusió. Inclús a països com Alemanya, malgrat que es va produir una reducció important després de l'accident de Chernòbyl.
- A nivell dels països que conformen l'Agència Internacional de l'Energia, la tendència és similar amb un protagonisme de l'energia nuclear.

Aquestes dades contrasten amb la inversió de més de \$625 *billions* anuals (2012) que el conjunt d'empreses petrolieres han invertit en la cerca de nous jaciments i tècniques d'extracció. I en representa tota una declaració d'intencions.

3.2.4.3 Impactes socials

Un darrer àmbit que cal introduir en l'anàlisi multifactorial de les diferents tecnologies energètiques és el social. Com s'ha analitzat anteriorment, la complexitat intrínseca del model energètic exigeix metodologies de treball que sobrepassen el mètode científic tradicional. No n'hi ha prou en una aportació tècnico-científica. Cal, a més, la participació d'una manera dinàmica i pro-activa de tots els agents involucrats i afectats per la decisió final que es prengui.

Els impactes socials vinculats a les diferents tecnologies, es divideixen en:

⁵⁴ <http://www.iea.org/statistics/topics/rdd/>

- Impactes intra-estats:
 - Democratització de l'energia. Control dels recursos i les tecnologies associades.
 - Conflicte entre territoris: territoris més protegits i àrees del país que suporten major pressió d'infraestructures sobre el territori.
 - La pobresa energètica: problema creixent en ciutats.
 - Exigències de qualitat i nivell de subministrament:
 - Acceptem microtalls?
 - Penetració d'energies renovables
 - Model socioeconòmic:
 - Privilegis fòssils (Volar barat el cap de setmana...)
 - Dependència a la mobilitat privada
 - Model consumista basat en l'acumulació de béns
 - Costos de finançament associats a la balança de pagaments:
 - Quin cost té la importació de productes fòssils?
 - Accés al mercat de finançament
 - Cost d'oportunitat

- Impactes internacionals:
 - Control dels recursos primaris i les tecnologies associades
 - Geopolítica i conflicte internacional entre territoris.
 - Refugiats climàtics
 - Efectes en els països productors (sobre la salut, ecosistemes, condicions sociolaborals ...). És el que es coneix com "acaparament energètic" o *energy grabbing*, especialment en recursos com els biocombustibles (Action Act, 2012).
 - Fluxos de capitals en els mercats financers

Per poder gestionar aquesta vessant cal dotar-se d'entitats adequades de governança tant a nivell local com global. Si ja és difícil disposar-ne dins d'un estat industrialitzat, encara més ho és a nivell global. Però la dificultat no ha de fer caure la demanda d'un procés transparent i democràtic en la gestió dels recursos energètics limitats, escassos, repartits de manera no homogènia i amb conseqüències globals. Desgranem a continuació alguns dels aspectes de caràcter social més cabdals.

a) Transicions energètiques i de potència

El recurs que emprava una societat fixa els límits de desenvolupament socioeconòmic de la mateixa. Per això, passar de l'explotació d'un recurs a un altre no és trivial. Són processos que conformen profundament tots els aspectes socials, econòmics i polítics de les pròpies societats i contribueixen a crear nous paradigmes.

Com fa palès Van den Bergh i col·laboradors (2011), la transició energètica és també una transició de densitat de potència. I això no es té en compte, normalment, com passa en els marcs teòrics que han estudiat recentment les transicions de sostenibilitat: 1) l'enfocament de sistemes d'innovació (Jacobsson i Bergek, 2011); 2) la perspectiva de diversos nivells (MLP) (Rip i Kemp, 1998; Geels, 2002; Geels, 2011),

juntament amb l'enfocament estratègic de la gestió de nínxol (SNM) (Kemp et al, 1998).; 3) l'enfocament de gestió de la transició (TM) basat en l'anàlisi de sistemes complexos (Ganyota et al, 2010; Rotmans i Loorbach, 2009); i (4) punts de vista evolutiu-econòmics i models multi-agent de les transicions (Safarzynska, 2010; Beddoe et al, 2009; van den Bergh et al, 2006; Karen Frenken and Faber, 2009).

Això obliga, doncs, a reformular-los des d'aquesta visió de densitat energètica. A més d'aquest aspecte tècnic, cal analitzar la transició energètica transversalment, en termes de coneixement, institucions, societat i economia (Weijermars *et al.*, 2013).

b) Transferència de renda familiar i Pobresa energètica

Tradicionalment hem distingit entre aquelles societats que han estat capaces d'utilitzar i maximitzar l'ús de recursos fòssils i les que no, concretant-se en el fet que una minoria consumeix una majoria dels recursos (WWF, 2006).

Aquest fet ha sigut ignorat per les societats occidentals o, com a molt, considerat com un "fet irremeiable". El no veure en el dia a dia les conseqüències de poder gaudir dels recursos energètics i materials a voluntat i baix cost ha permès tancar els ulls sobre una realitat incòmoda i, per tant, ha evitat una presa de consciència conseqüent i coherent.

Tanmateix, davant els senyals d'esgotament de recursos i inflació de preus, accentuat per l'accés creixent al recurs energètic per part de les "economies emergents" (Cowan, 2014), fa que, poc a poc, la relació del 20/80 comença a traslladar-se en el sí de la pròpia societat occidental. Diferents estadístiques⁵⁵ mostren la transferència progressiva de la renda familiar cap al pagament dels serveis bàsics i amb fenòmens com el de la "pobresa energètica", definit com a la incapacitat de cobrir el cost dels subministraments energètics bàsics per part de la població, i que esdevenen un fenomen de creixent importància social⁵⁶.

Això porta que abans de l'esgotament físic del recurs o de la manifestació de les conseqüències ambientals a gran escala, es produirà un encariment significatiu del recurs que pot portar associada una conflictivitat social creixent entre aquells que tenen accés al recurs i els qui no en el sí de les pròpies societats occidentals que han d'importar el recurs.

c) Llocs de treball. Energia i Ocupació directament relacionada.

Una variable socioeconòmica de gran relleu és l'impacte sobre l'ocupació que implica el sector energètic, tant des d'un punt de vista qualitatiu (quines disciplines

⁵⁵ <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=367&m=m> (Octubre 2014)

http://www.ine.es/inebmenu/mnu_nivel_vida.htm (Octubre 2014)

<http://www.ine.es/jaxiBD/menu.do;jsessionid=E44B6D2B451FEFC567E4FBCEF7BEB800.jaxiBD01?divi=EPF&per=01&type=db&his=1&L=0> (Octubre 2014)

<http://barometro.fundacioneroski.es/web/es/2004/capitulo2/pag1.php> (Octubre 2014)

⁵⁶ <http://pobresaenergetica.es> (Octubre 2014)

són necessàries), com quantitatives (creació neta de llocs de treball). Per tant se'n deriva una forta relació amb el sistema educatiu i de formació professional.

No es pretén en aquest apartat més que fer-ho constar com a variable important a considerar i a mesurar. Hi ha diferent literatura al respecte, ja sigui feta per agents del sector, com associacions sectorials d'energies renovables, o organismes públics (en el cas de l'Estat espanyol seria el cas de APPA (2012) o de l'IDAE (2011) o el US Energy Information Administration). La importància d'aquest debat es veu traduïda amb nombroses referències en els mitjans de comunicació general. Un exemple molt recent és el debat social i econòmic vinculat amb la tècnica del *fracking* als Estats Units⁵⁷, fent-se ressò de les dades que ha publicat l'administració nord-americana en referència al ritme de creixement de llocs de treball en el sector de petroli i gas ha sigut 40 vegades més gran que el conjunt de l'economia en el període 2007-2012 (EIA, 2013). Aquestes fonts governamentals sempre són de major credibilitat i objectivitat que les dades del propi sector (IHS, 2013), sovint massa enfocades a crear estats d'opinió favorables. Finalment trobem publicacions científiques al respecte amb major objectivitat i rigor (Wei, 2010).

Més enllà de les dades i projeccions de llocs de treball associat a, per exemple, la penetració de les energies renovables, és interessant veure que la transició energètica (energies renovables, l'eficiència energètica, smart grids...) implica a diferents sectors de la societat que actualment ja estan relacionats amb el sistema energètic actual. Podem diferenciar:

- Alt coneixement científic, des de ciència bàsica associada a nous materials, per exemple, fins a tècnica i enginyeria aplicada.
- Indústria manufacturera de béns i equips.
- Indústria de serveis (logística, consultoria, certificació, ...).
- Instal·ladors, enginyeries i constructores: un sector no molt intensiu en tecnologia ni coneixement, però molt dispers en el territori i nombrós.

Es fa necessari, per tant, una transformació a nivell de perfils curriculars i professionals que pugui donar resposta a les noves necessitats. Finalment, només fer constar la necessitat de quantificar realment aquest impacte socioeconòmic, tasca que queda fora de l'abast d'aquesta investigació.

d) Privilegis fòssils

L'accés a un recurs energètic d'alt potencial i baix cost ha permès gaudir a la societat occidental de béns i serveis sense precedents en cap altra societat de cap altre temps. Destaquem com a principals "privilegis fòssils" els que són conseqüència de:

- Quantitat de productes, béns i serveis a l'abast de la població i generació de residus (sòlids, líquids i gasosos).
- Deslocalització de la producció i el lloc de consum per accés a un transport energèticament barat.

⁵⁷ <http://www.washingtonpost.com/blogs/wonkblog/wp/2013/12/04/americas-energy-boom-has-been-great-for-trade-jobs-not-so-much/>

- Velocitat i intensitat dels processos (industrials, socials, econòmics, ...).
- Transport privat i de mercaderies.
- Agroindústria intensiva en ús d'input fòssil i alimentació deslocalitzada de l'època productiva.
- Plàstics i derivats fòssils com a components de quasi tots els productes quotidians.

Molts d'aquests "privilegis" no són considerats com a tal per una població que s'ha acostumat fàcilment a l'accés a recursos energètics abundants, barats i d'alt potencial. Això esdevé una barrera social molt important davant de la fi dels mateixos (per esgotament físic o per incapacitat de poder-se pagar) en associar-se a una pèrdua de progrés o de benestar. Però cal ser conscients que, en tant han sigut possibles gràcies a l'explotació del petroli, la substitució de recurs també implica un canvi en els privilegis que ha possibilitat.

e) Geoestratègia

L'accés als recursos (energètics i materials) per part de les regions consumidores ha marcat les relacions internacionals durant l'era del petroli. Llegir-les en aquesta clau aporta molta llum a l'hora d'interpretar molts dels conflictes de les darreres dècades i actuals. Aquest fet, continua sent vigent a l'entrada del segle XXI, malgrat que les regles han canviat d'ençà de l'increment del preu del petroli i l'emergència de tècniques d'extracció no convencional dels combustibles fòssils en certes regions del planeta. Així, per exemple, els Estats Units passen en pocs anys de ser importadors de petroli del Pròxim Orient a no ser-ne, deixant al descobert les importacions que es fan des d'Europa i que, fins avui, han gaudit de la cobertura política i militar americana. D'aquesta manera Europa haurà de competir amb economies emergents, principalment les asiàtiques, pel recurs cada vegada més escàs i més car.

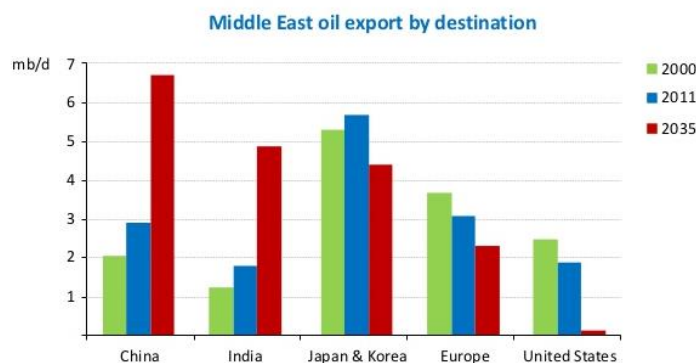


Figura 3.29: Exportació per destinacions de petroli des del Pròxim Orient. FONT: Agència Internacional d'Energia, *World Energy Outlook, 2012*

Des del punt de vista geoestratègic, aquelles regions més dependents de les importacions dels recursos fòssils, combinat amb economies molt dependents, esdevindran més dèbils i menys resilents davant una increment de preu o una reducció en la disponibilitat del recurs. Veure com evoluciona cada regió del planeta davant la dependència de les importacions dóna idea de les relacions internacionals que s'establiran en els propers anys. Europa es mostra amb nivells de dependència

energètica cada vegada majors, si fem cas a la informació de l'Agència Internacional de l'Energia que recull el següent gràfic.

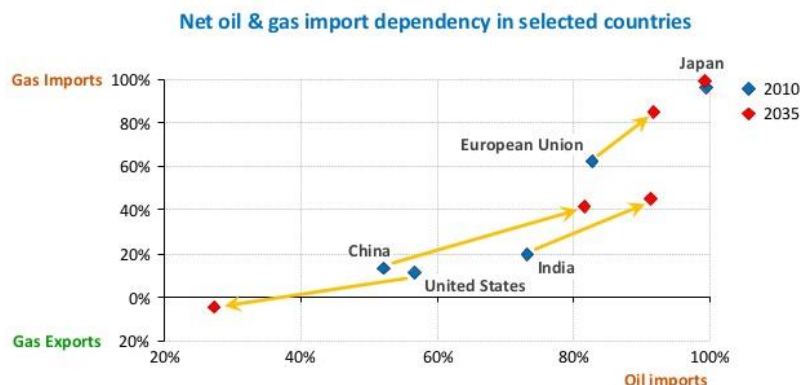


Figura 3.30: Dependència energètica neta de gas i petroli per països actualment importadors. FONT: Agència Internacional d'Energia, *World Energy Outlook*, 2012

3.2.5 Cruïlla de la societat fòssil a les acaballes del recurs fòssil

Quan abordem la qüestió del model energètic, doncs, és cabdal considerar quin recurs energètic podem explotar i quina disponibilitat *real* en tenim, que vindrà, alhora, condicionada per l'estat de la tecnologia i les reserves, la capacitat d'extracció i adequació i els camins físics d'obtenció del recurs, per la capacitat d'absorbir els residus generats en el temps i l'espai en què es generen, i, d'altra banda, per aspectes socioeconòmics, com la capacitat econòmica d'aquella societat, l'estructura de producció econòmica i la resiliència social.

Això ens porta, a nivell teòric, a posicionar-nos en dos escenaris extrems: un, on no hi ha limitació del recurs ni a nivell de densitat energètica (tècnicament molt gran), ni de disponibilitat, ni de cost; el segon seria davant un recurs energètic limitat en accés, quantitat, gradient i alt cost.

Aquesta reflexió ens porta a referir-nos al "pressupost energètic" d'Odum (1968), que ens planteja quina quantitat de recurs energètic tenim disponible per les nostres activitats. Fent un paral·lelisme econòmic, és fàcil veure que només els recursos renovables ens permeten emprar-los sense hipotecar la quantitat disponible futura. Seria aquell "sou" anual que tenim garantit i que ens permet planificar les nostres despeses sense posar en risc els estalvis ni el patrimoni acumulat durant anys.

Escenari Recurs "il·limitat"

- ✓ Recurs abundant i a baix cost
- ✓ T_c Augmenta $\rightarrow \Delta T$
- ✓ L'eficiència no és important.
- ✓ El cicle econòmic s'accelera i s'adapta a aquesta situació.

Escenari Recurs "limitat"

- ✓ Recurs escàs, manca d'embornal i alt cost
- ✓ L'eficiència esdevé el més important. Transició B \rightarrow A
- ✓ El cicle econòmic s'ha d'alentir i s'ha d'adaptar a aquesta nova situació.

Escenari canvi de Recurs (ex. Solar Fotovoltaica)

- ✓ Redimensionament del gradient ΔT a explotar $\Delta T \rightarrow \Delta T'$
- ✓ $\Delta T'$ pot ser superior (petroli > carbó) o inferior (solar < petroli)
- ✓ Si $\Delta T' < \Delta T$ Posicionar-nos en A pot no ser suficient $A \rightarrow A'$
- ✓ El cicle econòmic s'ha d'adaptar a aquesta nova situació.

Figura 3.31: Escenaris de disposició de recursos energètics. FONT: Elaboració pròpia

Davant d'aquests “ingressos regulars” podríem tenir un ingrés extraordinari (una loteria, una herència, uns estalvis o –de molta actualitat- un accés a finançament fàcil i barat, per exemple) que el seu ús n'implica una reducció proporcional (és a dir, els perdem irreversiblement, no són renovats). Si aquest és el cas, podem tenir la il·lusió d'un període molt fructífer que, mentre duri, es podrà confondre amb el millor dels mons possibles, podent “fer” moltes coses sense, ni tant sols, importar-ne l'eficiència, però que tard o d'hora s'esgotarà i ens tornarà a la realitat del nostre salari anual, veritable sostre i límit de la capacitat de despesa. El drama apareix si l'ús de la reserva ha estat tant desproporcionadament gran en quantitat i durada en el temps que ens hi hem acostumat i hem desenvolupat tot un seguit de despeses fixes de les quals ens n'hem fet dependents, com per exemple, les associades al manteniment d'infraestructures que haguem creat. Si això és així, el retorn a una situació de menors ingressos, malgrat que sigui l'única possibilitat, serà percebuda com un retorn al passat i generarà rebuig social per aparent pèrdua de confort.

Serveixi aquesta metàfora per a ser aplicada a la qüestió energètica. L'ús dels recursos fòssils ha estat de tal magnitud i durant prou temps, en termes de quantitat i qualitat respecte el potencial renovable a l'hora de fer les nostres activitats, que ens ha portat a una societat de sobreconsum, caracteritzada per l'objectiu ideològic del “creixement”. Però sense adonar-nos que es tracta d'un recurs que s'esgota i que, no només cada vegada és menys eficient tenir-ne disponibilitat des d'un punt de vista de balanç energètic, sinó que a més ara no el podem pagar.

Quan el recurs se'ns mostra limitat (ja sigui econòmicament o energètic), vénen les presses per, després d'una negociació inicial, intentar trobar un nou “avalador o finançador” que permeti continuar *el somni*. Si el trobés, “èxit!”, però en energia, a diferència de l'economia, un hipotètic “rescat” està subjecte a les lleis físiques, amb uns límits molt marcats que fan difícil que ningú pugui venir a “rescatar-te” i accedir a “refinançar-te”. Tanmateix, el fet que l'esgotament no sigui immediat i que tinguem una base renovable d'energia anualment és, justament, l'oportunitat que tenim de “finançar” energèticament la transició de model amb el recurs fòssil romanent evitant, així, un escenari de no-recurs (per disponibilitat o embornal) o no-tecnologia necessària per adequar el canvi de recurs, casos on no hi hauria transició possible i ens abocaria, ara sí, a un retorn a la societat pre-industrial.

Davant la percepció dels límits de recurs energètic d'alt gradient abundant i barat, primer, la societat actua cap a una revolució en l'eficiència del seu ús. Aquest increment en l'eficiència, però, genera una efecte rebot ja que, en generar una percepció de major disponibilitat de recurs, el consum en valor absolut augmenta més que proporcionalment. És el que es coneix com “Paradoxa de Jevons” (Alcott, 2005). Tot i així, voler aprofitar eficientment un recurs és una mostra inequívoca d'esgotament del mateix. Però aquesta eficiència no només es basa en equips de menys consum, sinó també en un progressiu redisseny dels processos tècnics i canvis de comportament social per, per exemple, incrementar el temps amb què es desenvolupen certes activitats (*slow movement*⁵⁸) i, per tant, poder migrar des d'un

⁵⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/Slow_Movement (Octubre 2014)

punt de màxima potència cap a un de major eficiència. Aquest alentiment de la societat i dels cicles socioeconòmics posa en escac el dogma del “creixement” i genera una contradicció social de gran calat, ja que si bé és necessari moure's cap a sistemes més eficients, aquest canvi portat a l'extrem farà entrar a moltes economies en “recessió” mesurada en els termes habituals de PIB. És més, en competir en un mercat global i, per tant, amb d'altres societats que no adoptaran aquesta estratègia de transició de recurs energètic, la percepció de la societat en transició durarà prou com per rebre contestació social davant el canvi de recurs, podent situar les decisions polítiques i socials a prendre en una tessitura difícil. Sobretot sense una governança global que pugui intervenir en l'assignació dels recursos i establir mecanismes compensatoris.

D'alguna manera és el que està passant als Estats Units a l'aprofitar el seu recurs autòcton fòssil d'esquist o *shale gas* (Greene, 2010). No només està aconseguint reduir les emissions (per substitució d'altres combustibles fòssils sòlids i de menys concentració energètica, com carbó) i major independència energètica respecte a tercers països (fins i tot hi ha autors que plantegen poder assolir una total independència a importacions de petroli en entre el 2020 i el 2030), sinó que ho pot ser a un cost energètic menor i, per tant, augmentar la seva competitivitat industrial davant d'altres regions com Europa. És un exemple d'aquesta situació la millora de la balança comercial americana per l'efecte d'una reducció d'importacions de petroli (Sovacool, 2007). Aquest fet està al darrera a Europa de l'increment de la pressió empresarial⁵⁹ (tan dels grans grups energètics, com dels grans consumidors) a les institucions europees per rebaixar els objectius d'energies renovables i d'emissions de CO₂.

La situació s'agreuja quan, acostumats a “recurs infinit d'alta potència”, ni tan sols l'eficiència ja no és suficient. I ja no per l'efecte rebot, si no per l'aparició dels límits físics del recurs. El grau de desorientació genera posicions extremes. Des de la il·lusió de poder canviar a renovables sense més, fins a l'optimisme tecnològic que promet un nou recurs energètic “*too cheap to meter*⁶⁰”, és a dir, tan abundant i tan barat que no paga la pena ni mesurar-se. Tot per negar l'evidència del pressupost energètic anual que, malgrat ser molt important, no s'adapta al model socioeconòmic actual i, encara menys, al manteniment de la infraestructura associada.

La contradicció lògica existeix i no té eixida que permeti satisfer alhora, i a llarg termini, les necessitats de l'estructura socioeconòmica de la societat fòssil amb els problemes d'abastiment i residus de cremar petroli. Ens despertem del somni del “recurs infinit i barat” a diferents ritmes segons cada societat i regió del Planeta, de manera que també es prenen camins diferents, fins i tot entre aquelles que han compartit model fins a la data. Si la geoestratègia durant molts anys s'ha basat en la dialèctica entre “països consumidors Vs països productors”, el cost de mantenir llargues cadenes fòssils fa que cada regió vagi basculant cap a solucions particulars

⁵⁹ <http://www.euractiv.com/energy/energy-ceos-call-renewable-subsidi-news-531024> (Octubre 2014)

⁶⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Too_cheap_to_meter (Octubre 2014)

quan detecta que disposa de recurs local fòssil, encara que li porti altres problemàtiques de caràcter mediambiental. És el que estem veient als Estats Units i la seva progressiva independència energètica per l'ús del *shale gas*, fet que té conseqüències a la UE, el seu soci tradicional en el mercat fòssil, ja que Europa no disposa de recurs autòcton, de manera que haurà de fer-se valer per sí mateixa en el mercat de la importació de cru a nivell mundial davant nous i potents consumidors com són els països asiàtics. Per això, urgeix actuar especialment a la UE per poder reduir la seva dependència a la importació de fòssils.

La substitució de recurs fòssil cap als recursos renovables no és una elecció que puguem "no-fer" amb l'estat de coneixement actual. Cada societat hi haurà de passar en moments temporals diferents i, segurament, per jerarquia de motivacions diferents. La qüestió és que la transició influirà en bona mesura les activitats socioeconòmiques d'aquelles societats pioneres de manera que si no canvien en paral·lel els criteris de valor de la societat, pot percebre's com una pèrdua de riquesa i de benestar atès que el recurs renovable té una densitat d'energia i potència inferior al fòssil. Aquest gradient menor a explotar permet fer menys coses i condiciona fer-les d'una manera diferent (menys intensivament, més lentament). Continuant la metàfora, és com, aquella família -o país- que, malgrat tenir un sou regular de l'ordre de 10^4€ , està acostumada a un ritme de despeses molt superior (10^6€) provinent d'una herència (o una "loteria") i sense límit de despesa diària en la targeta de crèdit. El ritme de vida i de despesa s'haurà adequat al flux econòmic màxim. Però quan el "recurs extraordinari" ja no es renovi i s'esgoti, la família haurà de retornar a un ritme proporcional al salari anual i regular, encara que es percebi com un retrocés, serà l'única opció compatible amb la continuació de la unitat familiar.

I aquesta és la singularitat històrica a què ens enfrontem, ja que fins ara la successió en l'ús de recursos sempre havia seguit una lògica incremental en termes de potència i energia (des de recurs renovable passiu a fusta, carbó, petroli...) possibilitant, d'aquesta manera, un cicle expansiu de l'economia, que assedegada de més combustible i potència, no ha dubtat en adaptar-se exponencialment a les possibilitats que li ofereixi el nou recurs.

Davant la manca de cap altre recurs amb capacitat energètica de millorar les propietats fisicoquímiques del petroli, hem d'adaptar-nos quan abans millor al recurs solar renovat regularment i veritable font d'energia inesgotable. Cal trobar un nou punt d'equilibri on circumscriure la societat post-moderna dins els límits dels recursos naturals, tal i com passa amb el manteniment i augment de complexitat dels ecosistemes. La contribució de la tecnologia (solar fotovoltaica, eòlica, emmagatzemament, TICs...) ha de permetre fer-ho i el lideratge social i polític ha de catalitzar-ho i finançar-ho. El recurs mana, i molt. I la tecnologia, sent important, hi està sempre circumscrita.

3.3 SMART GRID, un catalitzador tecnològic i social de la transició energètica.

Els sistemes socioeconòmics, en tant que entitats complexes, deuen la seva existència i manteniment al flux constant d'energia, matèria i informació des de i cap a l'entorn. D'aquesta manera, agafant l'estructura del diagrama de Sankey, fins ara hem funcionat incrementant l'activitat socioeconòmica en un escenari sense límit i dimensionant un sistema energètic que les satisfaci sense parar compte en com, ni amb quina eficiència (interior del diagrama) i anant als mercats internacionals a cercar els combustibles i els embornals (exterior del diagrama), que hem pogut pagar sense més problemes. Podem considerar que fins a dia d'avui aquesta manera de procedir ha funcionat a Europa i a l'Estat espanyol, més enllà de l'impacte ambiental, i s'ha pogut pagar. Però ara els límits es fan cada vegada més evidents. I si bé els costos ambientals i socials associats queden diluïts en una responsabilitat global, la factura energètica llastra de manera asfixiant la ja malmesa economia de l'Estat, fent urgent una estratègia de transició que permeti, des d'aquest punt de vista, afrontar el sosteniment de l'activitat socioeconòmica a un cost assumible.

