

Tecnologia, Ambiente e i Limiti dello Sviluppo

Angelo Bonomi
Maggio2013

L'effetto serra e il riscaldamento terrestre sono ormai da decenni al centro delle preoccupazioni ambientali e, per contrastare questi effetti, ci si propone un generale abbassamento delle emissioni di gas serra con interventi essenzialmente politici che orienterebbero le tecnologie e l'economia verso soluzioni alternative come il risparmio energetico e lo sviluppo di energie rinnovabili. In miei articoli precedenti [1, 2] avevo già discusso i limiti di quest'approccio che non tiene conto di altri fattori evolutivi e in particolare i bisogni di energia dovuti all'aumento della popolazione e al suo desiderio di miglioramento delle condizioni vita. Partendo da questa constatazione vorrei discutere un confronto, dal punto di vista tecnologico, tra l'approccio attuale espresso in particolare dal Protocollo di Kyoto e un approccio ai problemi globali che, agli inizi degli anni 70, ebbe grande risonanza, conosciuto come "I Limiti dello Sviluppo". Esso fu il risultato dell'attività di un'associazione "Il Club di Roma" formato da personalità indipendenti di grande rilievo in campo scientifico ed economico, e presentato in un rapporto pubblicato nel 1972 [3]. Quest'approccio ebbe vari sviluppi durante tutti gli anni 70 ma poi cadde nell'oblio oscurato dalla crisi dovuta al forte aumento del prezzo del petrolio. L'integrazione di questi due approcci è utile per avere una visione d'insieme che tenga conto di tutti gli aspetti dell'evoluzione umana per portarci verso un sistema ecotecnologico accettabile dal punto di vista ambientale ma nello stesso tempo in grado di rispondere a problemi come l'aumento della popolazione e l'esaurimento delle materie prime.

Protocollo di Kyoto e Limiti dello Sviluppo

Il solo aspetto comune tra l'approccio rappresentato dal Protocollo di Kyoto e quello dai Limiti dello Sviluppo riguarda la preoccupazione per il futuro dell'umanità messo in pericolo da alcuni aspetti del suo sviluppo. Il protocollo di Kyoto nasce da una preoccupazione ambientale e si rifà a modelli climatici di previsioni di aumento della temperatura terrestre dovute all'aumento dei gas serra nell'atmosfera, elaborate da un gruppo di scienziati del cosiddetto IPCC (International Panel on Climate Change), supportato dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale e dal Programma delle Nazioni unite per l'Ambiente. I risultati dell'IPCC sono quindi stati alla base di questo accordo internazionale, aperto ai vari stati che vogliono aderire, per un intervento adito a evitare gli effetti climatici negativi e basato su una riduzione programmata delle emissioni di gas serra attraverso opportune politiche di interventi statali, tasse e scambi di diritti di emissione. I Limiti dello Sviluppo sono stati invece basati su un approccio globale ai problemi umani basato su cinque fattori principali che sono: l'incremento della popolazione, la disponibilità alimentare, l'esaurimento delle risorse naturali, la produzione industriale mentre gli aspetti ambientali sono rappresentati da un quinto fattore riguardante l'inquinamento ma considerato in termini molto generali. Anche per i Limiti dello Sviluppo vi è stato un modello matematico, elaborato alla fine degli anni 60 al Massachusetts Institute of Technology (MIT), che mette in relazione questi cinque fattori con le loro interazioni reciproche per prevederne la loro evoluzione. A differenza del problema climatico i Limiti dello Sviluppo non hanno portato a protocolli d'intesa come quello di Kyoto. Essi hanno però avuto a suo tempo un forte impatto mettendo in luce i problemi riguardanti l'aumento della popolazione e l'esaurimento delle risorse naturali. Gli studi e i rapporti collegati a questi problemi sono continuati fino a tempi recenti [4], senza però avere una risonanza comparabile con quella dei problemi climatici. Da un punto di vista generale ambedue gli approcci sui problemi futuri dell'umanità presentano limiti importanti. Nel protocollo di Kyoto gli orientamenti sono troppo specifici per i problemi climatici e le soluzioni approntate dal protocollo non tengono conto di altri fattori che nella realtà interagiscono fortemente con le soluzioni proposte.

