

ENERGIA, MATERIE PRIME E AMBIENTE: IL MANIFESTO DI ASPO-Italia

Di Ugo Bardi
Gennaio 2008
ugo.bardi@unifi.it
www.aspoitalia.net

1	Parte prima: la situazione delle risorse	3
1.1	Energia.....	3
1.2	Materie prime.....	6
1.3	Ambiente.....	10
1.4	Effetti sociali	15
2	Parte seconda: la grande transizione.....	17
2.1	Una società sostenibile	17
2.2	La transizione.....	21
2.3	Gestire la transizione.....	24
2.4	I punti critici del sistema.....	27
2.5	Un esempio di intervento su un punto critico: rinnovabili e trazione elettrica.....	28
3	Energia rinnovabile	31
4	Conclusioni	35
4.1	Il ruolo di ASPO.....	36
5	Bibliografia.....	37

Riassunto

Dopo il periodo di ottimismo degli anni 1990, si è ricominciato negli ultimi anni a parlare di esaurimento delle materie prime di origine minerale, in particolare il petrolio e gli altri combustibili fossili. Le stesse preoccupazioni si estendono anche a risorse in principio rinnovabili, come la produzione agricola mondiale, che negli ultimi anni non è stata in grado di aumentare in proporzione all'aumento della popolazione umana. Inoltre, ci sono sistemi, come l'atmosfera, la cui capacità di assorbire i rifiuti dell'attività umana può essere considerata come una risorsa in via di esaurimento. Le conseguenze si manifestano in termini di riscaldamento globale e potrebbero essere disastrose.

C'è chi ritiene che l'esaurimento delle risorse e il riscaldamento globale potrebbero causare una crisi importante per l'economia mondiale e che, pertanto, si dovrebbero prendere specifici provvedimenti in proposito. Altri, tuttavia, sostengono che entrambi i problemi possono essere risolti dai normali meccanismi del libero mercato e che non c'è ragione di preoccuparsi. Sul dibattito fra queste due opinioni si gioca il futuro di un'intera civiltà.

L'argomento è di grande complessità e, come sempre quando si tratta di prevedere il futuro, le incertezze sono molto forti. Tuttavia, negli ultimi tempi, un quadro di insieme della situazione si sta rivelando in tutta la sua drammaticità. Sia l'esaurimento delle risorse come il cambiamento climatico non sono problemi che possiamo consegnare alle prossime generazioni, ma problemi che stiamo fronteggiando già oggi e che diverranno sempre più gravi nei prossimi anni.

Quello che segue riporta gli elementi principali del pensiero in proposito dell'associazione della sezione italiana di ASPO (association for the study of peak oil and gas). ASPO è nata per riunire un gruppo di scienziati e ricercatori impegnati nella stima delle risorse petrolifere e del loro esaurimento. Col tempo, gli obiettivi dell'associazione si sono diversificati e comprendono oggi una visione a tutto campo del problema dell'esaurimento delle risorse in relazione al sistema economico.

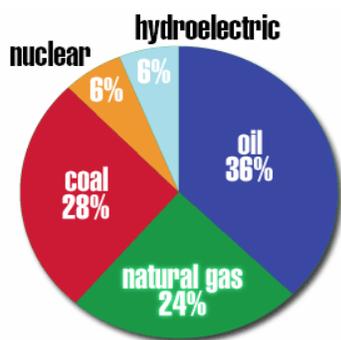
I punti essenziali del pensiero di ASPO sono basati sul concetto che l'esaurimento delle risorse è un problema immediato e che si farà sempre più grave nel futuro. "Esaurimento", come è ovvio, non va inteso come la completa sparizione fisica di una risorsa. Il problema è l'esaurimento di quella frazione di risorse che possono essere utilizzate a basso costo. La prima, e forse la più importante, di queste risorse è il petrolio. I giacimenti di petrolio non sono vicini all'esaurimento fisico, ma gli aumenti di prezzo degli ultimi anni sono causati dall'esaurimento dei tradizionali giacimenti a basso costo che hanno alimentato l'economia mondiale nel ventesimo secolo. Altre risorse energetiche, come il gas naturale, il carbone e l'uranio stanno anch'esse seguendo la stessa curva di esaurimento che ha seguito il petrolio. Anche altre risorse minerali mostrano problemi del genere.

Dobbiamo prendere atto che i vari tentativi di rimanere all'interno del "paradigma dei fossili" possono al massimo prolungare la nostra dipendenza ma non risolvono il problema dei costi crescenti che andiamo a fronteggiare. E' necessario muoversi il più rapidamente possibile verso una società la cui economia possa essere stabilizzata su un consumo sostenibile delle risorse disponibili. Questo è possibile, ed è possibile che una società del genere mantenga gli elementi essenziali della società in cui viviamo oggi: la tecnologia, la scienza, l'arte, la letteratura, i diritti dell'uomo, la giustizia, i servizi sociali e tutti gli elementi che ci fanno definire il nostro mondo come una "civiltà". Per arrivarci, tuttavia, occorre muoversi già oggi verso un'economia che sia alimentata da risorse rinnovabili.

1 Parte prima: la situazione delle risorse

Questa prima sezione esamina in grandi linee la situazione mondiale attuale per quanto riguarda energia, materie prime e ambiente. In tutti i casi, vediamo che siamo vicini ai limiti di sfruttamento e che ci sono elementi per pensare che in un futuro non lontano il flusso di risorse naturali verso l'economia dovrà rallentare considerevolmente. Allo stesso tempo, le conseguenze del sovrasfruttamento dell'ambiente cominceranno a diventare importanti.

1.1 Energia

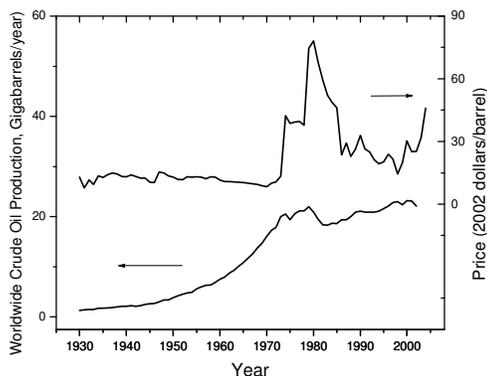


L'economia mondiale funziona utilizzando quasi unicamente energia che viene dai combustibili fossili. Petrolio, gas naturale e carbone, tutti insieme, generano la frazione principale dell'energia primaria prodotta sul pianeta. Il rimanente, qualora si trascuri il contributo energetico dovuto all'uso tradizionale delle biomasse per la cottura dei cibi e per il riscaldamento, è tutto di origine nucleare o idroelettrica, con solo minuscoli contributi dell'energia geotermica e dell'energia fotovoltaica e eolica.

Fra i combustibili fossili, il petrolio è la risorsa principale, quella più critica per l'economia. La sua importanza non deriva soltanto dalla quantità di energia generata; viene anche dalla capacità, unica del petrolio, di fornire energia in forma compatta e trasportabile. I derivati del petrolio, kerosene, gasolio, benzina e altri sono i carburanti principali per i trasporti. I trasporti navali, su strada e per via aerea non potrebbero esistere nella loro forma attuale senza il petrolio. Senza i derivati del petrolio, non sarebbe neanche possibile asfaltare le strade e comunque non ci sarebbe gomma per i pneumatici. Il petrolio è vitale anche per la produzione di fertilizzanti, materie plastiche, pesticidi, e altri prodotti chimici. Gli altri due combustibili fossili, gas naturale e carbone, sono usati principalmente per la generazione di energia elettrica e per il riscaldamento degli edifici. Solo in piccola parte, il gas naturale viene utilizzato come "feedstock" per l'industria chimica. Il carbone era stato utilizzato per questo scopo nel passato, ma è una tecnologia oggi quasi del tutto abbandonata per i suoi costi eccessivi.

Petrolio, carbone e gas naturale hanno alimentato l'economia mondiale durante tutto il periodo industriale, iniziato circa due secoli fa. Ma, oggi, ci sono sintomi evidenti che le riserve di combustibili fossili, accumulate milioni di anni fa, sono state così ampiamente sfruttate da lasciare poco spazio a un ulteriore incremento dello sfruttamento. La crescita della produzione di energia fossile non può continuare all'infinito e può darsi che i limiti siano vicini nel tempo. Delle tre sorgenti fossili principali, svariati elementi indicano che il petrolio è quello più vicino a questo limite. Fra questi elementi, ci sono le forti oscillazioni dei prezzi e la delicatezza della situazione dell'approvvigionamento che potrebbe essere messo in crisi anche da una minima crisi geopolitica. La figura (dati ASPO) mostra l'andamento della produzione del petrolio e dei prezzi corretti per l'inflazione.

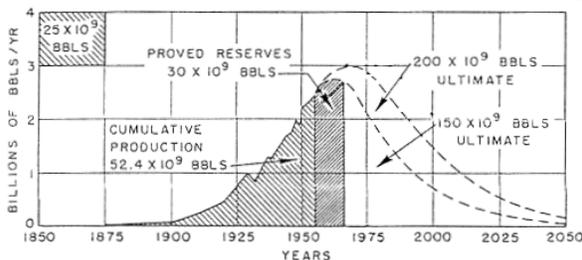
Una situazione simile all'attuale si è già verificata negli anni 1970, la grande "crisi del petrolio" che fu un'avvisaglia di crisi molto più gravi che andremo ad affrontare nel futuro. La crisi del petrolio ebbe inizio nel 1973 con l'embargo alle forniture dichiarato dall'organizzazione dei paesi esportatori di petrolio (OPEC). L'impennata dei prezzi che ne seguì fece aumentare bruscamente i prezzi dei carburanti e dette inizio a un periodo di recessione economica che sarebbe durato circa 10 anni.



La crisi fu percepita dal pubblico come imprevedibile e inaspettata; un fulmine a ciel sereno generato dalla guerra arabo-israeliana che era iniziata il 6 ottobre del 1973. A quel tempo, l'OPEC fu accusata di aver ordito un piano diabolico per strangolare economicamente i paesi occidentali e dare il dominio del mondo ai paesi arabi. Ma non era così. 10 anni di crisi non possono essere attribuiti a un embargo che durò soltanto pochi mesi (Ottobre 1973 - Marzo 1974) e che colpì direttamente soltanto due paesi: l'Olanda e gli Stati Uniti.

Ben altri erano i motivi della crisi che, del resto, era stata ampiamente prevista in anticipo. La predizione era rimasta ignota al grande pubblico, ma risaliva al 1956, quando il geologo americano Marion King Hubbert presentò per la prima volta il suo modello che descriveva la produzione petrolifera. Studiando l'estrazione dei minerali, Hubbert aveva notato che la produzione tende a seguire una "curva a campana" con il progressivo esaurimento della risorsa. La produzione cresce rapidamente in una fase iniziale; successivamente la crescita rallenta; raggiunge un massimo, e poi declina gradualmente.

Il modello di Hubbert era, inizialmente, soltanto empirico. Più tardi è stato possibile analizzarlo (Naill 1972, Reynolds 1999, Bardi 2005), comprenderne le basi teoriche e dimostrare che è molto generale e descrive l'estrazione in condizioni di libero mercato di quasi tutte le risorse minerali e anche molti casi di produzione di risorse biologiche. L'andamento "a campana" della curva di produzione è dovuto alla tendenza degli operatori ad estrarre quella frazione di risorse che sono meno costose. Via via che le risorse poco costose si esauriscono, gli operatori devono estrarre quelle più costose. A lungo andare, i profitti si riducono e di conseguenza gli investimenti. Mancando gli investimenti, la crescita della produzione rallenta fino a raggiungere un picco; dopo di che declina. Il picco *non* indica, come qualche volta si sente dire erroneamente, la "fine del petrolio." Il picco non è nemmeno un evento straordinario o una discontinuità importante. E', piuttosto, il risultato di una combinazione di fattori fisici ed economici che hanno un graduale effetto sulla curva di produzione. In una condizione di libero mercato, la curva è continua, ma discontinuità importanti possono aver luogo per effetto di sconvolgimenti politici.



Hubbert usò il suo modello e i suoi dati geologici per estrapolare la tendenza della produzione petrolifera dei 48 stati meridionali degli Stati Uniti. Trovò che il picco di produzione avrebbe dovuto verificarsi a circa 14 anni di distanza nel futuro, ovvero nel 1970. Questa predizione fu un notevole successo; la produzione petrolifera dei 48 stati raggiunse il suo massimo nel Dicembre del 1970 ed è stata in declino da quel momento in poi. Da allora il picco di estrazione di una risorsa è noto

anche come "picco di Hubbert".

Hubbert non si occupò specificatamente delle conseguenze del picco degli Stati Uniti sull'economia mondiale, ma era chiaro che l'inizio del declino del maggior produttore dell'epoca non avrebbe potuto essere senza serie conseguenze. L'ingresso degli Stati Uniti nel mercato come importatore di petrolio mise in difficoltà tutto il sistema petrolifero mondiale e generò il decennio di prezzi alti e difficoltà di approvvigionamento che fu poi chiamato "la crisi del petrolio". Questo effetto della crisi USA era stato previsto in anticipo già nel 1971 da Pierre Wack della Shell Oil che aveva sviluppato una serie di scenari che anticipavano la realtà storica della crisi petrolifera che seguì pochi anni dopo. Una crisi così ampiamente prevista e con largo anticipo non può essere considerata un imprevedibile fluttuazione politica. Era, invece, una reale crisi di disponibilità della risorsa, pur non ancora fisicamente esaurita.

La storia della crisi degli '70 ci fa vedere che le nostre capacità predittive sono discretamente buone. Altre predizioni del genere si sono rivelate approssimativamente accurate, anche se mai perfette. Dobbiamo sempre ricordarci che le predizioni non sono profezie, ma anche che non siamo ciechi davanti al futuro. Con una combinazione di dati quantitativi e di modellizzazione adeguata possiamo fare delle previsioni ragionevoli riguardo all'andamento della produzione delle risorse. Senza modelli adeguati, è noto che si possono fare anche clamorosi errori per eccesso. La prima grande crisi del petrolio ci fornisce un esempio storico di come geologi esperti avessero sovrastimato anche di un fattore 3 le risorse petrolifere estraibili degli Stati Uniti (Sterman 1988).

Con l'aiuto dei modelli, ci possiamo rendere conto che i problemi nascono ben prima che una risorsa mineraria venga esaurita nel senso fisico del termine. Piuttosto, i problemi si verificano in vicinanza del picco di produzione, quando la produzione non riesce più a tenere il passo con la domanda. Se la risorsa è quella cruciale per l'economia moderna, il petrolio, il picco di aree produttive importanti causa instabilità negative locali e su tutta l'economia mondiale.

Se negli anni '70 il picco produttivo degli Stati Uniti causò 10 anni di crisi, ci possiamo aspettare effetti ancora più importanti dal picco produttivo mondiale che deve arrivare prima o poi. La determinazione

della data di questo picco ("peak oil") è stata uno dei compiti che i membri di ASPO si sono dati. Negli anni 1990, il lavoro di Hubbert è stato ripreso e applicato alla situazione mondiale da Colin Campbell, fondatore di ASPO (Campbell 1998). Più tardi altri membri di ASPO e altri scienziati hanno continuato e allargato l'esame della situazione petrolifera mondiale. Il lavoro di ASPO in questo campo è basato su dati geologici, ma anche su una modellizzazione che parte dai primi tentativi di Hubbert e usa metodi matematici molto evoluti (p. es. Guseo e Della Valle 2005). L'approccio di ASPO differisce in modo sostanziale dalle metodiche comuni nell'industria petrolifera, dove spesso ci si limita a elencare le risorse disponibili sulla base di stime geologiche, alle quali si fanno seguire minimi o inesistenti tentativi di modellizzazione (p. es. CERA 2006).

Già negli anni 1970, Hubbert aveva indicato che la crisi globale avrebbe potuto verificarsi intorno al giro del secolo, ovvero a partire dal 2000. Secondo alcune valutazioni recenti, il picco del petrolio "convenzionale" potrebbe essersi già verificato nel 2005-2006. Secondo altre stime, il picco *totale* del petrolio, che include sia i liquidi convenzionali (petrolio) sia i non convenzionali (NGL, deepwater, eccetera), si verificherà entro qualche anno. Si ritiene comunemente che il picco sia caratterizzato da prezzi molto alti anche se sarebbe un errore cercare di associare il picco di produzione a uno specifico livello di prezzi. Le fluttuazioni e gli aumenti attuali dei prezzi del petrolio sono quasi certamente un sintomo o un presagio del picco.

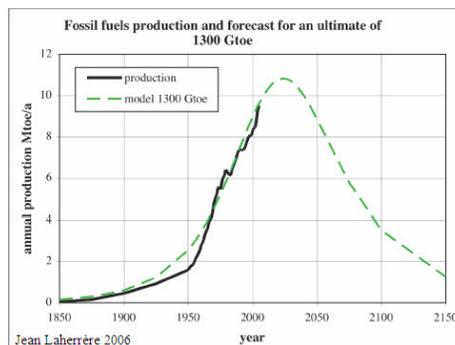
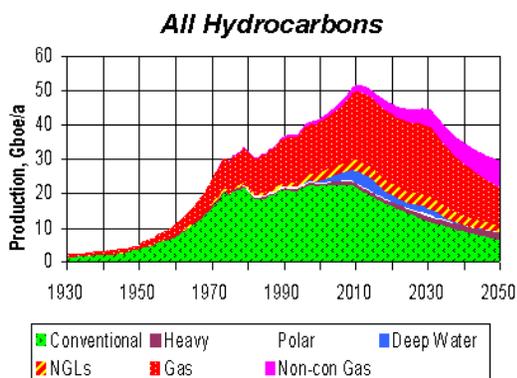
Se il petrolio è in evidente difficoltà produttiva, gli altri due combustibili fossili, gas naturale e carbone, non sono in condizioni molto migliori. Per entrambi, il picco produttivo è previsto dopo quello del petrolio; qui la situazione è resa più complessa dal fatto che sia gas che carbone si trasportano con molta maggiore difficoltà del petrolio, ovvero a costi molto più alti. Questo fa sì che gas e carbone siano – entro certi limiti – risorse regionali. Picchi produttivi, pertanto, si verificano separatamente nelle varie regioni.

Per esempio, ci si aspetta a breve scadenza l'inizio del declino produttivo del gas naturale nel continente nordamericano (USA e Canada) (Simmons 2004). Questo declino non potrà essere compensato se non in piccola parte dall'importazione di gas liquefatto da altre aree geografiche. Migliore è in questo caso la situazione dell'Europa, che può, in teoria, accedere via gasdotti alle riserve russe, nordafricane e orientali. Qui, tuttavia, fattori politici imponderabili potrebbero rendere la situazione degli approvvigionamenti molto difficile. Ci si aspetta che il picco di produzione di tutti gli idrocarburi (gas naturale e petrolio) si verifichi entro il 2020 (vedi figura a lato, previsioni ASPO)

Per il carbone, recenti analisi delle riserve (Energy Watch Group 2007) mostrano che certe ottimistiche stime spesso ripetute sui media non sono corrette. Non abbiamo "secoli di riserve" di carbone. Il picco globale del carbone potrebbe verificarsi entro il 2050, ma le varie regioni del mondo piccherebbero in tempi diversi. L'Europa, in particolare, si trova in forte difficoltà in questo senso, dato che le riserve europee di carbone sono state sfruttate per secoli e che sono ormai tutte in declino. La Francia ha chiuso l'ultima miniera di carbone nel 2004; gli altri maggiori produttori Europei di Carbone, Germania, Inghilterra, e Polonia, potrebbero chiudere le loro miniere entro il 2010. Importare carbone da lunghe distanze è possibile, ma molto costoso.

In ogni caso, le risorse di combustibili fossili sono destinate iniziare il loro declino sicuramente entro il presente secolo. In una proiezione (a lato) di Jean Laherrère (2006), il picco produttivo dell'insieme complessivo delle risorse fossili potrebbe verificarsi intorno al 2020.

Le altre risorse energetiche disponibili al momento,



quasi esclusivamente nucleare e idroelettrico, coprono soltanto poco più del 10% della produzione primaria. Per l'energia nucleare, si cominciano a vedere segni di ripresa dopo la stasi produttiva degli ultimi due decenni ma le nuove centrali previste sono in numero insufficiente per poter contrastare il previsto declino dei combustibili fossili. Sul nucleare incombono i problemi strategici della proliferazione e la carenza di uranio minerale, soggetta alle stesse leggi di esaurimento che valgono per il petrolio. Il fatto che i costi dell'uranio si siano decuplicati negli ultimi anni è sicuramente un indizio di serie difficoltà produttive.

La figura a lato, più in basso (fonte: International Energy Agency, IEA) mostra la produzione storica dell'Uranio e alcune proiezioni per il futuro. Come si vede,

l'andamento della produzione è stato fortemente influenzato da fattori strategici correlati allo sviluppo delle armi nucleari. Pertanto, la curva di produzione non si presenta in un singolo ciclo come nei casi più comuni dei combustibili fossili. Un "picco dell'uranio" si è verificato nel 1980, circa, ma la produzione mostra oggi segni di ripresa e potrebbe raggiungere un secondo picco verso il 2020, o più tardi se si utilizzeranno risorse meno concentrate. Si nota comunque come la produzione sia destinata a rimanere al di sotto della domanda per quasi tutto il periodo esaminato.

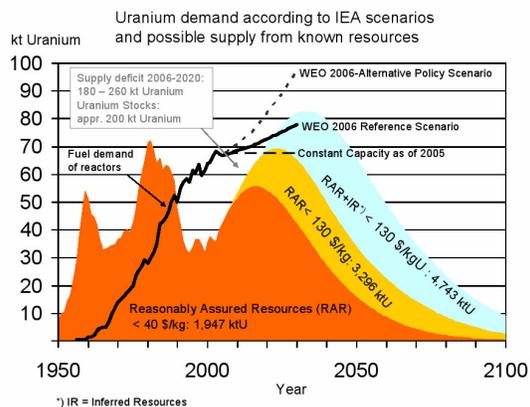
Queste proiezioni prendono in considerazione soltanto un piccolo incremento della capacità produttiva delle centrali nucleari. Se si dovesse portare questa capacità a livelli tali da rimpiazzare in modo sostanziale quella ottenuta oggi dal petrolio e dagli altri fossili, le capacità produttive del sistema minerario dell'uranio non sarebbero neanche lontanamente in grado di soddisfare la domanda. Al momento, la carenza di uranio minerale viene rimediata con la produzione di combustibile ottenuto mediante riserve accumulate negli anni. Di queste riserve, parte è fornita dallo smantellamento di vecchie testate nucleari sovietiche. Queste testate, ovviamente, sono in numero limitato e i trattati che ne prevedono lo smantellamento scadranno nel 2013. Non si può escludere che potrebbero essere disattesi unilateralmente molto prima visto il clima strategico attuale.

Si parla anche della possibilità estrarre uranio dal mare per risolvere il problema, ma le difficoltà e i tempi necessari sono enormi (Bardi 2007 (3)). Nuove tecnologie nucleari basate sulla fissione, come il ciclo del torio o quello dei reattori veloci potrebbero ridurre il problema della carenza di combustibile nucleare. Tuttavia, queste tecnologie sono o allo stadio di idea, come nel caso del torio, oppure sono state esaminate già nel passato e per il momento i tentativi di sviluppare sistemi commerciali sono falliti; come nel caso, per esempio, del reattore veloce francese "Superphenix". Questo non vuol dire che sia impossibile sviluppare queste tecnologie, ma indubbiamente questo richiederebbe destinarvi ingenti risorse senza avere comunque la garanzia del successo. Lo stesso vale per la fusione nucleare, sulla quale si lavora ormai da mezzo secolo senza ancora avere una tecnologia commerciale all'orizzonte.