Això obliga conèixer els límits i circumscriure-s'hi. La nova estratègia passa, doncs, per conèixer aquests fluxos màxims disponibles de recursos i embornal en termes d'energia i potència (part exterior del diagrama de Sankey), els quals ens fixen la demanda d'energia màxima a què podem aspirar, i organitzar la societat d'acord amb aquests límits físics (part interior del diagrama). En aquest context, l'eficiència energètica en la transformació, transport i distribució d'energia esdevé una necessitat imperiosa. També la gestió en temps real per anar adaptant amb la màxima coordinació, requeriments variables de potència amb els recursos i tecnologies de generació apropiades. És l'aspecte tecnològic de les Smart Grids. Però més enllà d'aquests aspectes tècnics, també cal un procés social per definir la demanda d'energia i decidir en què dediquem l'energia a nivell social i de model econòmic, deixant, segurament, de ser una variable fruit d'una assignació dinàmica de mercat més o més lliure, per esdevenir un procés social de posar prioritats. Com si es tractés d'un pressupost anual i límit de despesa diària, no podem fer tot el que voldríem, sinó el que podem fer combinant recursos propis (renovables) i externs (importació de combustibles fòssils i urani). I també forma part del concepte *Smart*.



Figura 3.32: Estratègia de presa de decisions quan els límits dels recursos es fan visibles. FONT: Elaboració pròpia

3.3.1 Estratègies de transició

Amb les dades i informació actual la qüestió no és si ens veurem abocats a canviar el model energètic tal i com l'hem conegut fins avui, sinó "quan passarà". I aquest factor és clau per gestionar una transició en el model que vagi adaptant-se progressivament als recursos energètics disponibles d'acord amb les constriccions físiques, ecològiques, socials i econòmiques. El temps, així com els recursos materials i energètics, són escassos, i per tant, un territori que necessiti evolucionar de model ha de prendre amb certa pressa les accions necessàries per anar-s'hi adaptant i aprofitar aquesta anticipació com a factor de modernització de la societat i l'economia, malgrat les reticències i inèrcies del model anterior (Chalmers, 2000).

Una societat donada conformada i modelada a partir de l'explotació d'un recurs energètic com el fòssil, d'alta potència, energia, disponibilitat i baix cost (societat A) transiti cap a una de menor potència (per explotació d'un recurs de menor densitat), de menor consum (per ajustar-se a la màxima eficiència possible), disponibilitat limitada (en el temps i l'espai) i cost internalitzat amb les conseqüències socials i ambientals, implica un canvi en dues dimensions a l'hora d'adaptar-se als límits de la biosfera i fer-ho a un cost d'importacions assumible: consumir menys energia (Mesures I o d'ajust) i requerir menys potència (Mesures II o de salt). Ambdós processos poden donar-se simultàniament (Mesures III), com mostra la Figura 3.33

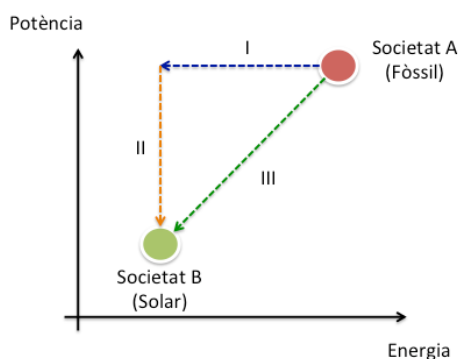


Figura 3.33: Fases de transició de potència des d'una societat fòssil a una basada en l'explotació del recurs solar. FONT: Elaboració pròpia

- Estat 0: mesures encaminades al manteniment de les condicions de contorn de la Societat A (per exemple, més recurs o increment de la capacitat d'embornal). Escenari tendencial.
- Estat I: mesures incrementals d'eficiència energètica. Evolució determinista i previsible de l'estat de la tècnica. S'accentua a mesura que el recurs es mostra escàs. Ho encapçala la indústria líder i dona peu a l'evolució de models de negoci tradicionals. Tanmateix, per l'efecte rebot, el potencial real d'estalvi es veu dràsticament disminuït.
- Estat II: mesures estructurals de canvi de model socio-econòmic. Succeeix davant de restriccions severes de recurs (disponibilitat i/o embornal i/o cost). En funció del temps en què es doni aquesta translació, pot tenir forma de revolució, de caos o de transició. Per això és important anticipar-se i fer els canvis estructurals en el consum i la infraestructura progressivament quan encara es disposa de recursos materials, energètics i econòmics.

- Estat III: tecnologies disruptives que permeten un canvi en l'estructura de la demanda de potència i energia (tant des d'un punt de vista de generació com de consum). Processos no deterministes que poden aparèixer per irrupció tecnològica, nous models de negoci (exemple, Internet i la possibilitat de gestionar la informació a gran escala, autoconsum d'energia) i catàlisi social.

La successió cronològica dels diferents estats no és totalment causal ($A \rightarrow B$), però l'experiència actual ens mostra com el primer a actuar és l'Estat 0-I i, a mesura que aquest es mostra limitat per satisfer les noves condicions de contorn del sistema (persisteix l'esgotament de recurs/embornal), apareix la necessitat de madurar mesures pròpies de l'Estat II (canvi en els hàbits de mobilitat). En aquest trànsit, determinats processos no previsibles poden irrompre facilitant la conjugació de tecnologies (ajuntar energia i informació gràcies a l'aparició del transistor, la microelectrònica i internet) i curtcircuitant processos aparentment lineals que poden portar-nos a nous estats estacionaris en (des)equilibri de manera més ràpida i eficient. Però també poden aparèixer reticències socials i empresarials al canvi de model.

D'altra banda, tenim una classificació d'accions segons la seva naturalesa:

- Accions de caràcter tècnic: són estratègies que es basen en l'adopció de solucions tecnològiques en qualssevol de les baules de la cadena del sector energètic.
- Accions de caràcter no-tècnic: estratègies no tècniques, però facilitadores de la transició energètica. És un ampli ventall d'accions d'acompanyament, de formació, educació, participació, regulació, organitzatives, econòmiques, socials, entres moltes d'altres.

Per cada acció concreta de la política energètica cal veure quines accions tècniques i no tècniques cal emprendre conjuntament per assolir els objectius previstos.

En funció d'aquests Estats i de la tipologia d'accions a fer, podem classificar diferents estratègies que tenim per gestionar la cruïlla de les societats fòssils altament dependents de combustibles fòssils.

TAULA 3.13: Diferents mesures tecnològiques i no tecnològiques de transició de model energètic. FONT: Elaboració pròpia

Tipus	Estat 0	Estat I	Estat II	Estat III
Tecnològica	Explotació de nous recursos fòssils (fracking)	Eficiència en la realització del treball	Canvi a recurs de menor densitat (renovables)	Reducció de la cadena energètica
	Segrest del CO ₂	Gestió de la demanda		
	Recursos no fòssils amb densitat equivalent (nuclear)			
	Deslocalització del lloc del consum (accés a nou embornal)			
		Recerca desenvolupament		

No Tecnològica			Terminologia i estadística energètica
	Regulació independent del sector energètic		
			Participació de tots els agents involucrats: ciència post-normal
	Decisió social de quin treball s'ha de fer		
		Deixar de subvencionar les tecnologies contaminants	
			Integrar els límits dels recursos en el cicle econòmic
		Foment de les inversions de tecnologies alternatives	
			Nous criteris de disseny. Ex teoria constructal
	Transferència de renda des d'altres partides socials públiques i privades (famílies i empreses)		

3.3.1.1 Estratègies a seguir de caràcter tècnic

1) Eficiència en els processos de transformació d'energia per la realització de treball

El darrer graó de la cadena energètica és el primer on cal actuar: fer el treball, allò que és objecte d'un procés, consumint menys recursos. Il·luminar-se, sintetitzar un compost orgànic, obrir la botiga, fer el dinar, generar electricitat en una central.

Cada activitat que realitzen els membres d'una societat implica màquines i sistemes tecnològics per la seva realització i això comporta alhora el consum d'una energia primària, materials i la generació d'un residu i pèrdues tèrmiques.

Una primera estratègia fonamental és aquella que ha de permetre fer el treball amb el mínim de recursos necessaris i mínima generació de residus.

De manera incremental això ja passa en el món actual, sovint motivat per un factor econòmic d'estalvi (sobretot a nivell industrial). En tenim molts exemples, com la certificació o etiqueta energètica dels electrodomèstics (indicada amb una lletra que va de més a menys eficient segons l'ordre alfabètic A, B, C, D, ...), reducció d'emissions en vehicles, classificació energètica de les cases, Directiva d'eficiència energètica de la UE, cogeneració i plantes de cicle combinat de gas, entre molts d'altres.

2) Eficiència en la gestió de la demanda i l'oferta

Un segon pas, focalitza ja no només en consumir menys en termes d'energia (Watts per hora), sinó en fer-ho en el moment adequat. **La gestió de la demanda i la generació ha de permetre equalitzar de manera flexible i dinàmica les necessitats**

de consum associades a la realització de treball amb la disponibilitat del recurs per adaptar-les al recurs disponible i a la seva disponibilitat.

Per assolir-ho hi ha diferents solucions tecnològiques, com serien:

- Emmagatzematge
 - sistemes directes o actius d'emmagatzemament d'energia (per exemple bateries, centrals hidràuliques reversibles, ...)
 - Sistemes indirectes d'emmagatzemament o plantes virtuals per anticipar-se al consum futur d'un sistema en un moment favorable (per exemple, baixar la temperatura del congelador, pouant aigua o gestionant el termòstat de les cases)
- Control remot de càrregues dins els paràmetres d'operació programables (per exemple, esperar senyals de preus favorables o de disponibilitat de recurs a l'hora de realitzar un treball. Seria el cas de, per exemple, reprogramar el funcionament d'una rentadora dins un rang de temps).
- Canvi de comportament de l'usuari amb el suport de sistemes d'informació (per exemple una aplicació mòbil que li doni la informació adequada).

En qualsevol cas és necessari la contribució efectiva de les tecnologies de la comunicació i la informació (TIC) per poder gestionar els fluxos d'informació involucrats en aquests processos i poder aprofitar-ne les oportunitats i anticipar-se a situacions desfavorables. Un exemple clar, serien els comptadors digitals intel·ligents (*smart meters*) i les tecnologies relacionades amb la gestió de les dades (tan a nivell físic com de programari).

Un altre aspecte derivat és com de distribuït ha de ser aquesta gestió de la demanda. Entre una manera totalment centralitzada o descentralitzada, trobem arquitectures jeràrquiques que combinen els òptims locals amb l'interès general.

3) Estratègia: Eficiència en reducció de la cadena energètica

El sector de més consum en el sistema energètic europeu i americà ja hem vist que són les pèrdues de generació, transport i distribució de l'energia. Per tant, si podem **apropar la producció al lloc de consum** aconseguirem millorar molt l'eficiència global del sistema. A nivell tecnològic això és possible per tecnologies de generació modulars, com seria la cogeneració i les energies renovables, tot i que cal una infraestructura específica que en permeti un funcionament adequat.

Aquest objectiu porta associat un canvi de model territorial i de distribució de la població i de l'activitat econòmica, esdevenint, d'alguna manera, un retorn a l'inici de la història de la tècnica energètica quan les fàbriques es situaven a les vores dels rius per aprofitar la força hidràulica, per exemple.

4) Explotació de recursos fòssils disponibles

En clau de cruïlla energètica, també s'intenta **explotar els recursos fòssils disponibles fins al darrer extrem que la tecnologia (i l'economia) permetin**. Encara que sigui "escurar el plat", si l'àpat era prou bo, qui no ho faria? Aquesta explotació, però topa amb la loteria geològica de cada territori. No serveix traduir literalment solucions tecnològiques que en d'altres indrets funcionen perquè es tracta de si es

disposa o no de recurs (no té sentit el debat de la tècnica del *fracking* si no hi ha gas d'esquist, com és el cas de Catalunya). Per tant, hi ha un seguit de discussions que es col·lapsen per si soles.

Tanmateix, pot passar que noves tècniques d'exploració (per exemple a grans profunditats marines) permetin fer prospeccions en zones inhòspites fins avui que aportin major nombre de reserves. O que, es disposi de recursos latents que en el passat es desestimessin d'explotar pel cost o tecnologia disponible i que ara puguin de nou ser plantejats. Ho estem veient amb les prospeccions al litoral català i a les Illes Canàries⁶¹, aquestes darreres recentment aprovades pel govern espanyol.

A més dels recursos extrets per tècniques convencionals, hi ha noves tecnologies que, com la de fractura hidràulica o *fraking*, permeten aprofitar recursos que, malgrat ser coneguts, no es tenia el coneixement tècnic necessari per aprofitar-los.

Aquestes noves i velles tècniques, però, presenten el límit ecològic derivat dels efectes de la seva explotació i l'afectació a llurs ecosistemes. Tan contaminació de l'aigua freàtica durant l'extracció del *shale gas*, emissions de gasos d'efecte hivernacle i d'altres partícules sòlides, entre d'altres. Aquests efectes poden voler amagar-se o menystenir-se per a que no esdevinguin un fre, i, en part, s'estan desenvolupant tecnologies per assolir-ho, per exemple, les tècniques de segrest de CO₂, que consisteixen en captar els gasos generats durant la combustió i confinar-los en vells dipòsits de gas⁶², per exemple, per evitar que surtin a l'atmosfera. Són processos coneguts ja des de fa molts anys (Socolow, 1997), però que la seva aplicació a gran escala no ha reeixit, en part per l'increment de costos que comporta. També hi ha tècniques de recombinació per obtenir-ne nous compostos (com per exemple certs processos biològics). Tot aquest conjunt d'estratègies es veuen afavorides per un increment del cost que les fa, a dia d'avui, sovint inviables.

5) Canvi de recurs amb densitat energètica equivalent (en ordre de magnitud): del fòssil a l'energia nuclear

La tecnologia termonuclear civil de fissió va tenir la seva etapa daurada a la segona meitat del segle XX empenya per la recerca militar i la carrera armamentista en un context de Guerra Freda. Va permetre diversificar els combustibles involucrats en la producció d'electricitat i oferir als països que la van explotar plantes de producció d'energia centralitzada per a usos civils equivalents en termes de potència i energia a les de combustibles fòssils. Així, en zones altament dependents d'importacions de petroli, com ara Europa, l'energia nuclear s'ha fet un forat dins el mix de producció d'energia oscil·lant des de pocs punts percentuals fins a casos que, com el cas de França o Catalunya, ha esdevingut en termes relatius la primera tecnologia en generació elèctrica, amb una contribució superior al 50%.

Tanmateix, els limitants d'aquesta tecnologia són molts, dels quals en destaca la seguretat i les conseqüències d'un accident, com s'ha posat de manifest en els accidents a Chernòbyl i, més recentment, a Fukushima. Això ha incrementat els

⁶¹ http://www.repsol.com/es_es/corporacion/prensa/publicaciones/especial-canarias/default.aspx (Octubre 14)

⁶² http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_sequestration (Octubre 2014)

protocols de seguretat en la construcció i operació de les plantes, fins a l'extrem de fer-les molt cares i generadores d'un ampli rebuig social. Són, per tant, un component a considerar, limitat en el context global de canvi de recurs, però amb un alt potencial de proveïment energètic a economies occidentals altament importadores de recursos fòssils i en societats emergents amb alts requeriments d'energia, malgrat la casuística de la tecnologia involucrada i els residus generats.

La fusió nuclear, com seria el cas del projecte ITER, està encara avui sota intensius processos de recerca i desenvolupament i no se n'espera la seva disponibilitat comercial fins cap a la segona meitat del segle XXI, per la qual cosa no entra a l'equació dels propers anys.

6) Tecnologies de transició

S'entén per “tecnologies de transició” aquelles que sense haver de formar part d'un pla energètic a llarg termini, són necessàries a curt per anar adaptant la societat a un canvi en el model de consumir en termes d'energia, de potència i de cost.

Podem parlar, per exemple, del transport de persones i mercaderies, que és responsable d'una part importantíssima en la importació de petroli i derivats. En aquest cas, podem considerar el gas natural com a substitut del dièsel pel transport pesat com una tecnologia vàlida per, a curt termini, reduir les emissions d'aquest sector i diversificar els proveïdors.

Cada territori o regió ha d'avaluar aquelles tecnologies d'acord amb els problemes energètics que tingui. En el cas de Catalunya, l'energia nuclear és clarament una tecnologia de transició ja que si bé a dia d'avui no forma part d'un horitzó, posem a mig termini com podria ser el 2040, és avui i durant els propers anys una opció de mantenir la diversificació en la importació de recursos energètics primaris que cal mantenir sota els criteris de seguretat establerts.

Una altra alternativa és aprofitar el potencial de regasificació al port de Barcelona per aprofitar gas natural obtingut de proveïdors estratègics i estables, com podrien arribar a ser els Estats Units o l'est de la Mediterrània.

En qualsevol cas, les tecnologies de transició han de perseguir l'objectiu d'aportar l'energia necessària a un cost assumible durant la transició energètica, per la qual cosa la seva contribució ha de fer-se sota el control públic d'acord amb els objectius socials i econòmics dels quals s'hagi dotat la societat.

7) Canvi de recurs amb densitat energètica menor. El cas de les energies renovables

Per tant, si les vies d'aprofitament de recurs fòssil, en les seves variants, no solucionen el problema global i a la llarga, i no es preveu l'explotació d'un recurs energètic equivalent ni de major densitat energètica, la via que queda és la d'aprofitar el recurs disponible renovable progressivament.

L'energia solar, en les diverses manifestacions (vent, biomassa, mareomotriu, hidràulica...) està disponible per ser aprofitada. El seu ús massiu implica un canvi de recurs dràstic amb implicacions socioeconòmiques de primera magnitud.

A més, el seu aprofitament òptim requereix d'infraestructura de transport i de distribució energètica que avui no es disposen (xarxes elèctriques i d'informació), generant disfuncions en la seva aplicació actual que alteren l'estructura de costos i la percepció social d'aquestes tecnologies (com si féssim passar un cotxe de Fórmula 1 per un camí de carros). El recurs presenta certa ubiqüitat en el cas de la solar, però una distribució discreta en el cas de l'eòlica. Això fa que associat al seu aprofitament, hi hagi una evolució cap a un model descentralitzat, amb major interconnexió de xarxes i apropant-ho als llocs de consum quan sigui possible.

D'aquesta manera, la seva explotació massiva té afectacions locals importants en el paisatge i, en alguns casos, en la gestió de llurs ecosistemes com seria la biomassa o els biocombustibles, o certes poblacions d'aus, fet que esdevé una barrera social per la seva adopció com a recurs prioritari que cal considerar. Aquest tipus de barreres socials en alguns casos responen a la lògica de l'Efecte NIMBY⁶³.

8) Recerca i Desenvolupament

La utilització de recursos renovables autòctons té l'avantatge que no cal importar-los i això és bo per tota societat i la seva economia. Ara bé, el seu aprofitament per mitjans tècnics cal que també estigui a disposició de la societat, les empreses, les universitats i els centres tecnològics del país per poder garantir el funcionament de l'economia. No es tracta d'haver-s'ho de fer tot a casa, sinó de tenir les línies estratègiques clares, apostar per aquelles tecnologies amb què es pot ser líder i les que aportin més valor afegit per cobrir les necessitats energètiques del país. En el cas de Catalunya podria ser, per exemple, l'energia solar fotovoltaica, l'eficiència energètica i la gestió de la xarxa de distribució (micro i nanoxarxes, entre d'altres). Aquesta estratègia ha de ser part de la política industrial del país i ha de veure's complementada amb una relació internacional amb els grups d'investigadors i les empreses que porten al mercat les diferents tecnologies.

3.3.1.2 Estratègies a seguir de caràcter no-tècnic

La gestió de la transició d'energia i potència no només es circumscriu a mesures de caràcter tècnic. Ans al contrari, l'entorn no-tecnològic té un paper fonamental per al seu desenvolupament i implementació a gran escala. Concretament, en els següents grans àmbits:

- Educació en qüestions energètiques
- Legislació i regulació
- Models de negoci
- Acceptació social
- Governança

Analitzem a continuació algunes de les principals estratègies que haurien d'estar al darrera de la transició energètica.

⁶³ <http://en.wikipedia.org/wiki/NIMBY> (Octubre 2014)

1) Terminologia i estadística energètica i econòmica

Un aspecte fonamental i previ a tota la resta és com quantifiquem els fluxos energètics, quines dades quantitatives i qualitatives fem servir i com les treballem. En funció d'això podem crear un estat d'opinió que derivi cap a mesures legislatives determinades o certs estats d'opinió, per exemple.

Primer fer notar que, tot i l'exemple d'agències públiques per la gestió de les dades, com la US Energy Information Administration⁶⁴, Eurostat (Energy Statistics⁶⁵), l'Agència Europea del Medi Ambient⁶⁶, l'Agència Internacional de l'Energia⁶⁷ i els seus documents d'anàlisis anuals (World Energy Outlook⁶⁸), o les estadístiques de BP (Statistical Review of World Energy⁶⁹), entre d'altres, en regions com l'Estat espanyol i concretament Catalunya, la qualitat de les dades dista molt de ser l'òptima. No només avui (2014) hem de recórrer a registres del 2009, sinó que molta informació resideix en mans de les empreses privades que operen el sistema i no es dona accés a la població.

Però, més enllà d'aquest fet, cal fer veure que l'estadística energètica que avui fem s'ha forjat en una concepció fòssil i productivista de l'energia. Bàsicament mesurem fluxos quantitius que en algun moment passen a través d'un sistema de comptatge. Menystenim així, per exemple, l'energia solar necessària pel manteniment dels ecosistemes que sostenen la vida i les nostres societats. Perquè comptabilitzem l'energia que a la nit fem per il·luminar els carrers, però no la que fem servir durant el dia? L'excusa de com fer-ho no és de rebut per abordar la seriositat de la qüestió.

També la terminologia associada al procés energètic no ajuda a entendre la naturalesa de fluxos dins d'un sistema termodinàmic com realment és la societat. "Generar Energia" és una barbaritat des d'un punt de vista tècnic (vulnera la Primera Llei) i conforma un pensament que ens dissocia de com funcionen les coses. Veiem els residus com un problema, en comptes de veure'ls com una part indestriable de qualsevol flux energètic i de material.

Aquest mateix fet passa en el sistema econòmic fòssil que ens hem dotat. Mesurar la riquesa de les nacions a través del PIB, per exemple, indueix a pensar un món sense límits en accés a recursos. Aquesta terminologia i mètrica feta a mida del sistema fòssil no serveix per avaluar el nou model ni tan sols la seva transició. Cal, per tant, un canvi epistemològic que possibiliti i faciliti la transició de model energètic basat en l'estat de coneixement científic contemporani, al fusió de les ciències i les humanitats i inclogui en la seva formulació i desplegament el conjunt de la població.

⁶⁴ <http://www.eia.gov> (Octubre 2014)

⁶⁵ <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/introduction> (Octubre 2014)

⁶⁶ <http://www.eea.europa.eu> (Octubre 2014)

⁶⁷ <http://www.iea.org> (Octubre 2014)

⁶⁸ <http://www.worldenergyoutlook.org> (Octubre 2014)

⁶⁹ <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013.html> (Octubre 2014)

2) Participació dels agents involucrats: ciència post-normal

Una característica pròpia del moment és la terminologia tècnica (en el camp energètic i econòmic) que allunya al ciutadà del seu dret i responsabilitat democràtica de participar i opinar respecte aquest aspecte cabdal de la societat.

Atès tots som part i subjectes actius i receptors de la política energètica adoptada per un país o regió i, d'altra banda, la complexitat del sistema energètic i les seves implicacions són de gran magnitud i abast, caldria disposar d'un mecanisme ordenat de participació social. Una extensió del sistema de validació que no deixi només en mans dels mercats i dels interessos corporatius de les empreses energètiques el model d'un país. Un procés dialèctic a on tothom ha de trobar les oportunitats d'una coexistència necessària entre la part pública, la privada i la societat. Comencen a haver-hi alguns intents d'articular aquesta relació, com serien els PPPP⁷⁰ ó *Public-Private-Person-Partnership* que poden servir d'aprenentatge per veure com articular-ho a gran escala per àmbits cada vegada de major abast.

3) Decisió social de quin treball s'ha de fer

Una de les decisions que més clarament corresponen a la societat és la de quin model socioeconòmic vol dotar-se. Això requereix tenir el màxim d'informació per poder avaluar les diferents alternatives que són possibles (en funció dels recursos) i les seves conseqüències bones i no tan bones en termes de llocs de treball, economia, respecte dels ecosistemes, entre d'altres. Estem, doncs, parlant d'educació i de formació com a ciutadans que hauria de veure's traduït amb un lideratge social reflectit en la gestió política dels diferents grups representatius al Parlament. La transició energètica implica més participació i això implica més democràcia. Aquest procés ha de veure's il·lustrat pel coneixement dels límits dels recursos energètics i materials que ens fixaran, irremeiablement, allò què és possible fer i el que no. Això ajudarà a fer efectiu els processos de participació destriant allò que és viable i fent el procés executiu.

4) Integrar els límits dels recursos dins el cicle econòmic.

Tenir una concepció de la societat no exclusivament productivista que persegueix l'explotació dels recursos naturals per veure's part d'un ecosistema ha estat durant molts anys un plantejament radical i marginal en el context de les societats occidentals. L'ombra del mecanicisme i de la Il·lustració fa ja uns quants segles s'estén implacablement per la cosmovisió d'una societat que s'ha dissociat dels cicles biològics en els quals està circumscrita i dels que, si vol continuar en vida, no pot desfer-se'n. Això que es veu clarament en la biologia d'un mateix (cada dia hem de menjar i expulsar els excrements), no assolim a veure-ho com a col·lectiu. Aquesta pèrdua de connexió amb els ecosistemes ha pogut portar-se a la pràctica, principalment i com hem vist, per la disponibilitat d'un recurs energètic sense precedent, el petroli. L'emergència dels límits, que en cas català ronda el 5% del PIB, fa, de sobte, trontollar aquesta visió quasi màgica de què hem gaudit durant unes quantes generacions (tampoc no moltes) i genera desorientació i desconcert.

⁷⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Public/social/private_partnership (Octubre 2014)

Quan abans una societat sigui capaç de reconèixer-se els límits, en aquets cas materials i energètics, i adaptar-s'hi, abans podrà esdevenir viable en el temps. Aquest procés, però, és socialment agressiu perquè estem en permanent competència amb d'altres regions que encara disposen dels recursos fòssils a voluntat i, per tant, el canvi ha de veure's acompanyat d'un canvi social que, per definició, requereix de temps per assentar un canvi de valors.