In particolare non viene tenuto conto del problema dell'aumento della popolazione accompagnato dal desiderio di migliorare le condizioni di vita e quindi del probabile corrispondente aumento della domanda di energia. Questi problemi si sono manifestati già nell'applicazione del primo accordo che escludeva paesi in via di sviluppo come la Cina che poi in pochi anni è diventata la maggior emettitrice di gas serra. I Limiti dello Sviluppo non ha invece preso in considerazione nel dettaglio i problemi di inquinamento e i possibili cambiamenti climatici, non ancora studiati negli anni 70, e che avrebbero sicuramente influenzato i risultati del modello. Ambedue gli approcci hanno subito varie critiche. Il protocollo di Kyoto è stato criticato dagli ambientalisti come una misura insufficiente a fermare l'effetto serra e non accettato dai governi di varie nazioni, come gli Stati Uniti, per i problemi economici che possono nascere dalla sua applicazione e incertezze sull'affidabilità dei modelli previsionali. I Limiti dello Sviluppo sono stati criticati come modello troppo semplificato per poter fornire previsioni affidabili, cosa dimostrata nei decenni seguenti il rapporto. Bisogna però dire che gli autori del rapporto erano ben coscienti dei limiti del modello e volevano soprattutto risvegliare l'attenzione sul comportamento controintuitivo dei sistemi complessi [5], e quindi combattere la trascuratezza con cui venivano considerati fattori come l'aumento della popolazione e l'esaurimento delle materie prime. Come si può vedere un problema di fondo di questi due approcci riguarda la validità dei loro modelli e delle loro previsioni. A questo punto è utile fare alcune considerazioni generali sui modelli di sistemi complessi, come lo sono il clima e le attività umane, per comprenderne i loro limiti e le conseguenze sulle decisioni che si possono prendere. Un buon approccio alla comprensione dei modelli di sistemi complessi è sicuramente quello offerto dalla scienza della complessità, sviluppatasi specialmente negli anni 80 del secolo scorso, e oggetto di vari libri divulgativi come quello di James Gleick sulla scoperta dell'effetto farfalla [6], o sulla diffusa presenza nei sistemi complessi di forti dipendenze dalle condizioni iniziali [7]. Inoltre l'esperienza ha dimostrato come l'affidabilità dei modelli non dipenda solo dalla loro aderenza alla realtà ma anche dal numero e dalla precisione di dati disponibili. Un modello più sofisticato e più aderente alla realtà potrebbe essere meno affidabile nelle previsioni di un modello più semplice se i il numero di dati e la loro precisione necessari per il suo uso sono insufficienti come dimostrato nei modelli meteorologici [8]. Da questo punto di vista i modelli sviluppati per i Limiti dello Sviluppo, per la complessità della realtà che vogliono affrontare, non possono non essere considerati che delle utili simulazioni senza un vero valore predittivo. Per i modelli climatici la situazione è differente poiché essi sono sviluppati per effettuare vere e proprie previsioni ma la cui validità rimane in sospeso per l'impossibilità di avere verifiche a posteriori come avviene invece per i modelli meteorologici. Le incertezze sull'affidabilità dei modelli non devono comunque costituire un impedimento a fare opportune considerazioni su possibili scenari evolutivi.

Tornando alla discussione dei problemi umani, restando nel campo della scienza della complessità, si può citare un convegno tenuto nel maggio del 1990 presso il Santa Fe Institute nel New Mexico sulla sostenibilità globale nel quale venne affermato come essa fosse possibile solo affrontando con successo la transizione demografica accompagnata da altre opportune transizioni di natura tecnologica, economica e sociale [9]. Cito questo convegno, che non ha avuto in realtà nessuna risonanza particolare, ma che è stato organizzato da uno dei più importanti centri di ricerca nel campo della scienza della complessità, e che annovera tra i suoi fondatori personaggi come Murray Gell-Mann, premio Nobel di fisica nel 1969. Possiamo notare come i risultati di questo convegno stabiliscano il quadro in cui si devono confrontare gli interventi possibili, sia per il clima che per uno sviluppo sostenibile, e che qualsiasi soluzione proposta non può non tener conto, non solo dei problemi climatici, ma anche dell'evoluzione della popolazione umana e quindi delle tecnologie disponibili per la sua sostenibilità. Per quanto riguarda il problema demografico esso è soprattutto di natura sociale e politica sul quale non vi è nessun accordo a livello internazionale. Per quanto riguarda invece le tecnologie è possibile fare qualche considerazione riguardo al loro ruolo nei problemi di sostenibilità integrati con quelli climatici.

Tecnologia e sostenibilità

Non è difficile constatare che la produzione di energia e il trasporto umano siano le tecnologie che sono al centro dei problemi climatici e d'inquinamento e d'altra parte legate anche ai fattori che riguardano la popolazione e l'esaurimento delle materie prime. L'influenza dell'energia e del trasporto umano sui fattori climatici è ben conosciuta, meno considerata quella delle materie prime, non tanto per il loro consumo ma soprattutto per il bisogno di energia per far fronte al loro esaurimento. Si parla comunemente di consumo di materie prime ma in realtà esso è piuttosto una dispersione di materie prime nell'ambiente accompagnata molte volte anche da trasformazioni chimiche. Questo processo provoca un aumento continuo di una grandezza termodinamica detta entropia che è tanto più grande quanto più elevato è il disordine molecolare della materia. Se vogliamo riciclare o riconcentrare le materie prime disperse occorre ridurre l'entropia e questo richiede molta energia. Il problema dell'aumento continuo dell'entropia dovuto alle attività e consumi umani è stato segnalato in campo ambientalistico in particolare in un libro di Rifkin (10) che, pur contenendo alcune gravi incongruenze scientifiche, ha descritto l'importanza di questa grandezza nel rapporto tra l'uomo e l'ambiente. Così ad esempio quando si produce energia bruciando carbone si ha un grande aumento di entropia dovuto sia alla reazione di combustione che alla dispersione di anidride carbonica nell'aria. La sua captazione e stoccaggio comporta una diminuzione di entropia e quindi un corrispondente consumo energetico. Se invece vogliamo ad esempio recuperare i metalli che si sono dispersi dopo il loro uso come sali in bassissime concentrazioni nel mare, ciò è tecnologicamente possibile con speciali "filtrazioni" che però consumano molta energia e ulteriore energia è necessaria per riformare i metalli dai sali. Il problema delle materie prime è come si vede anch'esso legato al bisogno di energia come l'aumento della popolazione e tutto ciò dovrebbe essere considerato nel trattare i problemi climatici.