Quanto all'idroelettrico, è abbastanza evidente che ha raggiunto i suoi limiti produttivi in Europa. In altri paesi si continuano a costruire impianti idroelettrici a costi ambientali immensi, anche di enormi dimensioni come il caso della diga delle tre gole in Cina. Ma, in ogni caso, la produzione di energia con i grandi impianti idroelettrici non cresce in modo significativo ed è probabile che comincerà a scendere nel futuro a causa del naturale riempimento dei bacini per sedimentazione. L'energia elettrica ottenuta mediante dighe e bacini è rinnovabile, ma non eterna.

Infine, restano le cosiddette "nuove rinnovabili" che comprendono principalmente l'energia fotovoltaica, solare termica e eolico. Queste sorgenti energetiche sono estremamente promettenti e in rapido sviluppo e saranno prese in considerazione in una sezione separata. Tuttavia, al momento, rappresentano soltanto una minuscola frazione della produzione di energia primaria mondiale. Pertanto, si può assumere che, nel breve termine, non sarà possibile utilizzarle per contrastare il declino delle fonti fossili.

Prendendo in considerazione le prospettive complessive di tutte le fonti energetiche importanti al momento attuale, possiamo concludere che la produzione di energia è destinata a raggiungere un limite massimo in tempi non più lunghi qualche decennio. Queste proiezioni, come si è detto, non vanno prese come profezie, ma soltanto come un'indicazione degli ordini di grandezza dei tempi che abbiamo di fronte.



1.2 Materie prime

La categoria "materie prime" include tutti i minerali; metalli, ossidi, materiali da costruzione, eccetera, come pure le risorse agricole e derivanti dall'allevamento e dalla pesca. In generale, non sembra che il problema dell'esaurimento delle materie prime sia percepito come un problema altrettanto grave di quello dell'esaurimento delle sorgenti energetiche. Tuttavia, esaminando la situazione attuale, vediamo che tutta una serie di risorse importanti stanno mostrando sintomi di difficoltà produttiva. Un elenco parziale (in ordine alfabetico) comprende:

- Materiali derivati dai combustibili fossili (plastica, gomma, fertilizzanti, insetticidi, medicinali e altri)
- Materie prime di origine minerale (fosfati, rame, zinco, piombo, indio, gallio e altri)
- Minerali energetici (petrolio, gas naturale, carbone e uranio)
- Pescato marino e oceanico
- Produzione agricola

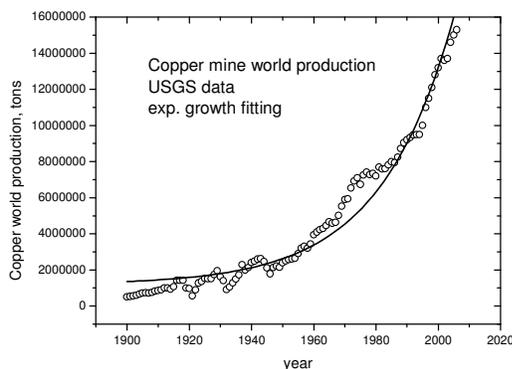
In molti casi, nonostante che la produzione sia ancora in aumento, gli aumenti dei prezzi indicano che non si riesce a produrre a sufficienza da soddisfare la domanda; questo è il caso, per esempio, di metalli come il rame, del petrolio e dei cereali. In altri, vediamo un reale declino produttivo, come nel caso del pescato oceanico.

Si tratta ora di analizzare le ragioni per questa difficoltà produttiva generalizzata che coinvolge risorse molto differenti. Alcune delle materie prime sono classificate come "rinnovabili" (acqua, agricoltura e pesca) altre come "non rinnovabili" (minerali). Per alcune esiste la possibilità di riciclaggio (per esempio i metalli), per altre no (per esempio il petrolio).

Il caso di risorse non rinnovabili e non riciclabili, come il petrolio, è particolarmente chiaro. In questo caso abbiamo un evidente problema di esaurimento. L'esaurimento è definitivo; una volta utilizzata, la risorsa non è più disponibile se non dopo che i processi geologici naturali l'avranno ricreata. Ma per questo occorreranno tempi geologici, dell'ordine dei milioni di anni.

Ma, anche nel caso di risorse teoricamente rinnovabili, come l'acqua di falda o il suolo fertile, il problema dell'esaurimento si pone se lo sfruttamento avviene a velocità molto superiori a quella con la quale la risorsa viene ricreata. Anche per le risorse teoricamente riciclabili, vale lo stesso ragionamento ma non in termini della quantità fisica della risorsa ma in termini dell'energia necessaria per estrarla. E' questo il caso della maggior parte delle risorse minerali non energetiche.

Metalli come il rame, il ferro, lo zinco, il piombo, eccetera, sono fondamentali per l'economia mondiale. L'estrazione di questi metalli si fa da sorgenti altamente concentrate, risultato di processi naturali che le hanno accumulate nell'arco di tempi geologici. Qui, per la maggior parte dei metalli, sembra che le

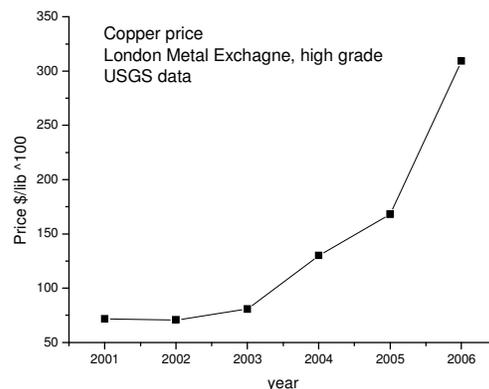


risorse minerali sfruttabili siano ancora relativamente abbondanti. Un articolo recente (Gordon 2006) ha esaminato il caso di alcuni metalli importanti per l'economia, ma non fra quelli più abbondanti nella crosta terrestre, ovvero rame, stagno, zinco, platino e nickel. In tutti questi casi si trova che l'ammontare delle risorse disponibili è tale da non destare preoccupazioni di scarsità a breve scadenza. Infatti, la produzione di questi metalli è cresciuta in modo esponenziale durante tutto il ventesimo secolo, fino ad oggi. Nella figura a lato, il caso del rame, dati da USGS (Kelly 2006). I dati sono stati fittati con una funzione esponenziale.

Tuttavia, i problemi con l'estrazione di questi metalli sono evidenti. In primo luogo, il riciclaggio è molto limitato. Secondo Gordon (2006) su 164 Tg (teragrammi, milioni di tonnellate) di rame estratti negli Stati Uniti, oltre

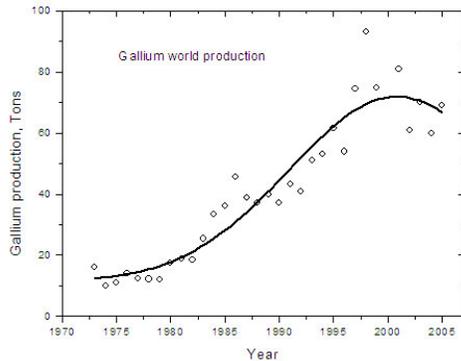
la metà (86 Tg) sono andati persi nell'ambiente o seppelliti in discariche. Dei rimanenti, circa 70 Tg rimangono in uso nell'economia USA, ma sicuramente sono soggetti a una graduale dispersione col tempo.

In secondo luogo, prezzi del rame sono enormemente aumentati negli ultimi tempi (figura a destra, dati USGS) a indicazione di qualche evidente problema. Anche qui, vale il fatto che è più economico estrarre da sorgenti ad alta concentrazione che viceversa e che, col tempo, occorre estrarre da sorgenti sempre meno concentrate. Per esempio, in epoche remote, il rame si trovava allo stato "nativo", ovvero metallico, ma da almeno duemila anni non lo si estrae più in questa forma. Lo stesso vale per l'oro che, al tempo della grande corsa all'oro in California, nel 1849, l'oro si trovava in forma metallica macroscopica, come "pepite" o polvere d'oro. Anche in questo caso, queste sorgenti di facile sfruttamento



sono esaurite e lo sfruttamento di metalli come l'oro e il rame si fa da minerali a bassa concentrazione da cui è possibile estrarre il minerale solo a prezzo di complesse e costose procedure industriali. Via via che si continua ad estrarre, occorre utilizzare fonti sempre meno concentrate.

Sembrerebbe dunque che il problema che si sta ponendo non è dovuto alla quantità assoluta dei minerali. Metalli come il rame, e anche l'oro, sono abbondanti nella crosta terrestre. Ma per estrarli da sorgenti a bassa concentrazione occorre sempre più energia. Siccome l'energia è diventata più costosa negli ultimi anni, questo costo si riflette sui costi delle materie prime che vengono estratte sfruttando quell'energia.



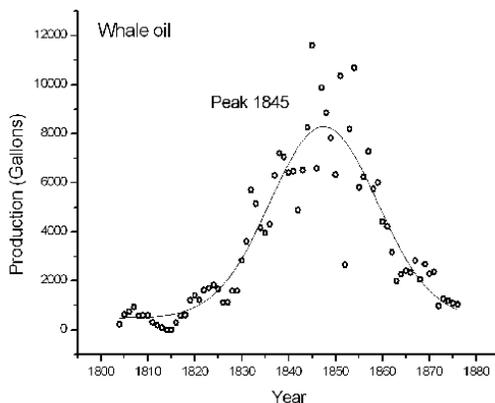
Anche nel caso dei minerali, dunque, ci aspettiamo un picco di Hubbert che, in questo caso, potrà essere dovuto alla combinazione di due fattori: uno è il graduale esaurimento del minerale stesso; l'altro il graduale esaurimento delle fonti energetiche necessarie per l'estrazione. Al momento, sembra che svariati metalli importanti per la tecnologia moderna abbiano raggiunto il loro picco mondiale di produzione per l'uno o l'altro dei due fattori. (Bardi e Pagani, 2007)

Mentre nel caso del mercurio si può arguire che la riduzione della produzione è dovuta alla graduale rinuncia all'utilizzazione per problemi di tossicità, questo non è il caso degli altri metalli. Nella figura a lato, vediamo il caso del gallio, minerale molto importante per

l'industria elettronica, che mostra un evidente picco di produzione, nonostante che la domanda si mantenga molto forte e in crescita.

È vero comunque che i metalli non scompaiono una volta utilizzati; diventano semplicemente più dispersi. In teoria, potremmo estrarli anche da sorgenti estremamente disperse, posto che potessimo permetterci le enormi quantità di energia necessarie. Ma quali sono i limiti di un'idea del genere? Per dare un'idea del problema consideriamo che l'estrazione delle 15 milioni di tonnellate di rame estratte annualmente nel mondo da minerali a circa il 2% di concentrazione richiede circa lo 0.2% del totale della produzione mondiale di energia primaria (450 EJ (exajoule)/anno) (Bardi 2007(1)). Se volessimo invece estrarre il rame dalla crosta terrestre indifferenziata, dove la concentrazione è di circa 25 parti per milione (25 ppm) (Wikipedia 2007), per estrarre 15 milioni di tonnellate all'anno, avremmo bisogno di qualcosa come 6.000 EJ, più di un ordine di grandezza maggiore dell'attuale produzione di energia primaria mondiale. Valori simili si ottengono per altri metalli, come il piombo, lo zinco e altri, la cui concentrazione nella crosta terrestre è simile a quella del rame.

Ovviamente, è impossibile mantenere i ritmi attuali di estrazione con le fonti di energia di cui disponiamo adesso, i combustibili fossili. Estrarre minerali dagli oceani sarebbe meno costoso in termini energetici, ma le difficoltà tecnologiche e pratiche sono immense e, nella maggior parte dei casi, le quantità di minerali disciolte sono troppo piccole per sostenere a lungo la civiltà industriale.



Il caso delle risorse biologiche è diverso da quello dei metalli dato che, in principio, le risorse biologiche sono rinnovabili. Tuttavia, la differenza è minore di quanto non possa sembrare a prima vista. La velocità di riproduzione di uno stock di una specie animale o vegetale è direttamente proporzionale al numero di individui in vita. Se il prelievo è molto grande, si ha una diminuzione non solo del numero di individui ma anche della capacità dello stock di ritornare ai numeri iniziali. Questo può portare a un rapido collasso della risorsa, che si comporta come se non fosse rinnovabile. Ci sono stati molti casi storici di collasso totale che vanno anche sotto il nome di "estinzioni". Questo è stato il caso, per esempio, della caccia alle balene nel secolo diciannovesimo. La curva

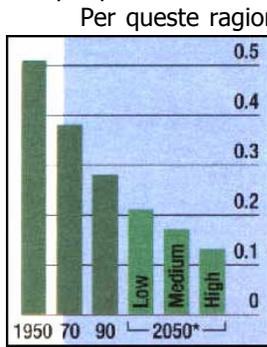
di produzione di olio di balena (vedi in alto) ha seguito una classica curva di Hubbert, tipica di materie prime non rinnovabili (Bardi 2006, 1). Non si è arrivati, in questo caso, all'estinzione completa delle specie cacciate,

ma si riporta che la specie "balena franca" era ridotta a solo una cinquantina di esemplari verso la fine dell'800, quando misure restrittive della caccia ne hanno impedito lo sterminio totale. La balena franca non è mai più ritornata ai numeri di prima della fase di caccia intensiva.

Sfruttare una risorsa più rapidamente di quanto questa possa rinnovarsi porta alla condizione detta "overshoot," ovvero "sovrasfruttamento", un termine usato per la prima volta in questo senso da Catton nel 1982. I modelli economici comuni raramente considerano il problema del sovrasfruttamento delle risorse. Nelle ipotesi che si fanno normalmente, l'economia si trova sempre in una condizione di equilibrio per cui la graduale riduzione della disponibilità di una risorsa si riflette sul suo prezzo in modo tale da evitare il sovrasfruttamento. Tuttavia, questa conclusione si basa su un certo numero di ipotesi che sono poco realistiche. Spesso i modelli assumono che gli operatori che gestiscono la risorsa tendano a ottimizzarne lo sfruttamento a lungo termine e che abbiano una completa conoscenza dell'ammontare delle risorse stesse. In pratica, in molti casi gli operatori non conoscono con esattezza l'ammontare totale delle risorse che stanno sfruttando e quasi sempre non hanno nessun interesse a ottimizzare lo sfruttamento in un'ottica di lungo termine.

Nel caso dell'agricoltura, gli esseri umani hanno preso il controllo del processo riproduttivo delle piante e questo fa sì che il fattore di esaurimento che vale per la pesca non esista. In teoria, l'agricoltura è una risorsa rinnovabile. Ma, anche qui, tuttavia, la rinnovabilità è soltanto teorica. Uno dei motivi è che l'agricoltura moderna fa grande uso di derivati dei combustibili fossili, in forma di fertilizzanti, pesticidi, e combustibili per le macchine agricole. Un altro è che l'agricoltura consuma gradualmente il suolo fertile che si riproduce abbastanza lentamente da poter essere considerato come una risorsa non rinnovabile.

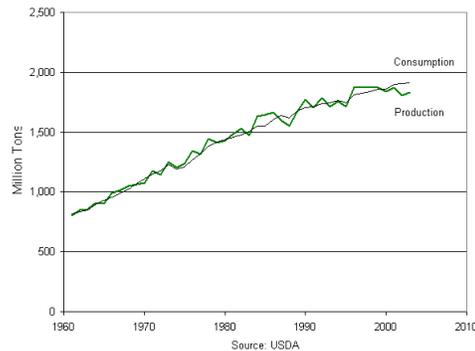
Oggi, la distruzione del suolo fertile è arrivata a livelli mai sperimentati da società del passato e, nonostante tutta la tecnologia disponibile, non è possibile ricostituire l'humus del suolo in tempi brevi. A questo si aggiunge la cementificazione del suolo che sta intaccando in modo sostanziale la disponibilità di terreni fertili. Per queste ragioni, l'estensione di terreno arabile per persona si sta continuamente riducendo; negli ultimi 30 anni, secondo la FAO, è sceso da 0.35 ettari a persona a meno di 0.25. Questa è una tendenza certamente non sostenibile. In basso, la figura presa da (FAO 2007) dove la scala verticale è in ettari per persona.



Per queste ragioni, vediamo che la produzione di cereali sta mostrando un andamento che sembra indicare che si sono raggiunti i limiti dell'espansione della produzione e che, probabilmente, andiamo incontro a una tendenza alla diminuzione in un futuro non lontano (Brown 2006). (in basso: produzione e consumo mondiale di grano secondo i dati USDA).

Questa dei cereali è solo un elemento del generale fenomeno di sovrasfruttamento delle risorse planetarie. Il sovrasfruttamento è strettamente correlato al concetto di "sostenibilità" e "impronta ecologica", come definita, per esempio, da Wackernagel (2001). Una risorsa il cui sfruttamento viene limitato entro la capacità della risorsa

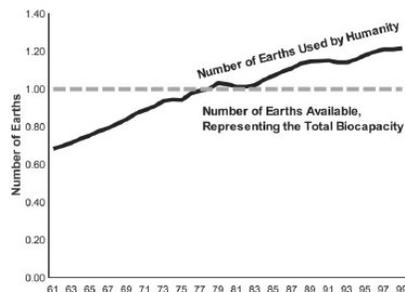
World Grain Production and Consumption, 1961-2003



di rinnovarsi può essere usata per tempi indefiniti e, in questo caso, si parla di sfruttamento sostenibile. Al contrario, la produzione di una risorsa sovrasfruttata deve necessariamente calare sotto questo livello a causa dell'esaurimento delle riserve accumulate da processi geologici o biologici precedenti. E' noto (Wackernagel 2001) che nei primi anni 1980 il prelievo di risorse

dall'ecosistema terrestre da parte

dell'economia umana ha ecceduto la capacità del sistema di riformarsi. Al momento, l'umanità sta utilizzando risorse a un ritmo tale che sarebbe necessario più di un pianeta per sostenere il prelievo. E queste considerazioni non tengono conto delle risorse non rinnovabili che, per definizione, sono sovrasfruttate dal primo istante in cui si comincia a utilizzarle- Questa situazione, ovviamente, non può durare a lungo. (figura a lato, da Wackernagel, 2001)



1.3 Ambiente

Uno dei problemi che ci troviamo di fronte nella situazione attuale è la difficoltà di quantificare in senso economico quell'entità che chiamiamo "ambiente", allo stesso modo in cui si quantifica il valore delle risorse minerali e di quelle agricole. Le scienze economiche, così come sono concepite oggi, non attribuiscono un valore a entità che non fanno parte del circuito dell'economia umana. Il petrolio che si trova in un pozzo ha un valore quantificabile, ma risorse come l'aria pulita, l'acqua limpida, la diversità genetica delle specie, sono "economicamente impalpabili"; non registrano nel computo generale delle risorse. Per dirla in altri termini, la macroeconomia attuale non attribuisce alle risorse naturali un costo diverso da zero e, pertanto, il maggior indicatore economico oggi utilizzato, il Prodotto Interno Lordo, non tiene conto del loro esaurimento. La conseguenza, che è sotto gli occhi di tutti, è il progressivo allontanamento dell'economia mondiale da una situazione di reale sostenibilità basata sui limiti delle risorse.

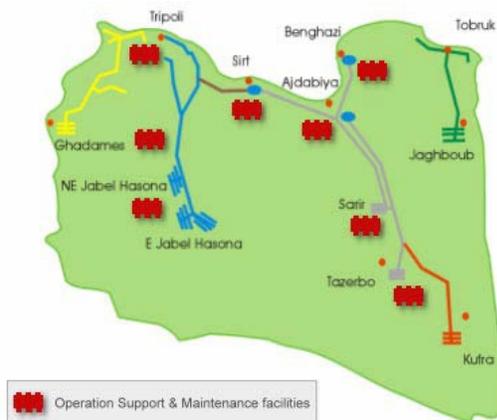
L'incapacità di inserire il valore dell'ambiente nella contabilità di un'attività economica è probabilmente insita nel modo di pensare degli esseri umani fin dai tempi di quando i nostri antenati erano cacciatori e raccoglitori nomadi. Fino a quando la densità di popolazione è molto bassa, come era a quei tempi, non aveva molto senso attribuire un valore alle risorse ambientali. Che fossero bacche delle foreste o mammoth delle pianure, le si potevano semplicemente prelevare senza che lo stock delle stesse ne fosse significativamente intaccato. Ma, con l'aumento della popolazione, il prelievo di risorse non è più a costo zero. I nostri antenati non devono essersi resi conto del problema, dato che i mammoth, come molte altre specie, si sono estinti quasi certamente a causa della caccia umana.

Questa incapacità di quantificare il valore di una risorsa comune è la ragione di fondo di quel fenomeno che viene chiamato "la tragedia dei commons", un termine reso popolare dal lavoro di Garrett Hardin nel 1966. Hardin si riferiva a un ipotetico pascolo gestito come una risorsa comune, ovvero dove ogni pastore è libero di portare il suo gregge a pascolare. Dal punto di vista del pastore, in queste condizioni ogni pecora in più porta un beneficio economico addizionale. Allo stesso tempo, tuttavia, un numero eccessivo di pecore danneggia la capacità dell'erba di ricrescere. Il danno fatto dalla pecora addizionale, tuttavia, si ripartisce su tutti i pastori mentre il beneficio va al solo possessore della pecora. Ne consegue che, per ogni singolo pastore, aggiungere una pecora in più al gregge è sempre conveniente. Finché ci sono pochi pastori, questo non causa nessun problema. Ma con l'aumentare del numero dei pastori, si arriva a un punto in cui il risultato finale è la distruzione del pascolo per sovrasfruttamento.

Il concetto di Hardin è molto semplificato e non si applica ai pascoli reali dove, nei casi storici noti, si arriva a delle forme di accordo per evitare il sovrasfruttamento. Tuttavia, lo vediamo accadere in alcuni casi, specialmente nell'ambito della pesca commerciale. Già nel 1954, Scott Gordon aveva esaminato il problema nell'ambito della pesca oceanica, dimostrando che, in una condizione di libero mercato, i pescatori tendevano a comportarsi in modo da sovrasfruttare le risorse. Nella visione classica dell'economia, si descrive questo fenomeno tenendo conto che l'obiettivo di ogni operatore è di massimizzare il proprio

profitto a breve termine. Questo assunto teorico è una buona approssimazione del comportamento reale degli operatori. In termini tecnici, i pascoli comuni, così come le aree peschere del mare, non possono produrre un "affitto" (rent).

La difficoltà di contabilizzare certe risorse si vede in molti esempi. Per esempio, il governo libico si è impegnato negli ultimi anni a trasformare i profitti delle vendite di petrolio e di gas naturale in un grande impianto di irrigazione: "il grande fiume fatto dall'uomo." Si tratta di un sistema di pompe e tubature che è destinato a portare l'acqua dell'acquifero sotterraneo sahariano alle città sulla costa. Dal punto di vista economico, i libici hanno ragionato che pompare acqua dall'acquifero costa meno che dissalarla dal mare. Questo è vero perché il valore economico dell'acqua



dell'acquifero si assume come uguale a zero finché non viene estratta.

Ma l'acquifero sahariano è il risultato di piogge cadute parecchie migliaia di anni fa e che, oggi, non cadono più. Per quanto tempo il grande fiume fatto dall'uomo continuerà a sgorgare? Nessuno lo sa

esattamente, forse decenni, forse secoli, ma la cosa sicura è che finirà per inaridirsi. Molto prima, vedremo scomparire totalmente il lago Chad, nel Sahara, che è formato da acqua proveniente da questo acquifero. Allora, come dovremmo valutare in termini monetari queste risorse non rimpiazzabili? Quanto vale il lago Chad? Certamente dovremmo valutare ben di più di zero queste cose e, se questo tipo di valutazione fosse stato fatto, i libici non si sarebbero probabilmente lanciati in questa impresa. Sarebbe stato molto meglio utilizzare energia rinnovabile per dissalare acqua di mare, anche quella rinnovabile.