5) Estructura curricular i coneixement

D'entre les mesures no tecnològiques cal considerar com una estratègia fonamental l'educació, no només com a ciutadans, sinó com a estructura curricular que aporti els perfils professionals (en l'ampli sentit de la paraula) necessaris per la transició energètica. Això inclou tot el ventall des d'humanitats a ciències i tecnologia i a tots els nivells des de coneixement més pràctic i aplicat a recerca bàsica i fonamental. Aquesta acció és a mig i llarg termini. Però a curt inclou també la incorporació del coneixement que avui ja es disposa en el camp de la ciència i la tecnologia per a incorporar-lo en el disseny del sistema energètic.

6) Regulació independent del sector energètic

El sector energètic és especialment dependent de les lleis que en regulen el seu desenvolupament. L'Estat espanyol ha passat en 20 anys d'un model totalment regulat a disposar de les activitats de generació i de comercialització liberalitzades. Tanmateix, no hi ha una clara separació funcional d'activitats per part de holdings empresarials, la qual cosa introdueix alteracions en el funcionament del mercat.

D'altra banda, l'evolució legislativa del sector elèctric a l'Estat espanyol ha estat caracteritzat per moltes mesures d'urgència que han anat modelant la llei sense el suficient debat parlamentari ni entre els agents involucrats. Ara tenim una nova Llei⁷¹, però encara pendent de desenvolupar en molts dels seus aspectes.

Des del punt de vista de la transició energètica, la regulació juga un paper fonamental, entre d'altres per:

- aportar seguretat jurídica pel desenvolupament del sector i assolir el finançament necessari,
- defensar els interessos del país i la societat davant dels grups de pressió en tant a sector estratègic,
- possibilitar l'aparició de figures dins la cadena de valor del sector, com podria ser l'agregador de demanda, o la consideració com a activitat regulada de l'emmagatzemament amb entitat pròpia,
- fixar la retribució a les activitats regulades, vetlla per la transparència dels costos reconeguts i per la conformació transparent de preus en el mercat,
- donar un marc legal de competència per totes les fonts de generació basat en la transparència dels costos,
- dona suport a la planificació estratègica del sector,
- arbitrar entre els diferents agents,
- estableix les condicions d'interoperabilitat amb d'altres mercats

⁷¹ RDL 23/2013

7) Seguretat jurídica

Un aspecte fonamental que mereix una menció específica és la seguretat jurídica que el sector ha d'oferir per tots els agents involucrats. Tant per afavorir les inversions necessàries per la modernització del sistema, com per donar senyals clars a la indústria per a que pugui innovar sota un esquema d'actuació estable. La transició energètica ha de gaudir, doncs, d'aquesta seguretat jurídica a nivell de país que permeti la modernització del sistema energètic. Aquest és un nou exemple del que no tenim a l'Estat espanyol i, per tant, tampoc a Catalunya. Recuperar aquesta reputació és fonamental per poder disposar dels recursos necessaris per la transició energètica i un full de ruta plausible.

8) Deixar de subvencionar les tecnologies contaminants

En el debat econòmic entre les diferents tecnologies de generació d'energia sovint es comparen fets incomparables. Les externalitats de l'explotació de les diferents fonts energètiques no solen entrar-se a l'equació i això distorsiona una correcta assignació de recursos. Així, per exemple, els subsidis al carbó a l'Estat espanyol (CEE, 2013) representen un cost directe de subvenció entre 400 i 500 milions entre ajudes al carbó (al 2013 es subvencionava 30 €/tona) i compromisos socials contrets amb les regions productores. El seu ús està garantit per Llei⁷², recentment aprovada (Real Decreto 676/2014, 1 d'agost de 2014⁷³), malgrat emet moltes emissions de CO₂ i encareix el cost de generació del MWh en un 6%, que representa més de 1.000 milions (Vila, 2014).

Contràriament, les energies renovables tenen un grau d'internalització major, ja que la cadena energètica és molt menor i els impactes de la seva utilització són mínims comparats amb la cadena de subministrament de combustibles fòssils i nuclears. Aquest fet, però, no es veu reflectit amb una millor competitivitat de les mateixes a l'hora de fer la cassació entre diferents tecnologies, de manera que, si bé entren amb prioritat en el mercat, la seva retribució ve fixada per preus regulats o per rendibilitats fixades, aparentment superiors al casat al pool, generant percepció de "que són cares", però no es té en compte que les tecnologies convencionals hi entren a preus sense externalitats, el que representa subvencions ocultes⁷⁴.

9) Preu de l'energia que reflecteixi els costos

A dia d'avui, el preu que acabem pagant per l'energia és una barreja entre preu fictici que no incorpora totes les partides de costos d'una banda, i preu polític on es fan cabre moltes partides provinents d'activitats regulades i impostos, per altre. Fer aflorar els costos reals de cada tecnologia a l'hora de fer l'assignació ajudaria a prendre consciència de l'alt valor que té per la societat el fet de disposar d'energia i potència quasi a voluntat i podria permetre esquemes tarifaris que ajudessin a modelar la corba d'oferta i demanda d'energia amb una palanca preu.

⁷² <http://www.irmc.es/Noticias/common/Nuevo-Marco-2013-2018.pdf> (Octubre 2014)

⁷³ <http://www.irmc.es/Noticias/news/060814-RD-676-2014-Prej-Bajas-ides-idweb.asp> (Octubre 2014)

⁷⁴ <http://www.odi.org/subsidies-change-the-game> (Octubre 2014) and <http://priceofoil.org/fossil-fuel-subsidies/international/> (Octubre 2014)

Tanmateix fer això implicaria un increment de preu important que tindria greus impactes sobre la inflació del país i la percepció social, de manera que el cost polític d'aquesta mesura és molt alt. El problema rau en el fet que, a florin o no els costos reals en el preu, aquests existeixen, i si no els paguem via tarifa, els paguem en d'altres partides ocultes via Pressupostos Generals de l'Estat, o els acumulem en forma de dèficit tarifari o dèficit ecològic. Si els preus fossin clars, es podrien també prendre mesures fiscals redistributives que atenuessin l'impacte del preu del servei bàsic energètic en funció de la renda dels ciutadans.

No fer-ho contribueix a mantenir artificialment una situació fictícia que no ajuda a la transparència del mercat i a la presa de consciència i actuació per part de la població i els diferents agents econòmics.

3.3.2 Smart Grid: una visió global que actua localment

Donem el nom d'*Smart Grid* al conjunt d'accions tècniques i no-tècniques descrites i que han de catalitzar la transició de model cap a un sistema menys dependent dels combustibles fòssils i circumscrit dins els recursos naturals.

Val a dir que les mesures concretes, per exemple a nivell tecnològic a alta, mitja o baixa tensió, per sí soles i descontextualitzades poden no servir de res, i fins i tot alentir el ritme de la transició. Per tant, podem parlar avui d'accions cap a les Smart Grid que no persegueixin intrínsecament la transició de model i que responen senzillament a una reducció de costos (accions Estat 1).

Per això cal vindicar aquesta visió global de les xarxes elèctriques i de la informació i, després, ser capaços d'executar-les en cadascun dels nivells i realitats que pertoqui. La complexitat rau, justament, que la suma de les accions no explica el resultat final, i cal vetllar per a l'aparició de les propietats emergents.

El diagrama de flux per abordar la pregunta del model energètic, no comença parlant de "si el recurs ha de ser més o menys renovable", sinó plantejant-se el treball que cal i volem fer com a societat.

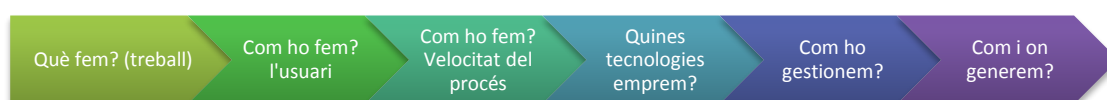


Figura 3.33: Procés d'anàlisi del procés energètic. FONT: Elaboració pròpia

a) Què fem? Repensant les activitats socioeconòmiques, una tasca de tota la societat

Abans de plantejar com transformem energia, a partir de quines fonts i com d'eficients són els nostres artefactes hi ha una qüestió bàsica i fonamental. La definició de quines activitats són bàsiques i fonamentals i quines no. I com *s'han de fer*. Acceptem socialment el cost energètic, social i econòmic de poder fer un viatge en avió a Amsterdam un cap de setmana per menys de 100 euros? Forma això part d'allò desitjable o és una mostra de privilegi fòssil?

La llista és llarga i en la seva definició cal intervenir-hi com a ciutadans. Ens podem permetre construir en les 800 Ha del Parc Agrari del Llobregat, de primera qualitat en termes agrònomic i proveïdor de quasi el 15% de tot el producte fresc de Mercabarna un complex d'oci com l'anomenat "Eurovegas"? D'on provindran els aliments? A quin cost energètic? Més enllà del model socioeconòmic d'aquest projecte, som conscients de la limitació i implicació dels recursos energètics en aquestes decisions? I la qüestió en majúscules, podem concebre un escenari de "creixement continuat" en un món de recursos limitats?

Aquest procés porta implícit una contradicció molt difícil d'abordar. Si som coherents i portem l'anàlisi a les darreres conseqüències la societat hauria de virar cap a una austeritat que generaria conflicte social atès que moltes de les activitats que fins ara hem considerat "normals" (d'ençà 30 ó 40 anys) haurien de desaparèixer. I amb elles moltes activitats econòmiques associades i llocs de treball. Com aconseguir, doncs, resoldre la paradoxa?

La resposta no és única i ni molt menys mecànica. Podem avaluar que ajudaran a respondre-la l'educació i el coneixement. Probablement si el recurs petroli s'encareix suficientment per una dinàmica pròpia d'oferta i demanda moltes coses ja deixaran de fer-se, malgrat que correm el risc d'una involució social entre els qui puguin pagar-se el recurs i els qui no. I fins i tot, en el cas que la nostra societat arribés a nivells de consciència i sensibilitat suficients com per replantejar-se el seu model econòmic, com encaixaríem en una economia global on els altres continuen cremant carbó o *shale gas*? La dimensió planetària ens aboca a un altre dels elements que de ben segur ha de contribuir a resoldre la paradoxa: una governança global que tingui cura dels recursos. Sona a ingenu i a impossibles, però l'alternativa que tenim és accentuar l'individualisme i el conflicte entre nacions i regions.

Educació, sensibilització, coneixement, governança, un seguit d'accions pròpies de la *Tercera Cultura*, on la ciència i les humanitats van de la mà per bastir un esquema de valors que compatibilitzi el desenvolupament social amb la gestió dels recursos. Cal aquesta aproximació metodològica per respondre al repte energètic que la societat té plantejada.

b) Com ho fem? Aprenentatge significatiu dels consumidors

Qualsevulla de les opcions tecnològiques abans descrites no serà efectiva, però, sinó s'incideix en l'aspecte humà de la tecnologia. Al capdavant, som les persones les qui acabem per connectar o desconectar un equip i, per tant, l'usuari no pot ser considerat com un agent extern al procés de generació-consum, sinó que ha d'estar integrat, des del principi, i amb un paper clar.

Un repte afegit és que no es tracta d'educar a aquell segment ja conscienciat o sensible amb la necessitat de gestionar els recursos, sinó a tota la població, atès que és tota la població la que consumeix energia i la que té quelcom a dir sobre el procés i les decisions que es prenguin. I aquí afloren barreres socials molt difícils de canviar a curt termini, com podria ser l'ús col·lectiu de serveis com, per exemple, rentar la roba (accions, d'altra banda, ben acceptades socialment en d'altres societats com, per exemple, la Suïssa). I és que anem malament, però còmodes i aquest fet impacta

fortament en el canvi d'hàbits dels ciutadans. En aquest sentit, la incorporació dels equips de mesura intel·ligents, o *smart meters*, representa una oportunitat sense precedents de modificar la relació entre els usuaris i els proveïdors d'energia. Faltarà veure si s'aprofita o es perd l'oportunitat d'estalvi associada.

Una derivada de l'exemple mostrat és la dicotomia aparent que hi ha entre que sigui l'usuari qui governi els seus electrodomèstics i equips (aportant, per tant, un alt grau d'autonomia) o automatitzar els processos i deixar-ho en mans de la companyia elèctrica o un tercer agent *agregador*. Atesa la mala reputació de les companyies elèctriques per part del consumidor⁷⁵, aquesta darrera opció sembla poc factible.

Respecte l'automatització de les llars, el mercat no ha acabat mai d'acceptar solucions aparentment robustes i que faciliten la vida domèstica i que sovint han rebut el nom genèric de "domòtica"⁷⁶. Una de les explicacions pot ser el cost associat a l'adquisició d'aquests components i el seu manteniment i, d'altra banda, a la seva usabilitat. Un extens estudi⁷⁷ a l'Estat espanyol conclou que el grup de consumidors més favorables acceptarien un cost màxim de 300 euros i un període de retorn de la inversió de 2 anys.

Ambdós reptes són els que durant l'experiència investigadora de l'autor s'han intentat minimitzar apostant per solucions *low cost* basades en interacció social amb l'usuari i que s'han concretat amb la proposta tecnològica de l'empresa ENERBYTE⁷⁸ i la sol·licitud de patent associada.

c) Tecnologia i Velocitat del processos, un compromís entre Eficiència i Potència

L'eficiència energètica és sense cap mena de dubte un camí que s'ha de recórrer amb prioritat, en tractar-se de la resposta més ràpida i cost-efectiva. Característic de les fases finals d'explotació d'un recurs energètic o material davant les mostres evidents de la seva finitud, l'eficiència es mostra com una manera eficaç i eficient de fer més amb menys. No soluciona per definició el problema, atès que no el qüestiona en la seva arrel ni planteja el canvi de recurs, però facilita el procés d'educació dels consumidors i, el que és més important, permet guanyar temps. Una altra cosa és que això s'aprofita per bastir l'alternativa i no per continuar l'agonia del pensament caduc i obsolet dels combustibles fòssils. O, fins i tot, una percepció d'increment d'eficiència pot generar un efecte rebot per al qual augmenta l'activitat en valor absolut i el consum total. Concretament l'eficiència energètica pot ajudar a:

1. Disminuir l'energia i la potència d'un procés a partir de canvi de tecnologia. Per exemple, a partir de la modernització de tecnologies que permetin realitzar el mateix treball amb menys energia. Tenim molts exemples: en el camp de la il·luminació, els llums LED; en el camp dels electrodomèstics, els

⁷⁵ <http://reputationinstitute.es/reputacion/los-consumidores-espanoles-recuperan-la-confianza-en-las-empresas/> (Octubre 2014)

⁷⁶ <http://ca.wikipedia.org/wiki/Domòtica> (Octubre 2014)

⁷⁷ http://gad.ite.es/index_es.html (Octubre 2014)

⁷⁸ www.enerbyte.com (Octubre 2014)

de classe A+; els vehicles amb motors d'explosió cada vegada més eficients, sistemes híbrids, regeneració de frenada entre d'altres.

2. Una altra contribució és la reenginyeria dels processos. Definir un procés productiu redimensionant el factor temps. Aplicant criteris d'anticipació i oportunitat es pot donar un grau de llibertat per desacoblar el moment de consumir energia respecte al de fer el treball. Seria, per exemple, la recàrrega nocturna del vehicle elèctric.

Com hem comentat anteriorment, cal minimitzar l'efecte rebot o Paradoxa de Jevons per tal de maximitzar el potencial real de les mesures d'eficiència energètica preses. Ambdós fenòmens es veuen representats en la Figura 3.35, un cas pràctic de la dialèctica "Eficiència Vs Potència", de manera que es genera un desplaçament cap a l'esquerra, això és, augmentant l'eficiència. Gràficament passant de P_1 a P_2 .

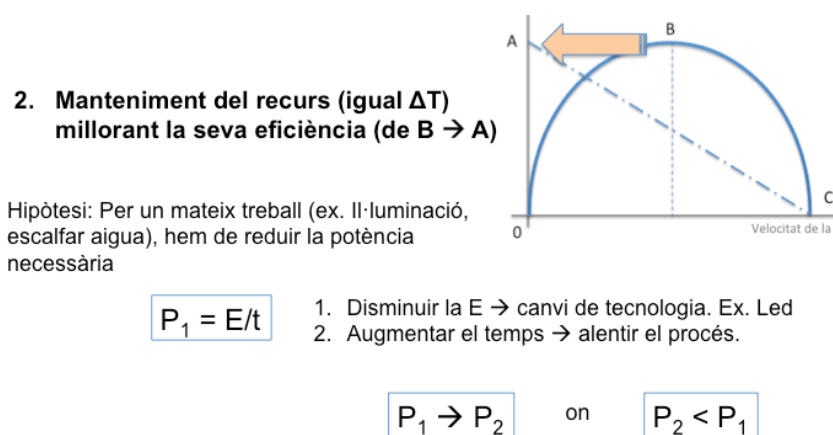


Figura 3.35: Estratègies de transició basades en eficiència energètica. FONT: Elaboració pròpia

d) Com ho gestionem? Gestió activa de la demanda

Una vegada decidit què volem com a societat i escollides aquelles tecnologies més eficients, cal veure la importància de *gestionar el balanç oferta-demanda*. A partir de tenir visibilitat sobre escenaris a curt i mig termini sobre demanda i disponibilitat de recurs energètic, cal optimitzar l'assignació dels mateixos al llarg del temps per evitar pics de demanda, minimitzar les pèrdues i millorar l'eficiència. Per exemple, quan fa sol i es produeix energia solar, fer funcionar els aires condicionats. És el conjunt de mesures conegudes com "*demand response*" en l'argot de les xarxes elèctriques intel·ligents o *smart grid*.

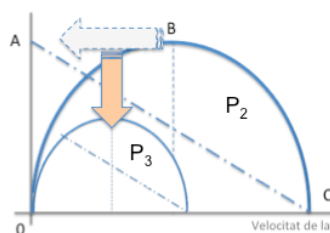
Per portar-ho a la realitat, cal adaptar la xarxa elèctrica de transport i sobretot la de distribució que approximi els emplaçaments productors, per exemple, allà on bufa el vent, amb els de consum, que sigui capaç de mantenir un diàleg entre l'operador del sistema i els consumidors (per exemple a través de tarifes variables) i capacitat tecnològica per actuar. Un aspecte fonamental és qui podrà exercir control dels sistemes de la gestió de la demanda i sota quin esquema econòmic. Estaran els consumidors disposats a cedir el control a la companyia elèctrica? I si això repercuteix en una reducció significativa del cost? Pot assumir-ho això el sistema? Són algunes, entre moltes preguntes, que cal plantejar i respondre.

e) Com i a on produïm? Canvi de recurs energètic i d'arquitectura

En aquest cas, estem canviant la corba Eficiència Vs Potència des d'un recurs inicial P_2 a un de final P_3 . Si el gradient energètic del nou recurs fos superior, ens trobaríem davant d'un creixement de l'àrea de la gràfica i, per tant, d'un procés expansiu tecnològic i socioeconòmic. Tanmateix, el canvi del recurs fòssil cap a un recurs renovable, és a dir d'un "pressupost energètic" basat en estalvis a un de basat en ingressos anuals i *dèficit zero*, porta una disminució de l'àrea i, per tant, de la capacitat de desenvolupar potència.

Canvi de recurs → canvi de corba

Hipòtesi: el nou recurs té un "gradient" propi i característic que permetrà desenvolupar una P_3



a) $P_3 > P_2$ Cicles expansius de l'economia associats a tecnologies que exploten el nou gradient (història). Ex. Màquina de vapor

b) $P_3 < P_2$ En el cas de l'energia solar, la P_3 té un valor màxim que no podem augmentar (1000 W/m^2).

$$P_3 = f(\text{sup}, t)$$

1. Reduir encara més la Potència a satisfer (si es pot)
2. Augmentar la superfície de captació (Ex. Desertec)
3. Emmagatzemar (augmentar el temps de captació)

$$P_2 \rightarrow P'_2$$

Figura 3.36: Estratègies de transició basades en canvi de recurs. FONT: Elaboració pròpia

Aquest canvi cap a renovables impossibilita, a priori, el manteniment de les condicions de treball adaptades al cicle expansiu fòssil. Aquesta situació refereix tant a nivell d'energia com de potència necessària. Queda tota una àrea d'activitats fora de l'abast del nou recurs que interpel·larà a la societat, al seu nivell de benestar i comoditat, i a la seva maduresa per incorporar els límits dels recursos en el seu model socioeconòmic.

L'efecte de pèrdua real de capacitat de realitzar treball (activitats socioeconòmiques d'avui) pot mitigar-se incidint encara més en l'eficiència energètica, augmentant la superfície de captació (a risc d'haver d'anar fora del propi territori, com seria el cas del projecte eòlic alemany del Mar del Nord o del projecte solar al nord d'Àfrica, Desertec⁷⁹), o bé augmentant el temps de captació de recurs a partir d'emmagatzemar l'energia en un moment donat per poder emprar-la posteriorment i, si s'escau, augmentant la potència capaç de subministrar. En cap cas, però, no podran compensar el potencial energètic dels recursos fòssils que han acumulat l'energia solar durant milions d'anys i, d'altra banda, generaran noves limitacions (polítiques, ecològiques, físiques, tècniques...) que en marcaran el seu potencial de desenvolupament

⁷⁹ <http://www.desertec.org> (Octubre 2014)

El canvi de recurs energètic cap a fonts renovables implica també canviar la infraestructura de transport, distribució i consum. Passar d'un model centralitzat que permet emetre a alta potència per absorbir les pèrdues fins arribar als llocs de consum i, un cop allà, satisfer càrregues d'alta densitat, ha de donar pas, pel criteri de limitació de potència descrit anteriorment, a un apropament de la generació amb el consum i poder amollar al màxim el potencial necessari amb el disponible. El canvi d'arquitectura del sistema energètic conjuntament amb l'increment de la participació de les tecnologies de la informació i la comunicació ha d'esdevenir la infraestructura necessària per un correcte desplegament de les energies renovables, com l'asfalt d'un pista en el circuit de F1 facilita el desplegament de tot el potencial d'un cotxe de carreres (Scheer, 2001).

3.3.3 Un exemple real, pràctic i quotidià: la rentadora

Tota la investigació feta i descrita s'objectiva amb l'exemple de la rentadora (Karfopoulos, 2014). Sobre aquest cas he investigat en el Mas Roig de Llagostera conjuntament amb el Dr. Francesc Sureda i m'ha permès experimentar les hipòtesis de treball. Es descriu a continuació el cas pràctic que il·lustra el potencial de les *smart grid* enteses com a veritables xarxes de gestió de matèria, energia i informació que han de permetre maximitzar les activitats a fer amb els recursos disponibles a partir d'un redisseny dels processos i un ús més racional per part dels ciutadans. Un cas que il·lustra el potencial d'aquesta metodologia d'anàlisi en els altres sistemes i equips de consum.

a) Treball a fer

Metodològicament, a l'afrontar un "treball" a fer per la societat no ens hem de fixar al principi en l'origen de l'energia, si no en la definició precisa del treball a fer. Posar el focus no en la generació, si no en la demanda. En l'exemple, es tracta de rentar 5 kg de roba a 60°C. Diferent seria l'evolució del procés si decidíssim rentar amb aigua freda o fer una bugada col·lectiva de 20 kg.



Figura 3.37: Exemple d'Smart Grid : treball a fer. FONT: Elaboració pròpia

b) Com subministrem energia a la rentadora?

Actualment, per donar energia a una rentadora ens limitem a veure'n la seva potència i validar que el contracte amb la companyia elèctrica que tenim a casa la pugui suportar. Alternativament, en indrets aïllats sense accés a xarxa, podríem pensar en tenir un grup electrogen de potència suficient per engegar-la (i compensar

el factor d'arrancada) o, en un cas renovable, dimensionar un sistema fotovoltaic i de bateries suficientment gran per poder fer funcionar la rentadora qualsevol que haguem triat.

✓ Com energitzem la rentadora (3,3kW)?

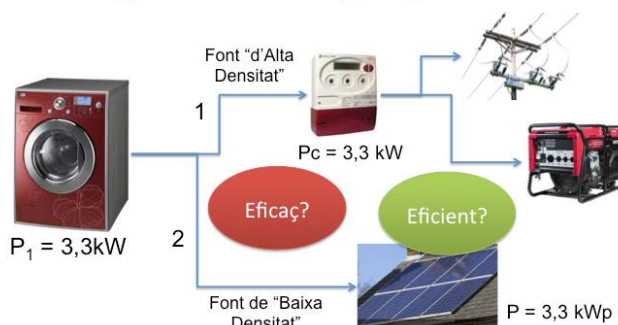


Figura 3.38: Exemple d'Smart Grid : Subministrament d'energia. FONT: Elaboració pròpia

c) Mesura 1: Eficiència energètica (Usuari i canvi de tecnologia)

Tanmateix, a l'hora de comprar la rentadora (l'equip tecnològic que realitza el treball decidit a una eficiència en l'ús de recursos determinat), podem triar entre diferents categories energètiques, identificades amb l'etiqueta de certificació energètica que ordena de més a menys eficient segons un codi que va des de l'A a la G.

Si el criteri de seleccionar l'equip és només el preu de compra, ens decantarem per les més ineficients (E, F, G) que, des d'un punt de vista de qualitat de servei, no tindrà cap conseqüència. Si introduïm un criteri econòmic que consideri també el cost de fer funcionar l'equip durant els propers anys, potser ens decantem cap a opcions més eficients (B, C). Però si el criteri no és econòmic ni a curt termini, sinó que introduïm els límits del recursos, no podrem més que seleccionar la més eficient de totes (A+++). Que, també serà la més econòmica en termes globals, malgrat el major cost inicial, ja que internalitza els impactes de la generació d'energia durant tota la seva vida útil. Aquesta economicitat, però no es veu traduïda a la butxaca de qui pren la decisió, de manera que es fa una assignació ineficient.

Suposem en l'exemple que escollim una rentadora A, de manera que ens permet reduir un terç la potència demandada. L'efecte de menor potència té una implicació directa en el cas que la generació sigui autònoma (grup electrogen o solar), malgrat que queda ocult si tenim el subministrament convencional des de la xarxa.

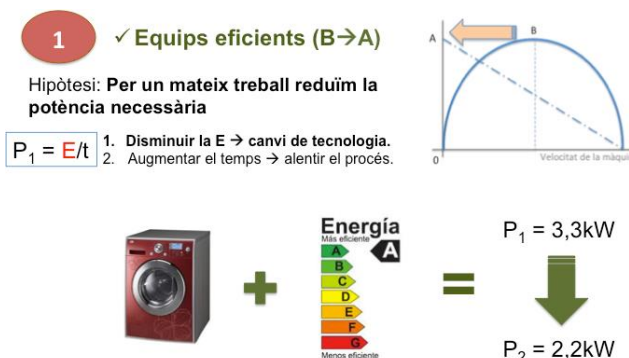


Figura 3.39: Estratègia #1 : Per un mateix treball reduïm la potència necessària. FONT: Elaboració pròpia

d) Mesura 2: Eficiència energètica, reenginyeria de procés incorporant el factor temps

Un cop hem reduït la potència necessària per una millora tecnològica, podem fer un nou pas en el camí de l'eficiència. Però necessitem més informació del procés que la que fins ara hem manegat i que es redueix a la lectura de la placa tècnica o matrícula de l'electrodomèstic d'on n'hem llegit la demanda de potència.