Le caratteristiche ottimali che devono avere le tecnologie energetiche riguardo i problemi climatici e di sostenibilità sono facilmente definibili e riguardano: la disponibilità di una fonte energetica quasi inesauribile, una tecnologia ininfluenza sugli andamenti climatici e un'economia di produzione accettabile. Volendo discutere questi aspetti per stabilire possibili scenari evolutivi, occorre considerare come le conoscenze scientifiche limitano le possibilità delle varie tecnologie energetiche e di trasporto considerate. L'uso delle conoscenze scientifiche come guida nel fare previsioni tecnologiche non è nuovo, e uno dei primi scienziati ad occuparsi di questo problema è stato G. Thomson, premio Nobel per la fisica nel 1937, che, nel dopoguerra, scrisse un libro su questo tema sulla base dei grandi sviluppi tecnologici effettuati durante la 2° guerra mondiale [11]. Egli stabilì sette principi di "impotenza" che dovevano essere comunque rispettati per qualsiasi previsione di evoluzione tecnologica. Alcuni di questi principi, che riguardano ad esempio la conservazione dell'energia e l'entropia già citata, interessano direttamente il caso della produzione energetica e del trasporto umano. Possiamo vedere qualche esempio di applicazione di questi limiti considerando due importanti tecnologie del campo energetico e dei trasporti, e cioè l'energia fotovoltaica e le batterie per la trazione elettrica. La produzione di energia fotovoltaica si basa su un fenomeno fisico che trasforma la luce solare in energia elettrica usando particolari materiali fotovoltaici come il silicio. I limiti della generazione energetica con questa tecnologia sono dati dall'energia solare disponibile e dalla resa della sua trasformazione nel materiale fotovoltaico che è ben lontana dal 100%. Naturalmente è possibile considerare materiali fotovoltaici con un'efficienza maggiore di quella del silicio, tuttavia, anche quando si considera questa possibilità, l'energia solare disponibile e una maggiore efficienza dei materiali non permettono miglioramenti di un ordine di grandezza rispetto ai risultati attuali. Un altro caso interessante riguarda le batterie. Esse sono essenzialmente un sistema in grado di trasformare energia chimica in energia elettrica durante l'uso, e l'inverso durante la carica. La chimica ci indica che la coppia di elementi con la più elevata energia generabile e leggerezza è quella basata sul sistema litio/fluoro. Il fluoro è un gas pericoloso e molto reattivo che lo rende inutilizzabile in pratica ma è però possibile usare almeno il litio da cui tutta una serie di batterie al litio che lo sfruttano sia dal punto di vista energetico che per la sua

leggerezza. Tuttavia, se si confrontano i risultati attuali delle batterie con quelli teorici della coppia litio/fluoro appare anche qui l'impossibilità di avere miglioramenti di un ordine di grandezza rispetto a quelli attuali. Possiamo ora discutere possibili scenari tecnologici evolutivi per la produzione energetica e per il trasporto anche alla luce di questo tipo di limitazioni.

Produzione dell'energia

La produzione attuale di energia si basa principalmente sull'uso di fonti esauribili di origine fossile, di energia nucleare, e in misura molto minore da fonti rinnovabili. In realtà, nel caso dell'energia fotovoltaica, solare termica o eolica si dovrebbe parlare piuttosto di energie quasi inesauribili e anche le energie nucleari possono essere considerate tali nel senso che utilizzano piccolissime quantità di materia che, nel caso della fusione, è anche presente in grandi quantità come l'acqua da cui si produce l'idrogeno necessario. Energie di tipo rinnovabile sono invece l'energia idroelettrica, legata al ciclo dell'acqua, e l'energia delle biomasse come la legna o il biogas che sono legati al ciclo della fotosintesi vegetale. Accanto a queste energie vi è anche l'energia geotermica, e quella gravitazionale nel caso delle maree, tuttavia la disponibilità di queste energie è limitata geograficamente e pur potendo dare un contributo alla produzione energetica non possono costituire una scelta strategica per la produzione di grandi quantità di energia. Molte energie quasi inesauribili citate hanno fatto le loro prove per piccole produzioni locali generalizzate mentre rimane dubbio l'interesse di usarle per centrali di grande produzione energetica dell'ordine dei gigawatt. Questo rappresenta il problema più critico delle nuove tecnologie energetiche poiché se è pensabile fornire buona parte dell'energia elettrica con piccole produzioni per uso domestico o in edifici pubblici, rimane la necessità di fornire grandi quantità di energia per le produzioni industriali tenendo conto anche del possibile grande aumento della domanda d'energia dovuta all'aumento della popolazione umana e per il recupero e riciclo delle materie prime che abbiamo già discusso. La fornitura globale energetica basata solo su una moltitudine di piccole produzioni è difficilmente sufficiente e gestibile, mentre la fornitura attraverso solo grandi unità produttive è vulnerabile. La soluzione sarebbe quindi una miscela ottimale di molte piccole produzioni accanto a un numero limitato di grandi produzioni. Uno studio di strategia energetica globale deve tener conto di tutti questi aspetti considerando le fonti energetiche più importanti, utilizzabili anche per grandi unità produttive, e che riguardano essenzialmente le varie energie fossili, nucleari, solari e rinnovabili.