Se nel caso dell'acquifero sahariano si parla di acqua disponibile per molti secoli (forse), ci sono molti esempi di sfruttamento sconsiderato di acquiferi non rinnovabili che stanno arrivando ai loro limiti. Per esempio, l'intera agricoltura delle Grandi Pianure degli Stati Uniti dipende dall'acqua estratta dall'acquifero di Ogallala, che sta mostrando segni preoccupanti di esaurimento dopo circa un secolo di sfruttamento. Intere città, come Tucson in Arizona, dipendono quasi completamente dall'acqua dell'acquifero. La mancanza di percezione del valore dell'acqua che ancora rimane fa sì che si continuino a fare piani di crescita economica e demografica di una città che ha già quasi un milione di abitanti e dove fra pochi anni il problema dell'acqua diverrà drammatico.

Il fatto che la valutazione di certe risorse naturali dovrebbe essere maggiore di zero è uno degli assunti dell'insieme di idee che va sotto il nome di "capitalismo naturale" (Hawken 2007). Tuttavia, il concetto che l'ambiente ha un valore è ancora lontanissimo da essere entrato nella testa dei pianificatori. Questo conduce a un grave problema di sovrasfruttamento di risorse ambientali che sono percepite come a costo zero, e quindi virtualmente "infinite", ma che in realtà sono limitate e non rimpiazzabili. Alcune di queste sono (ancora in ordine alfabetico):

1. Acqua potabile dagli acquiferi non rinnovabili
2. Capacità dell'atmosfera di assorbire i prodotti della combustione dei fossili (problema del riscaldamento globale)
3. Capacità dell'ambiente di degradare i rifiuti solidi e liquidi dell'attività industriale (problema dell'inquinamento e della gestione dei rifiuti)
4. Diversità genetica di piante e di animali
5. Estensione delle aree edificabili

Tutte queste risorse ovvero hanno valore monetario uguale a zero – o comunque molto basso – fino a che non sono sfruttate. Per esempio, il terreno non edificato vale enormemente meno di quello edificato. Questo ha portato a una vera esplosione di edificazione a livello planetario. Eliminare un pezzo di area fino ad allora non edificata dovrebbe influire sul il valore di quello che rimane, che si fa più scarso. Tenendo conto di questo fattore, ulteriori edificazioni dovrebbero diventare progressivamente più costose. Ma costruttori, amministratori e pubblico, tutti quanti sembrano operare in base alla convinzione che il terreno edificabile sia infinito.

Che questo non sia vero, e che il problema dell'esaurimento delle aree edificabili si stia ponendo, lo si può verificare dai dati disponibili. Leggiamo in un articolo di Maria Cristina Treu (2006) che

Secondo i dati Eurostat, in Italia nell'ultimo decennio del ventesimo secolo le costruzioni hanno sottratto all'agricoltura circa 2.800.000 ha di suolo. Ogni anno si consumano 100.000 ha di campagna, pressochè il doppio della superficie del Parco Nazionale dell'Abruzzo. D'altra parte l'Italia è anche il primo paese d'Europa per disponibilità di abitazioni; ci sono circa 26 milioni di abitazioni, di cui il 20% non sono occupate, corrispondenti a un valore medio di 2 vani a persona. Ciononostante, il suolo agricolo è sempre ritenuto potenzialmente edificabile: in alcune regioni è necessario disporre di almeno un ettaro di terreno di proprietà per farsi una casa, in altre bastano 5000 o 3000 mq, a volte anche non accorpati, e spesso senza l'obbligo di registrare, a costruzione avvenuta, l'utilizzo del diritto edificatorio su una parte o sull'intera proprietà.

L'Italia sembra essere un paese fra i più impegnati nella pavimentazione del proprio territorio. Secondo i dati dell'associazione italiana tecnico economica cemento (AITEC) si producono oggi oltre 48 milioni di tonnellate di cemento l'anno (AITEC 2006), in maggior parte utilizzate in Italia. Questo equivale a 830 kg di cemento a persona all'anno per 58 milioni di Italiani. Per visualizzare questo ammontare, dobbiamo pensare che qualcuno depositi un blocco di quasi 10 kg di cemento tutte le mattine sulla soglia di casa di una famiglia di 4 persone. La Cina, paese in grande espansione economica, produce meno cemento per persona dell'Italia: 730 kg a persona (Aggregate Research, 2006) In tutto il mondo si producono oggi circa 2.3 miliardi di tonnellate di cemento all'anno (econsmartconcrete, 2006), il che corrisponde a 340 kg all'anno per persona.

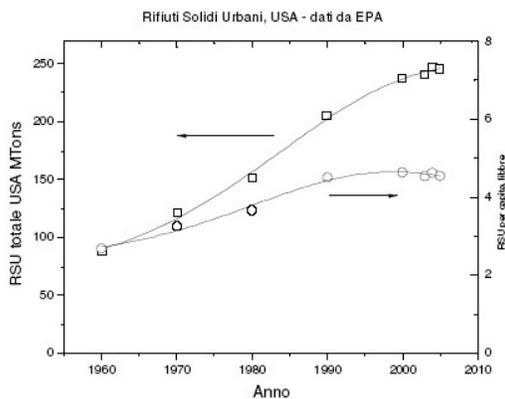
Secondo Treu (2005), circa 1000 km² di territorio vengono cementificati in Italia ogni anno. Su una superficie totale è di 300.000 km² del territorio italiano, questo vuol dire cementarne l'1% in tre anni. A questi ritmi, una persona che vive 75 anni potrà vedere nel corso della sua vita la cementificazione di un quarto del totale del territorio. Tuttavia, dobbiamo considerare anche fattori come la frazione già cementata, l'espansione economica prevista da tutti coloro che si occupano di pianificazione, il fatto che il dato di Treu potrebbe essere ottimistico (il WWF parla di 1500 km² all'anno pavimentati), nonché il fatto che non tutto il territorio è pavimantabile. Infine, notiamo che il 35% del territorio italiano è montagna, il 42% collina e solo il 24% pianura. La perdita di suolo in pianura procede a ritmi sicuramente più elevati, soprattutto in zone critiche come i fondovalle. A questi ritmi, in un secolo o forse anche meno l'Italia potrebbe essere trasformata in un unico tappeto di cemento, attraverso il quale spuntano le cime degli Appennini e delle Alpi. Questo, ovviamente, non si verificherà ma è interessante notare che, dal punto di vista della teoria economica corrente, una cosa del genere non farebbe che aumentare il prodotto interno lordo (PIL) e quindi la prosperità della nazione.

Lo stesso problema di sovrasfruttamento si trova nel caso dei rifiuti solidi urbani e industriali. Anche qui, il problema nasce da una situazione inizialmente gestita in termini di "beni comuni", ovvero dove lo spazio utilizzato per le discariche era a costo zero. Qui, tuttavia, l'enorme espansione della produzione di rifiuti ha fatto sì che gli spazi disponibili cominciassero ad essere percepiti come insufficienti. Non si sa che valore economico dare al puzzo di una discarica mal gestita, ma certamente ha un valore negativo per chi abita nella zona. Questo ha generato una serie di conflitti che indicano come non sia possibile ulteriormente considerare lo spazio occupato dalle discariche come un "commons" libero per tutti.

L'evoluzione della questione rifiuti è interessante dato che uno degli approcci è stato, ed è tuttora, quello di mantenere la caratteristica di bene comune a costo zero dello "spazio rifiuti." Si è cercato di spostare il problema da un commons ormai sovraccarico, quello delle discariche, a uno percepito come ancora abbondante, ovvero l'atmosfera. Si è quindi cercato di sostituire le discariche con gli inceneritori.

Senza dubbio, il fascino di questa idea risiedeva, e risiede, nell'apparente capacità degli inceneritori di fare magicamente scomparire i rifiuti. Ma gli amministratori, e il pubblico che li vota, non sembrano essersi ricordati del principio di conservazione della massa, già scoperto da Lavoisier nel '700. Il rimedio, come succede spesso, si è rivelato molto peggiore del male dato che il commons che è l'atmosfera è risultato assai più ingombro di quello delle buche per terra che sono le discariche. Gli inceneritori sono risultati costosi e causano una serie di guai. Uno è l'emissione di inquinanti pericolosi, che si possono controllare ma mai eliminare del tutto. In particolare, molta preoccupazione deriva dall'emissione di particolato molto fine, le cosiddette "nanoparticelle" (Bardi 2006 (2)) del cui effetto sulla salute umana si sa ancora poco ma che sarebbe bene non trascurare. Inoltre, gli inceneritori usano la plastica come uno dei componenti principali del combustibile e questo porta all'emissione di biossido di carbonio di origine fossile, con il conseguente incremento irreversibile a breve termine della sua concentrazione nell'atmosfera.

Il problema dei rifiuti è oggi molto discusso, ma potrebbe essere meno grave di quanto non sembri. La produzione di rifiuti è strettamente legata alla disponibilità di materie prime e di energia. Essendo queste



ultime in difficoltà, anche la produzione di rifiuti sembra essere prossima al suo culmine e a iniziare un declino (Bardi 2007, (2)). Nella figura accanto, vediamo le tendenze per gli Stati Uniti. La produzione di rifiuti in termini di peso prodotto per persona ha raggiunto un massimo già verso il 1999 ed è oggi in declino. Quella assoluta sta ancora crescendo, ma sempre più lentamente e probabilmente raggiungerà fra breve tempo un picco. L'Italia sta seguendo un'evoluzione simile. Questa riduzione della produzione di rifiuti è un'evoluzione positiva sotto molti aspetti, ma è anche vero che produrremo zero rifiuti soltanto quando la produzione industriale sarà ridotta a zero, e questo potrebbe non essere il migliore dei mondi possibili.

Il massimo problema dell'incapacità di dare un valore economico a risorse comuni si trova nella questione del riscaldamento globale. Per secoli, l'atmosfera è stata considerata un bene comune ; ovvero di valore economico zero. Ne consegue che il costo di immettere nell'atmosfera gas di rifiuto dell'attività umana aveva, anch'esso, un costo zero. Ne è risultato il problema del riscaldamento globale dovuto al fatto che il gas principale che deriva dalla combustione dei fossili, CO₂, è un gas-serra, ovvero un gas in grado di trattenere la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre. La combustione di fossili nell'ultimo

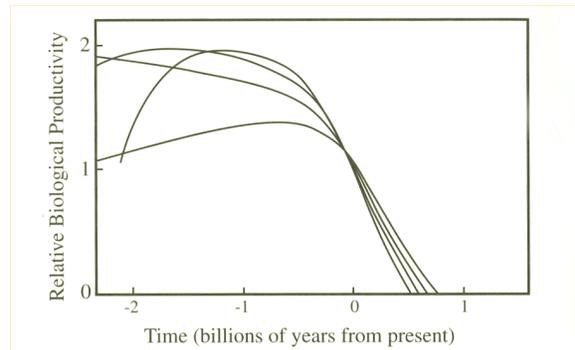
secolo ha causato un considerevole aumento della concentrazione di CO₂ e questo deve necessariamente sbilanciare il rapporto fra energia solare in ingresso e in uscita sulla superficie del pianeta, ovvero causare un riscaldamento dell'atmosfera. Gli effetti principali di questo fenomeno non si sono ancora fatti sentire in modo molto intenso, il riscaldamento globale osservato fino ad oggi è inferiore a un grado centigrado in media. Tuttavia, le proiezioni per il futuro dell'integovernmental panel for climate change (IPCC) sono estremamente preoccupanti.

La questione del riscaldamento globale è stata ampiamente discussa ed è oggi oggetto di un acceso dibattito. Perciò non entreremo nei dettagli in questa sede. Vale la pena, tuttavia, di notare come il fatto che l'attività umana abbia un effetto importante sulla temperatura planetaria è spesso estremamente difficile da accettare per via di un modo di pensare diffuso. Così come sembra impossibile che a furia di costruire case si finisca per non avere più posto per costruirne altre, sembra essere inaccettabile che l'uomo possa modificare il pianeta in modo così profondo. Per alcuni, sembra essere un'inversione della rivoluzione copernicana che ha detronizzato l'uomo dalla sua posizione di centro dell'universo.

Eppure, una delle grandi rivoluzioni scientifiche degli ultimi decenni è stata la scoperta dei meccanismi di feedback (retroazione) planetari che hanno fatto sì che il pianeta sia rimasto entro limiti di abitabilità per le specie viventi durante i passati 3 miliardi di anni, e abitabile per le specie terrestri per i passati 540 milioni di anni, il periodo che chiamiamo fanerozoico. Il pioniere in questo senso, il Copernico di questa rivoluzione, è stato James Lovelock, con il suo concetto di "omeostasi planetaria", sviluppato già negli anni 1960. Secondo questo concetto, a cui Lovelock dette il nome di "Gaia", la temperatura dell'atmosfera è regolata da un feedback che coinvolge la concentrazione di biossido di carbonio come gas serra. La visione di Lovelock era ancora molto semplificata e ci sono voluti decenni di lavoro per scoprire le complesse interazioni fra geosfera e biosfera. Queste interazioni fanno sì che il pianeta abbia mantenuto un clima accettabile fino ad oggi, nonostante che l'irradiazione solare sia aumentata di circa il 6% dall'inizio del periodo fanerozoico.

Oggi, sappiamo che la regolazione del clima terrestre è un meccanismo delicato che, nella storia del pianeta, è andato più di una volta fuori controllo trasformando la terra in una palla di ghiaccio o in un deserto rovente. Non solo, ma sappiamo anche che ci sono limiti fondamentali alla capacità dell'omeostasi planetaria di mantenere le condizioni di abitabilità planetaria. Secondo i dati disponibili, il nostro pianeta è già in netto declino in termini di produttività biologica. Lo si vede nella figura a destra (Ward 2002) dove si confrontano i risultati di diversi modelli.

C'è un'evidente incertezza nei risultati, ma è chiaro che il massimo fulgore planetario risale ormai a centinaia di milioni di anni fa. Il lento declino della produttività è dovuto al fatto che gli equilibri dinamici dei cicli biologici non riescono più a compensare l'aumento dell'irradiazione solare. In qualche centinaio di milioni di anni, la biosfera è destinata a scomparire. Molto prima, forse in non più di cento milioni di anni, i vertebrati scompariranno. Questo non è un problema che ci tocca al momento, ma è interessante per mettere le cose in prospettiva. Fra le altre cose, non è impossibile che l'estinzione accelerata causata dall'uomo non anticipi nettamente eventi che normalmente non si verificherebbero.



Decisamente, il nostro pianeta non è un'entità stabile che possiamo identificare come il migliore dei mondi possibili. Al contrario, potrebbe essere in una condizione di equilibrio instabile che aspetta soltanto una piccola perturbazione per spostarsi in una condizione che potrebbe essere per noi estremamente spiacevole. Il riscaldamento globale potrebbe fare danni immensi ed essere il pericolo maggiore per la sopravvivenza della specie umana su questo pianeta.

Per concludere, possiamo considerare l'interazione fra popolazione umana e ambiente. E' ben noto come la crescita della popolazione è stata quasi esponenziale negli ultimi secoli. Tuttavia, negli ultimi decenni, quella che sembrava una crescita esponenziale inarrestabile sta rapidamente rallentando e potrebbe darsi che si raggiunga un massimo, per poi declinare, in tempi abbastanza brevi. Molte regioni del mondo, tipicamente quelle dei paesi ricchi, hanno superato quella che viene chiamata la "transizione demografica" che consiste in una rapida riduzione dei tassi di fertilità. In molti paesi questi tassi sono oggi ben al di sotto del limite necessario per mantenere la popolazione costante (2.1 figli per donna) (Brown 2006). In Italia, per esempio, il numero di figli per donna è intorno a 1.3.

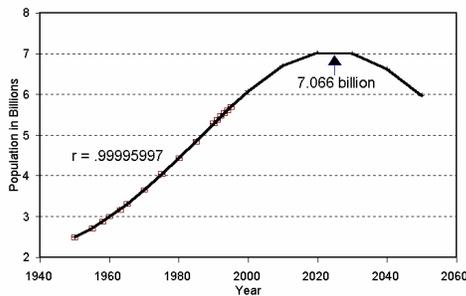
Evidentemente, il comportamento degli esseri umani in termini di riproduzione è molto diverso da quello della maggior parte delle altre specie che, normalmente, si riproducono in modo semplicemente

proporzionale alla quantità di risorse alimentari disponibili. Gli esseri umani, viceversa, sembrano riprodursi di meno dove le risorse sono più abbondanti, ovvero nei paesi ricchi.

L'inversione della tendenza alla crescita della popolazione viene detta "transizione demografica" e viene spesso correlata al livello di istruzione di una popolazione. Si ritiene che in una popolazione istruita, e in particolare una popolazione dove le donne sono istruite, la tendenza a fare molti figli venga ridotta da vari fattori, incluso il fatto che una parte del periodo fertile femminile viene passato a scuola. Tuttavia, spiegazioni alternative sono possibili. Secondo Virginia Abernethy (1993) la fertilità umana non è determinata direttamente dalle risorse disponibili, ma dalla percezione di quale sarà la disponibilità di risorse nel futuro. Questa percezione si basa su una valutazione della *relativa* abbondanza di risorse nel presente e nel futuro. In un paese ricco, si percepisce che un'ulteriore rapida crescita della ricchezza è improbabile. Al contrario, un paese povero può trovarsi in una fase di rapida crescita e la percezione dei suoi abitanti può essere che il futuro porterà condizioni di vita molto migliori del presente. Questo è particolarmente vero per quelli che emigrano da un paese povero a un paese ricco, i quali si trovano catapultati in una situazione di relativa ricchezza e pertanto hanno una visione più ottimistica del loro futuro. Questa sembrerebbe essere la ragione per la fertilità maggiore degli immigrati rispetto alla popolazione autoctona.

Un'interpretazione alternativa è che la transizione demografica è dovuta a un effetto diretto dell'inquinamento sulla fertilità umana. Ci sono alcuni studi (Butler 2004) che indicano che molti inquinanti (metalli, ozono, e altri) hanno l'effetto di ridurre la quantità e la qualità dello sperma maschile. Non ci sono dati a sufficienza per provare questa ipotesi, ma potrebbe essere, in effetti, che i paesi industrializzati hanno mostrato prima la transizione dato che i loro abitanti sono stati esposti per primi agli inquinanti. La transizione si starebbe oggi trasferendo ai paesi più poveri insieme ai rifiuti industriali che vengono anch'essi trasferiti nelle parti più povere del mondo.

Figure 2. World Population Convex Growth Projection 1950-2050



Comunque si vogliano interpretare le cose, sembra che tutte le regioni del mondo seguano curve di popolazioni simili, ovvero con una transizione demografica verso una bassa natalità. Questa transizione è già avvenuta in Occidente e sta avvenendo oggi nei paesi poveri. La fase di rapida crescita demografica che è stata la regola negli ultimi secoli sembra avviarsi a una fine e a una netta inversione di tendenza. Le proiezioni sul limite massimo di popolazione che potrebbe essere raggiunto sulla Terra sono molto varie, ma si assestano spesso al di sotto dei 10 miliardi di persone. Il picco reale della popolazione potrebbe essere molto più basso e di poco superiore al livello attuale di circa sei miliardi e mezzo di individui. Nella figura a lato, vediamo come esempio una

proiezione a opera di Blain (2007). Altri autori proiettano su numeri più alti, ma il concetto non cambia molto.

I concetti economici oggi comunemente accettati vedono l'incremento della popolazione umana sempre come un valore positivo, e il calo demografico, viceversa, come un valore negativo. Su questo punto, l'economia sembra essere d'accordo con una certa visione religiosa che vede la frase "crescete e moltiplicatevi" della Genesi (1,28) come da applicarsi alla lettera ancora oggi. Una corrente di pensiero opposta è nata negli anni 1960 per sostenere invece che l'incremento della popolazione ai livelli attuali è dannoso per l'ambiente e per l'umanità stessa. Queste due correnti di pensiero hanno portato ad azioni legislative di segno opposto a seconda delle condizioni di sovrappopolazione percepite. In Occidente è tradizionale incoraggiare le famiglie numerose, in Oriente, alcuni paesi come l'India e la Cina hanno tentato politiche di riduzione della natalità basate anche su provvedimenti coercitivi. I risultati di queste politiche pro o anti natalità non sembrano aver influenzato sensibilmente l'andamento della popolazione che ha seguito approssimativamente le stesse curve in tutti i paesi, anche se scalate differentemente nel tempo.

La domanda rilevante a proposito della popolazione umana è se anche questa – come altri elementi dell'economia umana – si trova in overshoot, ovvero in una condizione di insostenibilità rispetto al possibile flusso di risorse alimentari che l'agricoltura sarà in grado di produrre nel futuro. Le incertezze su questo punto sono molto forti ma, secondo Cohen (1996), non sarebbe impossibile nutrire una popolazione come l'attuale, e anche superiore, per mezzo di un'agricoltura sostenibile. Questo richiede che l'agricoltura venga gestita con cura ed efficienza, che si evitino gli sprechi di risorse attuali, fra i quali il consumo su larga scala di proteine di origine animale.

Ovviamente, l'agricoltura attuale è tutto fuori che sostenibile e la carenza di derivati dei combustibili fossili è destinata a ripercuotersi negativamente sulle rese agricole nel prossimo futuro. A sua volta, questa riduzione delle rese, accoppiata con l'aumento dei costi del trasporto, si ripercuoterebbe pesantemente sulle disponibilità alimentari, come già sta accadendo oggi nei paesi più poveri. In questo caso, la naturale

tendenza alla riduzione della natalità in atto al giorno d'oggi potrebbe non essere sufficiente a evitare una riduzione traumatica della popolazione umana causata dalla carenza alimentare.

1.4 Effetti sociali

La serie di crisi delle quali abbiamo parlato fino ad ora non può non impattare, e non aver impattato, sulle strutture economiche e sociali della nostra società. Tuttavia, l'analisi sui rapporti fra disponibilità di risorse e strutture sociali è sostanzialmente mancante o, comunque, superficiale. L'opinione generale sembra essere che, dato che il prodotto interno lordo (PIL) continua ad aumentare nelle società industrializzate, ne consegue che tutto va bene e non c'è ragione di preoccuparsi per le risorse.

Tuttavia, l'analisi basata sul PIL potrebbe non essere sufficiente per cogliere i grandi cambiamenti che si stanno verificando nella nostra società. Esistono altri indicatori che ci dicono che la grande crisi del petrolio degli anni 1970 potrebbe aver marcato il punto d'inizio di un'evoluzione verso sempre maggiori differenze sociali, invertendo una tendenza a una sempre maggiore uguaglianza che durava da circa un secolo.