Una primera dada important és conèixer el total d'energia (Wh) que consumeix cada programa de rentat. Això és important, però, el veritable increment d'informació qualitatiu és veure com evoluciona la potència demandada en cada instant al llarg del procés, és a dir, el consum d'energia instantània, que també és significativament diferent entre els diferents programes de rentat. Finalment, podríem disposar de major nivell d'informació si fem l'exercici d'evolució d'altres paràmetres elèctrics, com ara la potència reactiva o els harmònics.

2 ✓ Introduïm el factor temps

Tenir aquesta **INFORMACIÓ** ens permetrà noves estratègies

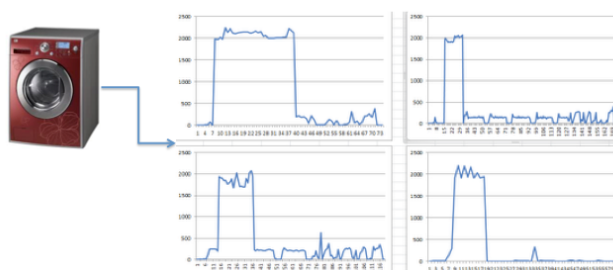


Figura 3.40: Estratègia #2: Introduïm el factor temps per tenir informació. FONT: Elaboració pròpia

e) Mesura 3: Assignació flexible de recursos energètic i optimització

Una vegada seleccionem el programa específic de rentat i constatem l'evolució del consum en cada instant, podem veure amb claredat dos nivells de demanda diferenciats. Un "d'alta potència", amb un consum instantani molt superior a la mitjana de tot el procés, però durant un període de temps molt limitat; i un altre de "baixa densitat" que, anàlogament, s'utilitza en un temps clarament majoritari, però de valor per sota la mitjana de consum. En l'exemple, tenim:

3 ✓ Assignem recursos energètic en funció del consum



Solució proposada: PV Ppeak = 0,5kWp (88% temps)
Pc = 2,2 (12% temps)

Figura 3.41: Estratègia #3: Assignem un recurs energètic segons la demanda. FONT: Elaboració pròpia

- consum d'alta densitat: escalfar l'aigua durant 20 minuts. Potència invertida màxima (entre 4 i 5 vegades superior a la mitjana) i durant un període aproximadament del 10% del temps total
- consum de baixa densitat: potència instantània inferior a la potència mitjana demandada durant el procés, però en operació en quasi el 90% del temps.

En el moment que per energitzar una demanda d'alta densitat és necessari que entri una font de generació de molta potència, per exemple, un grup electrogen en el cas d'una instal·lació aïllada. En aquest moment podem tenir un romanent d'energia potencial per a ser emprada per altres usos. Aquestes càrregues són consums no prioritaris que en algun moment s'hauran de produir, però que podem anticipar-nos aprofitant l'oportunitat de disposar d'energia disponible.

Sovint estan associats a sistemes d'emmagatzematge, ja sigui bombeig i acumulació d'aigua, baixar la temperatura del congelador, entre d'altres, o senzillament consums programats que ara poden fer-se total o parcialment, com podria ser regar.

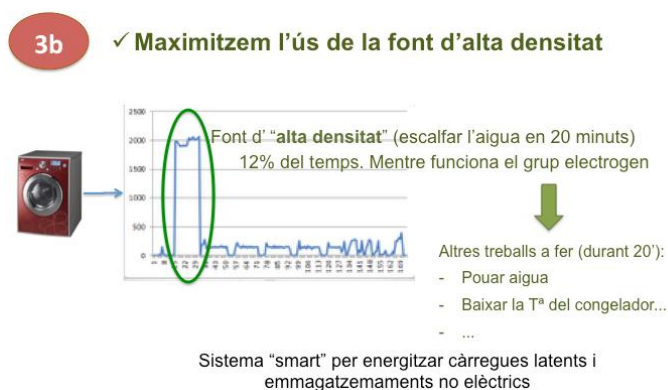


Figura 3.42: Estratègia #3b: Maximitzem l'ús de la font de generació d'alta densitat. FONT: Elaboració pròpia

f) Mesura 4: Gestió de la demanda en el temps

Aquesta gestió dinàmica de l'oferta i de la demanda d'energia també té sentit en un escenari amb interconnexió amb la xarxa elèctrica. Si analitzem com es comporta al llarg del dia la demanda d'energia del país detectem consums pic i vall, com es veu en la gràfica de *Red Eléctrica Española*⁸⁰, REE.

4 ✓ **Adaptem el consum a la corba de demanda**



Figura 3.43: Estratègia #4: Modulem el consum al perfil de la corba de demanda. FONT: Elaboració pròpia

⁸⁰ <http://www.ree.es/es/actividades/demanda-y-produccion-en-tiempo-real> (Octubre 2014)

Poder emplenar els moments de consum vall amb consums no prioritaris programats o sistemes d'emmagatzematge pot ajudar a equalitzar la corba global del sistema, millorant el seu funcionament i reduint-ne el cost.

g) Mesura 5: Canvi de recurs de nivell energètic inferior tot redimensionant el factor temps

Si l'objectiu (o la necessitat) és no utilitzar una font d'alta densitat (per un preu de disponibilitat, preu, emissions, ...) caldrà actuar reduint la demanda instantània. Poden haver-hi diferents maneres de matriu tecnològica (sistemes més eficients, com podria ser un escalfador d'aigua pel principi de la bomba de calor), però fins i tot així pot tenir una demanda de potència que el recurs disponible no pot cobrir. En aquest cas, caldrà optar per redissenyar el procés i augmentar la variable temps amb què es produeix aquell treball. D'aquesta manera podrem satisfer la necessitat del treball a fer (escalfar l'aigua a 60°C), però en comptes de fer-ho en 20 minuts a partir de combustibles fòssils, obtindrem la temperatura amb un sistema solar tèrmic que acumularà l'energia del sol durant unes quantes hores, possiblement el dia anterior, la qual cosa implica la necessitat d'un sistema d'emmagatzematge d'aigua calenta.

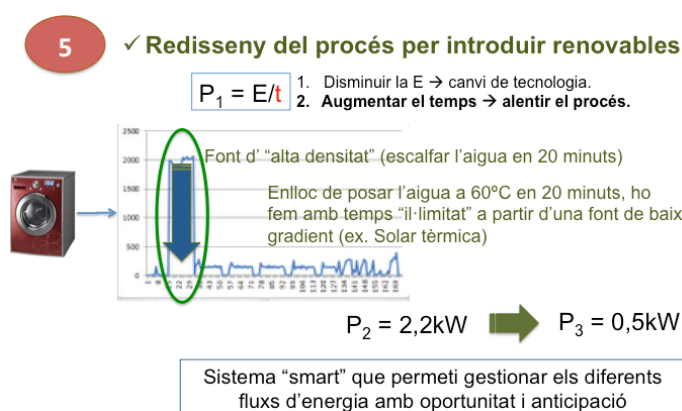


Figura 3.44: Estratègia #5: Redissenyem el procés de consum per introduir la producció amb les energies renovables. FONT: Elaboració pròpia

Les conseqüències d'aquesta experiència objectiven la dialèctica potència-eficiència explicada al llarg de la tesi i ajuden a entendre que un recurs donat només pot energitzar consums d'un nivell energètic inferior. I això no implica deixar de fer certes activitats socials, però sí fer-les d'una manera diferent.

h) Mesura 6: Cicles per maximitzar la degradació del gradient

Seguint l'aprenentatge de degradació del gradient solar pels ecosistemes, podem aplicar-ho en l'exemple de la rentadora. Una vegada tenim l'aigua a 60°C per fer el treball, aquest efluent residual pot restar encara a una temperatura superior a la xarxa general. Posem, per exemple, 50°C. Per tant, encara disposem d'un diferencial tèrmic susceptible de fer treball, per exemple, transferint calor al sistema de calefacció per terra radiant que treballa a 40°C. Un cop feta aquesta transferència, l'efluent residual, de nou, té cert potencial per ser aprofitat, per exemple, per preescalfar l'aigua de la xarxa (15°C) a l'hora d'emplenar la banyera (34°C).

Aquest aprofitament successiu del recurs energètic, en aquest tèrmic, permet maximitzar-ne la seva degradació i assolir un màxim de treball. Davant d'aquesta estratègia, actualment llencem l'aigua residual calenta i, després, tornem a consumir energia per escalfar el circuit de, seguint l'exemple, el terra radiant. Un cas pràctic seria fer servir l'aigua calenta produïda per un grup electrogen (Salas, 2001), opció ja disponible avui comercialment⁸¹.

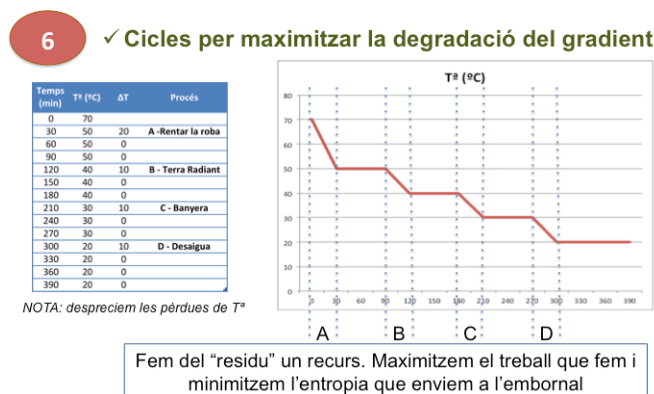


Figura 3.45: Estratègia #6: Aprofitem el calor residual per maximitzar la degradació del gradient a partir de cicles successius. FONT: Elaboració pròpia

i) Mesura 7: Gestió de la demanda entre diferents usuaris

Quan el que tenim no és una rentadora, sinó totes les rentadores d'un edifici de 20 pisos, veiem com la qüestió comença a prendre certa envergadura. Actualment, la potència que caldria contractar per satisfer les 20 rentadores (que suposem ja eficients) seria de 44 kW en total. Com que cada usuari és totalment independent dels altres no és possible compartir recursos. Tanmateix, constatem que la simultaneïtat de posar en marxa dues rentadores en el mateix segon entre els 20 veïns és molt baixa.

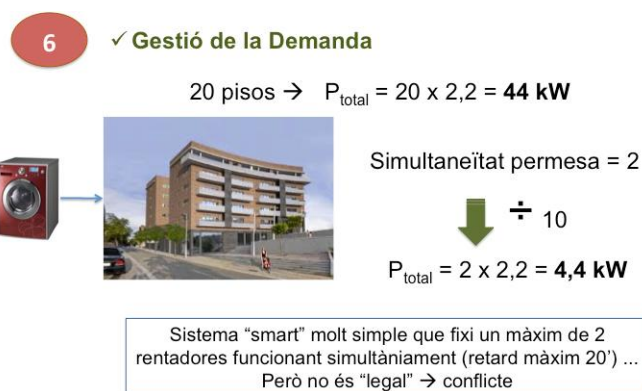


Figura 3.46: Estratègia #7: Gestionem la demanda de n consumidors simultàniament. FONT: Elaboració pròpia

⁸¹ DACHS-Baxiroca <http://www.baxi.es/microgeneracion/>
http://www.baxi.es/docs/sp_folleto/folleto_dachs.pdf (Octubre 2014)

De fet, inclús dins la mateixa hora... però si ens hi fixem bé, el punt crític de simultaneïtat només el tenim durant els 20 minuts de consum màxim. Per tant, si limitem la simultaneïtat a 2 rentadores durant 20 minuts (és a dir, la tercera entraria en el moment $t+20$), garantim que només contractant 4,4 kW de potència podem fer anar totes les rentadores de l'edifici. Fins i tot si el treball a fer és rentar la roba cadascú a casa seva (en lloc de compartir una rentadora industrial), podem donar-li resposta de manera altament eficient, però introduint un sistema bàsic de control.

j) De la rentadora a les micro/nano xarxes: Smart micro grid

El perfil de consum de la rentadora, caracteritzat per pocs moments de molta potència i una major part del temps a baixa intensitat energètica és extrapolable a molts d'altres equips de consum a nivell individual, però també a nivell de conjunt. Per exemple, es veu en la següent Figura 3.47 la distribució de la freqüència de consums per habitatges. Consums petits són majoritaris i els de molt alt consum, relativament esporàdics. Per tant les estratègies d'estalvi energètic i reducció del nivell de potència serien també aplicables en tants d'altres casos.

✓ Freqüència de distribució de consums domèstics

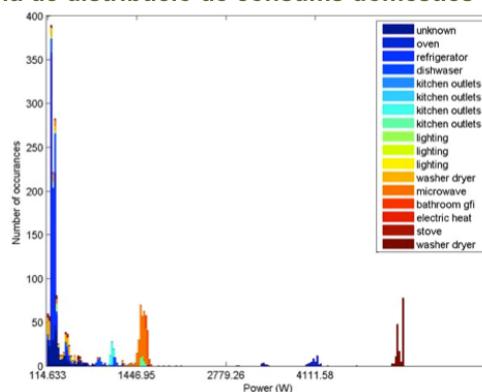


Figura 3.47: Estratègia #8: La freqüència en la distribució dels consums domèstics ens mostra que els equips de molt consum instantani són poc freqüents. FONT: <http://blog.oliverparson.co.uk>

Concretament a nivell residencial poden desenvolupar-se aquests sistemes integrals de gestió de la demanda i la generació d'energia totalment descentralitzats. Es coneixen com a microxarxes, o nanoxarxes i representen una oportunitat tecnològica per articular el sistema elèctric des de la base, amb diferents estratègies de control jeràrquiques amb les altres microxarxes i el sistema general. D'aquesta manera, si el control també està distribuït, podem imaginar una situació segons la qual, abans de generar una demanda al sistema general, les microxarxes intentin satisfer-la de manera local, i només interaccionin amb el sistema general per balancejar necessitats, disposar de potència de curtcircuit i evitar sobredimensionaments (per exemple, amb sistemes d'emmagatzemament). És un cas amb dos nivells jeràrquics de controls i de gestió. Un local, distribuït totalment que maximitzi la contribució dels recursos energètics locals i resolgui "internament" la cassació entre demanda i oferta d'energia; i un segon, jeràrquicament superior, que vetlli per l'interès del conjunt i es coordini amb altres microxarxes i la xarxa per assolir objectius comuns⁸².

⁸² Nodes Bàsics Distribuïts-NOBADIS www.wattpic.com (Octubre 2014)

k) La tecnologia està ja disponible, però no és suficient. Limitacions no tecnològiques de les smart grid

Aquest senzill exemple mostrat, però, no pot portar-se a la pràctica per un seguit de barreres no tecnològiques. D'aquesta manera es perden importants oportunitats de resposta ràpida a les necessitats de la qüestió energètica, abastament descrites en la present tesi, i ens ancorem en un sistema fòssil i antic.

Una primera limitació poden ser els estàndards dels equips de consum. Per exemple, aprofitar l'energia residual disponible per baixar la temperatura del congelador pot veure's limitat per la lògica de control binari del termòstat dels congeladors actuals i que no estan preparats per aquestes aplicacions.

Una segona, és la regulació pròpiament. Compartir l'escomesa a nivell de comunitat de veïns per gestionar conjuntament les diferents demandes d'energia no és possible amb la llei actual a l'Estat espanyol. Ja no cal anar més enllà i plantejar sistemes d'autoconsum fotovoltaic o de microxarxes amb acumulació distribuïda, directament prohibides per la llei sota l'amenaça de sancions milionàries.

Aquesta inseguretats jurídica fa inviable el desenvolupament de models de negoci que permeten portar-ho a la pràctica. Un cas ben clar és la figura dels agregadors de demanda i oferta i representants de molts consumidors, per exemple tot un poble, davant l'operador. Aquest agent podria tenir interès en maximitzar els sistemes de gestió i de generació locals per minimitzar les compres a la xarxa, optimitzar econòmicament les vendes d'energia excedentària i, fins i tot, donar suport a la xarxa treballant orquestradament amb d'altres microxarxes a recuperar paràmetres correctes de funcionament davant de perturbacions. Tot aquest nou rol de gestor i operador de microxarxes pot esdevenir una extensió de l'activitat de l'empresa distribuïdora (DSO) esdevenint una activitat amb retribució regulada.

Una darrera barrera potencial és la pròpia reticència social a certs canvis de comportament. A diferència de la incorporació d'altres tecnologies a gran escala, com seria internet, tot aquest sistema descrit no aporta millor satisfacció o servei a l'usuari. Al contrari, implica més temps en el procés, més "incomoditats" i dificultats de gestió ("només faltaria haver de rentar la roba a la mateixa rentadora en la que ho fa el veí!"). Per tant, el factor multiplicador social pot estar limitat a la consciència de voler fer-ho millor, per exemple, o en produir energia d'origen renovable.

L'exemple també és vàlid per posar de relleu la complexitat no-tecnològica de qualsevol canvi estructural del sistema de generació i consum d'energia.

3.3.4 La transició de model energètic

Al llarg de la recerca hem analitzat els múltiples factors que intervenen en la definició del model energètic, així com de les bases socials, científiques i econòmiques d'on sorgeix i les implicacions socioeconòmiques que se'n deriven.

Tota aquesta complexitat fa necessari un procés dialèctic entre el tot i les parts. Cal entendre les diferents àrees implicades dins un procés d'anàlisi, però, alhora, també la necessària visió de la globalitat i la seva síntesi.

Això ens porta a sostenir que el model energètic no pot canviar d'un dia per un altre. És un procés de canvi que ja està passant a ritmes diferents segons la regió del món i resta condicionat per factors tecnològics, però també socials, econòmics, ecològics, militars i legals. Els darrers 150 anys s'han caracteritzat per un procés incremental en el consum d'energia i potència associat a un desenvolupament tecnològic sense precedents i que s'ha vist satisfactòriament cobert i a baix cost pels combustibles fòssils. Això ha possibilitat crear tot un corpus social i econòmic en el marc de societats avançades amb accés majoritari als beneficis materials, com l'estat del benestar, i a gaudir de molts avenços científico-tècnics. Les contradiccions, però, inherents a la dependència d'un recurs per definició limitat i amb altes externalitats, fan que aquest parèntesi tingui data de finalització i que l'abundància s'hagi limitat, principalment, només a un grup, això sí majoritari, de les societats occidentals, les classes mitjanes i benestants.

Tanmateix el nivell material assolit porta implícit un seguit d'efectes sobre els ecosistemes i el grau de desenvolupament d'altres segments de la població d'aquí i altres societats a nivell planetari que, en no incorporar-se a l'equació, distorsionen la correcta assignació de recursos i preus (per exemple les emissions de CO₂, la pobresa energètica i la misèria a molts indrets, la desforestació, la pèrdua de biodiversitat, les guerres pel control dels recursos, entre d'altres), generant tensions creixents i contradiccions de primer ordre que posen en qüestió el propi model de societat fòssil allà mateix on ha estat exitosa. La prova definitiva d'aquesta realitat és que actualment conviuen diferents propostes, des de la transició a energies renovables o l'eficiència energètica a la perpetuació del model amb accés a nous recursos com el *shale gas*. És a dir, estem en una cruïlla, un moment de canvi, i el que es tracta és d'avaluar les diferents alternatives per triar-ne aquella, o combinació d'elles, que ens permetin el manteniment de les nostres societats. Hi ha molt en joc, poder i domini econòmic i polític. El debat no és, de nou, només de caràcter tècnic. Per això cal fer una bona diagnosi, fer-se les preguntes adequades abans de donar respostes de què hem de fer.

En aquest sentit, la proposta metodològica desenvolupada en la present tesi, ha consistit en trobar un punt de partida sòlid a partir de l'anàlisi de l'estat del coneixement actual i, sobre ell, bastir les bases del model energètic contemporani. Però una vegada fet, és la societat qui ha de decidir, amb coneixement de causa, cap a on tirar. ¿Continuem acceptant les externalitats socials, econòmiques i ecològiques d'un model intensiu en combustibles fòssils i que ens permet continuar el nostre ritme de consum i desenvolupament? És això possible? Ho podem pagar? A quin preu (impacte en el PIB, balança comercial, en la renda familiar i l'atur, per posar només uns exemples)? O, pel contrari estem disposats a canviar el nostre model socioeconòmic? O, senzillament, ens hi veiem abocats en no poder pagar la factura energètica fòssil i del que es tracta és de com ens repartim els recursos que resten? Cooperem? Competim? Què en fem dels nostres *privilegis fòssils*?

El canvi és irreversible perquè, d'una banda estem ja a prop dels límits ecològics dels recursos fòssils i, per l'altra, les bases científiques que han legitimat i fonamentat el model fòssil ja han canviat. El moment (o moments) en que es materialitzarà el canvi arreu és encara una incògnita i cal gestionar la incertesa pròpia del procés. A mesura

que les contradiccions s'aguditzen, les perturbacions en les condicions inicials poden generar evolucions no previsible, com per exemple un conflicte social per accés als recursos bàsics en les societats occidentals, molt abans d'un col·lapse ecològic.

El que és evident és que les societats amb major risc són aquelles més dependents dels recursos fòssils i, alhora, tenen menys recursos autòctons. Aviat no podran pagar la factura que suposa importar l'energia per funcionar. És el cas d'Europa i, més concretament, de l'Estat espanyol i Catalunya. Cal doncs, anticipar-nos i actuar per poder objectivar la transició energètica en aquestes regions, actuar amb rapidesa i liderar el canvi tecnològic i social. Basant-se en recursos disponibles (és a dir, principalment els locals), cal disposar de la tecnologia adequada per al seu aprofitament i dotar-se d'un model socioeconòmic que permeti maximitzar el retorn social de l'aprofitament del recurs disponible, la qual cosa implica un canvi també de model humanista, de valors i prioritats. Una transició també econòmica i social. Aquesta proposta necessària passa per guanyar complicitats a tots els nivells: socials, polítics, empresarials... perquè, com hem apuntat, el canvi no *passarà* per sí sol ni serà acceptat per qui manté els seus interessos arrelats en un model anterior, però tampoc per qui gaudeix de l'explotació del potencial energètic fòssil (incloent-nos a nosaltres mateixos). Més i quan la transició no es produeix simultàniament arreu i caldrà continuar competint globalment amb altres societats similars a la nostra mentre tinguin recursos energètics fòssils abundants i a baix cost.

Això obliga a posar de relleu les noves oportunitats econòmiques, socials i polítiques del nou model i poder així facilitar l'assentament de la transició i de la nova cosmovisió. Recollim en el següent esquema aquesta situació de transició en el model energètic:

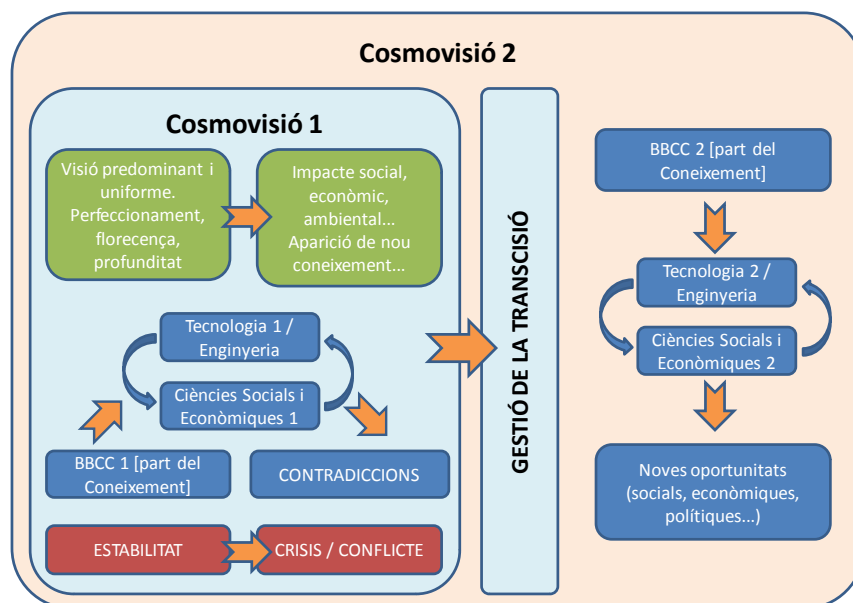


Figura 3.48: Esquema conceptual de transició de model energètic. FONT: Elaboració pròpia

3.3.5 Caracterització de la transició de model energètic

A partir de la informació recollida en la primera part, s'estructura sintèticament a continuació els trets principals que han caracteritzat al model energètic fòssil i nuclear, les conseqüències que han tingut i com s'haurien d'afrontar per bastir la proposta de model energètic solar.

TAULA 3.14: Caracterització de la transició de model energètic. FONT: Elaboració pròpia

Principi	Model fòssil	Conseqüències Model Fòssil	Model Solar
Conservació de l'energia	Converteix en prioritari i essencial un recurs energètic emmagatzemat, i per tant finit, amb una taxa de renovació amb ordres de magnitud superior al ritme d'utilització.	Inviabilitat progressiva del sistema a mesura que s'aproximi al límit tècnic i econòmic d'extracció del recurs. Externalitats socials, econòmiques i ecològiques no quantificades.	S'ha de basar en el flux renovable anual d'energia primària d'origen solar sota les diferents manifestacions. Els recursos emmagatzemats cal reservar-los per a usos molt específics.
Producció d'entropia	S'ignora les conseqüències en el temps i en l'espai de la utilització del combustible fòssil i nuclear, ja sigui en termes de residus sòlids radioactius, de gasos d'efecte hivernacle o tèrmics (calor residual de la transformació tèrmica del combustible)	Canvi de les condicions de treball de l'embornal (finit), per exemple augmentant la concentració de CO ₂ a l'atmosfera o increment de la temperatura del mar, amb afectacions als ecosistemes que en depenen no previsibles (acidificació...). Possible col·lapse de l'embornal que faci inviable el procés de transformació energètica que el genera.	Cal integrar el procés energètic dins el cicle dels ecosistemes, de l'economia i de la societat amb totes les seves conseqüències. La internalització dels impactes ecològics, socials i econòmics dinamitzarà trobar nous punts d'equilibri socioeconòmics.
Potència Vs Eficiència	Atesa la gran densitat energètica del combustible fòssil, combinat amb la percepció del "no límit", les societats que utilitzen els recursos fòssils se situen en punts de "màxima potència" de forma permanent. Combinat amb una ideologia també fòssil a l'hora de prendre decisions energètiques, no s'ha proveït de mecanismes interns de control -a partir de condicions i senyals externes- que permetin gestionar el procés.	Sistema altament ineficient en termes energètics globals que permet períodes ultraexpansius de l'activitat socioeconòmica i de domini cultural de les societats que controlen el recurs. Acceleració de tots els processos, major inèrcia i manca de capacitat de rectificar anticipadament davant dels senyals de possible col·lapse. En períodes de limitació de recurs risc de col·lapse de l'economia per manca de capacitat de reacció associada a una potència de reserva.	Sistemes dinàmics o "smart" capaços de canviar d'estratègia (basculant entre màxima potència i màxima eficiència) segons condicions de l'entorn. L'anticipació i l'oportunitat han de permetre un sistema evolutiu i adaptatiu a l'entorn i a la societat que se'n dota.