Energie fossili

Le energie di origine fossile si basano sulla combustione di derivati del petrolio e gas naturale e in misura minore del carbone. Poiché le fonti fossili sono esauribili è importante discuterne gli scenari futuri. Già negli studi sui Limiti dello Sviluppo erano state fatte previsioni di esaurimenti ravvicinati per il petrolio e altre materie prime che però non si sono dimostrate valide. Attualmente il problema dell'esaurimento delle riserve di petrolio e di gas è stato di nuovo sollevato, tuttavia le riserve stimate dai grandi produttori sono confidenziali e non è possibile usarle per fare previsioni affidabili. In ogni caso la questione delle energie fossili non è necessariamente tutta legata al petrolio e alle sue riserve. Negli anni 70, a seguito della crisi petrolifera, gli Stati Uniti condussero grandi sforzi per studi e ricerche di fonti alternative al petrolio dettate, non tanto dal problema dell'esaurimento, ma dall'elevato prezzo raggiunto. Dal punto di vista delle risorse gli studi individuano subito l'esistenza di grandi giacimenti di petrolio e gas naturale contenuto in rocce scistose da cui è possibile estrarlo con l'uso di vapore dopo aver frantumato la roccia e di cui esistono grandi depositi in Canada e nel nord degli Stati Uniti. Un'altra possibilità consiste nel produrre derivati del petrolio come benzina o gasolio a partire da carbone e acqua secondo un processo che forma dapprima una miscela di ossido di carbonio e idrogeno, che portata su opportuni catalizzatori, produce idrocarburi con un processo, chiamato Fischer-Tropsch, utilizzato industrialmente in Germania per produrre benzina durante la guerra. Occorre notare inoltre che le riserve di carbone sono molto superiori a quelle di petrolio e, pur non essendo evidentemente

inesauribili, assicurerebbero comunque un possibile lungo periodo di sfruttamento. Su questo processo gli Stati Uniti condussero un importante progetto chiamato *syn-fuel* per migliorarlo e renderlo più economico. Tuttavia, sia il caso del petrolio da scisti che idrocarburi da carbone non trovarono un seguito per ragioni economiche. Per l'estrazione da scisti del petrolio si può grossolanamente stimare un costo di 50 \$ al barile, mentre per la tecnologia Fischer Tropsch si deve considerare un ordine di grandezza di 150 \$ il barile, costi troppo elevati rispetto ai circa 30 \$ il barile esistenti all'epoca, con un picco a 50 \$ il barile verso il 1981 seguito però da una rapida caduta verso i 20 \$ il barile causata soprattutto da una contrazione della domanda dovuta ai grandi sforzi di risparmio energetico effettuati [12]. Il prezzo attorno ai 20 \$ il barile è rimasto abbastanza stabile fino a pochi anni fa dopo di che ha avuto un'impennata, probabilmente di origine speculativa, fino a circa 150 \$ il barile per poi assestarsi con una certa stabilità attorno ai 100 \$ il barile. A questo prezzo l'estrazione di petrolio e gas da scisti diventa economica da cui l'avvio di grandi bacini di estrazione in Canada e nel Nord Dakota e il progetto di costruire un oleodotto dal Canada al golfo del Messico. Se in futuro il prezzo del petrolio salisse ad esempio a 200 \$ il barile, non si assisterebbe probabilmente a un collasso dell'economia, che non è avvenuto nemmeno negli anni 70 con un prezzo aumentato di dieci volte, ma a questo punto diverrebbe economica la sintesi di prodotti petroliferi dal carbone dando nuova vita all'energia fossile assicurata così da una materia prima con grandi riserve sfruttabili. In definitiva l'evoluzione tecnologica potrebbe portarsi su uno scenario non improbabile di continuità per l'energia fossile con grandi effetti nefasti riguardo i gas serra che verrebbero prodotti in grande quantità, non solo per produrre energia, ma anche nella fase di estrazione e produzione dei combustibili. Un possibile intervento per mitigare i problemi di emissione di gas serra potrebbe essere l'uso di una tecnologia che li catturi e li immagazzini in profondità, evitando la loro diffusione nell'atmosfera, questa tecnologia è realizzabile ma è sicuramente accompagnata da ulteriori grandi bisogni energetici, problemi di affidabilità dello stoccaggio e costi aggiuntivi di produzione energetica.