La distribuzione del reddito nella società è qualcosa che si può misurare quantitativamente. Il metodo più comune si basa sull' "Indice di Gini", un numero che può andare da 0 a 1 (0, alle volte, viene dato in valori percentuali, dallo 0% al 100%). Un valore di zero dell'indice indica una situazione di uguaglianza assoluta. Un valore di 1, invece, corrisponde alla situazione opposta; ovvero pochi nobili

Fig. 1
INDICE DI GINI NEGLI STATI UNITI
(valori percentuali)

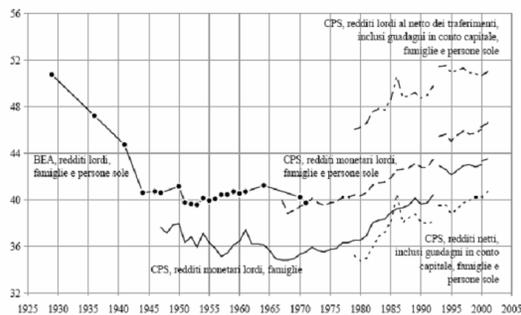
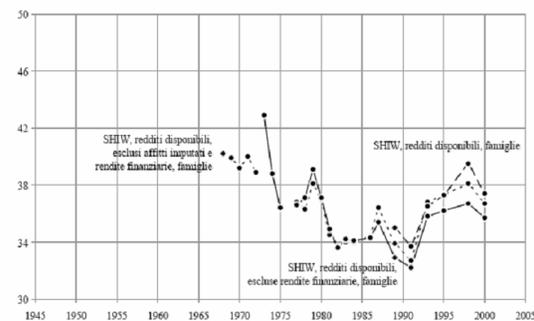


Fig. 5
INDICE DI GINI IN ITALIA
(valori percentuali)



ricchissimi e il resto servi della gleba. Come è ovvio, nessuno di questi due estremi si trova nelle società occidentali moderne che hanno indici di Gini che vanno, più o meno, fra 0.3 e 0.5. I paesi dell'Europa del Nord sono quelli che hanno il Gini più basso, sotto 0.3 mentre negli Stati Uniti siamo su valori maggiori di 0.4. In Italia, abbiamo un valore intermedio (circa 0.35) ovvero le differenze sociali da noi sono minori che negli Stati Uniti, ma più ampie che in molti paesi europei. Le figure a lato sono tratte da Targetti-Lenti (2005)

Un fenomeno poco noto che l'indice di Gini evidenzia è l'aumento progressivo delle differenze sociali in tutti i paesi occidentali. E' da circa la metà degli anni 70 che l'indice di Gini ha cominciato ad aumentare negli Stati Uniti. I paesi Europei hanno seguito la tendenza con qualche anno di ritardo, mentre in Italia l'indice di Gini ha cominciato a salire a partire dai primi anni '90. C'è stato un epocale cambiamento a partire dalla metà degli anni '70 con l'inizio di un fenomeno di trasferimento di ricchezza dai settori più poveri della società a quelli più ricchi. Per questo motivo, si parla della "grande inversione di marcia" ("The great U-turn") degli anni '70, un termine usato da due economisti Americani, Bennet Harrison e Barry Bluestone (1988), che per primi hanno notato la

tendenza.

Il quadro di incremento della disuguaglianza sociale che ci dipinge l'indice di Gini sembra andare contro la percezione generale della situazione economica che, invece, sembrerebbe essere che stiamo diventando tutti sempre più ricchi. Infatti, se esaminiamo l'indice economico più comune, il prodotto interno lordo (PIL), vediamo che in tutti i paesi occidentali il PIL per persona è in continuo aumento e non ha mostrato nessuna inversione di marcia. Secondo il PIL, nella media, stiamo diventando tutti più ricchi, ma il problema sta, appunto, nella "media". Il PIL soffre del problema di fondo di tutte le statistiche; aggrega insieme tutti gli elementi dell'economia e non è fatto per misurare spostamenti di ricchezza fra un settore della società a un altro.

Quindi, se è possibile che la ricchezza media della nostra società sia in aumento, sembrerebbe anche che le fasce sociali più deboli abbiano beneficiato soltanto in parte, o per niente, di questo aumento. Questa interpretazione è confermata dall'esame di altri indici economici più legati ad aspetti particolari della distribuzione del reddito. Per esempio, i salari minimi reali hanno seguito la stessa tendenza dell'indice di Gini, raggiungendo un massimo verso la metà degli anni '70 negli Stati Uniti, per poi calare progressivamente. Questo sembrerebbe indicare che i più poveri, ovvero quelli che vivono dei salari minimi, non solo non hanno beneficiato dell'aumento medio di ricchezza, ma sono diventati addirittura più poveri. E i salari minimi sono solo uno di una serie di indicatori economici che hanno mostrato la stessa inversione di tendenza. I salari medi, l'indebitamento delle famiglie, il debito pubblico e altri indici, hanno tutti cambiato tendenza insieme al Gini, indicando una condizione di stress generalizzato della società (vedi per esempio, Hodges (2007)).

Si tratta ora di domandarsi che cosa ha causato la grande inversione di marcia. Ci deve essere stato qualche cambiamento veramente importante negli anni '70 per aver invertito la tendenza a una maggiore uguaglianza sociale che, in Occidente, durava da più di un secolo. Le interpretazioni da parte degli addetti ai lavori sono molteplici e spesso si basano sui grandi cambiamenti dovuti allo sviluppo della globalizzazione. Secondo la teoria, la liberalizzazione dei mercati planetari ha messo in diretta concorrenza le fasce sociali più deboli di diversi paesi. Questo ha causato un effetto "vasi comunicanti" che ha colpito particolarmente i più poveri in Occidente, fino ad allora protetti dalle barriere doganali. Sicuramente, c'è qualcosa di vero in questa interpretazione. Rimane però da domandarsi come mai l'inversione di tendenza sia avvenuta proprio negli anni '70.

È possibile, in effetti, che il cambiamento epocale sia correlato alla crisi della disponibilità di petrolio degli anni 1970. La crisi non era un incidente di percorso; era il primo sintomo degli effetti sull'economia del graduale esaurimento planetario delle risorse minerali. Era davvero un momento epocale nella storia del petrolio e in tutta la storia economica planetaria. Manca un'analisi approfondita e quantitativa di questo fenomeno sull'economia mondiale, ma possiamo ipotizzare che l'incremento dei costi correlati all'esplorazione, sfruttamento, e raffinazione del petrolio e delle altre risorse fossili abbiano pesato sull'economia, sottraendo risorse ad altre attività. Come sappiamo dalla storia, quando si tratta di togliere risorse a qualcuno, la scelta cade sui più poveri. Non solo, ma la "guerra fra poveri" che ha colpito le fasce deboli in Occidente esposte alla concorrenza dei bassi salari dei paesi non occidentali è anche quella da correlare alla necessità di garantire l'accesso alle riserve petrolifere rimanenti abolendo o riducendo le barriere doganali.

Non possiamo provare questa ipotesi al di là di ogni dubbio, ma ci può servire come una possibile chiave interpretativa della situazione attuale. Indica che la carenza di risorse non è solo un problema per il futuro ma qualcosa che sta già avendo un profondo impatto sulla società e ne avrà sempre di più nel futuro.

2 Parte seconda: la grande transizione

L'impossibilità di mantenere i ritmi di produzione attuali di energia e materie prime, come pure l'impatto dell'attività umana sull'ambiente, ci fa pensare che il futuro vedrà dei grandi cambiamenti. Ma prevedere il futuro non è cosa facile e serve a poco cercare di vederlo nei fondi del caffè o nelle carte dei tarocchi. Tuttavia, esistono metodi abbastanza consolidati per farsi un'idea di quello che il futuro potrebbe essere. Il segreto della buona predizione è di non cercare profezie ma di generare un "ventaglio" di scenari che coprano le ragionevoli possibilità. Il futuro non si può veramente prevedere, ma di fronte al futuro si può essere preparati.

Così, abbiamo metodi predittivi che si sono rivelati utili e efficaci nel passato. Sfortunatamente, questi metodi prevedono che l'evoluzione più probabile delle tendenze attuali sarà il declino generalizzato dell'economia planetaria e per questa ragione sono poco popolari; specialmente fra i politici che per mestiere sono costretti a promettere cose belle per tutti. Tuttavia, non dobbiamo farci sopraffare dalle emozioni. Se la tendenza è verso un futuro non proprio buono, questo non vuol dire che non si possa operare per superare la crisi imminente e mantenere, o perlomeno evitare di perdere completamente, un livello di civiltà e di prosperità simile, o anche superiore, a quello dei tempi migliori. Ma non ci arriveremo automaticamente, dovremo lavorarci sopra.

2.1 Una società sostenibile

Il sistema economico non può rimanere a lungo nell'attuale condizione di sovrasfruttamento delle risorse. Esauriti gli stock accumulati da processi naturali che hanno operato per secoli, millenni, o anche milioni di anni, il sistema deve necessariamente adattarsi a un flusso sostenibile di materie prime.

Una società adattata alla disponibilità di risorse dovrebbe essere una società *stazionaria*. Una società del genere è stata oggetto degli studi, fra gli altri, di Georgescu Roegen (1971) Marion King Hubbert (1974) e Herman Daly (1977). Il concetto si è sviluppato, dando origine a una branca delle scienze economiche (vedi p.es. <http://www.steadystate.org/>). Al momento, un'economia stazionaria non è considerata come fattibile nel pensiero corrente, ma il problema non si può ignorare. Esistono dei limiti fisici alla crescita, perlomeno finché ci riferiamo alla superficie del pianeta Terra. Dati questi limiti, l'unica alternativa all'economia stazionaria sarebbe un'economia oscillante fra fasi di crescita e di decrescita, che non appare come una possibilità interessante.

E' probabile che una fase di decrescita sarà necessaria comunque per rientrare ai livelli di sostenibilità necessari per un'economia stazionaria. L'economia mondiale potrebbe "rientrare" (se possibile in modo dolce, www.rientrodolce.org) a condizioni di sostenibilità utilizzando due tipi di strategie 1) riducendo il prelievo delle risorse, 2) cambiando il tipo di risorse sfruttate. Nel primo caso si tratta di ridurre il prelievo ai livelli di sostenibilità tipici della risorsa, nel secondo di utilizzare una risorsa che permetta livelli di sfruttamento sostenibile più elevati. Il progresso tecnologico gioca un ruolo importante in queste strategie, permettendo di sfruttare in modo più efficiente certe risorse e di svilupparne di nuove. Certe risorse, come gli idrocarburi fossili, hanno un livello di prelievo sostenibile uguale a zero, e pertanto devono comunque essere sostituite prima o poi.

Date queste condizioni, ci sono molte possibilità diverse di concepire una società sostenibile. La strategia della riduzione del prelievo si può portare all'estremo nella concezione degli Amish americani, che ritengono che la società ideale è una società agricola che usa soltanto tecnologie del secolo diciannovesimo. Dalla parte opposta, il concetto di cambiare il tipo di risorse sfruttate ci potrebbe portare a pensare a una società sostenibile che utilizza risorse energetiche molto più abbondanti delle attuali; risorse che potrebbero arrivare, per esempio, dalla fusione nucleare del deuterio. Se, in aggiunta, si potesse sviluppare una tecnologia capace di trasformare questa energia in sostanze alimentari in modo più efficiente della fotosintesi clorofilliana non sarebbe impossibile pensare che il livello sostenibile dell'economia e della popolazione potrebbe essere molto più alto dell'attuale. In questo caso, vedremmo un effetto che potremmo chiamare la "trantorizzazione" del pianeta, ovvero quello di trasformarlo in un'unica distesa di cemento e di edifici. Il termine "trantorizzazione" deriva dalla descrizione che lo scrittore Isaac Asimov ci ha dato del pianeta Trantor, capitale dell'impero galattico della serie di romanzi del ciclo della "Fondazione." e che viene descritto come un pianeta completamente ricoperto di edifici su tutta la superficie. Ben oltre anche della

trantorizzazione si potrebbe arrivare con il concetto della "sfera di Dyson" (1960) che vuole che si possa adattare a condizioni ambientali compatibili con la vita umana l'intera superficie di un'immensa sfera che circonda il sole a distanza uguale a quella dell'orbita terrestre.

Qui, per non lanciarsi in scenari troppo lontani dal nostro modo di vedere le cose, ci limiteremo ad esaminare la possibilità di mantenere l'economia a un livello sostenibile che non sia troppo diverso dal nostro in termini di popolazione, di produzione industriale, produzione agricola e di tecnologia disponibile. "Non troppo diverso" deve essere inteso in termini di ordini di grandezza. In una società del genere, sia l'economia come la popolazione potrebbero essere considerevolmente più grandi o più piccole dei valori attuale. Tuttavia, una popolazione troppo piccola non potrebbe mantenere la tecnologia attuale e una popolazione troppo grande non potrebbe essere nutrita adeguatamente. Entro questi due estremi, si può immaginare l'esistenza di un giusto mezzo, anche se non possiamo al momento stimarlo numericamente.

Ciò detto, la domanda da farsi è se sia possibile mantenere *a livello di sostenibilità* alcuni punti cruciali per la sopravvivenza di questo tipo di società. E' evidente che ci sono delle esigenze essenziali che possiamo elencare come (in ordine molto approssimato di importanza):

- Una produzione di energia primaria sostenibile comparabile all'attuale
- La capacità di controllare e mantenere basse le emissioni di gas serra nell'atmosfera
- Un flusso di materie prime essenziali che renda possibile processi industriali paragonabili agli attuali.
- Un'agricoltura sostenibile in grado di nutrire una popolazione stabile a livelli non troppo diversi dagli attuali.

E' chiaro che ci troviamo di fronte a una sfida immensa per arrivare a una società del genere, ma non è impossibile. Vediamo ora di descrivere più in dettaglio come potrebbe essere questa società.

- *Energia*

Nessuna società prima della nostra ha avuto tanta energia come la nostra, e nessuna è riuscita a raggiungere un livello di complessità anche vagamente paragonabile a quello della nostra. Non è detto che "complessità" sia necessariamente un termine positivo, ma è chiaro che senza energia non sarebbe possibile mantenere certe strutture che universalmente riteniamo positive, dalla ricerca scientifica all'assistenza medica e sociale generalizzata. Una società stazionaria potrebbe essere molto più efficiente della nostra e evitare gli sprechi macroscopici di energia che ne sono una delle caratteristiche. Tuttavia, in vista del declino previsto per i combustibili fossili, la sola efficienza energetica non sarebbe sufficiente a sostenere una società simile alla nostra; anche se molto attenta a evitare tutti gli sprechi. Per mantenere in vita la nostra civiltà non si può prescindere dalla necessità di produrre energia in quantità e qualità non troppo lontane dalle attuali. Non solo, ma occorre produrla in modo sostenibile, riducendo drasticamente le emissioni di gas inquinanti e di gas serra nell'atmosfera che derivano dalla combustione dei fossili.

L'energia può essere prodotta senza immettere gas serra nell'atmosfera sia mediante le tecnologie rinnovabili, sia mediante l'energia nucleare. Non entriamo in dettaglio su questi argomenti in questo capitolo. L'argomento sarà discusso in dettaglio in un capitolo separato. In ogni caso, è chiaro che sostituire la produzione di energia attualmente ottenuta dai fossili con le attuali tecnologie è tecnologicamente possibile. Il problema principale delle rinnovabili sono i costi che, al momento, sono tuttora più elevati di quelli dei combustibili fossili. Questa differenza di prezzo rallenta la sostituzione. Sembra comunque ovvio che con il progredire delle tecnologie rinnovabili e il graduale esaurimento dei fossili, si deve arrivare a un punto di incrocio in cui le rinnovabili finiranno per costare meno sotto tutti gli aspetti e quindi essere preferibili ai fossili. Per quanto riguarda l'energia nucleare, il costo per unità di energia prodotta è, al momento, ritenuto più basso di quello prodotto dalle rinnovabili (anche se questo punto è discutibile), ma ci sono vari problemi ancora irrisolti con la tecnologia esistente (fissione di uranio arricchito); scorie, sicurezza, problemi strategici e una possibile scarsità di uranio minerale. Tuttavia, la tecnologia nucleare può essere migliorata e non si può escludere che questi problemi non possano essere risolti.

Tenendo conto di queste tecnologie, possiamo concludere che esistono ottime possibilità di disporre nel futuro di energia termica e elettrica in quantità relativamente abbondante da fonti che non producono inquinamento da gas serra. L'energia elettrica oggi rappresenta circa il 30% del consumo energetico; il restante è diviso in parti approssimativamente uguali per il riscaldamento degli edifici e per il trasporto. In entrambi le applicazioni, la fonte principale di energia è rappresentata dalla combustione dei fossili. La tecnologia per eliminare l'uso dei fossili per il riscaldamento degli edifici esiste ed è ben nota. Si tratta di una combinazione di sistemi di isolamento termico, sistemi passivi basati sul calore solare, e sistemi attivi di

riscaldamento a pompa di calore azionati da energia rinnovabile. Al momento, i costi tuttora bassi dei fossili non hanno spinto in questa direzione ma è chiaro che una società stazionaria del futuro non avrebbe grosse difficoltà a liberarsi dei fossili per questo tipo di applicazioni.

Per il trasporto, viceversa, oggi non sarebbe possibile rimpiazzare direttamente i derivati del petrolio con l'energia elettrica. E' probabile, tuttavia, che gli sviluppi tecnologici in corso permetteranno di utilizzare l'energia elettrica per quasi tutte le applicazioni concepibili oggi, incluso il trasporto su strada e forse anche per via aerea. Si può pensare anche a trasformare l'energia elettrica in idrogeno che può essere utilizzato come combustibile per aerei o mezzi stradali, anche se attualmente è una tecnologia poco efficiente e costosa. E' più probabile che una società stazionaria semplicemente non riterrà utili certi tipi di usi dell'energia poco efficienti, come il trasporto di merci per via aerea o quello dei pendolari su mezzi privati. Sarà difficile che voglia continuare con certe stravaganze estremamente costose in termini energetici come si vedono oggi, per esempio importare in Europa verdura coltivata in Tasmania.

Comunque questa società si voglia organizzare, in ogni caso l'energia non sarà il fattore limitante, posto che non si chieda al sistema di produzione di crescere esponenzialmente all'infinito.

- *Clima*

L'uso dell'energia rinnovabile tecnologicamente avanzata può risolvere il problema del riscaldamento globale che oggi rischia di distruggere la società attuale forse anche più rapidamente di quanto non potrebbe derivare dall'esaurimento delle risorse. Una società stazionaria potrà eliminare la necessità di bruciare combustibili fossili e, di conseguenza, il fattore principale che produce gas serra che vengono rilasciati nell'atmosfera.

La questione climatica non si riduce unicamente a questo punto. Esistono altri gas e altre attività umane che generano gas serra. In particolare, l'effetto del metano generato dalle attività agricole è stato indicato come un elemento importante nel cambiamento climatico (Ruddiman 2007). Inoltre, la dinamica atmosferica innescata da circa due secoli di utilizzo di combustibili fossili segue una sua curva che fa sì che il riscaldamento globale debba continuare ad aumentare per un certo periodo anche se cessassimo oggi di bruciare i fossili. La società del futuro potrebbe decidere che è necessario controllare attivamente la temperatura del pianeta, cosa che potrebbe essere fatta utilizzando l'energia rinnovabile (o nucleare) per ridurre la quantità dei gas serra nell'atmosfera o con altri interventi di schermatura della radiazione solare che arriva sulla superficie terrestre. Questo è un punto molto controverso, dove si scontrano due scuole di pensiero: quella che vuole che gli esseri umani debbano prendere un ruolo attivo nei processi che stabilizzano il clima planetario e quella che vuole che è meglio perturbarli il meno possibile e lasciare che la natura si prenda cura del pianeta. Su questo punto, è difficile prendere una posizione al momento ma è probabile che la strategia migliore, perlomeno nel breve termine, sia di cercare di ridurre il più possibile le emissioni di CO₂ nell'atmosfera.

- *Materie prime*

Fra i minerali di interesse per la tecnologia umana, la crosta terrestre abbonda di silicio, alluminio, ferro, magnesio e titanio che possono essere riciclati e utilizzati in relativa abbondanza da una società sostenibile. In forma metallica, possono essere usati per scopi strutturali, oppure in forma di ossidi come il silicio per il vetro, le fibre di vetro e la ceramica. L'alluminio può essere utilizzato per i conduttori di elettricità e il silicio rimane la base dei dispositivi elettronici, incluse le celle solari.

Tuttavia, molti elementi dei quali siamo abituati a disporre senza particolari limiti esistono soltanto in basse concentrazioni nella crosta terrestre. Anche disponendo di energia in quantità comparabili all'attuale, estrarre da giacimenti a bassa concentrazione diventa estremamente difficile se non impossibile (Bardi, 2007, Bardi e Pagani, 2007). Per queste ragioni, una società sostenibile dovrebbe adattarsi a una disponibilità molto inferiore all'attuale per quanto riguarda una serie di elementi, come per esempio rame, zinco, stagno, piombo e altri. Questo è specialmente vero per materiali "esotici" che vengono utilizzati per scopi speciali: il platino e il palladio per i processi catalitici, indio e gallio per l'elettronica, leghe di nickel per materiali resistenti ad alta temperatura, ceramiche a base di zirconio, oppure come conduttori elettrici ad alta temperatura e molte altre applicazioni. Una società sostenibile dovrebbe adattare i propri processi industriali per fare a meno, o utilizzare con estrema parsimonia, questi elementi.

In una società del genere, il *riciclaggio* sarebbe un componente essenziale dell'attività industriale. Al momento attuale, si riesce a riciclare solo circa il 50% dei metalli usati nei processi industriali. Questa è una strategia limitata: con il 50% di efficienza bastano quattro cicli di riciclaggio per perdere oltre il 90% del materiale di partenza. Inoltre certi elementi, per esempio l'indio per l'elettronica, non vengono riciclati affatto

per la difficoltà di recuperare i piccoli quantitativi utilizzati. Una società che volesse utilizzare i minerali chiudendo il ciclo di produzione in analogia di come fanno le piante dovrebbe cambiare completamente certi modi di produzione. Questa è probabilmente la sfida principale che ci troviamo di fronte; una sfida difficile ma non impossibile. Arrivare a chiudere i cicli di produzione implica una revisione totale di tutto il modo di pensare attuale riguardo all'economia industriale. Se è vero che riciclare al 100% non è possibile in un sistema chiuso per ragioni termodinamiche, è anche vero che non ci sono ragioni fisiche che impediscano di riciclare all'infinito in un sistema che riceve un input di energia dall'esterno, come lo è il sistema industriale.

Le stesse considerazioni valgono per il *riuso* dei manufatti; un'altra strategia per ridurre la dipendenza dalle fonti minerali. Anche qui dovremo sviluppare un'economia dedicata alla produzione di beni durevoli, come pure comportamenti completamente diversi dagli attuali.

Il fatto che certe materie prime costeranno più di quanto costano oggi non vorrà dire che spariranno completamente. Tutto quello di cui disponiamo oggi sarà disponibile anche in una società del genere, ma in quantità molto più ridotte. La diversa disponibilità di minerali genererebbe un mondo piuttosto diverso dal nostro nella vita di tutti i giorni, forse più simile al mondo di cento anni fa nell'uso prevalente di materiali naturali e la tendenza a produrre beni durevoli. La società non potrà più permettersi cose che oggi ci appaiono comuni, per esempio cambiare automobile ogni cinque-sei anni. La plastica dovrà diventare estremamente rara, soprattutto nella forma "usa e getta". Si potranno ancora sintetizzare fibre sintetiche per scopi particolari, per esempio kevlar o nylon per applicazioni strutturali. Ma per gli usi comuni, la plastica sarà sostituita da prodotti naturali, cellulosa o altre fibre vegetali.

Forse il cambiamento principale sarebbe nel trasporto stradale che, oggi, si basa su una serie di tecnologie certamente insostenibili. Mentre non ci sono problemi sostanziali per sostituire i motori a combustione interna con motori elettrici alimentati a batterie, la gomma per i pneumatici dei veicoli stradali e il bitume per l'asfaltatura delle strade sono destinati a diventare materiali costosi. L'asfalto si può sostituire con il cemento e può darsi che si riesca a sviluppare qualche tipo di materiale a basso costo con le caratteristiche della gomma. Ma, in ogni caso, sembra difficile che una società stazionaria possa mantenere quel pendolarismo motorizzato su lunghe distanze che è stato caratteristico degli ultimi 50 anni circa. Molto del trasporto locale si potrà fare su ferro, ma le rotaie non hanno la flessibilità dell'accoppiata asfalto-gomma, per cui bisognerà ridurre la richiesta di mobilità su tempi e distanze più corti. Possiamo pensare a un ritorno della bicicletta su larga scala, cosa di cui già si vedono alcune avvisaglie.

Comunque vada, una società stazionaria potrà permettersi una mobilità individuale e delle merci inferiore all'attuale. Dovrà fare più uso di risorse locali e fare maggiore uso di sistemi di comunicazione virtuale.