<p>Generació de coneixement en el camp energètic</p>	<p>Alt procés de tecnificació del sector. Per exemple, la cadena de subministrament de petroli, tecnologia nuclear, xarxes elèctriques. Desenvolupament de noves tecnologies com les energies renovables i l'emmagatzematge.</p> <p>Capacitat de millorar l'eficiència energètica dels equips de consum (motriu, cinètic, il·luminació).</p>	<p>Percepció de control i seguretat d'una societat "tecnocientífica" que s'encomana als tècnics per trobar una solució a tots els problemes sense haver de canviar el model (no es fa preguntes).</p> <p>És una visió antropocèntrica allunyada de la connexió biològica necessària, però que, si es posa al servei de la societat té el potencial d'ajudar a la transició energètica.</p>	<p>Per la complexitat de la qüestió i les conseqüències de les decisions en el temps i l'espai cal integrar al procés tecnocientífic al conjunt de la societat de manera ordenada i proactiva.</p> <p>Cal posar l'alt coneixement i capacitat tècnica al servei de la societat per desenvolupar tecnologies apropiades a les necessitats dels ciutadans i circumscrits als límits físics dels ecosistemes.</p>
<p>Planificació energètica i aplicació a la societat</p>	<p>Procés acientífic basat sobre estadístiques parcials d'ús de recursos (només comptabilitza els que passen per un punt de mesura) i principis ideològics de creixement econòmic il·limitat (més demanda anual com a senyal de major i millor desenvolupament econòmic).</p> <p>Necessitat de mantenir el control polític i militar sobre els fluxos de materials i energia. Minimització dels efectes de les externalitats.</p>	<p>Davant l'esgotament del recurs i encariment, s'entra en un "optimisme tecnològic" que entra en un cicle viciós on les solucions que s'adopten (més potència, més consum, etc.) generen més externalitats pels ecosistemes i la societat i requereixen cada vegada més recursos econòmics, energètics i materials, que acceleren el procés.</p> <p>Creació d'un sistema centralitzat en producció i control altament costós en termes de manteniment, poc eficient, però molt eficaç.</p> <p>A mesura que s'accentuen les tensions s'accelerarà el procés entrant en un període de "Rendiments decreixents" que esdevé preludi de col·lapse.</p>	<p>Transició a una economia lliure de carboni fòssil. Adaptació progressiva de les dinàmiques socials i econòmiques als límits dels recursos renovables per evitar el col·lapse i la conflictivitat social.</p> <p>Energia <i>km 0</i>, potenciant la producció i el control local i descentralitzat de l'energia integrat a nivells superiors de xarxa per facilitar intercanvis de potència activa i reactiva.</p> <p>Donant prioritat a la reducció del consum en termes d'energia i de potència instantània, introduint mesures per equilibrar la corba de càrrega del sistema i adaptar l'oferta a la demanda en un procés dinàmic d'equalització.</p> <p>Dret a serveis energètics bàsics inherent a la ciutadania que minimitzi tensions socials entre qui té recursos econòmics i qui no.</p>
<p>Dinàmica social</p>	<p>Relació entre territoris amb recursos emmagatzemats i territoris consumidors.</p> <p>Concentració de poder dels pocs agents que controlen els fluxos d'energia.</p> <p>Regulació i Lleis poc transparents que no</p>	<p>Conflictes a nivell internacional pel control dels recursos energètics i materials (guerres, ...).</p> <p>Translació dels conflictes dins les societats que han gaudit dels recursos fòssils per pèrdua de capacitat adquisitiva, transferència de renda per pagar els</p>	<p>Ús distribuït dels recursos energètics per minimitzar les dependències a tercers països.</p> <p>Control social dels recursos energètics i materials com a dret inherent a la societat.</p>

<p>protegeixen suficientment els interessos dels consumidors i dels ciutadans.</p> <p>Analfabetisme energètic de la població necessari per l'opacitat en la gestió del sistema.</p>	<p>serveis bàsics, pobresa (energètica) i atur.</p> <p>Potencials conflictes derivats dels impactes en els ecosistemes (canvi climàtic).</p> <p>Pèrdua de qualitat democràtica de les societats altament dependents dels combustibles fòssils.</p> <p>Discrecionalitat regulatòria i normativa que penalitza la incorporació de sistemes energètics nets malgrat ja estiguin disponibles i viables sense necessitat d'ajudes ni subvencions.</p> <p>Desvinculació de la població en com ens proveïm d'energia i les conseqüències. També dificulta la vertebració d'alternatives i la resposta social.</p>	<p>Acords democràtics internacionals (no bilaterals) entre països que disposen dels recursos primaris (ja siguin energètics o materials) i els territoris consumidors.</p> <p>Gestió multilateral de problemes globals com ara el canvi climàtic. Cal un nivell de decisió superior a l'estatal per vetllar per l'interès comú més enllà de l'interès personal de cadascú.</p> <p>Accés al coneixement i aprenentatge en temes energètics com a pas previ a poder exercitar els drets com a ciutadans.</p>
<p>Dinàmica econòmica</p> <p>Procés altament expansiu per accés a recurs d'alt potencial que genera grans fluxos de riquesa associats a un increment global del consum d'aliments, productes i serveis. Aquest domini econòmic esdevé far de les societats de tot el món.</p> <p>Creixement de tots els indicadors (rendiment de producció agrícola, etc.), proporcional a l'ús dels combustibles fòssils.</p>	<p>Durant el període de recurs barat i sense afectació de les externalitats, el creixement econòmic aporta grans beneficis a la societat. Tanmateix, la limitació del recurs (ja sigui per esgotament, per accés de nous consumidors o per col·lapse de l'embornal) requereix d'una nova tessitura socioeconòmica que genera rebuig social en percebre pèrdua de comoditat.</p> <p>Davant l'escassetat dels materials i l'energia disponible, es produeix una transferència de renda des dels sistemes productius cap als energètics. Genera pobresa en les societats altament dependents i sense recursos fòssils autòctons, generant una esclatxa entre els qui tenen accés i els qui no.</p>	<p>Adaptar els cicles socioeconòmics als recursos disponibles incorporant els límits físics dels ecosistemes i la voluntat de les societats sobre el seu model de desenvolupament.</p> <p>Reduir activitat i velocitat de l'economia, major distribució territorial, major eficiència i canvi en els processos de producció i consum.</p> <p>Les conseqüències macroeconòmiques a curt seran "nefastes" segons la lògica actual (per exemple, el PIB per avaluar el progrés d'un país). Però és necessari començar el procés de transició per poder estar en millors condicions per fer el canvi de recurs energètic i evitar el que sí seria realment nefast: no poder donar resposta a temps al canvi de model energètic davant altres països que s'hi s'hagin preparat.</p>

4 Conclusions

4.1 Anàlisi de les hipòtesis de treball

La tesi planteja una hipòtesi principal “la necessària transició des d’una societat altament dependent de petroli a una basada en l’aprofitament de recursos autòctons i renovables”. L’hem desgranat en diferents hipòtesis que analitzem a continuació.

➤ Hipòtesi #1:

“La crisi d’un model social donat esdevé estructural (social, ecològica, econòmica, política) quan és deguda a un canvi epistemològic de les bases que van conformar-lo. I, per tant, cal disposar de noves eines a partir del coneixement contemporani a l’hora de bastir la nova concepció del món, amb totes les seves implicacions i conseqüències socials, polítiques i econòmiques. Aquest coneixement no pot ser entès sense la combinació d’una anàlisi de les parts, de tall especialista, amb la síntesi del conjunt, amb visió transversal”.

S’ha fet una recerca bibliogràfica extensa durant la Part I on s’han mostrat els fonaments de la visió mecanicista del món sobre la que s’ha basat la construcció de la societat occidental i com han estès el seu àmbit d’aplicació a les ciències socials i humanistes. Aquest marc mental ha vist possible la maximització dels seus principis gràcies a l’explotació tecnològica dels recursos fòssils, al qual ha donat un mètode legitimador. Durant la Part II, s’ha analitzat abastament les implicacions socials, ecològiques i econòmiques d’aquest model basat en recursos fòssils i es pot concloure que està en la base de la crisi que actualment està sotmesa la societat occidental.

En tant a objecte d’anàlisi complexa, la societat i el seu model energètic, queden fora de l’àmbit d’aplicació de la concepció reduccionista i determinista, com hem vist en la Part I. La complexitat d’aquests sistema requereix de complementar l’estudi especialista amb la visió integral i global, incloent, per exemple, el clima i la influència en els ecosistemes. Calen les noves eines del pensament contemporani identificades per abordar la qüestió i estendre’n el seu domini a l’àmbit de les humanitats. No podem respondre al repte d’avui amb l’epistemologia de l’ahir, més i quan, aquesta està en la base de la legitimació del model que es mostra col·lapsat.

Podem, doncs, validar la hipòtesi de treball segons la qual estem davant una crisi estructural que ha de ser gestionada amb les eines contemporànies del coneixement, com la ciència de la complexitat, i superar la visió mecanicista.

➤ Hipòtesi #2:

“L’anàlisi del model energètic es caracteritza per un alt nivell de complexitat i incertesa, per la qual cosa requereix metodològicament d’una extensió del mètode científic clàssic per incorporar al conjunt d’agents involucrats i afectats d’una manera adequada”.

S'ha analitzat com la qüestió energètica no té un caràcter exclusivament tècnic. La successió de civilitzacions al llarg de la història no pot entendre's sense el potencial creixent dels recursos energètics que s'ha anat dotant la societat progressivament.

D'altra banda, quan una societat explota un recurs energètic que no disposa, genera la necessitat de complexes relacions internacionals que, durant el segle XX, s'han caracteritzat per l'hegemonia econòmica i militar d'occident. Tanmateix, el cost de manteniment dels fluxos és cada vegada més alt, generant rendiments decreixents i una inflació de preus que sacseja l'economia del país importador, amb greus afectacions sobre els ciutadans i el teixit productiu. Una transferència de renda que empobreix la població i genera atur per deslocalització d'empreses que cerquen costos energètics més competitius.

Finalment, l'afectació als ecosistemes de la combustió massiva dels combustibles fòssils ha alterat equilibris naturals potencialment de gran abast i irreversibles. L'afectació és a escala planetària i les conseqüències per la població poden ser múltiples, des de refugiats climàtics, a períodes de sequera, intensificació de fenòmens meteorològics extrems, entre d'altres.

Tot això no permet falsar la hipòtesis #2 i ens porta a concloure sobre la necessària extensió del debat sobre qüestions energètiques al conjunt de la població.

➤ Hipòtesi #3:

“La informació és la magnitud necessària, però no suficient, per governar la degradació del gradient energètic que maximitzi, en combinació amb els recursos materials, el treball realitzat per una mateixa producció d'entropia a partir de desenvolupar estratègies cícliques d'anticipació i oportunitat. Aquest és un aprenentatge de com la natura gestiona els fluxos d'energia i matèria i ha d'incorporar-se als sistemes socials i tècnics construïts i configurats per la societat”.

S'ha analitzat abastament i s'ha documentat la funció del flux d'informació en els processos naturals per gestionar la creixent complexitat dels ecosistemes a partir de la combinació d'un recurs energètic solar i la combinació amb els recursos naturals. No s'ha pogut falsejar aquesta hipòtesi i, sense donar-li atributs de ser la única manera d'assolir-ho, sí que com a mínim és una possibilitat que compta amb tota la història de l'evolució com a experiència. La potència d'aquest principi biomimètic, doncs, implica que pot ser una de les eines fonamentals per aplicar-se a nivell tecnològic per maximitzar els recursos renovables i els materials finits a la Terra.

➤ Hipòtesi #4:

“El recurs natural que una societat explota per mitjans tècnics en caracteritza el seu model socioeconòmic i organització, i no a la inversa. La Terra és un sistema tancat per la matèria i obert per l'energia, d'origen solar. La societat en el seu conjunt, com la resta d'ecosistemes, tendeix a maximitzar la seva complexitat a partir del màxim aprofitament del recurs energètic que explota en combinació amb els recursos materials disponibles amb un nivell d'eficiència creixent si disposa d'un període de temps suficient. La nostra civilització s'ha especialitzat en l'ús dels combustibles fòssils, de gran densitat de potència, però que l'ha fet comportar-se amb trets de sistema aïllat, apareixent no només límits de disponibilitat (en tractar-se d'una

reserva, el seu ús implica la seva disminució), sinó també de capacitat d'embornal per la gestió dels residus generats. Tornar a comportar-se com a sistema obert per l'energia implica adaptar-se al flux solar i circumscriure l'activitat socioeconòmica al nou nivell de densitat de potència, sensiblement menor. D'acord amb aquest plantejament, la viabilitat del sistema en el temps (mantenir-lo amb un cert grau de complexitat i lluny de l'equilibri tèrmic), només pot assolir-se si es gestiona la transició cap al nou recurs a partir d'adaptar-ne l'activitat socioeconòmica abans del col·lapse de l'embornal o esgotament del recurs precedent. Es tracta, per tant, d'una transició en termes d'energia, però sobretot en termes de potència”.

S'ha analitzat com la successió de recursos amb densitat energètica creixent al llarg de tota la història de la civilització ha possibilitat sense excepció una millora dels nivells de producció. Especialment manifest amb el salt que representen els combustibles fòssils a partir de la meitat del s.XIX.

S'ha tractat també amb profunditat que l'estratègia de l'eficiència energètica permet un millor aprofitament d'un recurs donat, malgrat l'impacte de l'efecte rebot. Però que, tanmateix, no és una estratègia vàlida en exclusiva per substituir el recurs donat per un de nou de menor densitat energètica.

Hem vist com els recursos d'energia primària renovables tenen moltes avantatges, com la seva renovació, cert nivell d'ubiquïtat, la no emissió de gasos d'efecte hivernacle en no combustionar, entre d'altres. Però també s'ha constatat la limitació que suposa la intensitat amb la que, per exemple el Sol, arriba a la Terra. Així com les limitacions físiques i tecnològiques d'altres aprofitaments renovables a gran escala, com l'energia eòlica. Aquest fet suposa una singularitat històrica en haver d'afrontar per primera vegada una transició de recurs energètic de menor potència que l'anterior.

Es valida, doncs la hipòtesi de treball segons la qual en un escenari de transició a recursos renovables cal una adaptació socioeconòmica a les propietats físiques d'aquest recurs i de la tecnologia que en permet el seu aprofitament, essent l'element més crític el nivell de densitat de potència. Les conseqüències socials d'aquest fet fan que es consideri com un dels reptes de major envergadura en el context de transició energètica i de profundes connotacions en el model socioeconòmic.

➤ Hipòtesi #5:

“Per assolir alts nivells de resiliència i d'eficiència, les xarxes de distribució d'energia, en tant que xarxes, han de seguir models descentralitzats d'organització amb especial atenció a la naturalesa de les interconnexions entre els nodes de generació i consum que possibilitin la màxima eficiència, el manteniment de la inèrcia del sistema i la capacitat de resiliència. Aquesta “infraestructura facilitadora” és necessària i prèvia al desplegament de les energies renovables i genera impactes en el territori que forja un nou model de relació urbà-rural, en tant el potencial de l'aprofitament del recurs renovable és, en darrera instància, una funció del temps i de la superfície (o volum) disponible”.

El coneixement en el camp dels sistemes i la complexitat, sovint provinent de l'anàlisi de xarxes naturals i ecològiques, però també de tecnològiques, aporta criteris de disseny contrastats i validats per la comunitat científica.

Les xarxes de transmissió d'energia tenen l'objectiu de connectar els nodes de generació d'energia amb els de consum. Són susceptibles de ser dissenyats segons els criteris de robustesa i eficiència coneguts. Tot i així, la seva funció d'apropar les fonts d'energia renovable que, per definició es troben disperses en el territori, implica modelar el paisatge amb les conseqüències socials que té.

Una de les conseqüències d'aquesta hipòtesi de treball acceptada confereix a les *smart grid*, o xarxes elèctriques intel·ligents, un paper fonamental en la transició energètica i en la vertebració del país.

➤ Hipòtesi #6:

“L'observació que la natura bascula entre estats on desenvolupa màxima potència i d'altres de major eficiència per adaptar-se a les disponibilitats de recurs i incertesa de l'entorn. Tanmateix, l'economia fòssil s'ha instal·lat en un escenari permanent d'alta velocitat que requereix desenvolupar màxima potència. Però la percepció de límits en l'ús dels combustibles fòssils i el seu increment de cost fa necessària la translació cap a una situació de major eficiència i, per tant menor velocitat, que li confereixi major resiliència. Resoldre on situar-se com a societat dins el rang potència-eficiència que ens descriu i fixa la física pel cas dels combustibles fòssils depèn, en darrera instància, del model socioeconòmic que la societat es vol dotar. D'aquesta manera, no es pot deslligar el debat energètic de caràcter tècnic, del social i econòmic, ni en la seva anàlisi, ni en la seva gestió”.

Acceptem de nou aquesta hipòtesi arran de les bases biomimètiques d'operació dels sistemes biològics (Part I) i de la constatació de la comunitat científica sobre els límits dels recursos i de l'embornal (Part II). És una constatació que els sistemes vius desenvolupen estratègies variables de consum a diferents nivells d'intensitat segons condicions de contorn (per exemple, percepció o no de perill davant d'un depredador). Aquest funcionament “smart”, que capta i processa informació per decidir la ruta metabòlica, sembla raonable aplicar-lo a d'altres sistemes que es comporten de la mateixa manera termodinàmica.

Només societats que esdevenen extractores intensives de recursos materials i energètics d'altres regions poden permetre's posicionar-se transitòriament en un punt de màxima potència a costa d'exploitar social i ecològicament altres humans i territoris. Malgrat que a escala temporal humana pot transmetre idea de permanència, a llarg termini és una estratègia equivocada en compartir tots un mateix sistema Terra tancat pels cicles materials.

Per tant, una consciència ètica de respecte als altres ciutadans del món i un respecte als cicles materials del planeta (recursos i embornal) porten, fins i tot a validar aquesta hipòtesi #6 a llarg termini pel conjunt de societats.

Sobre aquesta hipòtesi, la Tesi defineix els Principis Biològics de Gestió dels Recursos sota la qual es valida el concepte “Smart Grid/City”. D'aquesta manera, acceptem la premissa que el debat energètic col·lapsa el discurs merament tècnic i ha d'entrar en

tota la seva magnitud humanista. Aquesta fet requereix d'una nova epistemologia i validació estesa del coneixement generat.

Una derivada d'aquest fet és la capacitat de la societat per prendre consciència i accedir a renunciar a privilegis fòssils que s'han assumit com a normals en la nostra quotidianitat. I la confrontació entre estratègies de cooperació per gestionar els recursos escassos disponibles o, pel contrari, la competència i la imposició d'uns sobre els altres.

➤ Hipòtesi #7:

“Forjada a partir de l'aprenentatge de com gestiona la vida els recursos, planteja que la globalització socioeconòmica en el conjunt del planeta pot ser viable en el temps només si és capaç de comportar-se com un sistema obert per l'energia i tancat per la matèria. És a dir, no és ja qüestió d'utilitzar més eficientment els recursos fòssils, sinó que cal passar a aprofitar els fluxos d'energia provinents de fora el sistema Terra (el Sol) de manera passiva i activa, reciclar els materials i mantenir els embornals sota el seu nivell de saturació per poder exportar l'entropia. La gestió és possible per la contribució de les tecnologies de la informació i la comunicació i el control esdevé distribuït entre els diferents nodes del sistema. D'aquesta manera, el sistema socioeconòmic ha de, a més de bascular entre màxima potència i major eficiència en funció de la informació disponible de l'entorn i de les prioritats socials, adaptar-se a les característiques físiques, com és la densitat de potència, dels recursos energètics d'origen solar”.

L'anàlisi de la Teoria de Sistemes porta a acceptar la naturalesa de sistema tancat per la matèria i obert per l'energia de la Terra. I, la teoria de la seva evolució (en termes de producció d'entropia, per exemple) ens porta a concloure la necessitat de mantenir els fluxos oberts d'energia amb l'exterior, això és, utilitzar l'energia solar com a font única i principal a la Terra per les activitats socioeconòmiques. Un sistema basat amb recurs energètic a la Terra porta al col·lapse en comportar-se com un sistema aïllat.

El l'aprofitament del recurs solar cal, de nou inspirats en al biomimètica, veure la importància de desenvolupar cicles concatenats de degradació del gradient solar per aprofitar-ne tot el seu potencial, fet al que ens pot ajudar l'enginyeria i la tècnica redissenyant processos.

➤ Hipòtesi #8:

“D'entre les tecnologies disponibles per generar electricitat a partir de l'energia solar, el principi fotoelèctric (tecnologia fotovoltaica) és la forma més eficient de transformació atès ho fa de manera electrònica, sense necessitat de consumibles ni reposicions i amb poc manteniment. D'aquesta manera pot treure el màxim profit del recurs solar, ja de per sí amb clars avantatges com la seva ubiqüitat, una taxa de renovació diària i una potència coneguda i regular”.

Dins el conjunt de les activitats de recerca i desenvolupament recollits en la Tesi, té un paper principal l'experimentació amb la tecnologia fotovoltaica, tant amb l'objectiu d'optimitzar-ne la seva producció (sistemes de seguiment solar,

refredament passiu del camp fotovoltaic, minimització de pèrdues), com la seva integració amb el subsistema consum d'energia en microxarxes.

Aquesta experiència pràctica a nivell tecnològic, complementada amb l'anàlisi del recurs solar i les implicacions termodinàmiques d'aquells sistemes complexos que utilitzen el Sol com a energia exterior (Part I i II) porta a validar la hipòtesi #8.

➤ Hipòtesi #9:

“Els nous coneixements sobre la simbiosi i la cooperació i la seva contribució a l'evolució de les espècies alternant-se amb períodes de competència i de selecció natural, ens mostren com les dues estratègies poden ser també útils per la societat contemporània. D'una banda, la discontinuïtat en els processos evolutius convida a acceptar una ignorància irreductible dins qualsevol pretensió d'anàlisi del futur, i d'altra; la importància d'estratègies de col·laboració i simbiogènesi per assolir nivells superiors de complexitat que són més eficaços en la degradació del gradient energètic disponible”.

Aquesta hipòtesi mostra un dels exemples clars del canvi epistemològic que implica el coneixement científic contemporani. La impossibilitat d'explicar salts evolutius per una mera competència en l'adaptació a l'entorn, com proposa Darwin, esdevé una dada discordant que, sovint, s'elimina del debat per evitar la incomoditat que genera. Tanmateix, quan trobem una nova hipòtesi que s'adapta millor a la descripció de la realitat en aquests punts no resolts i és validada científicament, cal incorporar-la també en els altres camps d'aplicació. Per aquest motiu s'accepta aquesta novena hipòtesi de treball com a eina de treball en la transició energètica.

➤ Hipòtesi #10:

“Un canvi de model energètic necessita un canvi epistemològic que superi l'atomització del coneixement i la separació de disciplines que ha portat la ultra especialització actual. Només amb una concepció de l'activitat humana dins els ecosistemes, que combini l'anàlisi del tot i de les parts de manera integradora i aporti una nova mètrica d'avaluació del progrés social i de la economia es podrà bastir el debat sobre el canvi de model energètic i les conseqüències socials, ecològiques i econòmiques”.

S'ha analitzat abastament durant la Part II com les mètriques d'avaluació del sistema energètic s'han fet en un context d'explotació de recurs fòssil sense percepció de límits. Aquest fet les invalida per definir la transició de model, ja que sempre esdevindran limitades i ortopèdiques davant de nous models conceptuals i dels recursos energètics renovables.

És un nou exemple de transversalitat de la qüestió energètica, que l'extreu del senzill anàlisi tecnocèntric per inscriure'l definitivament en el pla humanista. S'accepta aquesta hipòtesi en clau de vertebració de la transició energètica.

4.2 Conclusions

La cosmovisió mecanicista nascuda de la Il·lustració legitima l'explotació màxima dels recursos energètics i materials i ha forjat la societat occidental, aportant un

model epistemològic d'èxit basat en el mètode científic. Ara ha entrat en crisi social, econòmica i ecològica estructural i de matriu energètica. La seva superació requereix d'una nova cosmovisió que només pot estar basada en, com va ser el seu moment la Il·lustració, els principis científics contemporanis, recollits en els Principis Biològics de Gestió dels Recursos, i que integren la incertesa irreductible del coneixement, la irreversibilitat dels processos, l'entropia energètica i material i la complexitat social, econòmica i ecològica d'un món circumscrit en els límits dels recursos disponibles, que utilitza tecnologia adequada per la seva transformació i adequació i que ha de comptar i integrar tots els agents afectats per la decisió que es prengui.

Per tant, no podem falsar la hipòtesi principal. La transició d'un model energètic basat en els combustibles fòssils no és una decisió discrecional o ideològica, sinó una necessitat socioeconòmica. La transició energètica és necessària per motius ecològics, econòmics i socials i les *smart grid* (i per extensió les *smart cities* i l'*smart rural*), enteses com la confluència de les xarxes d'energia i informació tan a nivell tecnològic com socioeconòmic, són un instrument fonamental per mantenir la complexitat de la nostra societat durant la transició a un recurs energètic de menor densitat de potència. Per fer-ho possible, cal anar més enllà dels aspectes tècnics i fer un procés inclusiu del conjunt de la societat fonamentat en l'estat de coneixement actual que aporta la ciència i que objectiva la tecnologia. Cal concebre, doncs, les xarxes elèctriques intel·ligents dins els límits dels recursos energètics i materials amb les parts positives que això té, però, alhora, també afrontant les seves implicacions socials i econòmiques que sovint xoquen amb els estàndards de la societat actual. I, per fer-ho, una bona opció, segurament no l'única, és entendre i aprendre de com la natura gestiona els recursos. La biomimètica és una eina de treball sobre la qual basar les propostes tecnològiques i socioeconòmiques de la transició.

4.2.1 És raonable parlar de transició de model avui i aquí?