Energie nucleari

Le energie nucleari si basano su processi di fissione o di fusione nucleare. Si tratta di energie quasi inesauribili nel senso che coinvolgono piccoli consumi di materia, come nel caso dell'uranio, o addirittura di grandi disponibilità nel caso della fusione che utilizza acqua come sorgente dell'idrogeno necessario. Il processo di fissione è il solo industrialmente usato con un'ampia diffusione. Il processo di fusione è invece ancora allo stato sperimentale e la via più avanzata si basa sulla formazione di un plasma d'idrogeno a elevatissima temperatura che lievita in un anello, sostenuto da fortissimi campi magnetici, e in cui vengono introdotti opportuni isotopi dell'idrogeno che si trasformano in elio liberando grandi quantità di energia. Il processo di fissione utilizza invece uranio arricchito nel suo isotopo U235 che subisce la fissione, mediata dal flusso di neutroni prodotti dalla stessa fissione. Il nucleo dell'uranio si rompe, formando una serie di nuclei più leggeri e radioattivi, liberando energia. Questa forma di produzione di energia è attualmente contestata soprattutto a seguito di due gravi incidenti avvenuti a Chernobyl in Ucraina nel 1986 e a Fukushima in Giappone nel 2011, incidenti dovuti a insufficienze tecniche ed errori umani e, nel caso di Fukushima, anche a seguito di un evento sismico eccezionale. La tecnologia nucleare è in grado di sviluppare reattori nucleari molto più sicuri, tuttavia la percezione negativa nella popolazione riguardo l'energia nucleare da fissione è diffusa considerando troppo elevati i danni alle persone e alle cose a seguito di incidenti maggiori per continuare ad usarla. Dal punto di vista tecnologico è normale che nuove concezioni di centrali siano molto più sicure perché questo è il tipico risultato dell'evoluzione delle tecnologie. Sostituendo le centrali che usano le vecchie tecnologie con quelle nuove ne consegue una sicurezza molto maggiore. Si potrebbe addirittura pensare che le nuove centrali nucleari abbiano una probabilità di danni inferiore a quella risultante della loro rinuncia, vista l'inesistenza di emissione di gas serra per questa fonte energetica. In realtà vi sono altre importanti ragioni che ne sconsigliano una loro ampia diffusione e che si possono esprimere metaforicamente paragonando la radioattività a un fuoco che non si può mai spegnere. Se

è possibile avere reattori sicuri e, anche volendo, luoghi di stoccaggio di materiali radioattivi sicuri, non è possibile evitare i molteplici problemi di manipolazione di materiale radioattivo nella produzione del combustibile nucleare, nella sua manipolazione nelle centrali, nel trattamento del combustibile esausto e nel trasporto dei materiali radioattivi nei siti di stoccaggio. Nel caso di un'ampia diffusione di questo tipo di produzione energetica si possono difficilmente evitare incidenti minori e diffusione della radioattività, che per la sua natura non è eliminabile ma solo confinabile, e che toccherebbe in particolare il personale addetto e la popolazione vicina. D'altra parte è difficile prevedere quanto una robotica avanzata potrebbe evitare questi problemi e gli effetti negativi sulla salute, da cui l'interesse di trovare comunque fonti alternative. Per quanto concerne la fusione nucleare, gli studi più avanzati riguardano il progetto ITER che prevede la costruzione di un grande impianto sperimentale in Francia con una potenza di uscita di 500-700 MW. L'impianto ITER non è ancora un prototipo di centrale produttiva di energia ma serve solo a dimostrare la possibilità di generare con la fusione energia in eccesso rispetto a quella necessaria per sostenere le condizioni di fusione nucleare nel plasma mai finora dimostrata. Per la produzione è previsto un progetto chiamato DEMO per un impianto ancora più grande. La fusione nucleare appare sicuramente una sorgente energetica quasi inesauribile e ininfluenza sul piano climatico ma di cui resta da dimostrare la fattibilità. Inoltre non è scevra da possibili inconvenienti che riguardano l'enorme quantità di energia da gestire nell'impianto solo per sostenere la fusione, il fatto che alcune reazioni di fusione utilizzabili coinvolgano l'uso di litio, che potrebbe dare problemi futuri di esaurimento come materia prima, e il fatto che non si può escludere una possibile radioattività indotta nei materiali di contenimento per effetto dei neutroni che si generano durante la fusione.