- Agricoltura e popolazione

Anche avendo energia rinnovabile a disposizione, ci sono forti limitazioni alla produzione agricola. L'energia rinnovabile può gestire l'irrigazione e la meccanizzazione. Può anche produrre fertilizzanti azotati estraendo azoto dall'atmosfera. Tuttavia, i fosfati sono fertilizzanti di origine minerale e sono soggetti al problema dell'esaurimento. E' possibile che la disponibilità di fosfati sia uno dei limiti principali dell'agricoltura sostenibile.

In aggiunta, l'agricoltura soffre di un problema di fondo che è la progressiva erosione del suolo, dovuta a vari fattori fra i quali l'urbanizzazione, l'incremento della popolazione e il sovrasfruttamento agricolo. Lo strato di humus che si trova nel suolo fertile è, sotto molti aspetti, un organismo vivente che non si può maltrattare oltre certi limiti. Ricostruire un suolo degradato e distrutto è un'impresa difficile e che richiede anni, e in certi casi, secoli. Esistono tecniche agricole rispettose del suolo ma occorre un'estrema attenzione per applicarle con consistenza.

Il limite finale dell'agricoltura è, comunque, quello dell'efficienza della fotosintesi. In un'area limitata, come è quella del nostro pianeta, si possono produrre quantità limitate di alimenti. Questo limite, pone come conseguenza un limite superiore alla popolazione umana. E' difficile stimare quante persone potrebbero essere nutrite su questo pianeta mediante tecniche agricole sostenibili. Questo dipende, ovviamente, dallo stile di vita, dal tipo di dieta, e altri fattori. Secondo Cohen (1996) questo numero potrebbe non essere molto diverso dalla popolazione attuale (6.5 miliardi). Pertanto, non sarebbe impossibile nutrire una popolazione come l'attuale, e anche superiore, in modo sostenibile. Questo richiede però che l'agricoltura venga gestita con cura ed efficienza, che si evitino gli sprechi di risorse attuali, ovvero il consumo su larga scala di proteine di origine animale. Ovviamente, occorre anche mantenere la popolazione stabile.

Quest'ultima condizione, popolazione stabile, ci sembra oggi molto difficile da ottenere. Siamo abituati a un mondo dove la crescita della popolazione è un fatto accettato e quasi inevitabile. In realtà, abbiamo già visto in precedenza come che la fertilità umana potrebbe non essere incontrollabile, ma

determinata dalla *percezione* di quale sarà la disponibilità di risorse nel futuro (Abernethy 1993). In questo caso, una società stazionaria non avrebbe difficoltà a mantenere una popolazione stabile senza bisogno di misure costrittive o coercitive.

Vediamo quindi che è possibile, perlomeno in linea di principio, costruire una società stazionaria che mantenga livelli di popolazione, energia primaria e produzione industriale non molto diversi dai nostri. Il quadro che ne viene fuori è sotto molti aspetti sorprendente. Le nostre attuali difficoltà ci sembrano dipendere principalmente da un problema climatico e un problema di carenza di energia. Tuttavia, una futura società stazionaria non sarebbe limitata da questi fattori; anzi, potrebbe avere energia in relativa abbondanza e potrebbe produrla senza danneggiare il clima terrestre. Al contrario, i fattori limitanti principali sarebbero la disponibilità di materie prime di origine minerale e la produzione agricola.

Ci riesce abbastanza difficile immaginarci una società del genere dove certe cose che oggi ci sembrano ovvie sarebbero completamente diverse: niente "usa e getta", il concetto stesso di "rifiuti" sarebbe obsoleto. Dovremmo abituarci a un mondo dove assolutamente tutto viene riciclato e riusato con una cura che a noi potrebbe apparire addirittura maniacale. Una dieta ad alto contenuto di proteine animali sarebbe considerata una follia (oltre che dannosa alla salute). Lo stesso sarebbe per l'idea di fare il pendolare per 50 km tutti i giorni, oppure andare alle Maldive in aereo in vacanza. In compenso, sarebbero mantenuti elementi come le telecomunicazioni, computer, telefoni, internet, come pure la medicina moderna. L'agricoltura potrebbe essere meccanizzata come la nostra e non richiedere l'estesa mano d'opera che era necessaria nelle società contadine di una volta.

Ci è anche difficile immaginare quali potrebbero essere le strutture politiche e sociali di una società del genere. Per certi aspetti, come abbiamo detto, potrebbe somigliare alle società agricole del passato. Ma ci sarebbe una differenza fondamentale nel fatto di non essere basata sull'energia fornita dalla manodopera umana, ma sull'energia elettrica rinnovabile. Per questa ragione, non dovrebbe necessariamente essere una società piramidale e altamente gerarchizzata come erano le società contadine di un tempo.

Non possiamo stabilire a priori se un'economia stazionaria sarebbe più equa di una in rapida crescita. In effetti questo è un punto fondamentale, dove i proponenti dell'economia stazionaria si trovano spesso accusati dai sostenitori della crescita di voler perpetuare le differenze sociali ed economiche di oggi. La teoria che sta dietro a questa accusa si può chiamare col nome di "teoria della marea", che vuole che "la marea che sale tira su tutte le barche". Secondo questa idea, la crescita economica e tecnologica da benefici a tutti, ricchi e poveri, e quindi è comunque preferibile a ogni tentativo di redistribuzione della ricchezza in termini di equità. Anche se le differenze sociali fra ricchi e poveri stanno aumentando (Targetti-Lenti 2005) si sostiene che i poveri delle società industrializzate moderne sono poveri soltanto in termini relativi; in fondo, un secolo fa, neanche la persona più ricca del mondo avrebbe potuto avere un telefono cellulare o un televisore a colori.

Il concetto non è privo di logica, ma nella pratica non è ovvio che telefonini, televisori a colori e altri aggeggi possano veramente compensare per l'andamento della situazione degli ultimi anni che ha portato a una crescente insicurezza del posto di lavoro, malattie da inquinamento, impoverimento della dieta, degrado dell'assistenza medica e altre conseguenze.

Questo è un punto decisamente controverso e qui non si può fare altro che limitarsi a dire che una società stazionaria non deve necessariamente essere meno tecnologica della nostra. Uno stato *stazionario* non deve essere concepito come uno stato necessariamente *statico*. Può e deve mantenere lo sviluppo della tecnologia, purché si tratti di tecnologie compatibili con la condizione stazionaria. In altre parole, una società stazionaria non troverebbe nessun interesse al progresso tecnologico in campi quali, per esempio, l'aeronautica o i motori a scoppio, ma può benissimo progredire in tecnologie come il trattamento e la trasmissione di dati, oppure la medicina o la biotecnologia. In questo senso, non si vede perché queste tecnologie non possano essere messe al servizio di una migliore qualità della vita per tutti, anche se la società non cresce.

2.2 La transizione.

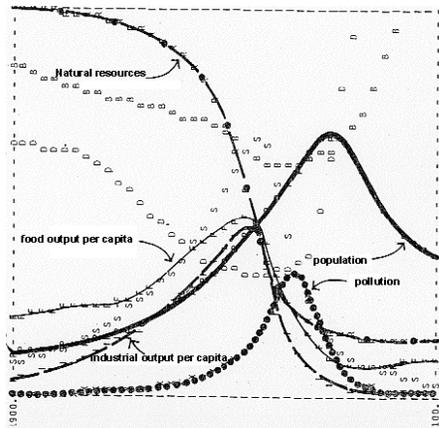
E' possibile pensare a una società stazionaria futura che sarà prospera e relativamente simile alla nostra. Non è detto, però, che ci si arrivi automaticamente. Al contrario, il sistema economico, se lasciato a se stesso, potrebbe benissimo portarci al collasso totale.

Prevedere l'andamento futuro dell'economia, come pure dell'ambiente e della popolazione è sempre difficile, ma ci sono vari metodi di analisi che permettono di farsi un'idea delle tendenze del futuro. Un

metodo molto potente si rifà a modelli basati sulla "dinamica dei sistemi" (p. Es Forrester 1971, Meadows 1972, 1974, 1992, 2005, Fiddaman 2006, Sterman 1981, Randers 2000 e altri). I modelli dinamici definiscono un sistema in termini di "stock" delle risorse e di "flussi" delle stesse fra i vari elementi del sistema. Un elemento fondamentale di questi modelli è il concetto di "feedback" detto in italiano "retroazione," che fa sì che certi elementi del sistema rinforzino (feedback positivo) o rallentino (feedback negativo) l'evoluzione di altri elementi.

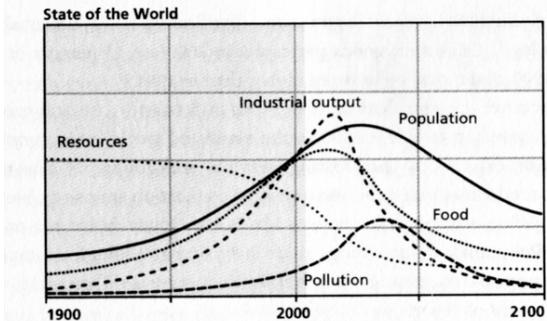
La dinamica dei sistemi può essere applicata all'interazione fra materie prime e sistema economico sulla base di una serie di assunzioni che sono fondamentalmente le stesse di quelle dell'economia classica, ovvero che gli operatori economici agiscono con l'obiettivo di massimizzare il loro profitto in una situazione di sostanziale liberalismo economico. In questa ipotesi, la rapida crescita dell'economia osservata negli ultimi decenni è riprodotta dal modello sulla base di un feedback positivo dovuto alla relazione fra il flusso in ingresso di materie prime e la crescita sia economica sia della popolazione. Si investono ulteriori risorse nello sfruttamento e la produzione tende a crescere rapidamente, seguendo una curva quasi esponenziale che va in parallelo con la crescita economica. I modelli dinamici descrivono bene le "curve a campana" di Hubbert. Il progressivo esaurimento della risorsa ingenera nel tempo un feedback negativo che si manifesta in costi di estrazione crescenti. Di fronte a questi costi, gli operatori reagiscono aumentando gli investimenti ma, a lungo andare, i costi di investimento diventano troppo elevati per essere sostenuti. Di conseguenza, la produzione raggiunge un "picco" per poi declinare.

Per una visione più generale dell'interazione fra lo sfruttamento delle risorse e l'economia, sono possibili modelli più complessi e dettagliati. Il primo tentativo della storia di modellizzare dinamicamente l'economia mondiale è stato ad opera di Forrester (1971). Il modello di Forrester è stato poi perfezionato da Meadows e altri (1972) con lo studio intitolato, "I Limiti alla Crescita", noto in Italia come "I Limiti dello Sviluppo". Sia i risultati di Forrester come quelli di Meadows e altri indicavano la possibilità di un collasso generalizzato nella produzione industriale e agricola planetaria che avrebbe potuto verificarsi entro i primi decenni del secolo XXI. Il collasso non è dovuto all'esaurimento fisico delle risorse prime ma all'impossibilità di mantenere flussi sufficienti di risorse verso il sistema economico. Nella figura a lato, vediamo i calcoli dell'edizione del 1972 de "I Limiti alla Crescita" che indicavano che il declino sarebbe potuto iniziare nei primi decenni del ventunesimo secolo.



Lo studio dei "Limiti" generò un'enorme controversia. In un paio di decenni di polemiche sembra che si sia persa la cognizione su cosa esattamente si stesse polemizzando. Per qualche ragione, si è sparsa la voce che Meadows e gli altri avevano "sbagliato le previsioni" sostenendo che questa o quella

risorsa minerale si sarebbe dovuta esaurire prima della fine del ventesimo secolo. Queste voci di previsioni sbagliate erano e sono pure leggende: lo studio del 1972 dei Limiti alla crescita non prevedeva che si esaurisse nulla fino a ben oltre la metà del ventunesimo secolo. L'illustrazione del "sistema base" mostrata qui sopra indica chiaramente che il collasso del sistema economico era previsto – molto approssimativamente – entro i primi decenni del ventunesimo secolo e, ovviamente, non si può parlare di previsioni sbagliate dato che non abbiamo ancora raggiunto quelle date. Le revisioni più recenti del modello (Meadows 2004) non hanno cambiato di molto gli scenari, con il collasso che rimane una conseguenza necessaria del sovrasfruttamento e che è tuttora previsto come entro i primi due decenni del ventunesimo secolo (vedi figura a lato).



Un risultato importante di tutti questi lavori è che il collasso è un risultato "robusto" dei modelli. Ovvero, il fatto che un collasso avvenga non dipende in modo critico dalla scelta dei parametri in ingresso dei modelli. Anche partendo da ipotesi molto più ottimistiche di quelle ragionevoli per la disponibilità di materie prime il collasso si verifica comunque, anche se si allontana nel tempo. Lo stesso si verifica per altre ipotesi ottimistiche, per esempio assumendo una molto più grande capacità del sistema di assorbire i prodotti di scarto dell'economia industriale. Al tempo della prima edizione dei "Limiti" il problema del riscaldamento globale non era noto; ma i calcoli lo prevedevano ugualmente in modo implicito sotto una dizione generica di "inquinamento".

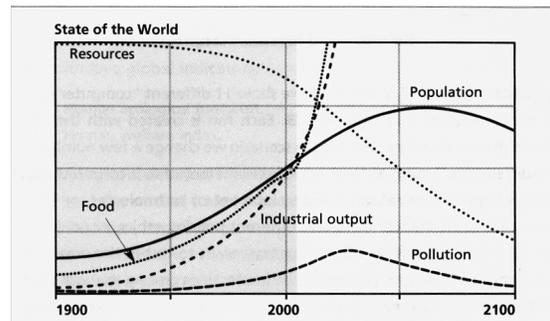
I modelli rivelano in effetti che ci sono molteplici elementi del sistema che si influenzano fra loro e finiscono per lavorare in sintonia per portare al collasso. Variando i parametri, si osserva che il collasso può arrivare come la conseguenza di fattori diversi. Se si aggiustano i parametri in modo da ridurre l'effetto dell'inquinamento, l'economia cresce rapidamente e il collasso arriva per esaurimento delle risorse. Se, al contrario, si assume che le risorse siano abbondanti, allora è l'inquinamento – ovvero principalmente il riscaldamento globale – a far collassare il sistema.

Molta speranza viene riposta nel progresso tecnologico per evitare il collasso e risolvere i problemi di esaurimento. Questa visione viene spesso basata nell'analisi economica corrente dal modello detto di "Solow-Stiglitz" (Solow 1957, Stiglitz 1974) che assume che l'output di un economia sia determinato dal prodotto algebrico di quattro fattori principali; 1) capitale, 2) lavoro, 3) risorse e 4) un "residuo" che si assume essere dovuto al progresso tecnologico. La parola "residuo" è in effetti fuorviante dato che è proprio questo residuo l'elemento quantitativamente più importante nel modello; senza il quale l'accordo con i dati sperimentali non sarebbe neanche pensabile. Per questa ragione, lo si definisce a volte anche "total factor productivity" (TFP).

Nel modello, si assume che il flusso delle risorse minerali sia in progressiva diminuzione col tempo. Dato che il lavoro e il capitale sono soggetti alla legge dei ritorni decrescenti, ne consegue che la crescita economica del sistemi è, a lungo termine, dovuta quasi esclusivamente al fattore TFP, ovvero al progresso tecnologico. Su questa base, molti economisti hanno sostenuto che è possibile sostituire le risorse con il progresso tecnologico e che pertanto la crescita dell'economia è possibile ancora per lungo tempo, se non addirittura all'infinito (vedi P.es Nordhaus 1992, Simon 1981, Marxsen 2003). Tuttavia, dati più recenti indicano che il progresso tecnologico non cresce più esponenzialmente (Ayres, 1998, 2001, Huebner, 2005). E' possibile attribuire la crescita dell'economia non al TFP ma alla crescente produzione di risorse minerali (Ayres 2002). Inoltre, Solow stesso (Solow 1997) ha abbandonato l'idea della sostituibilità fra tecnologia e risorse per sostituirla con una più ragionevole sostituibilità fra risorse minerali e risorse rinnovabili.

Da notare anche che il progresso tecnologico è soggetto a quello che viene chiamato "Effetto Jevons" o "Rebound" ("rimbalzo") studiato, fra gli altri, da Blair (1984), Brooks (1990) e Grubb (1990). Già nel 1856, William Stanley Jevons aveva notato nel suo "Il problema del carbone" che le risorse liberate da una maggiore efficienza nella loro produzione non portano necessariamente a un risparmio. Al contrario, fanno sì che la domanda aumenti, il che vanifica il risparmio teoricamente possibile ("rimbalzo"). Per esempio, l'uso di lampadine più efficienti può far sì (e succede di solito) che queste lampadine vengano tenute accese più a lungo, vanificando il risparmio energetico relativo. Il rebound è un classico caso di effetto dinamico che è incluso nei modelli basati sulla dinamica dei sistemi. Viene però spesso dimenticato nella pratica corrente quando si invocano misure per risparmiare energia basate su miglioramenti tecnologici.

L'analisi dinamica permette di considerare il progresso tecnologico in modo molto più dettagliato e realistico di quanto non sia possibile mediante il modello neoclassico, che aggrega tutte le tecnologie in un singolo fattore. In particolare, è possibile modellizzare miglioramenti tecnologici specifici, per esempio la possibilità di aumentare la produzione di energia sfruttando meglio le risorse fossili esistenti. Tuttavia, il



meccanismo dei feedback insito nell'economia fa sì che lo sforzo per risolvere un problema ne aggravi altri. Per esempio un miglioramento tecnologico che generi una maggior quantità di energia fossile a basso costo aumenta i problemi di inquinamento e genera ulteriore sovrappopolazione. Si possono esaminare persino l'ipotesi poco realistiche ma non impossibili, come una nuova rivoluzionaria tecnologia che produca energia infinita a costo zero. Anche una rivoluzione del genere, tuttavia, può solo allontanare nel tempo la prospettiva di un declino dell'economia ma non evitarlo. In questo caso, il collasso arriva per una combinazione di sovrappopolazione, inquinamento, e sovrasfruttamento delle risorse agricole.

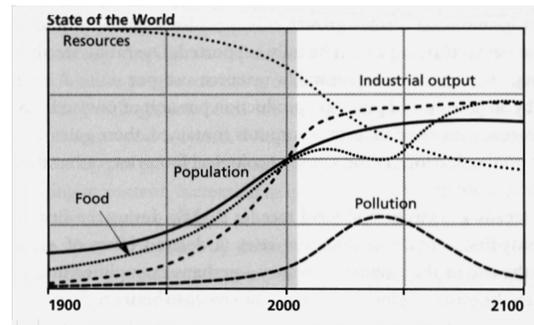
I modelli dinamici indicano che per continuare l'attuale livello di produzione per un futuro indefinito sarebbero necessari non una ma molteplici rivoluzioni tecnologiche in campi quali l'energia, la gestione dell'inquinamento, la produzione agricola e altri settori (Meadows 2004). Anche in questo caso improbabile (vedi figura a lato), i limiti fisici del pianeta impongono dei limiti alla crescita.

2.3 Gestire la transizione

L'analisi dinamica (Meadows et. al 1971, 2004) mostra chiaramente che il sistema economico umano non si stabilizzerà su un livello simile all'attuale se lasciato a se stesso, ovvero in una condizione di puro liberismo economico. Il declino dopo il punto di massima produttività e popolazione prende l'aspetto di un vero e proprio collasso economico che avrebbe conseguenze traumatiche per l'intera umanità. Non solo, ma il collasso che segue al picco di sovrasfruttamento potrebbe essere talmente profondo da rendere impossibile ritornare nel futuro a certi livelli tecnologici precedenti. In questo caso, l'economia si potrebbe stabilizzare a livelli assai più bassi di prosperità degli attuali. La desertificazione e la conseguente riduzione della produzione alimentare potrebbe ridurre la popolazione in modo sostanziale. Le risorse rimanenti dopo il declino della produzione mineraria potrebbero non permettere gli investimenti necessari per passare a fonti energetiche solari e per le infrastrutture necessarie per riciclare le materie prime. In questo caso, la società potrebbe ritornare a un livello di agricoltura di sussistenza a bassa tecnologia e con una ridottissima popolazione rispetto all'attuale, come avvenuto nei collassi di civiltà del passato (Diamond, 2005). Non si può nemmeno escludere un ritorno a livelli ancora più bassi secondo il "modello Olduvai," (Duncan 2006) ovvero il ritorno a un livello di sussistenza di cacciatori e raccoglitori.

Si tratta, allora, di capire se è possibile prendere provvedimenti per guidare il sistema in una specifica direzione, evitando il declino o, perlomeno, evitando che sia troppo rapido. Lo studio dei "Limiti alla Crescita" del 1972 è stato forse il primo che si è posto seriamente il problema di come si potrebbe evitare il collasso e stabilizzare il sistema economico mondiale a un livello compatibile con i limiti planetari. Già nell'edizione del 1972 si elencavano i parametri sui quali era necessario intervenire per evitare il collasso dell'economia. Nell'edizione del 2004 dello studio, i calcoli mostrano (vedi figura) che una stabilizzazione del sistema economico ai livelli attuali fino al 2100 può essere ottenuta mediante le seguenti azioni:

- Controllo delle nascite con 2 figli per coppia a partire dal 2002
- Limitazione della produzione industriale
- Miglioramenti tecnologici sulle emissioni di inquinanti
- Controllo dell'erosione del suolo
- Aumento della resa agricola



Il punto dolente di questo tipo di considerazioni sta nel capire chi e come dovrebbe intervenire sull'economia con le azioni di cui sopra. Chiaramente, un sistema basato sul libero scambio delle merci, dove gli operatori sono guidati dal profitto a breve termine, non evolverebbe da solo in questa direzione. Dovrebbero essere i governi, o un "supergoverno" mondiale, a imporre certe misure? O dovrebbero essere i singoli individui ad abbandonare la ricerca del puro profitto e prendere in mano la situazione? I due approcci vanno sotto il nome, rispettivamente, di "top-down" (dall'alto verso il basso) e di "bottom-up" (dal basso verso l'alto). Tutti e due gli approcci hanno problemi e vantaggi.

Usando il nome di "Tragedia dei Beni Comuni", Hardin aveva dato una certa aura di cupa inevitabilità al suo modello che prevedeva il disastro da sovrasfruttamento. In realtà, se è vero che la "tragedia" è inevitabile nell'ipotesi di un sistema completamente liberalizzato, in nessun caso storico si trova che i pascoli, pur denominati "beni comuni" (in italiano più propriamente "usi civici"), siano completamente di libero accesso. Nella storia, la gestione di pascoli e foreste è quasi sempre regolata da accordi, leggi, consuetudini e prassi destinati ad evitare il sovrasfruttamento dovuto alla tendenza individuale di massimizzare i profitti. Anche nel caso della pesca, esistono casi di sovrasfruttamento quasi terminale, come nel caso della caccia alla balena nel secolo XIX (Bardi 2006), ma oggi la pesca è normalmente regolata da trattati internazionali, come ampiamente studiato dagli economisti (p. es. Hanna 1997). Più tardi, abbiamo visto l'abolizione dell'uso di insetticidi dannosi alla salute umana come il DDT e dei clorofluorocarburi, sostanze dannose per il "commons" che è lo strato di ozono dell'alta atmosfera. Recentemente, il protocollo di Kyoto è stato una novità di enorme interesse in quanto rappresenta forse il primo caso di un trattato internazionale che va ad agire direttamente a limitare le opzioni economiche dei paesi firmatari. Il trattato di Kyoto va a regolare il commons dell'atmosfera, mentre per il futuro sono in discussione regolazioni di un altro commons, quello delle risorse di carbone e idrocarburi con il concetto della "carbon tax" e con il concetto di "protocollo del petrolio" (Heinberg 2007).