Les regions amb alta dependència de recursos fòssils i amb necessitat d'importar-los patiran amb més intensitat i premura les conseqüències socials d'un escenari de preus elevats i sostinguts del petroli. Un cas és Catalunya i, de fet, Europa en el seu conjunt, malgrat que la seva dependència és molt menor. Per això si no es fa un canvi progressiu cap a la descarbonització de l'economia, podem trobar-nos en un punt de no retorn. Aquest es podria situar quan la nostra economia dediqui més del 5% del PIB a pagar la factura energètica, xifra de la qual estem a prop i que podria créixer fins a un 10% si el barril de petroli arribés a 200\$ de manera sostinguda. Recordem que ja hi ha un precedent a quasi 150\$ (2008, abans de l'inici de la crisi econòmica) i que la pròpia Agència Internacional de l'Energia té prospeccions de futur on s'arriba a aquests valors durant els propers anys.

La descapitalització de les nostres finances com a Estat, com a empreses i famílies pot incrementar la fractura social d'accés als serveis bàsics, procés que pot retroalimentar-se amb increment d'atur per deslocalització d'empreses d'alta intensitat energètica. Aquest seria el factor de major risc a curt termini a Catalunya, per davant d'altres com el canvi climàtic, d'afectació a escala global.

Per això no només és pertinent participar d'un canvi de model energètic, sinó que cal fer-ho intensivament i amb urgència. Una transició de model requerirà energia, materials i diners per fer-se, per la qual cosa arribarà un moment en què no serà possible finançar les infraestructures necessàries que possibilitin un desplegament a gran escala de la tecnologia que aprofiti els recursos autòctons i renovables.

4.2.2 Smart Grid, ¿moda o necessitat?

Des de les bases epistemològiques descrites (primera part), fins a la descripció de la transició de model des de la ciència de la complexitat i la concreció tecnològica i social que ha sigut objecte de la recerca d'aquesta tesi s'ha estudiat la hipòtesi, falsable, segons la qual "cal una transició dels recursos fòssils".

Amb la recerca realitzada no s'ha pogut falsejar. Un escenari de "no transició" hem vist que està abocat al col·lapse termodinàmic a curt termini i social a mesura que ens acostem als límits dels recursos. Tanmateix, és possible el manteniment per un període de temps llarg a escala humana de certes regions del planeta si exerceixen el control dels fluxos des d'altres regions. Aquest fet pot no ser acceptable des d'una vessant democràtica i de drets humans, però és un escenari possible des d'un de vista tècnic.

Estem abocats a la necessària transició des d'una vessant humanista i per portar-la a terme podem basar-nos i inspirar-nos en com la natura gestiona els recursos, en la biomimètica. Posat en termes contemporanis, podem acceptar el mot "Smart" per referir-nos al sistema energètic "*smart grid*" o social "*smart rural/city/country*". Tanmateix, no es pot caure en l'abús del terme i desnaturalitzar-lo. Cal estar amatents a una interpretació estricta i forta del concepte, amb tota la seva magnitud i implicacions.

S'ha contribuït amb la present recerca a aportar un marc teòric i una sòlida base conceptual per afirmar que una societat smart és aquella que es basa i aplica el coneixement actual (que pot manifestar-se amb caràcter científic o d'altra naturalesa), que és coneixedora dels límits físics imposats pel recurs energètic que explota i que, coherentment, desenvolupa estratègies socioeconòmiques que li permetin treure'n el màxim rendiment a partir de l'ús de la tecnologia apropiada en termes físics, locals i ètics.

4.2.3 Una transició de potència, més que d'energia

La transició cap als recursos autòctons no és determinista des del punt de vista de model social, però sí que circumscriu, com sempre ho fa un recurs energètic, el màxim treball que aquella societat pot desenvolupar i la forma de com fer-lo.

La singularitat històrica de la transició del recurs fòssil al que ens afrontem és que no anem cap a un recurs de major densitat energètica, sinó cap a un de menys. Històricament, hi ha hagut períodes socioeconòmics expansius de la societat i de l'economia associats a la transició cap a un recurs energètic de major potència, de manera que, senzillament, *ha passat*. La conjugació d'un recurs disponible, d'una tecnologia per aprofitar-lo i d'una cosmovisió determinada ha permès les transicions energètiques, aportant a aquelles societats una millora significativament la qualitat

de vida. D'aquesta manera s'ha retroalimentat el convenciment que el canvi implica major consum d'energia i de potència i aquest s'associa a progrés social.

L'actual transició cap a recursos renovables, però, *no passarà*, en no implicar un major ús d'energia i potència pel model socioeconòmic, ans al contrari. La seva gestió té un component de canvi de valors i de consciència que és fonamental i sense el qual no pot esdevenir. Hem de canviar i fer-ho de manera anticipada no només perquè la nostra economia presenta el risc de col·lapsar-se en no poder pagar la factura de la importació dels recursos, sinó per la responsabilitat que tenim com a habitants d'aquest planeta de no alterar irreversiblement els paràmetres ecològics que sustenten el funcionament dels ecosistemes.

El fet que això no encaixa amb el model accelerat que hem adoptat com a societat fòssil, esdevé una de les barreres principals. No es troben només reticències en els beneficiaris directes del model fòssil, sinó també, i paradoxalment, amb els qui han de ser el subjecte del canvi cap a la descarbonització de l'economia. És a dir, els propis conciutadans. Els privilegis fòssils no es deixaran perdre.

Aquesta multidimensió (tecnològica, social, ecològica, econòmica, ...) fa necessari emprar la ciència de la complexitat per abordar la transició de model energètic, anant a l'arrel i canviant també la cosmovisió en la qual hem estat educats, basada en el determinisme, la reversibilitat i la conservació de la matèria i de l'energia. Molts canvis impossibles d'abordar, justament, de manera determinista i causal, però que conjugats poden evolucionar de manera no previsible a partir de certes condicions inicials i, d'aquesta manera, tenir l'oportunitat de poder esdevenir. Temps de canvis, doncs, de model energètic que implicarà indubtablement, una transició social i de valors si vol esdevenir i consolidar-se i que comportarà una adaptació del model socioeconòmic.

4.2.4 Una base ètica necessària

Però, alhora, l'accentuació del conflicte per l'apropament als límits dels recursos pot desencadenar altres evolucions possibles del sistema social cap a posicionaments que, si bé poden ser viables des d'un punt de vista ecològic, poden no ser acceptables socialment ni ètica. Pocs recursos disponibles i cars, poden segmentar la societat entre aquells que hi tenen accés (menys recurs, però menys agents a repartir) i els qui no, aprofundint una escletxa social que comença a veure's amb fets com la "pobresa energètica". Paradoxalment, la partició entre regions del món amb accés o no als recursos que ha caracteritzat l'època fòssil i en permet entendre molts dels conflictes militars contemporanis ens la podem trobar dins les pròpies societats post-industrials. El que socialment hem acceptat a Europa i occident i, segurament és inacceptable des d'un punt de vista ètic, però la distància d'on passa l'externalitat social, econòmica o ambiental ens permet tenir la consciència tranquil·la, ens ho podem trobar ara a casa.

I tot en un context internacional on la premura per la descarbonització energètica no és una prioritat a tot arreu per igual, ja sigui perquè hi ha regions que disposen de recurs fòssil autòcton, o perquè minimitzen les implicacions de vulnerar els límits ecològics dels ecosistemes, o per ambdues raons alhora. Posats a fer-ho difícil,

doncs, sembla raonable pensar en la necessitat d'estructures de governança global que vetllin per l'equitat en la distribució dels recursos i la preservació de les condicions de funcionament dels ecosistemes.

La tesi no avalua ni fa valoracions de si és fàcil o difícil (com òbviament n'és), sinó de la conjuntura que ens ha tocat viure, l'oportunitat que tenim de poder dotar-nos d'un cos de coneixement sòlid on posar els peus per plantejar la transició de recurs energètic i des d'on construir realitats (tecnològiques, socials, empresarials...) que, malgrat que locals i aparentment menors, poden esdevenir condicions inicials fonamentals en l'evolució futura del complex sistema social que ens dotem per viure i conviure.

4.2.5 En futur està per escriure

La recerca feta porta a plantejar la necessitat de la transició, però aquesta no té perquè arribar en breu, ni fer-ho de la manera descrita. Hi ha diferents escenaris compatibles des d'un punt de vista físic a curt i mig termini, independentment de sí són o no convenients èticament. La singularitat històrica que ens trobem fa difícil projectar en el futur l'aprenentatge del passat, quan el canvi de recurs portava associat processos socioeconòmics expansius que s'anaven perfeccionant amb l'aportació de la tècnica. No hi ha receptes, però hi ha indicacions.

La present tesi sustenta la necessitat de posar al servei de la ciutadania la tecnologia disponible i fer-ne un ús auster. La transició es farà fent-se i és fonamental assolir la democratització de les tecnologies d'aprofitament dels recursos renovables, com seria en el nostre cas, l'autoconsum d'energia a les nostres llars. Per a fer-ho cal organitzar la infraestructura facilitadora i auxiliar necessària, com seria un potent sistema de distribució elèctrica bidireccional, que moduli els fluxos de demanda i generació, permeti l'electrificació del transport i ho pugui fer sota una doble lògica de control territorial i manteniment del sistema regional, avançant cap a microxarxes i un nou rol del distribuïdor.

Utilitzar els recursos locals per satisfer les nostres necessitats implica democratitzar a nivell mundial l'accés als recursos i oferir igualtat d'oportunitats. Però la nostra societat, acostumada als privilegis fòssils i amb una informació molt parcial de les implicacions del model energètic actual, no està disposada a renunciar. Anem malament, però còmodes. Una inflació de preus produïda per un encariment del petroli per causes conjunturals, com un conflicte armat, o estructurals, per exemple si el *shale gas* fos una bombolla i petés, o apareixen episodis dramàtics associats a un canvi climàtic, poden definir pertorbacions inicials que indiquin, ara sí, amb bastanta precisió l'evolució que prendrà el sistema energètic, com a passat amb l'accident nuclear a Fukushima.

Però, com s'ha recollit al llarg de la tesi, hi ha punts de no retorn que poden impossibilitar la transició per manca de recursos energètics i/o materials i/o econòmics. Arribats a aquesta situació, el sistema actual podria col·lapsar sense tenir capacitat d'articular una transició durant suficient temps per adaptar les estructures socioeconòmiques. Aquest escenari, possible també, portaria a un col·lapse social sense precedents.

La conclusió és que no actuar és, d'alguna manera, el camí més perillós, perquè ens accelera cap al col·lapse sense preparar-nos a nivell d'infraestructura i de model socioeconòmic.

4.3 Treballs futurs i noves línies d'investigació

Arran de la feina realitzada s'han identificat diferents línies d'investigació que poden donar continuació a la recerca. S'ha volgut prioritzar en les deu de major importància en el context transició energètica a Catalunya.

4.3.1 Línies a desenvolupar de caràcter tecnològic

1. Desenvolupament d'infraestructura de distribució d'energia i informació. En el procés d'avançar cap a una major penetració de les energies renovables, la implementació de les smart grids enteses com la xarxa de connexió entre els equips generadors i els consumidors esdevé fonamental. Cal fer recerca sobre com gestionar aquestes xarxes de manera òptima, com minimitzar-ne el seu cost d'inversió i d'operació i fer possible els fluxos d'energia en condicions de seguretat de subministra. És una de les actuacions prioritàries d'execució a Catalunya.
2. Reenginyeria per assolir alts nivells d'eficiència energètica. L'entramat d'equips i processos que operen i fan funcionar la nostra societat s'han dissenyat sota una concepció de recurs d'alta potència accessible a baix cost. Això ha fet que no s'hagi prestat atenció al balanç d'energia i matèria fins que els costos d'ambdós han començat a escalar. Cal anar un pas més enllà i desenvolupar projectes de recerca que permetin redissenyar els processos per assolir el mateix resultat amb una contribució de molta menys energia, potència i materials.
3. Generació amb energies renovables. Les tecnologies d'energies renovables tenen graus de maduració diferents, però en tots els casos cal investigar en millorar rendiments, les condicions d'operació i integració amb el sistema elèctric. La contribució de nous materials pot jugar un paper fonamental. L'escalabilitat ha de permetre una reducció significativa dels costos a partir de la industrialització de la cadena de producció, com ha passat amb l'eòlica i amb la solar fotovoltaica.
4. Emmagatzemament. És l'element cabdal de la transició de model perquè permet desacoblar els moments de consum amb els de generació i aportar potència. Des de sistemes tradicionals com centrals hidràuliques reversibles, fins a nous sistemes cal fer recerca intensiva en aquest camp i estudiar-ne les condicions de la seva aplicació a gran escala. Inclou tot allò referent al vehicle elèctric.
5. Gestió activa de la demanda i de l'oferta, a nivell local (microxarxes) i global. Aprofitar els recursos energètics distribuïts i generar electricitat a nivells baixos de tensió permeten aproximar-se als llocs de consum creant unitats autosuficients que operen d'acord amb la xarxa. No només cal recerca relacionada amb electrònica de potència per integrar tots aquests equips, sinó també relacionada amb lògica de gestió i la microelectrònica.

4.3.2 Línies a desenvolupar de caràcter no tecnològic

6. Anàlisi multifactorial basat en la ciència de la complexitat que abordi els canvis socials en un escenari d'escassetat de recursos, incloent impactes econòmics, nous models de negoci, estratègies de cooperació, entre d'altres. La singularitat del procés que encarem requereix aprofundir de manera transdisciplinària en aquestes àrees de coneixement per generar coneixement sobre com gestionar la transició cap a un recurs energètic més limitant en termes de potència. Algun exemple concret és la contribució de la psicologia social i la ciència del comportament en el canvi de model.
7. Desenvolupament d'una terminologia apropiada per definir el sector energètic i d'una mètrica associada. El model fòssil ha desenvolupat el seu propi corpus de paraules, conceptes, mètriques i definicions. Encarar la transició energètica necessita desempallegar-se de la herència i influència d'aquest vocabulari, per anar a l'essència dels conceptes i bastir un nou paradigma que permeti explicar i gestionar les contradiccions del canvi de model energètic i socioeconòmic actual.
8. Transparència en els costos reals de cada tecnologia i recurs, incloent tota la cadena energètica per procedir a una assignació correcta de preus i planificació energètica a diferents nivells (país, regió, global). Investigar en quins són els costos, les externalitats no compatibilitzades, les subvencions directes i indirectes que reben les diferents tecnologies i recursos, els esforços d'inversió en recerca i desenvolupament, ajudarà a fer més transparent el mercat de l'energia i afavorirà una millor decisió. Pot ajudar a una governança global de les qüestions relacionades amb el recursos i els ecosistemes.
9. Procés social participatiu basat en l'accés a la informació contrastada per part de la ciutadania i interactiu amb el coneixement científic i tècnic. Des del moment que tots rebem els conseqüències del model energètic que adoptem com a societat, tots tenim el dret i l'obligació de participar-hi. Tanmateix, el procés ha de ser operatiu i executiu. Cal fer recerca en models de participació social, tècnica, econòmica, política i fixar les regles de joc per a que el debat sigui executiu a nivell local, nacional, regional i global.
10. Desenvolupar models de regulació facilitadors de la transició de model tecnològic en el sector energètic (consum, transport, distribució i generació). Com hem analitzat, hi ha ja moltes solucions tecnològiques disponibles que no s'apliquen per barreres regulatòries. Cal fer recerca sobre models de regulació avançats, el paper dels ens neutrals en la transició energètica i la seva funció de catalització.

5 Annex: Activitat investigadora realitzada

5.1 Resum dels principals indicadors de qualitat

a) Papers

- ✓ Rosas-Casals, M., Marzo, M., Salas, P., Sovereignty, robustness, and short-term energy security levels. The Catalonia case study, *Frontiers in Energy Research*, May 2014, <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/fenrg.2014.00016/full>
- ✓ Karfopoulos, E et al. A Multi-Agent System providing demand response services from residential consumers, *Electric Power Systems Research*, 2014 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779614002089>

b) Patents Internacionals (PCT)

- ✓ [STAND-ALONE, INTERACTIVE MODULAR ENERGY-PRODUCTION SYSTEM \(WO2008000863\)\(Link\)](#) Spain PCT/ES2007/000240 Issued April 23, 2007
- ✓ [MACHINE COMPRISING A SOLAR HEAT SOURCE \(WO2008104619\)\(Link\)](#) Spain PCT/ES2008/000050 Issued January 31, 2008 2.
- ✓ Pendent de presentar (Novembre 2014): Methods and devices for disaggregating utility usages

c) Articles en Congressos

- ✓ Salas, P, et al, *Sociological analysis, social networks and gamification to change the energy consumption in households*, BEHAVE Energy Conference, Oxford, UK, 2014 <http://behaveconference.com>
- ✓ Salas, P., Guerrero, JM., *Mas Roig Mini-Grid: A Renewable-Energy-Based Rural Islanded Microgrid*, IEEE International Energy Conference ENERGYCON 2014, http://vbn.aau.dk/files/192693251/EnergyCon_2014_Pep.pdf
- ✓ Salas, P., et al, *Consumidor activo de energia: nuevas oportunidades a partir del dato de consumo horario del contador inteligente a través de técnicas big data*, II Congreso de Generación Distribuida – Madrid, 2014
- ✓ Silvente, J., Graells, M., Espuna, A., Salas, P., *An optimization model for the management of energy supply and demand in smart grids*, Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6347785&tag=1&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6347785%26tag%3D1

- ✓ Salas, P., *Sistema multiagentes para el control de microrredes. El caso Mas Roig*, I Congreso de Generación Distribuida – Madrid, 2012

d) Altres

- ✓ Chapter - Book Title: Energy-Efficient Computing and Networking. First International Conference, E-Energy 2010, Athens, Greece, October 14-15, 2010, Revised Selected Papers
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19322-4_23
- ✓ Director científic del Congrés Rural Smart Grid www.ruralsmartgrids.cat/ca
- ✓ Promotor de la web de divulgació energètica www.smartgrid.cat
- ✓ Membre de diferents grups socials i professionals dedicats a l'estudi del model energètic i la seva evolució.

5.2 “El meu laboratori el món”

L'estudi del model energètic no pot fer-se des d'un sol punt de vista. El seu abast i les conseqüències de la decisió que es prenguin li confereixen un caràcter complex que requereix d'un sistema epistemològic propi, més enllà del reduccionisme del mètode científic *normal*.

En el debat social relacionat amb el medi ambient, el cost de l'energia tant per les famílies com per les empreses, la democratització dels serveis bàsics, l'impacte ambiental en el territori de tecnologies com els parcs eòlics i la necessària dialèctica camp-ciutat, les innovacions tecnològiques en el camp de l'eficiència energètica, els comptadors digitals, l'impacte de la regulació del sector elèctric, els conflictes internacionals de matriu energètica, entre molts d'altres, ens interpel·len quasi diàriament. Seria difícil posar-hi dates, però podem considerar un punt d'inflexió l'Informe Brundtland “El nostre futur comú” (UN, 1987) i podem ressaltar com a esdeveniments rellevants de major impacte en la societat catalana respecte la qüestió energètica l'accident nuclear a Vandellós I (1989), la 2a Guerra d'Irak (2003), la irrupció i posterior aturada del sector fotovoltaic a l'Estat espanyol (2006-2010), el desastre de la central nuclear de Fukushima (2011) i els constants increments en el preu de l'energia.

Tot això ha creat una massa crítica de pensament, que a poc a poc s'ha anat introduint en tot l'espectre ideològic transversalment, respecte la necessitat de preservar els ecosistemes i la importància a tots nivells de reduir la dependència de les importacions de combustible. Tanmateix, continua sent encara massa influent el biaix ideològic a l'hora de posicionar-se davant de les qüestions més espinoses, com serien l'energia nuclear o, a casa nostra, la línia de molt alta tensió (MAT) que ens connecta amb el sistema elèctric Europeu. Com a observador sovint he trobat a faltar cert rigor científic en els plantejaments que s'esgrimeixen al voltant d'aquestes qüestions i mentre es manté aquesta confusió, el temps passa, la dependència energètica creix i el cost esdevé insuportable. Aquesta manca ha estat el principal

motivador de realitzar els estudis de doctorat per, primer de tot, tenir l'oportunitat d'aprendre i reflexionar introspectivament sobre aquestes qüestions i, en paral·lel, a poder posicionar-me en el debat. Però alhora, i modestament, d'intentar compartir els resultats d'aquesta recerca amb el conjunt de la societat per contrastar els arguments, enriquir-los i ajudar al que crec és el principal repte d'avui de la societat catalana i europea.

On posar els peus per trobar a on recolzar-se? En el meu cas, ho he trobat en les aportacions científiques contemporànies que m'ha anat descobrint amb generositat i paciència el Dr. Francesc Sureda, cap allà al tombant de segle, al Mas Roig de Llagostera. D'ençà aquell moment, la voluntat de saber no ha fet més que generar inquietud per aprendre i contrastar hipòtesis de treball. Posicionar-me en la frontera, intentar estar al cas de les principals tendències. No cercar fets confirmadors, com a actitud inductivista, sinó cercar la contradicció, la falsació. Reforçar la reflexió teòrica amb la força de l'experimentació. Interioritzar els fluxos d'energia que circulen permanentment al nostre voltant i aspirar a poder respectar-los al màxim possible quan t'afrentes a reptes professionals i problemes tecnològics, durant la simple, i difícil, quotidianitat.

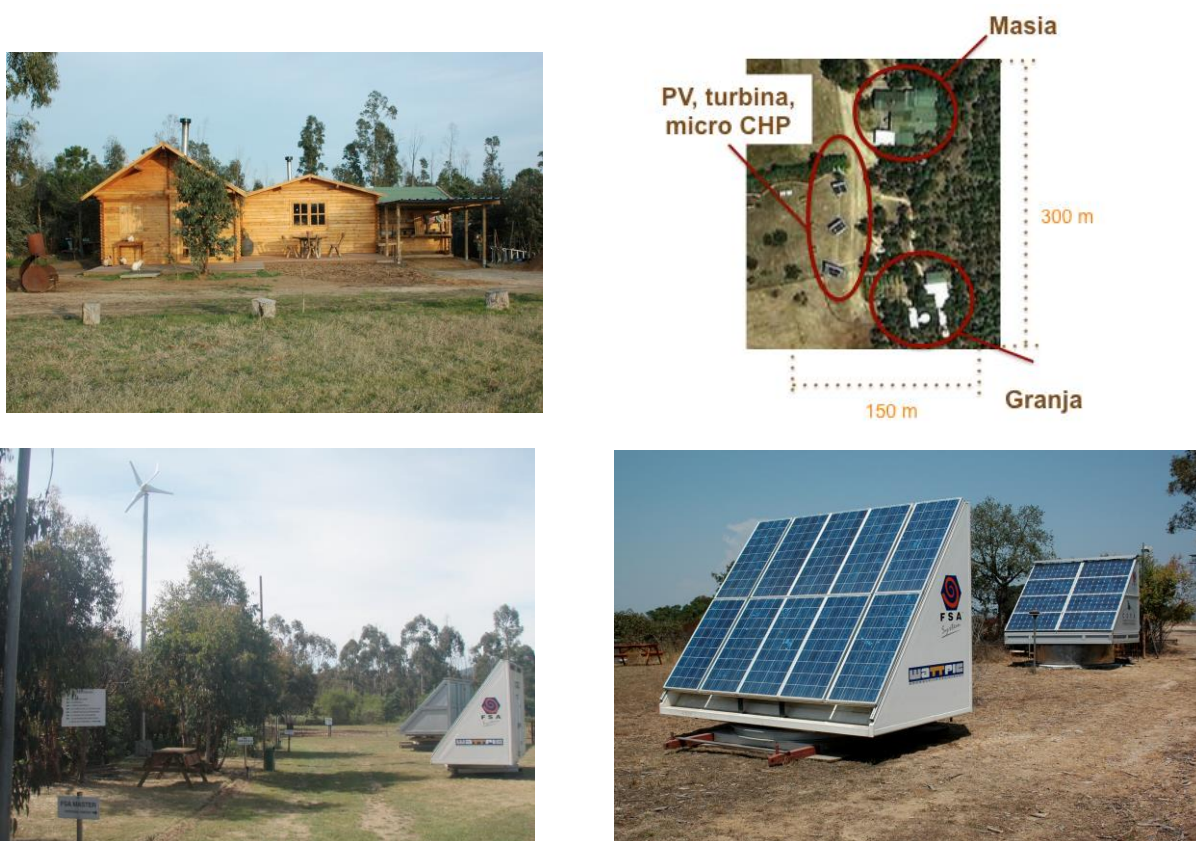


Figura 5.1. Imatges del Mas Roig, a Llagostera (Girona), amb el Dr. Francesc Sureda. a) vista general de la Masia; b) vista aèria de les instal·lacions; c) detall del molí eòlic a l'àrea de l'energia; d) detall de les unitats de producció solar Font Solar Autònoma. FONT: Mas Roig

En tractar-se, doncs, d'una temàtica d'aquest abast, incapaç d'estudiar-se només des d'una vessant tècnica i en coherència amb els plantejaments desgranats a la present tesi, vaig decidir fer la recerca allà on s'està experimentant, que és, a més de l'entorn purament de recerca universitari, la societat en el seu conjunt, a les organitzacions socials de diferent propòsit i vocació, a l'empresa, en el sector econòmic, educatiu, polític, entre d'altres. Aquest ha estat el meu laboratori. També en els boscos i en d'altres ecosistemes, observant-ne els fluxos d'energia i de materials. I a casa, experimentant amb sistemes d'estalvi actius i passius i proveint-me amb energia solar. I explicant-ho als meus fills amb la seguretat que la seva generació viurà plenament la tensió derivada del canvi de model i que, malgrat no té un final escrit, cal ser-ne conscient, poder transmetre'ls-hi el coneixement i, sobretot facilitar la seva experimentació a nivell personal com a fet intransferible i de gran calat.