Energie solari

La produzione energetica dal sole comprende sistemi che sfruttano direttamente il calore solare, ovvero la trasformazione diretta di energia solare in energia elettrica con il fotovoltaico, e l'energia eolica indirettamente prodotta dal sole attraverso i movimenti dell'atmosfera. Per questi tipi di energia occorre distinguere prima di tutto i sistemi che forniscono energia a livello domestico o per edifici pubblici da quelli con grandi produzioni necessarie all'industria. Per l'uso domestico o pubblico si usa l'energia solare come calore per fornire acqua calda e con il fotovoltaico per fornire energia elettrica. L'energia eolica è più raramente usata a livello domestico ma le potenze sfruttabili con le pale hanno dei limiti e occorrono interi campi di generatori eolici per avvicinarci alle potenze più basse delle centrali convenzionali. Per produrre grandi quantità di energia solare termica o fotovoltaica occorrono grandi superfici, visti i limiti dell'irraggiamento e delle rese energetiche di trasformazione dell'energia solare in energia elettrica. Se da un lato questi tipi di produzione energetica sono interessanti per usi domestici e pubblici, rimane il problema della loro adattabilità per grandi centri di produzione indispensabili per l'attività industriale. Nonostante che le tecnologie termiche, fotovoltaiche o eoliche siano molto differenti, esse presentano problemi simili che ne complicano la loro utilizzazione. Questi limiti sono dovuti al fatto che l'energia solare non è disponibile con continuità ma a picchi produttivi che non corrispondono necessariamente alla variabilità dei bisogni energetici giornalieri e stagionali che subiscono anch'essi dei picchi di domanda. Per questo, una centrale produttiva basata su queste energie, necessita la disponibilità di sistemi di stoccaggio energetico e di sovradimensionamento delle superfici rispetto al potenziale di picco sfruttabile. Lo stoccaggio di grandi quantità di energia è difficilmente fattibile con batterie, visti i loro limiti dimensionali e di densità di potenza, ma potrebbe essere ottenuto con sistemi di pompaggio in bacini idroelettrici costruiti ad hoc o aggiunti alle centrali idroelettriche attuali. Si tratta di un sistema utilizzabile nelle zone montane ricche di acqua ma non in pianura o nelle zone desertiche a meno di poter estendere la rete elettrica in maniera così importante per includere anche le regioni con bacini idroelettrici. Un'altra possibilità riguarda il pompaggio non di acqua ma di aria compressa, sistema che tuttavia deve ancora dimostrare l'utilizzabilità anche per grandi quantità di stoccaggio di energia. Un'alternativa al pompaggio potrebbe essere la trasformazione dell'energia elettrica in energia chimica producendo idrogeno per elettrolisi dell'acqua. Questo potrebbe essere

stoccato per poi alimentare delle fuel cell per rigenerare energia elettrica, oppure usato direttamente come combustibile o carburante, aspetto che è discusso più avanti trattando il trasporto umano. Esiste infine un'ultima limitazione di natura economica per questo tipo di energia che è dovuta al fatto che gli investimenti unitari di produzione non subiscono riduzioni per effetto scala, come nel caso delle energie fossili o nucleari, ma restano direttamente proporzionali alla potenza installata.

Energie rinnovabili

L'uso di energie rinnovabili riguarda in particolare l'energia idroelettrica e le centrali che usano biomasse come combustibili o biogas come carburante in motori generatori di energia elettrica. Il biogas è in genere ottenibile da compostaggio di rifiuti mentre la disponibilità di legna è legata al ciclo di crescita delle piante, in ogni caso si tratta anche qui di soluzioni interessanti per la produzione di energia termica o elettrica per usi domestici o pubblici ma non per grandi centrali di produzione per l'industria. L'energia idroelettrica è invece adatta per grandi produzioni e largamente diffusa. La sua sorgente energetica è di tipo gravitazionale ma è inserita nel ciclo dell'acqua movimentato dall'energia solare ed è sfruttata nelle zone montane da alte cadute di limitate quantità d'acqua da bacini idroelettrici, o da grandi fiumi con piccole cadute ma con grandi masse di acqua. Le capacità di produzione variano spesso stagionalmente nelle zone montane, meno nei fiumi. Pur essendo la produzione di energia idroelettrica importante, le sue possibilità di espansione sono limitate sia per la carenza di località adatte per nuove produzioni che per l'impatto che creano sul territorio.