Se la storia ci insegna qualcosa, dunque, è che gli esseri umani riescono normalmente ad accordarsi per gestire al meglio risorse comuni in un approccio "top down". Regolare lo sfruttamento dei beni comuni, sia rinnovabili che non rinnovabili, è possibile ed è un obiettivo prioritario per la sopravvivenza dell'attuale civiltà.

Tuttavia, ci sono dei problemi con l'approccio top-down. Gli operatori economici spesso si oppongono alle regolazioni imposte dall'alto, cosa che può intralciare o rimandare l'applicazione di leggi e regole per gestire i commons. Ci sono molti esempi di questa reazione; possiamo citare i boscaioli americani che manifestano per le strade con cartelli che dicono "jobs, not trees!" (posti di lavoro, non alberi!). Oppure, il caso della questione del controllo delle nascite che, negli anni 1970, era stata oggetto di molta discussione e anche di proposte concrete. Tuttavia, la reazione che ne è seguita, negli anni 1980, ha reso politicamente scorretto anche soltanto menzionare il concetto di "controllo delle nascite" senza essere accomunati a Hitler e alle sue azioni di sterminio. Ci si può fare un'idea di questa reazione di ritorno contro il tentativo di regolare le nascite dal libro di Julian Simon del 1985 "La Risorsa Finale". Un caso emblematico di questa reazione sono stati i pesanti attacchi anche personali contro Rachel Carson, che aveva sollevato il problema della tossicità dei pesticidi e in particolare del DDT. Anche gli studi del gruppo "I Limiti alla Crescita" sono stati fortemente criticati e, in più di un'occasione, i membri del gruppo e i loro sponsor sono stati accusati di voler sterminare gran parte dell'umanità e di voler creare una dittatura mondiale. Questa accusa è arrivata anche in articoli pubblicati da autori in circostanze che normalmente dovrebbero essere considerate "serie" (vedi per esempio Golub e Townsend, 1977). Queste accuse mostrano come chi si impegna nell'impresa di cercare di influire sul sistema economico per il bene generale sia soggetto ad attacchi molto pesanti.

Davanti a questo tipo di reazione, costruire sistemi di regolazione efficaci richiede tempo e può darsi che non sia possibile arrivarci prima che i danni di una gestione di "libero accesso" non siano stati dimostrati nella pratica. In altre parole, storicamente la regolamentazione dello sfruttamento di un bene comune è più il risultato di un'azione reattiva che di una proattiva. Sembrerebbe che al momento attuale manchi ancora una dimostrazione evidente e inoppugnabile del danno che sta derivando al pianeta dal sovrasfruttamento delle risorse oppure della capacità dell'atmosfera di assorbire i prodotti della combustione degli idrocarburi. Nonostante lodevoli tentativi, come il trattato di Kyoto, è evidente che il progresso verso la gestione top-down delle risorse planetarie non si sta realizzando con una velocità sufficiente.

La lentezza dello sviluppo di regolazioni internazionali ha spinto un gran numero di persone a ipotizzare che comportamenti responsabili a livello individuale (bottom up) siano la strada migliore per contrastare il sovrasfruttamento delle risorse. Tipicamente, i comportamenti virtuosi individuali consistono in ridurre il proprio impatto sull'ambiente. Viene considerato virtuoso chi evita di usare mezzi privati in favore di mezzi pubblici; chi usa la bicicletta invece di mezzi a motore; chi isola termicamente la propria casa; chi ricicla carta, vetro e rifiuti organici, chi spegne la luce quando esce di casa; insomma tutti i comportamenti che sono tipici di chi si definisce come "ambientalista".

Il movimento politico e intellettuale degli ambientalisti ha avuto origine con la grande crisi del petrolio negli anni 1970, anche se lo si può far risalire al libro di Rachel Carson "Primavera Silenziosa" del 1966 che è stato il primo testo di grande diffusione a portare in pubblico il tema dell'impatto ambientale degli esseri umani. Non c'è dubbio che grandi sforzi siano stati fatti durante questo periodo per favorire comportamenti virtuosi a livello individuale. Ma quale è stato l'effetto di questo sforzo?

Abbiamo scarsissimi dati quantitativi affidabili sull'impatto dei comportamenti individuali sul sistema economico mondiale. L'unico probabilmente rilevante è il parametro detto "efficienza" (o anche "intensità energetica"), ovvero l'andamento del rapporto fra il prodotto interno lordo e i consumi energetici. In generale, da qualche decennio questo rapporto tende ad aumentare in tutti i paesi industriali. L'interpretazione comune è che rifletta un sempre migliore utilizzo dell'energia; ovvero del fatto che ne occorra sempre meno per creare un'unità di PIL.

Su questa interpretazione, tuttavia, si possono esprimere considerevoli perplessità. Il PIL è una misura in unità monetarie dei beni e dei servizi prodotti in un'economia. Produrre servizi richiede, normalmente, meno energia della produzione di beni materiali. Per esempio, le attività che si fanno in una banca richiedono sicuramente meno energia di quelle che si fanno in una fabbrica. In termini monetari, tuttavia, può darsi che il valore delle attività di una banca sia superiore a quelle di una fabbrica. Inoltre, non c'è dubbio che la tendenza degli ultimi decenni è stata di avere più banche e meno fabbriche. Pertanto, lo spostamento della produzione da beni a servizi (detto "terziarizzazione"), tipico delle società occidentali, potrebbe da solo spiegare l'andamento del rapporto PIL/energia. In altre parole, il rapporto PIL/energia non misura il fatto che certe attività produttive (per esempio costruire un'automobile) siano fatte in modo più efficiente di una volta, ma solo il fatto che la frazione di PIL generata da queste attività si riduce rispetto ad attività che sono strutturalmente meno energivore; per esempio le transazioni del mercato immobiliare o finanziario.

Questa interpretazione non vuol dire che i processi industriali moderni non siano più efficienti in termini energetici di quelli del passato, ma soltanto che questo elemento è probabilmente marginale nel complesso dell'economia. Se poi guardiamo i consumi privati, difficilmente possiamo vedere un incremento di efficienza. E' vero che gli ultimi anni hanno visto la nascita di un piccolo settore industriale dedicato a prodotti quali la coibentazione degli edifici, lo sfruttamento dell'energia solare e il riciclo dei rifiuti. Queste attività, tuttavia, sembrano più che compensate dallo sviluppo di mercati per beni che fanno grande uso di risorse naturali non rimpiazzabili: quali quello dei SUV (sport utility vehicles) per il trasporto, i condizionatori d'aria per gli edifici pubblici e privati, e lo sviluppo sempre più rapido dei prodotti "usa e getta".

Queste considerazioni sembrano indicare che il sistema economico nel suo complesso ha continuato a evolversi risentendo poco degli effetti dei comportamenti virtuosi individuali. Questo si può notare anche da un confronto delle curve del "sistema mondo" dell'edizione del 1971 de "I Limiti alla Crescita" comparate con quelle del 2004. Le curve per la crescita economica e dell'uso delle risorse naturali, calcolate a più di trenta anni di distanza, non mostrano nessun cambiamento significativo che si possa interpretare come dovuto a un aumento dell'efficienza nell'uso dell'energia o delle risorse.

Anche sulla questione della popolazione, le esortazioni a fare più (o meno) figli sembrano non aver avuto molto successo. Si può supporre che il buon ambientalista non debba avere molti figli per non impattare troppo sull'ambiente, ma non sembra che ci sia una differenza significativa in questo senso fra chi è ambientalista e chi non lo è. Perlomeno, non sembra che quelli che si comprano le SUV lo facciano per avere più posto per trasportare una numerosa prole.

Evidentemente, i metodi usati fino ad oggi per promuovere comportamenti individuali virtuosi sono stati poco efficaci. Non bisogna pensare che questo sia dovuto alla richiesta di sacrifici alle persone che li adottano. Al contrario, chi propone questi comportamenti è di solito molto attento a far notare che chi è virtuoso ha un vantaggio economico dalla sua virtù. Per esempio, chi monta pannelli solari sul tetto della sua casa ne ha un ovvio vantaggio economico. Chi usa la bicicletta al posto della macchina ne ha non solo un vantaggio economico ma anche uno di salute; e lo stesso vale per chi usa un'utilitaria al posto della SUV. Tuttavia, queste abitudini non si diffondono o, perlomeno, non si diffondono con la rapidità che i vantaggi che portano dovrebbero giustificare.

Forse il caso più interessante in questo senso è quello delle cinture di sicurezza per le automobili private. E' difficile pensare a un'abitudine più vantaggiosa di quella di indossare le cinture di sicurezza quando si viaggia in macchina. Studi dopo studi hanno dimostrato che la cintura porta dei benefici immensi nel ridurre i danni in caso di incidenti e questo a un costo infinitesimale. A partire dagli anni '70, negli Stati Uniti si è cercato per un buon decennio di convincere la gente a indossare spontaneamente la cintura di sicurezza. Sono state realizzate campagne di informazione e campagne pubblicitarie. Un gran numero di "testimonials" in forma di attori veri o personaggi dei cartoni animati sono stati mostrati sullo schermo televisivo nell'atto di indossare le cinture. Si è provato l'approccio positivo (il bravo cittadino usa la cintura) e quello negativo (se non la indossate, morirete fra atroci sofferenze). Alla fine, tutti i tentativi di spingere gli automobilisti a indossare le cinture spontaneamente (bottom-up) sono falliti. Non solo negli Stati Uniti, ma anche in Europa le si sono dovute imporre per via legislativa (top-down), a mezzo di multe anche molto salate per chi non le indossa.

Quello delle cinture non è l'unico caso di comportamenti individualmente vantaggiosi che tuttavia gli individui non seguono. Ce ne sono di anche più evidenti; se indossare le cinture richiede uno sforzo, sia pure infinitesimale, fumare è un'abitudine che è dannosa non solo alla salute ma anche al portafoglio. Eppure è un comportamento comune.

Evidentemente, la psicologia umana nel prendere decisioni e nell'eseguire o non eseguire certe azioni non si basa unicamente su stime del rapporto costi/benefici. Ci sono fattori di tipo diverso, come per esempio la questione dello status sociale individuale. In una società dove lo status individuale è basato spesso sul "consumo conspicuo" propongono comportamenti che tendono a risparmiare risorse è, come minimo, un'impresa difficile, se non impossibile.

Sia l'approccio top-down che quello bottom-up hanno evidenti limiti e faticano a imporsi a una velocità sufficiente per contrastare la crisi in atto. E' probabile che nel futuro vedremo sia provvedimenti governativi sia tendenze comportamentali sempre più in accordo con una situazione che comincerà a farsi chiara. Tuttavia, entrambe gli approcci non stanno ottenendo risultati abbastanza in fretta da contrastare il collasso economico.

2.4 I punti critici del sistema.

Sia Jay Forrester come Donella Meadows (Meadows 2005), fra i fondatori della "dinamica dei sistemi" hanno discusso della tendenza delle strutture sociali e economiche a impegnarsi in attività controproducenti, ovvero che peggiorano il problema che si cerca di risolvere. Sembra che in molti casi non sia difficile identificare i "punti critici" (o "punti-leva") del sistema. Tuttavia, entrambi notano che quasi sempre si finisce per agire su questi punti critici in modo tale da ingenerare un feedback negativo e ottenere il risultato esattamente opposto a quello che ci si propone.

Un esempio storico di soluzione controproducente lo troviamo nella storia della caccia alle balene del secolo diciannovesimo. E' affascinante per noi leggere come i balenieri del tempo reagivano di fronte a una situazione di carenza di balene. Che ci fosse un problema era ovvio per tutti, ma qual'era la soluzione?

Dal nostro punto di vista, a più di un secolo di distanza, la soluzione è ovvia. Si tratta di ridurre il prelievo di balene in modo tale da permettere allo stock di ricostituirsi. Ma, all'epoca, non si ragionava così. Quasi tutti reagivano con il tentativo di aumentare l'efficienza della caccia. Ci racconta Starbuck nel suo classico "Storia dell'industria baleniera Americana" del 1878 di come le navi baleniere dell'ultimo periodo del ciclo di caccia erano "equipaggiate in modo stravagante", ovvero con un'attrezzatura sproporzionatamente costosa ed elaborata rispetto alle usanze di qualche decennio prima. Starbuck confonde la causa con l'effetto, crede che il costo di questa attrezzatura sia uno degli elementi principali che ha messo in crisi l'industria; non la conseguenza di una difficoltà progressivamente maggiore di catturare le balene. Eppure, Starbuck era un esperto nel campo della baleneria con molti anni di esperienza e riconosceva esplicitamente il fatto che le balene si stavano facendo rare. Che abbia così clamorosamente mancato la soluzione che a noi sembra ovvia è una cosa che fa pensare.

Evidentemente, quella di attrezzare le baleniere per migliorare l'efficienza della caccia era una soluzione che peggiorava enormemente il problema. Era un classico caso in cui si agiva al contrario sui punti di pressione del sistema. Riducendo ulteriormente gli stock di balene, si rendeva la caccia sempre più difficile. Il feedback fra aumento di efficienza e riduzione del numero delle balene era negativo. Più si spendeva per attrezzare le baleniere, più si rendeva difficile cacciare le balene.

Quando le balene della specie "franca" si ridussero a poche centinaia di esemplari in tutto l'oceano, era ovvio che nessun ulteriore miglioramento dell'efficienza delle baleniere poteva risolvere il problema – perlomeno per quella specie di balene. La specie della balena franca è stata salvata quasi per miracolo all'ultimo momento, ma dopo un secolo non è ancora ritornata, e forse non ritornerà mai più, ai livelli di prima dell'inizio della caccia. Quello che successe è che un certo numero di innovazioni tecnologiche sviluppate nei primi decenni del ventesimo secolo resero dare la caccia ad altre specie di balene; con il problema dell'esaurimento che finì più tardi per ripresentarsi allo stesso modo.

La storia delle soluzioni che peggiorano il problema si ripete oggi nel caso del petrolio. Tutti quanti, o quasi, si rendono conto che abbiamo un problema di esaurimento. La "soluzione" che viene proposta quasi sempre è quella di aumentare gli sforzi per trovare nuovo petrolio, per sfruttare di più i giacimenti esistenti, o per trovare altre risorse che si possono trasformare in petrolio. Anche ammesso di riuscire in queste strategie, tuttavia, quello che si ottiene nel migliore dei casi è di continuare per un po' la crescita della produzione. Dopo di che, ci si ritrova con lo stesso problema, ingigantito dallo sfruttamento esasperato di quel poco che rimaneva. Viceversa, se si intervenisse per *ridurre* lo sfruttamento dei giacimenti questo avrebbe molteplici effetti di feedback benefici; prolungare la vita delle risorse, ridurre gli sprechi, favorire la sostituzione con tecnologie sostenibili, eccetera. Questo è il concetto che sta dietro la proposta del "protocollo del petrolio" (Heimberg 2007) che è una proposta che interviene correttamente sui punti di pressione del sistema. Proprio per questo, probabilmente, viene ignorata o addirittura ridicolizzata.

L'esistenza dei punti leva, o critici, di un sistema, deriva da una questione di feedback. Il concetto di feedback, detto a volte "retroazione" in italiano, è tipico dei sistemi complessi, ovvero sistemi dove un gran numero di fattori interagiscono fra di loro. Agire su un solo fattore, considerandolo isolatamente, non solo non è possibile, ma le conseguenze sono di solito imprevedibili, quasi sempre inaspettate, e molto spesso controproducenti.

E' questo fattore di feedback che da potenza ai punti leva, mettendoli in grado di sterzare tutto un sistema in una certa direzione. Se si riesce a trovare un punto in cui si genera una cascata di feedback positivi, si può fare espandere un sistema economico a velocità crescente. Questa crescita si vede nei sistemi biologici, per esempio lasciando una specie libera di riprodursi in un ambiente favorevole. Basta ricordare il caso dei conigli in Australia che, importati in pochi esemplari per il divertimento di qualche cacciatore, si sono diffusi in numeri tali da aver danneggiato profondamente l'ambiente originale australiano. Gli esseri umani si comportano in modo più intelligente dei conigli nel gestire la propria attività riproduttiva

(Abernethy 1993) ma, ciononostante, è possibile che la popolazione umana sia cresciuta oltre il limite della capacità del pianeta di sostenerla.

Un altro esempio di feedback positivo più vicino all'argomento di cui trattiamo è quello del petrolio. La diffusione esplosiva del petrolio nel mercato energetico è avvenuta senza bisogno di una legislazione che ne imponesse l'uso. Sappiamo anche che chi usava il petrolio non era ritenuto più virtuoso di altri. Ciononostante, il consumo di petrolio si è sviluppato a una velocità impressionante. Le ragioni per la rapida crescita della produzione petrolifera si possono trovare nei feedback positivi connessi con la sua diffusione. Inizialmente, il petrolio si usava soltanto come combustibile per le lampade. Quando si cominciò ad utilizzarlo come combustibile per motori, cominciarono a nascere tanti nuovi usi, ognuno dei quali ne rinforzava altri. Dal petrolio si faceva l'asfalto per le strade, il che rendeva possibile usare più macchine, il che rendeva necessario altro petrolio. D'altra parte, per andare sulle strade asfaltate, ci vogliono gomme e ci si accorse che la gomma si poteva fare anche dal petrolio. Questo faceva sì che ci fossero ancora più macchine, il che richiedeva più petrolio. Poi qualcuno si è accorto che col petrolio si faceva plastica, i sacchetti del supermercato, medicinali, fertilizzanti, insetticidi e un milione di altre cose. Tutti questi usi generavano nuovi mercati che, a loro volta, richiedevano ulteriori aumenti di produzione di petrolio. I dati indicano che la produzione mondiale di petrolio è aumentata esponenzialmente al ritmo del 7% circa all'anno dalla fine dell'800 fino alla grande crisi del 1973.

Il problema con i feedback è che il meccanismo di crescita può andare fuori controllo, e di solito ci va. Questo è successo in tutti i casi che abbiamo citato. I conigli in Australia, come abbiamo detto, sono cresciuti senza limiti diventando un disastro per l'ambiente locale. La produzione di petrolio è cresciuta generando una serie di guai, non ultimo il riscaldamento globale. La popolazione e la resa agricola hanno continuato ad aumentare insieme, ma la produzione agricola non si può aumentare all'infinito e potrebbe darsi che arriveremo al picco produzione agricola molto prima di arrivare al picco della popolazione.

Tutti questi disastri sono un risultato necessario del meccanismo dei feedback. I feedback positivi portano a una crescita incontrollata che, prima o poi, deve arrestarsi. L'arresto si manifesta con l'apparizione di feedback negativi, reazioni del sistema che tendono a rallentare la crescita e – alla fine – a causarne la decrescita. Per il petrolio, il feedback negativo si chiama esaurimento. Per l'agricoltura, si chiama erosione del suolo. Per i conigli in Australia, è la capacità del suolo australiano di sostenerli e – probabilmente – anche misure drastiche di contenimento della popolazione prese dagli esseri umani.

Da qui, possiamo trovare una spiegazione dell'osservazione di Forrester che nella maggior parte dei casi i tentativi di agire sui sistemi complessi si rivelano controproducenti. La gente tende ad agire sui punti leva del sistema ricordandosi di quelli che erano una volta feedback positivi. Non si rende conto che quei feedback positivi non sono più attivi, anzi sono diventati negativi. Da qui, il tentativo di incrementare la produzione di petrolio con più ricerca e trivellazione, il che accelera l'esaurimento. Da qui il tentativo di incrementare la produzione agricola con metodi di coltivazione intensivi che accelerano l'erosione del suolo. Si può immaginare che i conigli australiani stiano facendo quello che possono per riprodursi al massimo ritmo possibile, stimolando gli esseri umani a prendere nuove misure e più efficaci per sterminarli.

Una volta capito questo punto, possiamo sfruttare il meccanismo dei feedback a nostro vantaggio. Il feedback usato a proposito è un po' come il vaccino per certe malattie infettive che, anche loro, sono un risultato di un feedback positivo nella riproduzione dei virus. Bisogna stare attenti, il vaccino può anche fare dei danni se usato impropriamente. Ma se usato con criterio, è un'arma potente contro le malattie.

Una volta identificati i punti critici, si può evitare il perverso effetto che Forrester ha descritto: quello di agire al contrario sui punti leva del sistema. Ovvero, si può evitare di disperdere energia e risorse nel cercare di forzare un sistema ad andare per forza in una certa direzione. L'esaurimento del petrolio non si può rimediare scavando più buchi per terra. Conviene, anzi, non sprecare ulteriori risorse in un'attività che ormai non può più rendere come ai tempi dell'abbondanza.

2.5 Un esempio di intervento su un punto critico: rinnovabili e trazione elettrica.

Ci sono molti esempi di interventi positivi per ridurre gli effetti della crisi di disponibilità delle risorse che ci sta attanagliando. Molti di questi punti sono stati correttamente identificati a livello di conoscenza comune. Pertanto, non parleremo qui di cose del tutto ovvie come interventi mirati alla riduzione dei consumi, l'uso della bicicletta e dei mezzi pubblici per i trasporti urbani, coibentazione degli edifici e molti altri elementi che, a questo punto, sono ben noti.

Considereremo invece in un certo dettaglio un esempio che illustra la possibilità di sfruttare i feedback positivi per dare inizio a nuove rivoluzioni tecnologiche. Le soluzioni che cerchiamo si rinforzano reciprocamente e crescono nel modo più rapido possibile. Lo possiamo chiamare anche "sinergia positiva"

oppure "strategia win-win". Alla fine dei conti è basato sulla cooperazione di vari fattori, che tutti agiscono insieme verso lo stesso obiettivo. Se si riesce a innescare un fenomeno del genere, come è stato possibile col petrolio, non c'è niente che non sia possibile.

Per evitare malintesi, va specificato subito che la crescita di una soluzione sostenibile, come potrebbe essere l'energia rinnovabile, deve essere il più rapida possibile all'inizio, ma non può e non deve continuare a crescere all'infinito. Deve invece assestarsi su un livello sostenibile e compatibile con le altre esigenze dell'economia. Questa è appunto la caratteristica delle energie rinnovabili, che non sono soggette al ciclo di Hubbert e che si assestano su un tetto produttivo che dipende dalla frazione di territorio che è possibile assegnare alla produzione energetica.

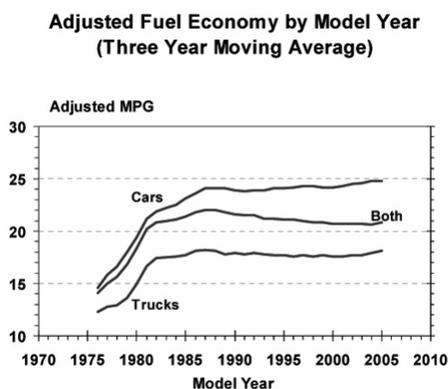
Non sarebbe il caso qui di elencare in dettaglio tutte le possibili combinazioni di tecnologia e mercato che hanno un feedback positivo. Faremo soltanto un esempio relativo al trasporto su strada. Si tratta di un punto critico per la nostra economia, un punto che al momento dipende crucialmente dalla disponibilità di carburanti derivati dai combustibili fossili.

Di fronte alla riduzione della disponibilità di carburanti, il sistema reagisce in molti modi. Evidentemente, ci sono molte azioni possibili per reagire a livello di risparmio che consistono nel ridurre il pendolarismo, incoraggiare i trasporti pubblici, l'uso di mezzi quali le biciclette e cose del genere. Rimane il problema, tuttavia, che l'economia ha comunque bisogno di trasportare sia mezzi che persone. Nel futuro, è possibile che decideremo di riorganizzare le strutture della società in modo da minimizzare questa necessità. Ma, nel breve termine, non si può pensare a una riduzione drastica e rapida di questo trasporto senza un effetto traumatico sulle strutture della società.