5.3 Activitats en R+D 2004-2014 – recull cronològic

En els darrers 10 anys he estat treballant en diferents activitats relacionades amb recerca i desenvolupament en el camp dels sistemes energètics. Les temàtiques principals de treball de caràcter tecnològic es relacionen en al Figura 5.2, però transversalment hi ha hagut una immersió durant tots aquests anys en aspectes no tecnològics associats al model energètic treballant des de diferents àmbits socials, professionals i de divulgació

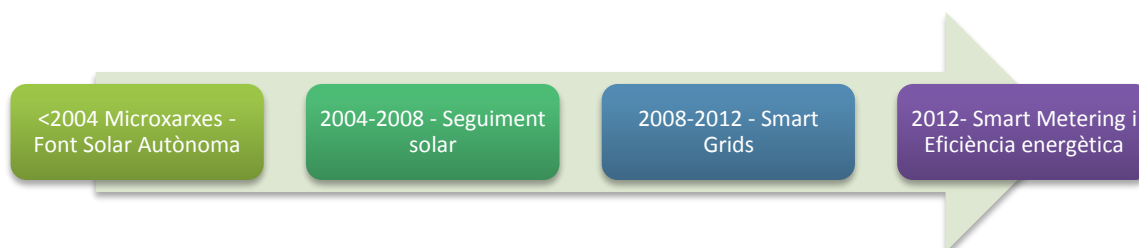


Figura 5.2. Timeline de l'activitat de recerca tecnològica en el camp energètic durant el període 2004-2014. FONT: elaboració pròpia

5.3.1 Període 2004-2008 - Recerca en sistemes de seguiment solar:

Davant una limitació mecànica de les tecnologies existents en seguiment solar per producció d'energia solar fotovoltaica (resistència mecànica davant el vent), vaig treballar en R+D en aquestes tecnologies fins a trobar una solució viable tècnicament. La innovació va ser a nivell mundial i va permetre obtenir una patent internacional, de la qual en sóc inventor principal:

[STAND-ALONE, INTERACTIVE MODULAR ENERGY-PRODUCTION SYSTEM \(WO2008000863\)](#)

Spain PCT/ES2007/000240 Issued April 23, 2007

Com a investigador principal vaig liderar i dirigir un equip de 5 persones, desenvolupant les següents tasques:

- Anàlisi de solucions tècniques disponibles i detecció de problemàtica

- Disseny de la solució tècnica inspirant-se en com la natura soluciona la residència mecànica al vent (biomimètica).
- Àrees de coneixement involucrat: enginyeria mecànica, electrònica, elèctrica, hidràulica.
- Coordinació de Prototipatge, primera sèrie i redisseny per optimitzar costos.
- Transferència tecnològica sota model de llicència. Co-fundador d'una start up amb l'objectiu de portar la patent al mercat: WATTPIC Energia Intel·ligent. Finançament privat, públic. Facturació > 7M€ amb contractes sobre la patent.
- Procés d'internacionalització de la tecnologia: Estat espanyol, Àustria, Croàcia, Índia, Estats Units, Austràlia. Selecció de partners locals i cerca de projectes.
- Involucració en el procés de fabricació de prototips i sèries seleccionant proveïdors, fent seguiment de fabricació, treballant colze a colze amb proveïdors
- Logística de transport nacional i internacional, direcció d'obra de muntatge, operació i manteniment de la maquinària en operació

Aquest projecte va rebre finançament públic per part del CIDEM-Generalitat de Catalunya i del CDTI, en sengles projectes de R+D.

D'altra banda, aquesta experiència va permetre també investigar en sistemes de seguiment solar per aplicacions de solar tèrmica. Finançat per fons públics de R+D (CIDEM-Generalitat de Catalunya) i obtenint una patent internacional:

[MACHINE COMPRISING A SOLAR HEAT SOURCE \(WO2008104619\)](#)

Spain PCT/ES2008/000050 Issued January 31, 2008 2.

Aquesta tecnologia no es va arribar a comercialitzar per motius empresarials.

Finalment, vaig participar en el desenvolupament d'una aplicació d'energia solar tèrmica per dessalinització d'aigua cofinançat pel 6th Framework Programme de la UE: Low cost Low energy Technology to desalinate wàter to potable water (Project No. COOP-CT-2005-017928)

<http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/121625111EN6.pdf>

5.3.2 Període 2003-2005 i 2008-2010- Recerca en microxarxes:

Al voltant de la tecnologia solar fotovoltaica Font Solar Autònoma, FSA ([Autonomous interactive solar energy production system. December 19, 2002: US20020190688-A1](#)), desenvolupada pel Dr. Francesc Sureda, vaig estar treballant en diferents projectes de R+D amb cofinançament públic i relacionat amb microxarxes tan a nivell català, com estatal i del Programa Marc de la UE:

TÍTOL DEL PROJECTE:	GEINCO: Gestión INtegral de CONsumos		
ENTITAT FINANÇADORA:	PROFIT – Ministerio		
ENTITATS PARTICIPANTS:	WATTPIC, La Salle-FUNITEC		
DURADA, des de:	2004	Fins:	2005
INVESTIGADOR PRINCIPAL:	Pep Salas		

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

NÚMERO D'INVESTIGADORS PARTICIPANTS (a temps complert)	3
DESCRIPCIÓ	Disseny d'endolls intel·ligents i software de gestió de demanda.

TÍTOL DEL PROJECTE:	MICRO – GD: Optimización de generación distribuida a partir de sistema de control de demanda y poligeneración
ENTITAT FINANÇADORA:	PROFIT - Ministerio
ENTITATS PARTICIPANTS:	WATTPIC, FATRONIK
DURADA, des de:	2006 Fins: 2008
INVESTIGADOR PRINCIPAL:	Pep Salas
NÚMERO D'INVESTIGADORS PARTICIPANTS (a temps complert)	4
DESCRIPCIÓ	Disseny d'endolls intel·ligents i gestió de la demanda en temps real en un escenari de poligeneració d'energia. Executat

TÍTOL DEL PROJECTE:	BODEGA – GD: Electrificación autónoma de una bodega a partir de fuentes renovables y gestión de la demanda
ENTITAT FINANÇADORA:	CIDEM – GENERALITAT DE CATALUNYA
ENTITATS PARTICIPANTS:	Wattpic, Vinyes Domenech
DURADA, des de:	2008 Fins: 2010
INVESTIGADOR PRINCIPAL:	Pep Salas
NÚMERO D'INVESTIGADORS PARTICIPANTS (a temps complert)	3
DESCRIPCIÓ	Disseny del sistema d'energia i control de la demanda executat a una bodega de Capçanes. Actualment en funcionament.

TÍTOL DEL PROJECTE:	INTEGRAL - Integrated ICT-platform based Distributed Control in Electricity Grids
ENTITAT FINANÇADORA:	STREP
ENTITATS PARTICIPANTS:	6è Programa Marc UE
DURADA, des de:	ECN, Essent, KEMA, NTUA, IDEA, Humiq, Wattpic
TÍTOL DEL PROJECTE:	1.11.2007 Fins: 28.02.2011
INVESTIGADOR PRINCIPAL:	ECN (Energy Center of Netherlands)
NÚMERO D'INVESTIGADORS PARTICIPANTS (a temps complert)	>15 (entre tot el consorci)
DESCRIPCIÓ	Responsable d'un dels <i>Test Site amb</i> una microxarxa operada i controlada per un sistema multiagents. Estudi del seu funcionament sota condicions normals i crítiques.

TÍTOL DEL PROJECTE:	NOBADIS: Nodes Bàsics Distribuïts		
ENTITAT FINANÇADORA:	ACC10 – Nuclis + finançament per part d'ICF		
ENTITATS PARTICIPANTS:	WATTPIC, UPC, La Salle		
DURADA, des de:	2008	Fins:	2010
INVESTIGADOR PRINCIPAL:	Pep Salas		
NÚMERO D'INVESTIGADORS PARTICIPANTS (a temps complert)	5		
DESCRIPCIÓ	Disseny biomimètic de microxarxes a partir d'una concepció orgànica de nodes bàsics on conflueix poligeneració i gestió activa de la demanda. Execució del projecte en prova real, disseny de components, sistema de gestió.		

I amb les següents publicacions relacionades:

Papers i conferències

- A Multi-Agent System providing demand response services from residential consumers, Electric Power Systems Research, Ms. Ref. No.: EPSR-D-14-00078R1 (accepted on 2nd June 2014)
- Salas, P., Guerrero, JM., *Mas Roig Mini-Grid: A Renewable-Energy-Based Rural Islanded Microgrid*, IEEE International Energy Conference ENERGYCON 2014, http://vbn.aau.dk/files/192693251/EnergyCon_2014_Pep.pdf
- Silvente, J., Graells, M., Espuna, A., Salas, P., *An optimization model for the management of energy supply and demand in smart grids*, Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6347785&tag=1&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6347785%26tag%3D1
- Salas, P., *Sistema multiagentes para el control de microrredes. El caso Mas Roig*, I Congreso de Generación Distribuida – Madrid, 2012

Chapter Book Title: Energy-Efficient Computing and Networking. First International Conference, E-Energy 2010, Athens, Greece, October 14-15, 2010, Revised Selected Papers

INTEGRAL: ICT-Platform Based Distributed Control in Electricity Grids with a Large Share of Distributed Energy Resources and Renewable Energy Sources
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19322-4_23

5.3.3 Període 2010-2012 consultor en R+D

Després dels anys treballant a WATTPIC en temes de seguiment solar i microxarxes i haver dirigit els projectes de R+D relacionats, vaig decidir reprendre el projecte de

Tesi. Durant aquest període, vaig treballar com a consultor extern per una empresa de Serveis Energètics, ENERTIKA, creant i desenvolupant el seu departament de R+D, principalment desenvolupant un programari per la gestió energètica d'edificis industrials i xarxes elèctriques intel·ligents. En aquest període vaig liderar dos projectes amb finançament públic (estatal i 7è Programa Marc)

TÍTOL DEL PROJECTE:	PURI – Plataforma Unificada para redes Inteligentes		
ENTITAT FINANÇADORA:	AVANZA2 – Ministerio Industria de España		
ENTITATS PARTICIPANTS:	ENERTIKA		
DURADA, des de:	2011	Fins:	-
INVESTIGADOR PRINCIPAL:	Pep Salas		
NÚMERO D'INVESTIGADORS PARTICIPANTS (a temps complert)	3		
DESCRIPCIÓ	Desenvolupament d'un software per gestió de xarxes elèctriques internes d'edificis de serveis i industrials		

TÍTOL DEL PROJECTE:	7th FP - EUROENERGEST - Increase of Automotive car Industry competitiveness through an integral and artificial intelligence driven Energy Management system		
ENTITAT FINANÇADORA:	7th Framwork Programme		
ENTITATS PARTICIPANTS:	Enertika, VW-SEAT, VTT, UPC		
DURADA, des de:	2013	Fins:	On going
INVESTIGADOR PRINCIPAL:	Pep Salas		
NÚMERO D'INVESTIGADORS PARTICIPANTS (a temps complert)	9		
DESCRIPCIÓ	Sistema avançat de gestió energètica en fàbrica d'automòbils. Redacció, coordinador de la proposta i líder del consorci. Negociació i Tramitació davant la Comissió Europea.		

5.3.4 Període 2013-: barreres socials del consumidor residencial davant l'eficiència energètica i les energies renovables

Arran del projecte de Tesi i de l'experiència en recerca en el camp tecnològic, vaig aprendre de la importància de les barreres no tecnològiques en la transició de model energètic. Aquest fet va generar un fort impacte en l'orientació de la meva activitat investigadora focalitzant els aspectes socials.

En tractar-se el model energètic d'una qüestió complexa que impossibilita reproduir les condicions de l'assaig en el laboratori per fer la recerca, la meva decisió ha sigut involucrar-me en diferents grups socials i professionals que treballen la temàtica a Catalunya i intentar divulgar aspectes sobre el model energètic i la societat.

Des d'una vessant professional, m'he especialitzat en el component sociològic dels ciutadans davant l'estalvi d'energia i l'adopció de noves tecnologies més eficients.

Així com dels impactes sobre la societat del canvi de model. Per portar a terme aquesta recerca he cofundat l'*start up* ENERBYTE, amb el suport de l'Institut Europeu de Tecnologia, EIT⁸³, a través de KIC InnoEnergy⁸⁴.

La meua tasca com a investigador és crear un equip de R+D, coordinar el desenvolupament del software d'interacció amb l'usuari residencial per eficiència energètica i els algorismes d'anàlisi de les dades de consum d'energia. El projecte ha rebut el suport de finançament privat (Business Angel, Fons d'Inversió de l'EIT) i d'organismes públics (CDTI). Les activitats més rellevants en què he participat, són:

- Direcció del desenvolupament del software multiplataforma (web, APP, email, reports) amb criteris d'usabilitat. Actualment en operació
- Transferència tecnològica al mercat sota model Software as a Service (SaaS).
- Estudi sociològic sobre comportament dels ciutadans davant el consum d'energia, conjuntament amb la Universitat Pompeu Fabra. Resultats pendents de publicar (enquestes a més de 300 ciutadans i model matemàtic de comportament)
- Estudi de consums dels principals electrodomèstics i altres equips de consum domèstics. Executat pel Centre Tecnològic basc Tecnalia.
- Patent sobre desagregació de consums basat en sistemes no intrusius (redactada, pendent de presentar)

Cal destacar l'aprovació del primer paper en un congrés internacional de referència dins d'aquest àmbit de coneixement, Energy Behave⁸⁵, amb el següent títol:

Salas, P, et al, *Sociological analysis, social networks and gamification to change the energy consumption in households*, BEHAVE Energy Conference, Oxford, UK, 2014

5.3.5 Activitats transversals

En paral·lel a l'activitat professional en el camp de la Recerca i el Desenvolupament indicada, es mencionen a continuació algunes de les activitats no professionals més rellevants vinculades amb l'activitat investigadora, dins el concepte ampli explicat i recollit amb la idea de "el meu laboratori el món".

Paper

Rosas-Casals, M., Marzo, M., Salas, P., *Sovereignty, robustness, and short-term energy security levels. The Catalonia case study*, Frontiers in Energy Research, May 2014, <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/fenrg.2014.00016/full>

⁸³ <http://eit.europa.eu/>

⁸⁴ <http://kic-innoenergy.com/>

⁸⁵ <http://behaveconference.com>

Congressos

Director científic del Congrés Rural Smart Grid < <http://www.ruralsmartgrids.cat>>. Actualment ja s'ha celebrat la segona edició i enguany s'integra en el Smart City Expo World Congress < <http://www.smartcityexpo.com/en/call-for-papers-2014>>

Divulgació, Articles

- Promotor i editor de la web www.smartgrid.cat sobre model energètic
- "Llei elèctrica catalana: dret a decidir el model energètic", diari ARA, 21 d'Agost de 2013.
- "Plugging in to Europe's innovation grid", Research magazine, Juny 2013.
- "Más allá de la tecnología: la implantación de las Smart Grid, un reto global", DISTRELEC, Maig 2013
- "Smart Grids: una oportunidad más allá de la tecnología", Ecología Política, Gener 2013.
- "L'autoconsum d'energia: una oportunitat per actuar" (Pep Salas), Espai Verd ONGC núm 49 - revista de pensament polític, solidaritat, cooperació i relacions internacionals, Juny de 2012.
- "La revolució ambiental arriba als comptadors d'electricitat" (Albert Punsola), publicat al diari ARA febrer de 2012.
- "Smart Grid: la xarxa elèctrica del futur" (Albert Punsola), publicat per la revista THEKNOS, del Col·legi d'Enginyers Tècnics Industrials de Barcelona. Febrer 2012.
- ENERGIA PER AL SEGLE XXI, publicat per la Fundació IRLA - novembre 2010, és una aproximació al potencial de les energies renovables i les xarxes elèctriques intel·ligents, o *smart grids*, a Catalunya. Possiblement dels primers documents sobre smart grids escrit en català i per Catalunya
- LA INDUSTRIA CATALANA EN EL NEGOCI FOTOVOLTAIC (Damià Martín, César López), publicat per l'Observatori de Prospectiva Industrial de la Generalitat de Catalunya, novembre 2009

XERRADES I CONFERÈNCIES DE DIVULGACIÓ

- "BIG DATA for Energy Efficiency" (Pep Salas), CleanWeb Initiative. Barcelona, Abril '14.
- "Dialogue: Energy Use Appropriation" (Pep Salas), *6th UPC International Seminar on Sustainable Tehcnology Development*. UPC. Vilanova i la Geltrú Juny de 2013.
- "Smart Grids, introducció i cas pràctic: El consumidor residencial" (Pep Salas), *Jornada Tècnica del Col·legi d'Enginyers Tècnics Industrials de Barcelona "Smart Grids, la gestió eficient de les xarxes de distribució"*. Juny 2013.
- "Entrepreneurship in Sustainable Energy" (Pep Salas i altres ponents), *BCN Global Energy Challenge*. enllaç. Juny, 2013. Programa
- "Infraestructures bàsiques d'estat: energia, aigua, telecomunicacions i espectre radioelèctric" - Debats de la Conferència Nacional per la República Catalana" Accés al debat sobre energia i país (Montserrat Mata, Marcel Coderch i Pep Salas, coordinat per Ferran Casas, cap de política del diari ARA), Fundació IRLA , Maig 2013
- "El paper del consumidor en les *Smart Cities*" (Pep Salas), *Jornada Eficiència Energètica i Smart Cities*. Open Energy Institute. Lleida, abril 2013.
- "Fostering Innovation and Strengthening Synergies within the EU" (Pep Salas i altres ponents), *EIT Conference*. Dublin, April 2013 Accés
- "Potencial de les xarxes elèctriques intel·ligents municipals; casos d'èxit. És possible que Ordís pugui funcionar com una smart grid?" (Pep Salas), Sessió de participació

- sobre Pacte d'Alcaldes, Ordis, Març 2013.
- "EIT: new opportunities for talented people" (Pep Salas i altres ponents), European Commission (DG Education and Culture) and European Institute of Innovation and Technology. Athens, February 2013
 - "Smart Grids: eines de suport al disseny industrial", *Grau en Enginyeria de disseny Industrial – Elisava*. Febrer 2013
 - "El paper del consumidor en les Smart Grid" (Pep Salas), *Congrés d'Energies Renovables i Sostenibilitat en Territoris Insulars*. Menorca, Abril 2013.
 - "Foro Anual de Innovación", *EIT Foundation*, Brusel·les, Març 2013. Notícia relacionada
 - "Com la natura ens pot ajudar a millorar el nostre model energètic?" (Pep Salas), *Setmana de la Ciència a UPC-Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa*. Novembre 2012. Notícia relacionada
 - "Energy/Smart Grid, Impact on Montgrí Plain landscape", (Pep Salas), *Màster EMiLA Summer Workshop Barcelona 2012*. Torroella de Montgrí, Octubre 2012.
 - "Cas Pràctic d'Eficiència energètica aplicant tecnologies Smart Grid" (Pep Salas), *Jornada Smart Grids – Col·legi d'Enginyers Industrials de Barcelona*. Maig 2012.
 - "Smart Grid: moda o Realitat?" (Pep Salas) *Cicle Energia Girona – 2a Jornada Xarxes Elèctriques Intel·ligents – Càmara de Comerç de Girona*. Juliol 2012.
 - "Situació Energètica i Tendències" (Pep Salas), *Conferència Eficiència Energètica i impacte en els costos de les empreses*. Ajuntament de Santa Margarida i els Monjos. Abril 2012.
 - BCN Global Energy Challenge Juny, 2012
 - "Relació entre el Món Rural i l'Energia", 1r Congrés Rural Smartgrid. Barcelona, Octubre 2012. Accés.
 - "An optimization model for the management of energy supply and demand in smart grids", *EnergyCON12 IEEE International Energy Conference and Exhibition. Toward user-centric Smart Systems*. Florency – Italy. 2012.
 - "Smart Grids: ¿Moda o Realidad? Bases científicas y un caso práctico: Nodos Básicos Distribuidos" (Pep Salas). *Ir congreso Smart Grid Madrid 2012*.
 - "Photovoltaic potential in residential areas. NET METERING at Distribution Substation level. A Smart Regulation is (also) needed!" (Pep Salas). *Smart City Congres 2012*. Barcelona november 2012
 - "SmartGrid: Oportunitats de la confluència entre energia i telecomunicacions" (Pep Salas), *Ecoviure 2011*. Manresa, Octubre de 2011. Accés a la presentació i notícia
 - "El model energètic: transició de l'actual model centralitzat a un de descentralitzat" (Pep Salas) *Setmana de la Ciència, Molins de Rei*. Novembre 2011
 - "Potencial de la domòtica per les Smart Grid" (Pep Salas), *Jornada Tècnica de la Domòtica, LEITAT i DOMOTYS*, Maig 2011

6 Bibliografia

- Action Act (2012). *Adding Fuel to the Flame: The real impact of EU biofuels policy on developing countries*.
http://www.actionaid.org/sites/files/actionaid/mellemfolkeligt_samvirke_adding_fuel_to_the_flame_2013.pdf
- Aguilera, R.F., Radetzki, M. (2013). *Shale gas and oil: fundamentally changing global energy markets*. Oil&Gas Journal. Vol. 11, Nu. 12. <http://www.ogj.com/articles/print/volume-111/issue-12/exploration-development/shale-gas-and-oil-fundamentally-changing-global-energy-markets.html>
- Alayo, J.C. (2003). *L'electricitat a Espanya en els segles XVIII i XIX. Una anàlisi a partir de la bibliografia històrica*. Actes de la VIIa trobada de la Història de la Ciència i de la Tècnica, Barcelona, 2003 p.433-438 ISBN 84-7283-710-6.
- Alcott, B. (2005). *Jevons' paradox*. *Ecological economics*, 54(1), 9-21.
- Angrist, S., Hepler, L.G. (1967). *Order and Chaos*. Basic books.
- APPA (2012). *Estudio del impacto macroeconómico de las energías renovables en España (datos 2011)*. http://www.appa.es/descargas/APPA_ESTUDIO_2011_WEB.pdf
- Aracil, J. (1986). *Máquinas, sistemas y modelos, un ensayo sobre sistémica*, Ed. Tecnos, Madrid.
- Arrojo, P. (2001). *El Plan Hidrológico Nacional a debate*. Fundación Nueva Cultura del Agua. ISBN 84-88949-44-8.
- Awerbuch, S. (2006). *The economics of Wind. A critique of IEA and Other Levelized Cost Methodologies*.
- Azar, C., Rodhe, H. (1997). *Targets for Stabilization of Atmospheric CO₂*. POLICY FORUM. Science 20. Vol. 276 no. 5320 pp. 1818-1819 DOI: 10.1126/science.276.5320.1818
- Barabási A., Albert R. (1999). *Emergence of scaling in random networks*. Science 286[5439]: 509-12, 15 October
- Baran, P. (1964). *Rand Memoranda on Distributed Communication*. <http://www.rand.org/publications/RM/baran.list.html>
- Bardi, Ugo (2011). *The Limits to Growth Revisited*. SpringerBriefs in Energy. ISBN 978-1-4419-9416-5
- Barthes, R. (1957). *Mythologies, 1957 (Mitologías, Siglo XXI, 2009, ISBN 978-84-323-0381-4)*.
- Bary, H.E. (1879). *Die Erscheinung der Symbiose (The Phenomenon of Symbiosis)*. Privately printed in Strasburg.
- Bejan, A., Lorente, S. (2006). *Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering*, Journal of Applied Physics, vol 100 no. 4 [[10.1063/1.2221896](https://doi.org/10.1063/1.2221896)].
- Berkes, F., Folke, C., (1998). *Linking Social and Ecological Systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press. ISBN: 9780521785624.
- Betz, A. (1967). *Introduction to the Theory of Flow Machines*. Journal of Fluid Mechanics. Volume 28, Issue 04, pp 824-826
- Boltzmann, L. (1886). *The second Law of Thermodynamics*. Theoretical physics and Philosophical problems: selecting writings. B. McGuinness, ed. Dordrecht:Riedel 13-32
- BP (2013). *Statistical review world energy 2013*. <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013/review-by-energy-type/oil-oil-trade-movements.html>

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- Brendel, R., Werner, J.H., Queisser, H.J. (1996). *Thermodynamic efficiency limits for semiconductor solar cells with carrier multiplication*. Solar Energy Materials and Solar Cells (Elsevier). doi:10.1016/0927-0248(95)00125-5. ISSN 0927-0248.
- Brockman, J. (1995). *The Third Culture: Beyond the Scientific Revolution*. Simon & Schuster. ISBN 0-684-82344-6
- Bucio, A., Longhurst, N. & Graugaard, J. (2012). *Energy Densities: Why Do They Matter For Sustainability Transitions?*. 3S Working Paper 2012-08. Science, Society and Sustainability Research Group. Norwich. <http://www.3s.uea.ac.uk/sites/default/files/3S%20WP%202012-08%20Bucio%20et%20al%20WEB.pdf>
- Carbon Tracker (2012). *Unburnable carbon*. <http://www.carbontracker.org/site/carbonbubble>
- Carbonell, E., et. al. (2000). *Sapiens. Un llarg camí cap a la intel·ligència*. Barcelona: Edicions 62. ISBN: 978-84-9930-100-6.
- Carnot, S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu, et sur les machines propres à développer cette puissance*. Gauthier-Villars, 1824, p. 69
- CEE – Club Español de la Energía (2013). *La situación del carbón en España en 2013*. <http://www.enerclub.es/es/frontAction.do?action=viewCategory&categoryName=Carbón&id=1086>
- Chalmers, A. F., Mániz, P. L., Sedeño, E. P., & Villate, J. A. P. (2000). *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*. Siglo XXI de España.
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.(1984). *Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective*. Science 225: 890-897.
- Cleveland, C.J. (1992). *Energy Surplus and Energy Quality in the Extraction of Fossil Fuels in the U.S.* Ecological Economics, 6: 139-162.
- Cleveland, C.J. (1997). *Net energy from oil and gas extraction in the United States 1954-1997*. Energy, 30: 769-782.
- Cleveland, C.J., O'Connor, P.A. (2011). *Energy Return on Investment (EROI) of Oil Shale*. Sustainability 2011, 3(11), 2307-2322; doi:10.3390/su3112307
- CNE – Comisión Nacional de Energía (2008). *Informe complementario a la propuesta de revisión de la tarifa eléctrica a partir del 1 de julio de 2008. Precios y costes de la generación de electricidad*. http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/cne82_08.pdf
- Cowan, W.N., Changb, T. (2014). *The nexus of electricity consumption, economic growth and CO2 emissions in the BRICS countries*. Energy Policy. Volume 66, March 2014, Pages 359–368
- Department of Geography and Environment, Boston University, 675 Commonwealth Avenue, Boston, MA 02215, USA <http://www.mdpi.com/2071-1050/3/11/2307>
- Delucchi, M., Jacobson, M. (2011). *Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies*. Energy Policy 39. Elsevier Ltd. pp. 1170–1190.
- Diamond, J.M., (2005). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Penguin Group, New York.
- Einstein, A. (1905). *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light)*. Annalen der Physik [17 pp.] (EAP, 164; CPE 2, 149) http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_17_132-148.pdf
- Einstein, A. (1936). *Physics and reality*. Journal of the Franklin Institute, Elsevier <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003236910475>
- Einstein, A. (ed 2005). *Mi visión del mundo*. Editorial Tusquets, Col·lecció Metatemas, núm. 90. ISBN: 978-84-8310-420-0