Trasporto umano

Il trasporto umano costituisce un altro importante tipo di consumo energetico e, ad eccezione del trasporto ferroviario, si basa principalmente sull'uso di carburanti di origine petrolifera e quindi fossile. L'uso dell'energia elettrica per il trasporto in campo automobilistico attraverso batterie è per il momento molto marginale e presenta alcuni limiti. Prima di tutto occorre osservare che il trasferimento in larga misura dell'energia per il trasporto da quella fossile a quella elettrica richiederebbe un grande aumento della produzione di energia elettrica per la ricarica delle batterie e, se i sistemi di produzione di elettricità rimangono in grande misura basati su l'energia fossile, non si avrebbe nessuna riduzione di emissioni di gas serra ma solo il loro trasferimento dal trasporto alle centrali termiche. La diffusione attuale di auto ibride può ridurre sensibilmente il consumo di carburante ma non eliminarlo completamente. Un altro limite della batteria è costituito dal suo peso e dalla densità energetica possibile, che abbiamo già discusso in precedenza, e che limitano in maniera importante l'autonomia di una vettura. Vi è poi un ulteriore limite legato alla velocità di ricarica delle batterie che è molto più lenta rispetto a un riempimento di un serbatoio con il carburante. Si tratta di un limite cinetico legato alla velocità con cui avvengono le reazioni elettrochimiche della ricarica che si considera difficilmente migliorabile in maniera importante. Questo problema è risolvibile se le batterie sono ricaricate ad esempio la notte nei garage o nei depositi di autobus, mentre la ricarica in parcheggi pubblici rimane una soluzione limitata. Non è nemmeno ragionevole avere stazioni di servizio per la sostituzione delle batterie scariche, ma che richiederebbero enormi magazzini di stoccaggio e ricarica per assicurare un rifornimento energetico dello stesso ordine di grandezza che ora si ha con i carburanti. Ridurre il tempo di ricarica significa ridurre automaticamente l'autonomia del mezzo di trasporto, cosa che non è sempre accettabile. In queste condizioni è probabile che l'auto elettrica basata su batterie possa diffondersi solo in particolari nicchie d'uso ma non sostituire largamente il trasporto umano almeno nella forma in cui si svolge attualmente. Il problema è quindi quello di trovare un carburante da sorgente rinnovabile e ininfluenza sul clima e l'inquinamento. Esistono carburanti come il bioetanolo e il biodiesel da sorgenti rinnovabili ma il loro potenziale di sostituzione è limitato dalle possibilità di coltivazione agricola e il loro uso non è libero da inquinamenti. In realtà un carburante da energie rinnovabili e libero da inquinamenti esiste ed è l'idrogeno. Esso può essere usato come carburante per motori a

scoppio ma anche alimentare fuel cell per la produzione di energia elettrica per la trazione. L'idrogeno può essere prodotto in maniera rinnovabile attraverso l'elettrolisi dell'acqua che libera anche ossigeno che, nel ciclo dell'atmosfera, riforma acqua con l'idrogeno per combustione o nelle fuel cell. Naturalmente in questo caso l'energia per l'elettrolisi dovrebbe essere di origine non fossile per evitare i problemi climatici. Vi sono ancora alcuni limiti all'utilizzazione dell'idrogeno, in particolare per lo stoccaggio, ma non limiti fisici d'impossibilità.

Un ecosistema tecnologico sostenibile

Un ecosistema tecnologico sostenibile che soddisfi allo stesso tempo gli aspetti climatici e i bisogni energetici futuri, e in grado anche di gestire il problema dell'esaurimento delle risorse, non può non dipendere da un radicale cambiamento delle tecnologie, di cui ho avuto occasione di parlare in alcuni miei articoli precedenti [1, 2]. Purtroppo molte delle tecnologie sviluppate o in sviluppo, e in particolare in quelle rinnovabili, se sono interessanti per piccole e medie produzioni energetiche a livello locale, possono avere difficoltà a coprire le grandi produzioni energetiche per i bisogni industriali in previsione anche di un aumento della popolazione mondiale. Le possibili evoluzioni tecnologiche future per le energie fossili aprono scenari di continuità con il carbone che possono dilazionare per lungo tempo i problemi di disponibilità energetica, naturalmente con probabili conseguenze sul riscaldamento terrestre visti i dubbi sulle possibilità di captare e stoccare in maniera efficiente e generalizzata le emissioni dei gas di combustione. D'altra parte le energie nucleari presentano limiti per la loro sicurezza nel caso di un ampio uso della fissione, e interrogativi sulla realizzabilità per i sistemi basati sulla fusione nucleare. Una soluzione energetica possibile che allo stesso tempo potrebbe risolvere le discontinuità della produzione di energia da fonti quasi inesauribili o rinnovabili come anche i bisogni energetici del trasporto umano, è quella legata all'uso di idrogeno come vettore energetico, combustibile o carburante e anche sorgente di energia elettrica attraverso le fuel cell. L'idea di usare l'idrogeno come vettore energetico non è recente e risale anche a studi condotti già prima della grande crisi petrolifera degli anni settanta. L'idea dell'uso di questo vettore si è poi diffusa nel campo ambientalistico e sostenuta anche da Rifkin in un suo libro [13]. Per la produzione d'idrogeno come vettore energetico, oltre al metodo di elettrolisi dell'acqua da energia elettrica di origine solare o comunque rinnovabile, esiste anche un'altra alternativa interessante, ma di cui esiste solo qualche studio da poco tempo, e che riguarda la realizzazione industriale di una fotosintesi da energia solare analoga a quella delle piante. La fotosintesi clorofilliana vegetale si basa sull'uso dell'energia solare per decomporre l'acqua formando idrogeno e liberando l'ossigeno nell'aria. L'idrogeno reagisce quindi con l'anidride carbonica dell'aria formando glucosio che in seguito è polimerizzato formando i componenti di base dei vegetali come gli amidi e la cellulosa. La fotosintesi clorofilliana è un processo molto complesso che fa intervenire, oltre alla clorofilla, anche altri pigmenti ed enzimi. Non esistono però impossibilità fondamentali che impedirebbero la realizzazione di una fotosintesi industriale se non quella di fare importanti ricerche in questa direzione, cosa che non è mai stata fatta finora. Una fotosintesi industriale in linea di principio potrebbe inoltre, non solo produrre idrogeno o glucosio, ma essere orientata anche verso altri componenti chimici di base come l'etanolo e sostituire non solo i carburanti e i combustibili fossili ma tutta una chimica ora derivata essenzialmente dal petrolio.