Si tratta allora di domandarsi come si può intervenire sul sistema di trasporto per agire sulla sua capacità di adattamento a un mondo di ridotte disponibilità di carburante. Senza considerare l'idrogeno come carburante (costoso e non utilizzabile in pratica), ci sono perlomeno tre possibilità di cui si legge comunemente nella letteratura.

1. Mezzi tradizionali a motore a combustione interna, ma più efficienti
2. Mezzi che usano carburanti derivati dall'agricoltura (biocarburanti)
3. Mezzi a trazione elettrica.

Tutte e tre queste possibilità sono normalmente considerate come positive per ridurre le emissioni inquinanti e la dipendenza dai combustibili fossili. Ma come stabilire una graduatoria di preferenza? Dobbiamo investire subito nei veicoli elettrici o non vale piuttosto la pena di graduare la transizione con veicoli tradizionali ma più efficienti? Ci sono, indubbiamente, ancora grandi possibilità di miglioramento per questi mezzi: motori più efficienti, veicoli più leggeri, più durevoli. Ma vediamo di esaminare queste tre possibilità in vista della capacità di generare feedback positivi e quindi essere introdotti rapidamente nel sistema di trasporti.



In primo luogo, vediamo che i mezzi tradizionali più efficienti non generano nessun feedback degno di nota. Per la ditta costruttrice, progettare e mettere in produzione un veicolo è sempre lo stesso costo, indipendentemente dall'efficienza dello stesso. Si può sostenere, anzi, che i materiali e gli studi necessari per fare un mezzo ad alta efficienza sono un costo in più che il mercato non ripaga. Dal punto di vista degli utenti, il costo in più del veicolo si ripaga, sì, con i consumi più bassi, ma solo a lungo termine e non è detto che l'investimento sia percepito come conveniente. In pratica, l'efficienza dei veicoli è un concetto che non è mai decollato sulla base del mercato. Si è cercato di imporre l'efficienza più di una volta con provvedimenti legislativi dall'alto ma, nella pratica, l'efficienza dei veicoli stradali in termini di km percorsi per litro di carburante è migliorata

soltanto sull'onda della crisi del petrolio degli anni 1970, per poi stabilizzarsi e addirittura diminuire. La figura a lato si riferisce agli Stati Uniti, da www.epa.gov/otaq/gifs/420s06003pg5.gif, ("MPG", "miles per gallon", ovvero "miglia per gallone"). Si nota come il leggero aumento dell'efficienza delle auto private (cars) è bilanciato dal leggero decremento di quello dei veicoli commerciali (trucks). Ancora una volta, notiamo come né i provvedimenti governativi, né gli inviti a comportamenti che riducano gli sprechi, hanno avuto grossi effetti su un mercato che reagisce quasi unicamente ai prezzi dei carburanti.

A differenza del caso dell'efficienza dei veicoli, il concetto di sostituire i carburanti fossili con carburanti di origine vegetale beneficia di un immediato feedback positivo con l'agricoltura. L'economia

agricola è stata in una continua crisi da sovrapproduzione negli ultimi decenni e gli agricoltori hanno visto come un'occasione da non lasciarsi scappare quella di un nuovo mercato per i loro prodotti: zuccheri da trasformare in etanolo e olii vegetali da trasformare in biodiesel. L'interesse degli agricoltori si è manifestato in termini di un lobbying governativo che ha fatto approvare un po' ovunque provvedimenti di detassazione per i biocarburanti o quote di consumo degli stessi da raggiungere entro un certo periodo. Rappresentativa di questi provvedimenti è la direttiva 2003/30/EC del parlamento Europeo che impone un target del 5.75% del consumo di biocombustibili in Europa entro il 2010.

Il feedback dei biocombustibili, tuttavia, illustra come tutti i feedback positivi generino feedback negativi di ritorno. In questo caso il ritorno negativo è stato quasi immediato. Il feedback negativo, in questo caso, è la competizione per il terreno disponibile fra i biocombustibili e i prodotti alimentari. L'effetto della competizione si vede già oggi molto bene con l'aumento dei costi degli alimentari che risentono della deviazione di una frazione dei cereali prodotti verso il mercato dei biocombustibili. In aggiunta, la produzione dei biocombustibili si trova a dipendere dai combustibili fossili per fertilizzanti, pesticidi, meccanizzazione agricola e trasporto a lunga distanza. Di conseguenza, soffre dell'ulteriore feedback negativo dell'aumento dei costi dei fossili. In pratica, ci si può attendere che i biocombustibili avranno un ruolo nel trasporto su strada sulla base degli incentivi governativi top-down. Tuttavia, potrebbero fare dei danni enormi alla capacità dell'agricoltura di produrre alimentari.

Al contrario dei casi visti finora, i veicoli elettrici generano feedback positivi duraturi e interessanti. Il mezzo elettrico a batterie si sposa perfettamente con l'energia rinnovabile che produce direttamente energia elettrica. Le due tecnologie possono andare in parallelo con le batterie dei veicoli elettrici che – in aggiunta – forniscono un mezzo di stoccaggio dell'energia prodotta che le rinnovabili – da sole - dovrebbero altrimenti prevedere a un costo aggiuntivo. Lo sviluppo tecnologico per le batterie dei mezzi elettrici genera anche sistemi sfruttabili come stoccaggio statico e viceversa. Inoltre, i mezzi elettrici sono mezzi a emissione zero, il che permette un loro utilizzo anche nei centri urbani.

La trazione a batteria è stata fino ad oggi bloccata dalla concorrenza dei motori a combustione interna che, pur poco efficienti, avevano dalla loro il basso costo dei combustibili. Oggi, vediamo svilupparsi condizioni favorevoli ai veicoli elettrici: lo sviluppo di nuove batterie, l'aumento dei costi dei combustibili fossili, e lo sviluppo dell'energia rinnovabile a basso costo. Tutti questi fattori fanno sì che ci siano le condizioni per una crescita esplosiva dei veicoli elettrici, che accompagna e promuove quella dell'energia rinnovabile. Basta un piccolo sostegno governativo e una presa di coscienza anche da parte di poche persone per far partire questa evoluzione che avrebbe un effetto estremamente benefico sulla situazione delle risorse e del riscaldamento globale.

Ovviamente, questo non vuol dire che la crescita dei mezzi elettrici debba rimanere esplosiva per sempre. Anche loro sono soggetti a un feedback negativo dovuto semplicemente allo spazio occupato. Inoltre, bisogna che la rete venga potenziata e adattata per l'incremento di assorbimento che i mezzi elettrici causerebbero; senza queste misure la crescita del parco dei veicoli elettrici non può avvenire. Una volta che i mezzi elettrici avessero completamente sostituito i mezzi a motore a scoppio, ci sarebbe senza dubbio un enorme vantaggio per tutti in termini di aria pulita, ma se si rimane nel paradigma dei mezzi privati rimarrebbe il problema degli ingorghi e del traffico. In ogni caso, come detto inizialmente, il problema del trasporto su strada non è soltanto quello dei pendolari e dei loro ingorghi mattutini, ma quello di mantenere una certa mobilità delle merci e delle persone, senza la quale la società come la conosciamo oggi non può esistere. Questa necessità si può soddisfare a costi ragionevoli e senza danno per l'ambiente usando la trazione elettrica in aggiunta ad altri metodi ben noti, come i trasporti pubblici, biciclette, eccetera.

Il caso dei veicoli elettrici è soltanto un esempio di una varietà di feedback positivi che si possono stimolare sia con provvedimenti top-down che con azioni bottom up. Fra questi, vale la pena di citare il mercato dell'efficienza energetica degli edifici in Germania, stimolato da provvedimenti governativi e da un atteggiamento positivo della popolazione. Questo mercato ha generato un'industria locale con effetti positivi sull'impiego e sulla distribuzione del reddito, oltre che sull'efficienza energetica del sistema-paese. In Italia, abbiamo visto questo effetto soprattutto nelle regioni del nord, nelle province autonome di Trento e Bolzano, mentre il resto del paese rimane molto indietro nell'adozione di misure come, per esempio, la certificazione energetica degli edifici.

Il trattamento dei rifiuti ai fini del riciclaggio si presta anche quello alla generazione di industrie locali, con i multipli vantaggi di generare reddito, di rendere più efficiente il sistema paese, di ridurre il problema rifiuti. Qui, sarebbero necessari incentivi governativi e – soprattutto – di non incentivare il feedback negativo che è l'incenerimento dei rifiuti, cosa che rende inutilizzabili "materie seconde" che potrebbero invece essere recuperate.

Si può anche pensare alla questione della popolazione, dove metodi coercitivi – oppure semplicemente esortativi – per ridurre la natalità generano spesso feedback negativi di ritorno, sia a livello

individuale sia a livello culturale. Anche qui, le società occidentali hanno invece sviluppato metodi di feedback positivo che si allineano con la naturale tendenza alla riduzione della natalità di società che si avviano a una certa stabilità economica, per esempio l'istruzione pubblica gratuita accessibile anche alle donne.

Altri esempi possono essere sicuramente trovati, il punto che questo capitolo ha cercato di evidenziare è che non tutte le soluzioni prospettate per le varie crisi che abbiamo davanti sono soluzioni efficaci. Molte sono controproducenti e generano reazioni negative che peggiorano il problema. Alcune sono neutre, ma le migliori sono quelle che generano feedback positivi che ne permettono una rapida diffusione.

3 Energia rinnovabile

Concludiamo questa trattazione con una discussione sulle energie rinnovabili, dette anche, impropriamente, "alternative." Queste tecnologie sono la speranza migliore che abbiamo oggi per liberarci dalla dipendenza dai combustibili fossili. Ma sono anche poco conosciute e poco capite e molto spesso soffrono di una immagine che le presenta come giochetti per ecologisti più che vere forme di produzione energetica. In realtà, la capacità di trasformare l'energia solare, in forma di luce o di vento, in energia elettrica in modo efficiente è una delle più importanti rivoluzioni tecnologiche del ventesimo secolo.

Sotto certi aspetti, le rinnovabili non fanno niente di più di quanto non facesse l'agricoltura tradizionale, ovvero trasformare l'energia solare in forme di energia sfruttabili in termini economici. Ma le "nuove" rinnovabili, il solare termico, il fotovoltaico e l'eolico, sono enormemente più efficienti dell'agricoltura. Le coltivazioni tradizionali riescono normalmente a trasformare in biomassa frazioni fra lo 0.1% e l'1% dell'energia della radiazione solare incidente. I collettori solari termici a bassa ed alta temperatura hanno oggi un'efficienza tra il 30% ed il 50% ed un costo ormai competitivo rispetto ad altre forme di generazione del calore. Una tecnologia moderna come quella delle celle fotovoltaiche ha già efficienza commerciale cento volte superiore a quella delle biomasse, dell'ordine del 15%-20% nel trasformare l'energia solare in energia elettrica utilizzabile. E queste sono solo le efficienze attuali di una tecnologia in crescita che promette di arrivare a oltre il 30% in pochi anni e poi a livelli ancora più alti. L'energia eolica sfrutta indirettamente la radiazione solare in forma di vento. La resa della tecnologia attuale in termini di area occupata dal piede delle torri eoliche è ancora superiore a quella del fotovoltaico; i costi sono già competitivi in confronto a quelli delle fonti fossili a parità di energia generata.

A queste forme di energia rinnovabile vanno aggiunte tecnologie ben note da lungo tempo ma che, negli ultimi tempi, hanno visto un rapido sviluppo. Fra queste, l'energia idroelettrica ad acqua fluente ("mini idro") e l'energia geotermica. Esistono anche altre forme di energia rinnovabile in corso di studio, come l'energia dalle maree, dal moto ondoso, dalle correnti oceaniche, i sistemi detti "solare a concentrazione" oppure "solare termodinamico," come pure le nuove tecnologie di eolico d'alta quota, come il sistema detto "kitegen" (www.kitegen.com). Sono forme di energia promettenti ma, al momento, non sono ancora disponibili in forma commerciale. Infine, va citata la biomassa come combustibile. Anche questa è una fonte rinnovabile che, tuttavia, è meno efficiente del fotovoltaico in termini di energia ottenibile per unità di area e che, pertanto, deve essere usata con grande precauzione per evitare di entrare in competizione con la produzione alimentare.

Non tutto quello che viene chiamato "rinnovabile" lo è veramente, come nel caso dell'incenerimento dei rifiuti. L'incenerimento è definito come una fonte energetica "assimilata" alle rinnovabili secondo la legge italiana, ma questa definizione serve solo a sviare imponenti finanziamenti che, invece, dovrebbero andare alle vere rinnovabili. Gli inceneritori bruciano una frazione importante di materie plastiche che derivano dal petrolio. Considerare l'energia ottenuta dall'incenerimento come una sorgente rinnovabile non è solo sbagliato dal punto di vista formale, ma è dannoso in quanto genera effetti perversi facendo diventare i rifiuti un combustibile piuttosto che una sorgente di "materie seconde" attraverso il riciclaggio. Anche la combustione di biomassa pura può essere una falsa sorgente rinnovabile se la biomassa viene coltivata con l'uso di fertilizzanti e altri derivati dal petrolio o se viene trasportata a grande distanza dalla zona di produzione utilizzando veicoli alimentati con derivati del petrolio.

Occasionalmente, il termine "rinnovabile" viene applicato anche all'energia nucleare. Si intende in questo caso che le risorse di materiale fissile o fondibile sono talmente grandi che le si possono ritenere infinite nella pratica. Questo è sicuramente sbagliato per quanto riguarda l'uranio fissile (U235), che è una risorsa altrettanto limitata dei combustibili fossili, perlomeno se usato con la tecnologia corrente. Altrettanto sbagliato è applicare la definizione alla fusione nucleare che, nella forma che si cerca di sviluppare al momento, utilizza un isotopo relativamente raro del litio come sorgente di combustibile. Anche in questo caso, le risorse sono limitate e la loro scarsità potrebbe farsi sentire in tempi non lunghissimi (Fasel 2005).

In principio, si potrebbero realizzare forme di fusione nucleare che utilizzano elementi molto comuni sulla crosta terrestre, come il deuterio o addirittura l'idrogeno. In questo caso, la fusione nucleare si potrebbe considerare come, se non proprio rinnovabile, perlomeno come "praticamente illimitata". Ma non sappiamo se una tecnologia del genere si potrà mai realizzare in pratica.

Il potenziale dell'energia rinnovabile vera e propria è immenso se consideriamo l'abbondanza anche solo della radiazione solare diretta. La radiazione che cade in un anno su un metro quadro di superficie a



latitudini medie corrisponde a quella di un intero barile di petrolio. Anche con le tecnologie fotovoltaiche attuali, non ci sono problemi di area per produrre a livello mondiale quantità di energia pari a quelle generate oggi dai fossili utilizzando soltanto una minima frazione del territorio emerso (meno dell'1%). La figura a lato mostra l'area (tratteggiata) che sarebbe necessario coprire di pannelli fotovoltaici in una zona desertica dell'Arabia Saudita per ottenere energia pari all'attuale produzione di energia primaria mondiale (da Muneer 2003). L'ipotesi dello studio è che la

conversione sia possibile con un'efficienza del 20%; cosa alla quale la tecnologia attuale si sta già avvicinando. Evidentemente, non ci manca il posto per mettere i pannelli. Se aggiungiamo le forme di energia solare indiretta (principalmente eolico e mini-idro) come pure l'energia geotermica, vediamo che le prospettive sono eccellenti.

La particolarità delle nuove rinnovabili è di non essere soggette al ciclo di Hubbert, che invece si applica a tutte le risorse soggette a esaurimento. Le rinnovabili sono disaccoppiate dai cicli minerali e biologici terrestri; l'energia solare non viene minimamente intaccata dal prelievo che se ne fa sulla superficie terrestre. Ovviamente, questo non vuol dire che le rinnovabili possano espandersi senza limiti. Al contrario, la loro espansione è limitata per il fotovoltaico dalle esigenze di mantenere il terreno libero per l'agricoltura e per l'eolico dal numero limitato di siti adatti oppure, per l'eolico di alta quota, dalla necessità di non influire significativamente sulla circolazione dei venti nell'atmosfera. Tuttavia, mentre una risorsa non rinnovabile raggiunge i limiti massimi compatibili con l'ambiente come un picco seguito da declino, una risorsa rinnovabile come il fotovoltaico o l'eolico arriva ai limiti come un "tetto" che, una volta raggiunto, può essere mantenuto per un tempo indefinito. Questa caratteristica rende le rinnovabili particolarmente adatte a una società sostenibile la cui produzione di energia può essere mantenuta per un lungo periodo a ritmi costanti.

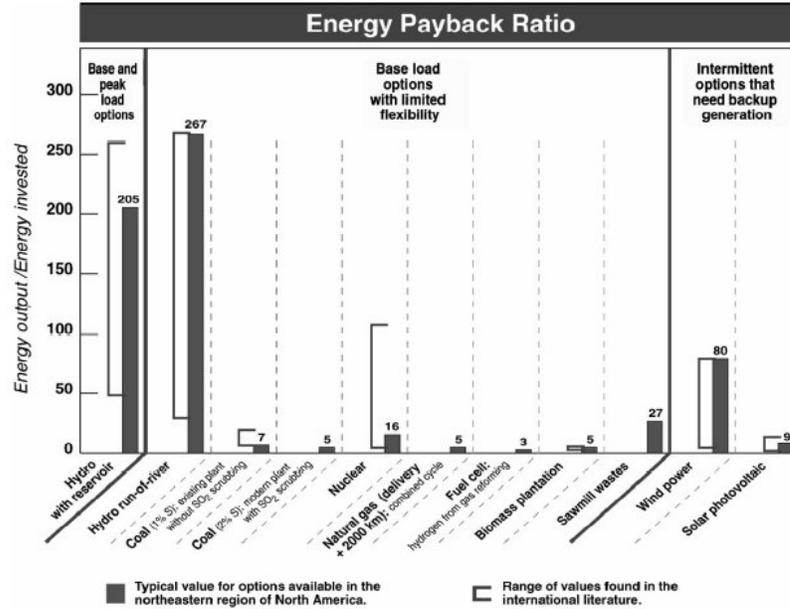
Si tratta a questo punto di stabilire un criterio per valutare il relativo valore delle energie rinnovabili e impegnare le risorse disponibili verso quelle più adatte per gli scopi che ci siamo posti. Tipicamente, questo giudizio è basato su considerazioni basate sul prezzo per unità di energia prodotta. Questo però rischia di essere fuorviante in quanto i prezzi attuali dipendono sia dagli investimenti pregressi sia dai sussidi statali, occulti o palesi. Inoltre, nella maggior parte dei casi i prezzi non tengono conto dei cosiddetti "costi esterni" che sono molto difficilmente quantificabili anche se esistono e qualcuno li deve pagare. Infine, il prezzo è una variabile che dipende dalla scala della produzione e pertanto il giudizio penalizza le tecnologie nuove, come le rinnovabili, rispetto a quelle più consolidate.

Per questa ragione, in questa sede non parleremo di proiezioni e dati monetari relativi all'energie rinnovabili. Ci baseremo invece su fattori fisici. Un criterio basato su questi fattori esiste e viene chiamato EROEI, "energy returned for energy invested", ovvero energia ottenuta per energia investita. Tutte le forme di produzione di energia, come scavare un pozzo di petrolio, richiedono un investimento energetico che viene restituito poi dalla produzione. La fonte energetica è tanto migliore quanto maggiore è il rapporto fra l'energia restituita e l'energia investita. In questo senso, l'EROEI è l'equivalente energetico del normale concetto di ritorno finanziario. L'EROEI si calcola per mezzo di un'analisi di ciclo di vita (LCA) di tutti i costi energetici correlati alla costruzione di un impianto, incluso i costi di smantellamento e di smaltimento a fine vita.

Il concetto di EROEI non è ancora definito in modo completamente univoco. In effetti, rimangono delle incertezze su come gestire i costi esterni nell'analisi LCA. Per esempio, nel caso di una centrale nucleare, non si dovrebbero trascurare certi costi quali la necessità di prevedere una difesa strategica della centrale stessa sia da attacchi terroristici come convenzionali. Ma, normalmente, questi costi non vengono considerati. Comunque sia, anche tenendo conto di questi limiti, l'uso di un criterio fisico elimina le incertezze derivanti dai criteri monetari applicati alle rinnovabili. Prevedere oggi su una distanza di decine di anni quali saranno parametri economici quali l'inflazione, il tasso di sconto, i costi dei combustibili e simili è

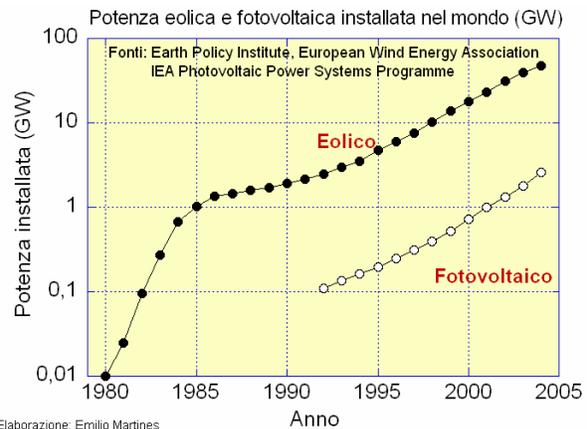
sostanzialmente impossibile. Viceversa, siccome l'energia è una grandezza fisica, non è influenzata da fattori monetari.

La seguente tabella dei valori dell'EROEI è tratta da Gagnon et al (2002). L'articolo non è recentissimo ma i valori riportati sono ancora validi come ordine di grandezza, anche se dovrebbero essere aggiornati a vantaggio delle tecnologie rinnovabili che sono state migliorate nel frattempo. Tuttavia, questa tabella è interessante in quanto riporta tutti insieme i valori dell'EROEI di un gran numero di tecnologie. Riporta anche le "forchette di incertezza" dei dati in letteratura. Come si vede, ci sono delle forti variabilità nei valori ma, perlomeno, i rapporti reciproci sono evidenti.



La tabella divide le fonti energetiche in tre categorie. La prima è "base load", ovvero tecnologie che tendono a produrre energia a potenza costante e che non sono in grado di adattarsi alla variazione della domanda giornaliera e stagionale. Tipicamente, si parla dei reattori nucleari che sono costruiti per operare sempre alla massima potenza. La seconda è "peak load", ovvero sistemi che possono adattare la loro produzione alla domanda. Qui, la tabella riporta il grande idroelettrico, ma i tipici sistemi di questo tipo sono le turbine a gas che fanno da "buffer" per adattare la produzione alla domanda. La terza categoria è quella delle sorgenti intermittenzi, ovvero le rinnovabili.

L'esame della tabella mostra che esistono tecnologie rinnovabili che hanno ritorni energetici (EROEI) molto superiori a 1. In particolare, le rinnovabili hanno EROEI altrettanto buoni se non superiori di quelli di tecnologie che a volte vengono presentate come "l'unica possibile soluzione per la crisi energetica" (per esempio, carbone). Le rinnovabili sono dunque una soluzione concreta per produrre energia in modo non inquinante e senza problemi di esaurimento dei combustibili. La loro efficacia si vede anche dal rapidissimo ritmo di crescita, intorno al 30% annuo sia per l'eolico come il fotovoltaico (illustrazione, Martines 2005). Va detto che anche a questo ritmo di crescita le rinnovabili non sono riuscite a coprire l'incremento dei consumi nel periodo in considerazione, ma va anche detto che, storicamente, nessuna fonte di energia aveva mostrato simili ritmi di crescita. In confronto, il petrolio non era mai cresciuto a ritmi di oltre il 7% l'anno, nemmeno ai tempi d'oro.