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- EIA – Energy Information Administration, (2013). *Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States*. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=5&pid=57&aid=6>
- EIA – Energy Information Administration, (2013). *Oil and gas industry employment growing much faster than total private sector employment*. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=12451>
- EIA – Energy Information Administration, (2014). *Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013*. U.S. Department of Energy (DOE). http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/electricity_generation.cfm and http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/electricity_generation.pdf
- EIA – Energy Information Administration, (2014). *AEO – Annual Energy Outlook Electricity Generation*. http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/early_elecgen.cfm
- EIA – Energy Information Administration, (2014). *International Energy Statistics*. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=5&pid=57&aid=6>
- EEA - European Environment Agency (2009). *Energy losses and energy availability for end users in 2008 (% of primary energy consumption)*. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/energy-losses-and-energy-availability-1>
- European Commission (2005). *Energy R&D Statistics in the European Research Area*. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/statistics_en.pdf
- European Commission (2013). *Progress towards achieving the Kyoto and the UE 2020 objectives*. Report to the European Parliament and the council. Brussels. http://ec.europa.eu/clima/policies/g-gas/docs/com_2013_698_en.pdf
- Flannery, T. (2005). *Learning from the past to change our future*. Science, Vol. 307 no. 5706 p. 45
- Fowler, R., Guggenheim, E.A. (1939). *Statistical Thermodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge UK, page vii.
- Fraunhofer Institute – ISE (2013). *Levelized cost of electricity. Renewable Energy Technologies*. <http://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/study-levelized-cost-of-electricity-renewable-energies.pdf>
- Funtowicz, S., Ravetz, J. (1991). *A New Scientific Methodology for Global Environmental Issues*. Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability. Ed. Robert Costanza. New York: Columbia University Press: 137–152.
- Funtowicz, S., Ravetz, J. (1994). *The worth of a songbird: ecological economics as a post-normal science*. Ecological economics, núm. 10.
- Funtowicz, S., Ravetz, J. (1996). *La ciencia postnormal: la ciencia en el contexto de la complejidad*. Ecología Política, número 12, Barcelona.
- Galving, R., Yeager, K. (2008). *PERFECT POWER: How the Microgrid Revolution Will Unleash Cleaner, Greener, More Abundant Energy*. McGraw-Hill. ISBN-10: 0071548823. ISBN-13: 978-0071548823.
- Gang Li, et al., (2005). *High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends*. Nature Materials 4, 864 - 868
- Generalitat de Catalunya (2013). *Informe sobre la Pobresa Energètica a Catalunya*. Síndic de Greuges de Catalunya. <http://www.sindic.cat/site/unitFiles/3530/Informe%20pobresa%20energetica%20definitiu.pdf>
- Georgescu-Roegen, N. (1986). *The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect*. Palgrave Macmillan Journals. Eastern Economic Journal. Vol. 12, No. 1 (Jan. - Mar., 1986), pp. 3-25 <http://www.jstor.org/stable/40357380>

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- Gever, J., Kaufmann, R. (1986). *Beyond Oil: The Threat to Food and Fuel in the Coming Decades*. Ballinger, Cambridge, 304 pp.
- Giampietro, M., Mayumi, K. (2008). *The Jevons Paradox: The Evolution of Complex Adaptive Systems and the Challenge for Scientific Analysis*. In Polimeni, JM., Mayumi, K., Giampietro, M. *The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements*. Earthscan. pp. 79–140. ISBN 1-84407-462-5.
- Gibbs, J.W. (1873). A method of geometrical representation of thermodynamic properties of substances by means of surfaces: reprinted in Gibbs. *Collected Works*, ed. W. R. Longley and R. G. Van Name (New York: Longmans, Green, 1931)". *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 2: 382–404.
- Giebink, N.C., et al., (2011). *Thermodynamic efficiency limit of excitonic solar cells*. American Physical Society. doi:10.1103/PhysRevB.83.195326.
- Glansdorff, P., Prigogine, I. (1971). *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations*, Wiley-Interscience, London, ISBN 0-471-30280-5.
- Goldthau, A., Witte, J.M. (2010). *Global Energy Governance. The New Rules of the Game*. Washington DC. Brookings Institution Press, 2010.
- Grandy, W.T., Jr (2008). *Entropy and the Time Evolution of Macroscopic Systems*. Oxford University Press. ISBN 978-0-19-954617-6.
- Greene, D. L. (2010). *Measuring energy security: Can the United States achieve oil independence?*. *Energy policy*, 38(4), 1614-1621.
- GTM Research (2012). *Global PV Module Manufacturers 2013: Competitive Positioning, Consolidation and the China Factor*. <http://www.greentechmedia.com/research/report/global-pv-module-manufacturers-2013>
- Gunderson, L.H. (2000). *Ecological Resilience — In Theory and Application*. *Annual Review of Ecology & Systematics* 31: 425.
- Hall, C., Lambert, J., Balogh, S.B. (2014). *EROI of different fuels and the implications for society*. *Energy Policy*. Volume 64, Pages 141–152.
- Hansen, J. et al. (2008). *Target atmospheric CO2: Where should humanity aim?* *Open Atmospheric Science Journal*. Vol. 2, pp. 217-231.
- Hauwermeiren, Saar Van (1998). *Manual de Economía Ecológica*, Instituto de Ecología Política de Chile, Santiago de Chile.
- Hawking, S. (2004). *The Illustrated on the shoulders of giants*. Running Press Book Publishers; ISBN-10: 0762418982. ISBN-13: 978-0762418985.
- Heisenberg, W. (1927), *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. *Zeitschrift für Physik* 43 (3–4): 172–198.
- IDAE (2011). *Estudio sobre empleo asociado al impulso de las energías renovables*. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Resumen_Ejecutivo_Empleo_\(2\)_863_06935.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Resumen_Ejecutivo_Empleo_(2)_863_06935.pdf)
- IEA – International Energy Agency (2009). *CO2 Emissions from Fuel Combustion* Paris.
- IEA, OECD and World Bank. (2010). *The Scope of Fossil-Fuel Subsidies in 2009 and a Roadmap for Phasing out Fossil-Fuel Subsidies*. Report for the November 2010 G20 summit meeting in Seoul, Korea.
- IEA, OPEC, OECD. (2011). *Joint report by IEA, OPEC, OECD and World Bank on fossil-fuel and other energy subsidies*. <http://www.oecd.org/env/49090716.pdf>
- IEA - International Energy Agency (2012). *World Energy Outlook 2012. IEA analysis of fossil-fuel subsidies*. http://www.iea.org/media/weowebiste/energysubsidies/ff_subsidies_slides.pdf

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

<http://www.iea.org/publications/worldenergyoutlook/resources/energysubsidies/inputtog20initiative/>

- IEA - International Energy Agency (2013). *RD&D Budget. IEA Energy Technology RD&D Statistics (database)*. <http://www.iea.org/statistics/topics/rdd/>
- IEA - International Energy Agency (2014). *Technology roadmap: Energy Storage*. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-energy-storage-.html>
- IEA - International Energy Agency (2014). *World Energy Investment Outlook, Special Report*. OCDE/IEA. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weio2014.pdf>
- IER - Institute for Energy Research (2014). *Electricity Generation Cost*. <http://www.instituteforenergyresearch.org/levelized-costs-of-new-electricity-generating-technologies/>
- IHS (2013). *America's New Energy Future: The Unconventional Oil and Gas Revolution and the US Economy*. [http://www.energyxxi.org/sites/default/files/pdf/Americas New Energy Future Phase3.pdf](http://www.energyxxi.org/sites/default/files/pdf/Americas%20New%20Energy%20Future%20Phase3.pdf)
- Jou, D., Casas-Vázquez, J., Lebon, G. (1993). *Extended Irreversible Thermodynamics*, Springer, Berlin, ISBN 3-540-55874-8, ISBN 0-387-55874-8.
- Karfoopoulos, E., Tena, L., Torres, A., Salas, P., Jorda, J. G., Dimeas, A., & Hatziargyriou, N. (2014). *A multi-agent system providing demand response services from residential consumers*. Electric Power Systems Research. Available online 19 June 2014.
- Kay, J. (2000). *Ecosystems as Self-organizing Holarchic Open Systems : Narratives and the Second Law of Thermodynamics*. Handbook of Ecosystems Theories and Management, CRC Press - Lewis Publishers. pp 135–160
- Kessides, I.N., Wadeb, D.C. (2011). *Towards a sustainable global energy supply infrastructure: Net energy balance and density considerations*. Energy Policy. Volume 39, Issue 9, Pages 5322–5334
- Kessides, I.N. (2012). *The future of the nuclear industry reconsidered: Risks, uncertainties, and continued promise*. Energy Policy. Special Section: Frontiers of Sustainability. Volume 48, September, Pages 185–208
- Kestin, J. (1966). *A Course in Thermodynamics* (Preface, pgs. vii-ix). London: Blaisdell Publishing Co.
- Kondepudi, D., Prigogine, I. (1998). *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*, Wiley, Chichester, 1998, ISBN 0-471-97394-7.
- Kuznets, S. (1971). *Economic Growth of Nations: Total Output and Production Structure*.
- Layton, B.E. (2008). *A comparasion of Energy Densities of prevalent energy sources in units of Joue per cubic metre*. International Journal of Green energy, 5: 438-455
- Lebon, G., Jou, D., Casas-Vázquez, J. (2008). *Understanding Non-equilibrium Thermodynamics: Foundations, Applications, Frontiers*. Springer-Verlag, Berlin, e-ISBN 9783540742524
- Locke, J. *Assaig sobre el govern civil i la Carta sobre la tolerància*, publicat a la col. Textos Filosòfics, Barcelona Laia, 1983.
- Lotka, A. J. (1922). *Contribution to the Energetics of Evolution*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 8, 147–151. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1085052/pdf/pnas01891-0031.pdf>
- Lovelock, J. (1979). *Gaia: A New Look at Life on Earth*. Oxford University Press
- Lovelock, J., Bateson, G. (1987). *Gaia. A way of knowing: Political Implications of the New Biology*. Lindisfarne Pr. ISBN-10: 0940262231, ISBN-13: 978-0940262232. Tradcció espanyol: *Gaia. Implicaciones de la nueva biología*. Editorial Kairós (1989)

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- Lovelock, J. (2001). *Gaia: The Practical Science of Planetary Medicine*. Oxford University Press US. ISBN 0-19-521674-1.
- Lovins, A. (2011). *Reinventing Fire*. Chelsea Green Publishing. ISBN-10: 1603583718. ISBN-13: 978-1603583718.
- Lucia, U. (2008). *Probability, ergodicity, irreversibility and dynamical systems*. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 464: 1089.
- Luft, G. (2008). *Sovereign Wealth Funds, Oil and the New World Economic Order*. IAGS - Institute for the Analysis of Global Security http://www.iags.org/Luft_HFRC_SWF_052108.pdf
- Lund, H. (2009). *Renewable Energy Systems - The Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions*. Academic Press. Elsevier. ISBN-13: 978-0123750280. ISBN-10: 0123750288.
- Luvie, D. (1979). *Termodinámica de la Evolución Biológica*. Investigación i ciencia 30 (102).
- Margalef, R. (1963), *On certain unifying principles in ecology*. American Naturalist. Vol 97, No. 897, 357-374
- Margulis, L. (1970). *Origin of Eukaryotic Cells; Evidence and Research Implications for a Theory of the Origin and Evolution of Microbial, Plant, and Animal Cells on the Precambrian Earth*. New Haven: Yale University Press, 1970.
- Margulis, L., Sagan, D. (1987), *Microcosmos: Four Billion Years of Evolution from Our Microbial Ancestors*. HarperCollins. Traducción *Microcosmos*. Tusquets Editores (1995).
- Margulis, Lynn (2002). *Planeta Simbiótico. Un nuevo punto de vista sobre la evolución..* Victoria Laporta Gonzalo (trad.). Madrid: Editorial Debate.
- Margulis, L., Dorion, S. (2002). *Planeta Simbiótico. Un nuevo punto de vista sobre la evolución*. Victoria Laporta Gonzalo (trad.). Madrid: Editorial Debate
- Mari, C. (2014). *The costs of generating electricity and the competitiveness of nuclear power*. Progress in Nuclear Energy, Volume 73, May, Pages 153–161
- Marti, A., Araújo, GL. (1996). *Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems*. Solar Energy Materials and Solar Cells – Elsevier, Volume 43, Number 2, pp. 203-222(20)
- Martínez Alier, J. (1995). *Los principios de la Economía Ecológica. Textos de P. Geddes, S.A. Podolinsky y F. Soddy*. Madrid: Argenteria. ISBN 84-7774-971-X.
- Marx, K., Engels, F. (1848). *The Communist Manifesto*.
- McGlade, C., Ekins, P. (2014). *Un-burnable oil: An examination of oil resource utilisation in a decarbonised energy system*. Energy Policy. Volume 64, January 2014, Pages 102–112
- Meadows, D.H., et al. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's*. Universe Books, New York, 205. ISBN0-87663-165-0
- Monod, Jacques (1971). *Chance and Necessity*. New York: Alfred A. Knopf. ISBN 0-394-46615-2.
- Morin, E. (1982). *Science avec conscience*, Fayard
- Morowitz, H. (1968). *Energy Flow in Biology: Biological Organization as a Problem in Thermal physics*. Academic Press
- Mikulecky, D. C. (1993). *Applications of network thermodynamics to problems in biomedical engineering*. New York University Press.
- Milgram, S. (1967). *The Small World Problem*, Psychology Today, vol.1 no.1, pp61-67
- Morowitz, J. (1985). *Mayonnaise and the Origin of Life: Thoughts of Minds and Molecules*, Woodbridge, Conn. Ox Bow Press.

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- National Research Council (2010). *Electricity from Renewable Resources: Status, Prospects, and Impediments*. National Academies of Science. p. 4. The National Academy Press. Washington D.C.
- Odum, E. P. (1968). *Energy flow in ecosystems: a historical review*. American Zoologist, 8(1), 11-18.
- Odum, H.T., Pinkerton, R.C. (1955). *Time's speed regulator: The optimum efficiency for maximum output in physical and biological systems*, American Science, 43 pp. 331–343.
- OECD, NEA & IAEA (2012). *Uranium 2011: Resources, Production and Demand ("Red Book")*. ISBN 978-92-64-17803-8. OECD. <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2012/7059-uranium-2011.pdf>
- Onsager, L. (1931). *Reciprocal Relations in Irreversible Processes. I.*, Phys. Rev. 37, 405–426 <http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.37.405>
- Onsager, L., Machlup, S. (1953). *Fluctuations and Irreversible Processes*, Phys. Rev. 91, 1505 – Published 15th September
- Pacala, S., Socolow, R. (2004). *Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies*. Science Vol. 305. pp. 968–972.
- Paltridge, G. W. (1979). *Climate and thermodynamic systems of maximum dissipation*. Nature 279: 630-631
- Pascal, Blaise; Traducción y ampliación de Xavier Zubiri (2004), *Pensamientos*, España: Alianza Editorial, ISBN 84-206-5824-3
- Plank, M. (1900). *Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung (On an Improvement of the Wien's Law of Radiation)*. Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft. 2, S. 202–204.
- Plank, M. (1900). *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum (On the Theory of Energy Distribution Law of the Normal Spectrum Radiation)*. Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft. 2, S. 237–245.
- Plank, M. (1901). *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum (On the Energy Distribution Law in the Normal Spectrum Radiation)*. Annalen der Physik. 4, S. 553–563.
- Plató (514a-517a). *La República. El mite de la Caverna*, Fundació Institut Cambó Col·lecció Bernat Metge, Barcelona, pp. 11-122.
- Pointing, Clive (1991). *A Green History of the World: The Environment and the Collapse of Great Civilizations*, Penguin, ISBN 0-14-017660-8
- Prigogine, I. (1945). *Modération et transformations irréversibles des systèmes ouverts*. Bulletin de la Classe des Sciences, Academie Royale de Belgique 31: 600–606.
- Prigogine, I. (1947). *Étude thermodynamique des Phénomènes Irreversibles*, Desoer, Liege.
- Prigonine, I., Résibois, P. (1961). *On the kinetics of the approach to equilibrium*. Physica vol. 27 (7) p. 629-646
- Prigogine, I., Nicolis, G. (1977). *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. Wiley. ISBN 0-471-02401-5.
- Prigogine, I, Stengers, I. (1984). *Order out of Chaos: Man's new dialogue with nature*. Flamingo. ISBN 0-00-654115-1.
- Prigogine, I., Stengers, I. (1983). *La nueva alianza*. Alianza Editorial, p.39
- Ragheb, M., Ragheb, A.M. (2011). *Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio*. Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2.
- Rant, A. (1956). *Exergie, ein neues Wort für "Technische Arbeitsfähigkeit" (Exergy, a new word for "technical available work")*. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 22: 36–37.

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- Riba, C. (2011). *Recursos energètics i crisi. La fi de 200 anys irrepetibles*, Iniciativa Digital Politècnica. Centre de Disseny d'Equips Industrials (CDEI). Institut universitari de recerca en Ciència i Tecnologies de la Sostenibilitat (IS.UPC). ISBN: 978-84-7653-590-5
- Rockström, J. et al. (2009). *A safe operating space for humanity*. Nature 461, 472-475
- Rosas-Casals, M., Marzo, M., Salas, P. (2014). *Sovereignty, robustness, and short-term energy security levels. The Catalonia case study*. Frontiers in Energy Research, May. <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/fenrg.2014.00016/full>
- Sagan, Lynn (Margulis). (1967). *On the Origin of Mitosing Cells*. Journal of Theoretical Biology 14 (1967): 225–74. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022519367900793>
- Salas, P., Sureda, F., (2001). *FSA: un model d'energització sostenible*, Projecte Final de Carrera Enginyeria Agrònoma, Universitat de Lleida.
- Salvador, A. (2005). *Energy: A historical perspective and 21st century forecast*. American Association of Petroleum Geologists. ISBN-13: 978-0891810612 ISBN-10: 0891810617
- Sanchez, J.M. (2012). *Energía - una historia del progreso y desarrollo de la humanidad*. Lunweg Editores. ISBN: 978-84-9785-900-4
- Scharmer, K., Greif, J. (2000). *The European Solar Radiation Atlas: Fundamentals and maps*. Presses de l'Ecole des Mines. ISBN-10: 2911762215. ISBN-13: 978-2911762215
- Scheer, H. (2001). *Economía solar global: estrategias para la modernidad ecológica*.
Editorial: GALAXIA GUTENBERG. ISBN: 9788481093155
- Scheer, H. (2012). *The Energy Imperative: 100 Percent Renewable Now*. Taylor & Francis. ISBN: 1849714339. ISBN-13: 9781849714334.
- Scheffer, M. (2009). *Critical Transitions in Nature and Society*. Princeton Studies of complexity. Princeton University Press. ISBN: 9780691122045
- Schneider, E., Sagan, C., (2005). *Into the Cool. Energy flow, thermodynamics, and life*. The University of Chicago Press Books. ISBN: 9780226739366. <http://www.press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/l/bo3533936.html>
- Schneider, M. (2011). *The World Nuclear Industry Status Report 2012*. IAEA-INPRO-Dialogue Forum "Long-term Prospects for Nuclear Energy in the Post-Fukushima Era". Seoul, 29 August 2012.
- Schrödinger, E. (1926). *An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules*. Physical Review 28 (6): 1049–1070.
- Schrödinger, E. (1935). *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik (The present situation in quantum mechanics)*. Naturwissenschaften.
- Schrödinger, E. (1944). *What is Life? The physical aspects of the living cell*. Cambridge University Press. ISBN 0-521-42708-8. http://whatislife.stanford.edu/LoCo_files/What-is-Life.pdf
- Shannon, E. (1948). *La Teoria Matemàtica de la Comunicació*. Bell System Technical Journal, vol. 27, p. 379-423 i 623-656 PDF ISBN 0252725484. <http://www3.alcatel-lucent.com/bstj/vol27-1948/articles/bstj27-3-379.pdf>
- Shockley, W., Queisser, H.J. (1961). *Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells*. Journal of Applied Physics (The American Institute of Physics). doi:10.1063/1.1736034.
- Siegrist, M., Visschers, V. (2013). *Acceptance of nuclear power: The Fukushima effect*. Energy Policy, 2013 – Elsevier. Volume 59, August, Pages 112–119
- Snow, C. P. (2001) [1959]. *The Two Cultures*. London: Cambridge University Press. p. 3. ISBN 0-521-45730-0.
- Smil, V. (2004). *War and energy In: Encyclopedia of Energy*. C. Cleveland, ed., Vol. 6, Elsevier, Amsterdam, pp. 363-371

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- Smil, V. (2008). *Energy in Nature and Society: general energetics of complex systems*. The MIT Press. ISBN-10: 0262693569. ISBN-13: 9780262693561
- Smil, V. (2010). *Energy Myths and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate*, AEI Press; First edition August 16, 2010, ISBN-10: 0844743283, ISBN-13: 978-0844743288.
- Smil, V. (2010). *Power Density Primer*. <http://www.masterresource.org/2010/05/smil-density-comparisons-v/>
- Smil, V. (2010). *Science, energy, ethics, and civilization*. Visions of Discovery: New Light on Physics, Cosmology, and Consciousness, R.Y. Chiao et al. eds, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 709-729
- Smith, A. (1776). *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, Methuen and Co., Ltd., ed. Edwin Cannan, London 1904. Fifth edition.
- Socolow, R. (1997). *Fuels Decarbonization and Carbon Sequestration: Report of a Workshop*. Center for Energy and Environmental Studies, 1997. http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/socolow/socdoc/socolow_r302_webfinal_2004-03-17.pdf
- Solé, R. (2008). *Redes Complejas, del genoma a internet*, Editorial Tusquets Editors, Col·lecció Metatemats, Barcelona, núm. 105
- Sovacool, B. K. (2007). *Solving the oil independence problem: Is it possible?*. Energy Policy, 35(11), 5505-5514.
- Sovacool, B.K. (2014). *Cornucopia or curse? Reviewing the costs and benefits of shale gas hydraulic fracturing (fracking)*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 37, September, Pages 249–264
- Steinberg, M. (1999). *Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming*. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 24, Issue 8, August 1999, Pages 771–777
- Struchtrup, H., Weiss, W. (1998). *Maximum of the local entropy production becomes minimal in stationary processes*, Phys. Rev. Lett., **80**: 5048–5051.
- Szent-Györgyi Von Nagrapold, A. (1960). *Introduction to Submolecular Biology*. Publisher: Academic Press Inc; First Edition December. ISBN-10: 0126809682, ISBN-13: 978-0126809688
- Szilárd, L. (1929). Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen (On the reduction of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings), Zeitschrift für Physik, **53** : 840-856. Available on-line in English at: <http://aurellem.org/jaynes/sources/Szilard.pdf>
- Tainter, J.A. (1990). *The Collapse of Complex Societies*. New Studies in Archaeology
- Tainter, J.A. (1995). *Sustainability of complex societies*. Futures. Anthropological Perspectives on the Future of Culture and Society. Volume 27, Issue 4, May, Pages 397–407 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001632879500016P>
- Travers, J., Milgram, S. (1969). *An experimental Study of the small world problema*. Sociometry, Vo. 32 No. 4 Dec 1969, pp 425-443, Published by the American Sociological Association <http://www.jstor.org/discover/10.2307/2786545?uid=3739448&uid=2&uid=3737720&uid=4&sid=21104639789833>
- Tschoegl, N.W. (2000). *Fundamentals of Equilibrium and Steady-State Thermodynamics*, Elsevier, Amsterdam, ISBN 0-444-50426-5, Chapter 30, pp. 213–215.
- Turney, D., Fthenakis, V. (2011). *Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 6, August, Pages 3261–3270

Complexitat tècnica i socioeconòmica de la transició de model energètic. Una aproximació biomimètica a les xarxes intel·ligents de transmissió d'energia i informació.

- Tverberg , G. (2008), *The disconnect between oil reserves and production*. The Oil Drum <http://www.resilience.org/stories/2008-03-09/disconnect-between-oil-reserves-and-production>
- Tverberg , G. (2012). *Oil supply limits and the continuing financial crisis*. 7th Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”. Energy. Volume 37, Issue 1, January 2012, Pages 27–34
- UKERC (2007). *A Review of Electricity Unit Cost Estimates Working Paper*. http://www.ukerc.ac.uk/Downloads/PDF/07/0706_TPA_A_Review_of_Electricity.pdf
- UN – United Nations (1987). *Our Common Future*. http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future-Brundtland_Report_1987.pdf
- Ulanowicz, R.E. (1981). *A unified theory of self-organization*. In: W.J. Mitsch, R.W. Bosserman and J.M. Klopatek (eds.). *Energy and Ecological Modeling*. Elsevier, NY. pp. 649-652
- Van den Bergh, J., Truffer, B., Kallis, G. (2011). *Environmental innovation and societal transitions: Introduction and overview*. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1, 1-23.
- Veà, A. (2013),. *¿Cómo creamos Internet?* Ed. Península, ISBN 9788499422756
- Wagensberg, J. (2007). *El Gozo Intelectual*, Tusquets Editors, Col·lecció Metatemas núm. 97.
- Wagensberg, J. (1985),. *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Tusquets Editors, Col·lecció Metatemas, núm. 9.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., Kinzig, A. (2004). *Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems*. *Ecology and Society* 9 (2): 5.
- Watts, D. J., Strogatz, S. H. (1998). *Collective dynamics of 'small-world' networks*. *Nature* **393** (6684): 440–442. doi:10.1038/30918. PMID 9623998. edit <http://www.nature.com/nature/journal/v393/n6684/full/393440a0.html>
- Wei, M., Patadania, S., Kammen, D.M. (2010). *Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?* *Energy Policy*. Volume 38, Issue 2, February 2010, Pages 919–931
- Weißbacha, D., et al. (2013). *Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants*. *Energy*. Volume 52, Pages 210–221
- Weijermars, R. et al. (2013). *Energy strategy research – Charter and perspectives of an emerging discipline*. *Energy Strategy Reviews*, Vol. 1, No. 3, p. 135-137.
- Wicken, J. (1987). *Evolution, Thermodynamics, and Information: Extending the Darwinian Program*. Oxford University Press; 1st edition ISBN-10: 0195043189, ISBN-13: 978-0195043181
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or the Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge, MA: MIT Press. ISBN 978-0-262-73009-9
- Wiener, N. (1969). *Cibernética y Sociedad*, Ed. Sudamericana.
- Wimmel, H. (1992). *Quantum physics & observed reality: a critical interpretation of quantum mechanics*. World Scientific. p. 2. ISBN 978-981-02-1010-6. Retrieved 9 May 2011.
- World Nuclear Association (2014). *Supply of Uranium*. <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Supply-of-Uranium/#Appendix>
- WNA - World Nuclear Association (2014). *Military Warheads as a Source of Nuclear Fuel*. <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Military-Warheads-as-a-Source-of-Nuclear-Fuel/>
- WWF – World Wildlife Fund (2006). *Living planet Report 2006*. http://assets.panda.org/downloads/living_planet_report.pdf
- Yates, F.E. (1987). *Self-Organizing Systems: the emergence of order*. Plenum.