Riflessioni conclusive

Si è cercato in quest'articolo di dare un'idea delle tecnologie coinvolte nell'opera non solo per far fronte ai problemi climatici ma anche a quelli legati alla sostenibilità dello sviluppo umano. Si è visto come un problema cruciale sia quello di avere disponibili tecnologie di produzione energetiche valide anche per grandi unità produttive in vista di un possibile forte bisogno futuro di energia per affrontare l'aumento della popolazione mondiale e il miglioramento delle sue condizioni

di vita. Riguardo agli scenari tecnologici che sono stati esposti è utile fare alcune riflessioni conclusive. La prima riguarda l'affidabilità delle previsioni e degli scenari presentati. Questi sono stati elaborati sulla base delle conoscenze tecnologiche attuali su processi utilizzati o in sviluppo, tuttavia, non si può escludere la possibilità futura di nuove tecnologie attualmente imprevedibili e radicalmente differenti da quelle considerate finora, che possono cambiare sostanzialmente gli ecosistemi tecnologici possibili. La seconda riflessione riguarda il modo con cui è possibile arrivare a nuovi ecosistemi tecnologici sostenibili osservando che i problemi principali non sono tanto nel concepirli e dimostrarne teoricamente la loro fattibilità, ma nel trasformare gli ecosistemi attuali nei nuovi ecosistemi senza sconvolgimenti facendo nascere gravi e inaspettati problemi. Su questo tema bisogna considerare che vi sono due tipi di approccio al cambiamento: uno di tipo *top down* che prevede interventi attraverso leggi, misure e regolamenti che impongono i cambiamenti, ovvero un approccio *bottom up* che invece si basa su interventi indiretti che catalizzano le trasformazioni nella buona direzione. L'approccio *top down* ha il vantaggio di avere obiettivi precisi e tempi di realizzazione stabiliti, tuttavia il suo successo dipende dalla validità degli interventi rispetto alla complessità del sistema su cui si vuole intervenire non sempre dimostrabile a priori. Ne segue la possibilità di non avere risultati o avere addirittura risultati controproducenti. Il Protocollo di Kyoto rappresenta un esempio di fallimento degli approcci *top down*. L'approccio *bottom up* è forse più incerto, non ha all'inizio obiettivi molto precisi e i tempi sono meno definiti, tuttavia il sistema che genera è in generale molto più efficiente e robusto dei sistemi immaginati con un approccio *top down* e possono anche meglio affrontare inaspettati cambiamenti che possono sempre intervenire nel tempo. Ad esempio la legge del 1997 dell'allora Ministro dell'Ambiente Edoardo Ronchi che imponeva il raggiungimento di un minimo del 35% di raccolta differenziata è stato un altro esempio di fallimento di approccio *top down*, tuttavia essa indirettamente catalizzò un processo *bottom up* di cambiamenti nei sistemi di raccolta per raggiungere facilmente in molti territori valori di raccolta differenziata ben superiori a quelli stabiliti dalla legge [14, 15].

Bibliografia

- [1] Bonomi A. "Management della tecnologia e problemi ambientali" L'Ambiente 4/2012, pp.14-17
- [2] Bonomi A. "Ricerca & Sviluppo e le tecnologie per l'ambiente" L'Ambiente 1/2006 pp.24-31
- [3] Meadows D.H. Meadows D.L. et al. "I Limiti dello Sviluppo" Mondadori 1972
- [4] Meadows D.H. Meadows D.L. Randers J. "I Nuovi Limiti dello Sviluppo" Mondadori 2006
- [5] Forrester J.W. et al. "Verso un equilibrio globale" Mondadori 1973
- [6] Gleick J. "Caos" RCS Rizzoli 1989
- [7] Ruelle D. "Caso e Caos" Bollati Boringhieri 1992
- [8] Stewart I. "Dio gioca a dadi ?" Bollati Boringhieri 1993
- [9] Waldrop M. "Complessità" Instar Libri 1995
- [10] Rifkin J. "Entropia" Mondadori 1982
- [11] Thomson G. "Il Futuro Prevedibile" Biblioteca Moderna Mondadori 1957
- [12] Hawken P. Lovins A. Lovins L.H. "Capitalismo naturale" Edizioni Ambiente 2001
- [13] Rifkin J. "Economia all'idrogeno" Mondadori 2003
- [14] Bonomi A. "Strategie di Raccolta e Smaltimento dei Rifiuti Urbani" Atti dei Seminari di RICICLA 2000, Rimini 8-11 Novembre 2000, pp. 439-450
- [15] Bonomi A. "Fenomeni di transizione della raccolta differenziata e loro previsione" Atti dei Seminari di ECOMONDO, Rimini 22-25 Ottobre 2003, Vol. I pp. 177-184