Elaborazione: Emilio Martines

Non è detto che sarà possibile mantenere questi ritmi di crescita delle rinnovabili anche in un periodo di crisi economica dovuto alla crisi del petrolio e bisogna anche tenere conto del problema dell'intermittenza delle fonti rinnovabili. Al momento, infatti, l'immissione di energia intermittente nella rete viene compensata e integrata mediante generatori a combustibile fossile. Questa non è una soluzione a lungo termine, ma solo un rimedio temporaneo per far accettare dalla rete la connessione diretta del maggior numero possibile di generatori intermittenti. Al presente, la quantità di potenza intermittente allacciabile non può superare il livello di stabilità della rete e ciò costituisce un obiettivo limite tecnico all'espansione delle fonti elettriche rinnovabili. Per il futuro, è necessario superare questo limite cominciando a pensare a sistemi di integrazione che comprendano anche sistemi di stoccaggio specificatamente pensati per fare da "buffer" all'intermittenza giornaliera delle sorgenti rinnovabili, come pure da stoccaggio a lungo termine per tenere conto delle caratteristiche stagionali di sorgenti come l'eolico o il fotovoltaico.

La questione dello stoccaggio viene a volte presentata come un ostacolo insormontabile alla penetrazione delle rinnovabili nella rete elettrica, ma non è così. Lo stoccaggio è soltanto un elemento del concetto di "rete intelligente" (*smart grid*) che si sta sviluppando molto rapidamente. La rete intelligente è un concetto diverso da quello del modello corrente di rete centralizzata che non potrà sopravvivere all'incremento dei costi dei combustibili fossili. Il concetto di rete intelligente (vedi, per esempio, www.smartgridnews.com) si basa sull'idea di una rete flessibile e decentralizzata dove varie sorgenti energetiche vengono gestite dinamicamente a tutti i livelli temporali, ovvero per fluttuazioni a breve, medio e lungo termine, in modo da ottimizzare l'offerta e la domanda di energia elettrica. Questa gestione può e deve fare uso di sistemi di stoccaggio locali su varie scale ma, quando possibile, farà uso della naturale variabilità della produzione in zone diverse per compensare le variazioni. Fra le altre cose, la rete intelligente può gestire anche sistemi di "base load" come l'energia nucleare o l'energia geotermica che, da soli, presenterebbero problemi di stoccaggio analoghi, anche se opposti, a quelli dell'energia solare. Sia l'energia geotermica come quella nucleare, infatti, non sono concepiti in modo da poter seguire le variazioni della domanda della rete e – in assenza di sistemi di stoccaggio – dovrebbero essere ampiamente sovradimensionati per poter fare fronte alla domanda di picco. Questo, ovviamente, li renderebbe antieconomici.

Su piccola scala, lo stoccaggio energetico con metodi elettrochimici (batterie) non cambia enormemente i valori dell'EROEI delle rinnovabili, soltanto di circa un fattore 2 secondo Rydh e Sanden (2005) considerando le tecnologie disponibili. Su larga scala e, soprattutto, per lo stoccaggio a lungo termine ci sono opzioni sicuramente migliori e la possibilità di fare delle economie di scala con impianti di stoccaggio centralizzato dovrebbe portare i costi a livelli ragionevoli. Esistono varie tecnologie per questo tipo di stoccaggio. Fra queste citiamo lo stoccaggio in bacini idroelettrici oppure in forma di aria compressa (Compressed air energy storage, o "CAEN"), poco costosi e con efficienze di ciclo intorno al 70%. Per lo stoccaggio a lungo termine, si possono usare specie chimiche stabili che possono essere immagazzinate per tempi lunghi senza che si alterino. In questo campo, si è molto parlato dell'idrogeno e questo rappresenta al momento una possibilità interessante, anche se non la sola concepibile. L'idrogeno può essere prodotto mediante elettrolisi con buona efficienza e ha il vantaggio di poter essere utilizzato in accoppiata con le pile a combustibile che sono elementi molto efficienti anche su scale relativamente piccole. L'efficienza di ciclo potrebbe essere intorno al 30%-50% a seconda della scala e della tecnologia usata. Tuttavia, i costi delle pile a combustibile rimangono molto elevati e l'affidabilità della tecnologia ancora da verificare. In questo senso, appaiono concorrenziali tecnologie già note come le turbine a gas che potrebbero essere adattate per bruciare idrogeno con buona efficienza su scale medie e grandi, anche qui intorno al 50% o anche superiore. In alternativa all'idrogeno, si può pensare di utilizzare altri elementi che formano specie chimiche stabili e dalle quali si può estrarre energia. Lo zinco è una possibilità interessante, con il vantaggio rispetto all'idrogeno che si può stoccare in forma solida per lungo tempo e senza particolari precauzioni. Lo zinco verrebbe utilizzato per produrre energia in batterie "zinco aria" che lo trasformerebbero in zinco ione (Zn^{2+}). Lo zinco verrebbe poi nuovamente trasformato in forma metallica e riutilizzato. L'efficienza di ciclo può essere intorno al 40%-50%. Tutte queste tecnologie esistono già, anche se non sono al momento commercializzate su larga scala.

Al momento, la penetrazione delle "nuove rinnovabili" (eolico e fotovoltaico) rimane marginale nelle reti elettriche, ma non c'è dubbio che a lungo andare finirà per rappresentare una frazione importante, e alla fine prevalente, dell'energia prodotta. Per arrivarci, occorrono delle politiche che favoriscano l'introduzione delle rinnovabili in rete che mirino al futuro, senza guardare unicamente ai costi immediati. L'energia rinnovabile accoppiata con sistemi di stoccaggio nell'ambito di una rete intelligente rappresenta la migliore speranza per una soluzione definitiva del problema energetico.

4 Conclusioni

In questo documento, abbiamo esaminato tutto il "sistema mondo" nelle sue tendenze evolutive. Evidentemente, la complessità di un compito del genere è tale che non si possono fornire né certezze né ricette per rimedi sicuri ai problemi che ci troviamo di fronte. Tuttavia, abbiamo anche visto come i metodi predittivi sviluppati in quasi un secolo di ricerca siano nel complesso utili, anche se mai perfetti. Ovvero, l'immagine di "catastrofismo" che i media attribuiscono spesso alle predizioni del passato si rivela falsa. Questi metodi ci dicono che stiamo fronteggiando un momento critico: una vera "tempesta perfetta" dove l'esaurimento delle materie prime e dei combustibili fossili si accoppia con la perdita di suolo fertile e con il riscaldamento globale per generare un collasso del sistema industriale planetario che potrebbe avvenire entro i prossimi decenni.

Tuttavia, gli stessi metodi predittivi ci mostrano che se si mettono in atto rimedi basati sulle moderne tecnologie di produzione energetica, di riciclaggio delle materie prime e di gestione dell'agricoltura, sarà possibile superare il momento difficile e approdare a una società stabile, prospera, e equa.

I soli meccanismi del libero mercato non ci porteranno a questa società futura. Al contrario, il mercato deve essere regolato per evitare il sovrasfruttamento delle risorse, anche nel senso della capacità dell'atmosfera di assorbire i gas serra prodotti dalla combustione degli idrocarburi. Spesso, purtroppo, chi si rende conto dei problemi si lancia affannosamente alla ricerca di una soluzione, che spesso è un qualche miracolo tecnologico più o meno improbabile. Su questo punto, ASPO-Italia suggerisce un approccio più strutturato, basato sulla dinamica dei sistemi che permette di inquadrare l'intero sistema-mondo e di valutare l'effetto dell'introduzione di singole misure. E' su questa base che appare chiaro come non esistano soluzioni miracolose. Esistono, sì, soluzioni migliori di altre (per esempio le energie rinnovabili) e soluzioni che in pratica non lo sono (per esempio i biocombustibili per i veicoli stradali). Ma il sistema economico e ambientale va visto nella sua globalità e nel suo complesso sistema di interazioni. Se non lo si esamina in questi termini, non esiste nessuna soluzione possibile e non possiamo che avviarci ad occhi chiusi verso l'inevitabile collasso economico e ambientale che ci aspetta se lasciamo che le cose come stanno.

Ciò detto, alcuni punti salienti possono essere riassunti nel "decalogo ASPOItalia":

1. Il problema dell'esaurimento delle fonti energetiche, come pure quello delle materie prime più importanti, sia minerali che biologiche, è grave e immediato.
2. Fra i problemi dell'esaurimento rientra quello dell'esaurimento della capacità dell'atmosfera di assorbire i prodotti della combustione dei fossili e dei gravi danni al clima che ne risultano. Anche questo è un problema grave e immediato.
3. Il sistema economico mondiale è destinato ad affrontare un grave collasso entro un decennio o due al massimo se non si prendono provvedimenti per contrastare l'esaurimento delle materie prime e il cambiamento climatico.
4. Le energie rinnovabili sono già oggi sufficientemente mature per sostituire i fossili, in particolare se accoppiate a misure efficaci di efficienza energetica. Il criterio necessario per stabilire questo punto è quello dell'EROEI (il ritorno in energia per energia investita).
5. Sulla base dell'EROEI, le rinnovabili più promettenti sono il solare termico, il fotovoltaico, l'eolico e – per il futuro – l'eolico d'alta quota (www.kitegen.com) e forse anche il solare a concentrazione. A queste fonti si aggiungono l'idroelettrico ad acqua fluente, il geotermico e altre fonti in corso di sviluppo. I biocombustibili hanno bassa EROEI e non sono consigliabili se non per applicazioni ausiliarie.
6. L'energia nucleare nella sua forma attuale soffre di vari problemi, fra i quali la carenza di uranio minerale. Pertanto, non può essere considerata la soluzione di tutti i problemi nel breve termine. Può tuttavia dare un importante contributo in una fase di transizione e futuri sviluppi potrebbero rimediare a molti dei problemi attuali della tecnologia.
7. Il riciclaggio delle materie prime e il riuso dei manufatti sono elementi essenziali per fronteggiare l'esaurimento in atto. L'incenerimento dei rifiuti è da evitare in quanto in competizione con il riciclo e riuso.

8. L'agricoltura è forse il problema più critico al momento attuale per via dell'erosione irreversibile del suolo fertile. Non esistono soluzioni magiche ma solo buone pratiche da applicare metodicamente.
9. La popolazione mondiale è destinata a interrompere la tendenza alla crescita e iniziare una traiettoria discendente entro pochi decenni e forse prima. E' essenziale sviluppare soluzioni culturali per favorire la transizione verso una bassa natalità e sostenere l'agricoltura per evitare che la riduzione della popolazione divenga traumatica.
10. Esistono buone soluzioni e soluzioni molto meno buone ai problemi che abbiamo di fronte. Le migliori soluzioni sono quelle che generano un feedback positivo nel sistema economico, come per esempio l'accoppiamento dei veicoli a trazione elettrica con il fotovoltaico ed eolico.

Ciò detto, in questo documento, abbiamo preso in considerazione elementi che sono in qualche modo quantificabili e monetizzabili. C'è da aggiungere, tuttavia, che non tutto al mondo ha un valore di mercato e che proprio quelle entità che l'economia standard non considera sono forse le più importanti. Se l'unico obiettivo dell'umanità fosse la massima crescita possibile dell'economia e della popolazione, anche dato per assurdo l'assenza di limiti fisici, il pianeta si trasformerebbe in un'unica immensa megalopoli. Questo non può essere lo scopo degli esseri umani. Anche le creature non umane hanno i loro diritti e la bellezza del nostro pianeta deriva dalla varietà dei suoi ambienti e da quanto la società umana si trova in armonia con l'ecosistema in generale. Crediamo che le azioni che abbiamo delineato in queste note favoriscano a lungo termine quest'armonia.

Tutte queste azioni rappresentano indubbiamente una sfida immensa. Tuttavia, il sistema economico si sta muovendo comunque verso una transizione che lo porterà ad adattarsi ai limiti planetari; agire o non agire secondo le linee qui descritte fa comunque una differenza fra una transizione traumatica e una dolce. Agire, anche parzialmente, per ridurre questo trauma è possibile, utile e necessario. Va da sé che queste azioni sono pensabili in pratica solo in un clima di pace, di cooperazione e di comprensione fra popoli e nazioni. La guerra è il maggior spreco concepibile di risorse preziose ed è la strategia che ci porta più rapidamente al collasso.

4.1 Il ruolo di ASPO

ASPO internazionale, e la sua sezione Italiana (ASPO-Italia), è nata come un gruppo di scienziati e ricercatori indipendenti impegnati soprattutto sulla questione dell'esaurimento delle risorse, in particolare di quelle petrolifere. ASPO si è ampliata e sviluppata negli ultimi anni e conta ormai sessioni in quasi tutti i paesi detti "occidentali". Lo scopo dell'associazione si è ampliato e adesso comprende una visione ampia di tutto quello che ha a che vedere con il consumo delle risorse, senza trascurare i loro effetti ambientali, in particolare il riscaldamento globale.

ASPO si propone di mantenere il proprio ruolo di serbatoio di pensiero raccogliendo i contributi di ricercatori e studiosi sia a livello nazionale come internazionale. Intende anche concretizzare il proprio impegno a livello divulgativo, come pure a livello politico interagendo ufficialmente con entità governative come la EC e i governi nazionali. Intende anche confrontarsi direttamente con le associazioni che si occupano di risorse energetiche e di petrolio, come la International Energy Agency (IEA), il World Energy Council (WEC) e altre. ASPO-Italia intende anche promuovere lo sviluppo dell'energia rinnovabile a tutti i livelli in Europa.

5 Bibliografia

Abernethy, V. 1993, Population Politics: The Choices That Shape Our Future. Virginia Abernethy. New York: Plenum Press

Aggregate Research, 2006 (accessed) <http://www.aggregateresearch.com/caf/press.asp?id=9395>

AITEC, 2006 (accessed) www.aitecweb.com

Ayres Robert U., 1998 Technological Progress: A Proposed Measure, Technological Forecasting and Social Change, Volume 59, Issue 3

Ayres, Robert U., 2001, "The minimum complexity of endogenous growth models: the role of physical resource flows" *Energy*, 26, 9, 817-838

Ayres, R.U., L.W. Ayres and B. Warr (2002). Exergy, power, and work in the U.S. economy. INSEAD Working paper 2002/52/EPS/CMER. INSEAD: Fontainebleau, France.

Ayres 2006 <http://ec.europa.eu/environment/enveco/waste/ayres.pdf>

Bardi, Ugo. 2005 *Energy Policy, Volume 33, Issue 1, , Pages 53-61*

Bardi, U. 2006 (1) "Journal of Energy Sources, B." in press

Bardi, U., 2006 (2) "Scherzare col fuoco; miti e realtà delle nanopatologie da inceneritori" http://www.aspoitalia.net/index.php?option=com_content&task=view&id=118&Itemid=38

Bardi, U, 2007 (1), "Il pianeta dei minatori, i limiti minerali della società industriale" <http://www.aspoitalia.net/images/stories/ugo/pianetaminatori.pdf>

Bardi, U. 2007 (2), "Il picco dei rifiuti". <http://www.aspoitalia.net/images/aspoitalia1/rifiutizeroBardimay07.pdf>

Bardi U. 2007 (3) "Si può estrarre uranio dall'acqua di mare?" <http://aspoitalia.blogspot.com/2007/12/si-pu-estrarre-uranio-dallacqua-di-mare.html>

Bardi U. And Yaxley L.M., 2007 (3). To be published

Bardi U. and Pagani M., 2007, "Peak Minerals", *The Oil Drum*, <http://www.theoil Drum.com/node/3086>

Blain, B. "The End of World Population Growth" 2007 (accessed) <http://www.siue.edu/~rblain/worldpop.htm>

Blair, R.D., D.L. Kaserman and R.C. Tepel (1984). "The Impact of Improved Mileage on Gasoline Consumption." *Economic Enquiry* 22 (April): 209-217.

Brookes, L. (1990). "The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution." *Energy Policy* 18 (2): 199-201.

Bravo, Giangiacomo, 2006 – Gli alberi o le statue. Risorse comuni e sostenibilità ambientale. Aracne

Brown, L. 2006, <http://www.earth-policy.org/Indicators/Grain/2006.htm>

Butler, S. 2004 "The Fertility Riddle" *Nature* **432**, 38-39 (4 November 2004) |

Catton William, R. 1982 "Overshoot", University of Illinois press. ISBN 0-252-009826

- Cohen, J. L. 1996 "How many people can the earth support?" ISBN 0-393-31495-2
- Daly, Herman, 1977 "Steady State Economics", Island Press ISBN 155963071X
- Diamond, Jared, 2005 "[Collasso. Come le società scelgono di morire o vivere](#)", Einaudi
- Duncan, Richard, 2006 (accessed) <http://www.hubbertpeak.com/duncan/Olduvai.htm>
- Dyson, F. J. (1960). "Search for Artificial Stellar Sources of Infra-Red Radiation". *Science* **131**: 1667–1668.
- Econsmart concrete (2006, accessed) http://www.ecosmartconcrete.com/enviro_statistics.cfm
- Energy Watch Group, 2007 "Coal: reserves and future production"
<http://www.energywatchgroup.org/files/Coalreport.pdf>
- FAO, 2007 (accessed) "feeding the world, the search for food security,
<http://www.fao.org/docrep/u8480e/u8480e0a.htm>
- Fasel, D., Tran, M.Q., 2005, "Availability of lithium in the context of future D–T fusion reactors" *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005) 1163–1168
- Fiddaman T. 2006 (accessed) <http://www.sd3.info/models/#Business>
- Forrester, J. W. 1971 *World Dynamics*. Wright-Allen, Cambridge, Mass.
- Gagnon L., Belanger C., Uchiyama Y., 2002, "Life-cycle assessment of electricity generation options", *Energy Policy*, vol 30, p. 1267-1278
- Georgescu-Roegen, Nicholas, 1971, "The Entropy Law and the Economic Process", Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts
- Grubb, M.J. (1990). "Energy Efficiency and Economic Fallacies." *Energy Policy* 18 (9): 783-785.
- Hanna, Susan H. (1997) The new frontier of American fisheries governance *Ecological Economics, Volume 20, Issue 3, March 1997, Pages 221-233*
- Hardin, Garrett, 1968. "The Tragedy of the Commons," *Science*, n. 162 pp 1243-1248.
- Harrison, B & Bluestone, B, 1988, *The Great U-Turn: Corporate Restructuring & the Polarizing of America* (ISBN: 0465027199)
- Hawken, P, Lovins, A. Lovins H., 2007 (Accessed). "Natural Capitalism" <http://www.natcap.org/>
- Heinberg, R. 2007,
http://globalpublicmedia.com/richard_heinbergs_museletter_the_oil_depletion_protocol_an_update
- Hodges, M. W. 2007 (Accessed) "Grandfather Economic Report" <http://mwhodges.home.att.net>
- Hubbert, M.K. (1956). *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*. Presented before the Spring Meeting of the Southern District, American Petroleum Institute, Plaza Hotel, San Antonio, Texas, March 7-8-9, 1956
- Hubbert. M.K. 1974, "On the Nature of Growth" <http://energybulletin.net/3845.html>
- Huebner, Jonathan, 2005, *Technology Forecasting & Social Change*, n. 72, p980
- Kelly, T., Buckingham, D., DiFrancesco, C., Porter, K., Goonan, T., Sznoppek, J., Berry, C. & Crane, M. (2006, accessed) *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the U.S.*, Open File Report 2001-006 (U.S. Geol. Survey, Washington, DC). <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/#data>

Khazzoom, I.D. (1980). "Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances." *The Energy Journal* 1 (4): 21-40.

Laherrere, J. 2006, Beijing 16-17 October 2006 Workshop "Global Dialogue on Energy Security" The Dialogue International Policy InstituteChina Institute of International Studies Fossil fuels: what future? <http://www.oilcrisis.com/laherrere/Beijing20061009.pdf>

Muneer, T, Asif, M., Kubie, J, 2003. « Generation and transmission prospects for solar electricity: UK and global markets" *Energy Conversion and Management* vol. 44 pp. 35–52

Gagnon, L. Bélanger, C, Uchiyama, Y., 2002, "Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001 " *Energy Policy, Volume 30, Issue 14, November 2002, Pages 1267-1278*

Golub R., Townsend J., 1977, "Malthus, Multinationals and the Club of Rome" vol 7, p 201-222

Gordon R. B., Bertram M., and Graedel T. E., 2006, "Metal stocks and sustainability", *Proceedings of the national academy of sciences*, January 31, 2006, vol. 103, no. 5, 1209–1214

Martines, E. 2005, "Fotovoltaico e eolico: a che punto siamo?" www.aspoitalia.net
http://www.aspoitalia.net/index.php?option=com_content&task=view&id=64&Itemid=38

Marxsen, Craig S. 2003, *The Independent Review*, v. VII, n. 3, Winter 2003, pp. 325– 342.

Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, and William W. Behrens III. 1972. "The Limits to Growth". New York: Potomac Associates.

Meadows, Dennis, William W. Behren III, Donella Meadows, Roger F. Naill, Jorgen Randers, and Erich K.O. Zahn. 1974. *Dynamics of Growth in a Finite World*. Cambridge: Wright-Allen Press.

Meadows, Donella H; Meadows, Dennis L; and Randers, Jorgen: (1992) *Beyond the Limits, Chelsea Green, Post Mills, VT*

[Meadows](#), D.H., [Randers](#), J., [Meadows](#), D.L, 2004, *Limits to Growth: The 30-Year Update* Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vermont

Meadows, Donella, 2005 http://www.developerdotstar.com/mag/articles/places_intervene_system.html

Moxnes, E. 2000. "Not only the tragedy of the commons: misperceptions of feedback and policies for sustainable development." *System Dynamics Review* **16**(4).

Naill, Roger F. 1972. *Managing the Discovery Life Cycle of a Finite Resource: A Case Study of U.S. Natural Gas*. Master's Thesis Submitted to the Alfred P. Sloan School of Management. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139.

Nordhaus W., 1992, "Lethal Models" *Brookings Papers on Economic Activity* 2, 1

Randers, Jorgen, 2000 "From limits to growth to sustainable development" *System Dynamics Review* 16: 213-224.

Reynolds, D.B., 1999. The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity. *Ecological Economics* 31, 155.

Rydh C. J., and Sandén B. A. 2005, Energy analysis of batteries in photovoltaic systems: Part II. Energy return factors and overall batteryefficiencies, *Energy Conversion and Management, Volume 46, Issues 11-12, July 2005, Pages 1957-1979*

Ruddiman, W.F. 2007, (accessed) <http://www.whfreeman.com/ruddiman/>

Scott Gordon H. (1954). The Economic Theory of a Common-Property Resource: The Fishery. The Journal of Political Economy 62(2): 124-142.

Simmons, M. 2004. <http://www.simmonsco-intl.com/files/TXU%20Meeting.pdf>

Simon, J. 1981, "The Ultimate Resource" Princeton University press, Princeton.

Solow, R., 1957, [The Review of Economics and Statistics](#), Vol. 39, No. 3 pp. 312-320

Solow R., 1997. Ecological Economics vol 22 pp 267-268

Sterman JD. 1981. The Energy Transition and the Economy: A System Dynamics Approach, MIT PhD Thesis, Volume I and II. Sloan School of Management)

Stiglitz, J.E. (1974a). Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths . Review of Economic Studies, symposium, 123-37.

Stiglitz, J.E. (1974b). Growth with Exhaustible Natural Resources: The Competitive Economy. Review of Economic Studies, symposium, 138-57.

Targetti Lenti, R. 2005, "Economia del benessere e distribuzione del reddito", http://www.unipv.it/webdept/p_12_08.pdf

Treu, M.C. 2005 ; atti del Convegno nazionale: Produzione e consumo sostenibile, Monza 18 Giugno 2005, http://www.agricoltura.regione.lombardia.it/admin/rla_Documenti/1-2973/treu_politecnico_relazione.pdf

Wackernagel, M. Rees, W.E., Testemale, P., 2001, Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth ISBN: 086571312X

Ward P., Brownlee D., 2002, "The Life and Death of Planet Earth" Times books, New York

Wikipedia, 2007 (accessed) "Abundance of the elements"
http://en.wikipedia.org/wiki/Abundances_of_the_elements_%28data_page%29