Associazione Michele Fontana ONLUS
http://www.associazioni.milano.it/michelefontana/

Milano, 20 luglio 2003

PRIMO PREMIO DI LAUREA

"MICHELE FONTANA"

a

Giorgio Bocchio

per la tesi

UNA ALTERNATIVA POSSIBILE

UNIVERSITA' COMMERCIALE "LUIGI BOCCONI" MILANO

FACOLTA' DI ECONOMIA

Corso di laurea in Discipline Economiche e Sociali

UNA ALTERNATIVA POSSIBILE
UN'ANALISI ECONOMICO AMBIENTALE SULL'UTILIZZO DI ENERGIA SOLARE TERMICA E FOTOVOLTAICA

Relatore: Chiar.mo Prof. Marco FREY

Correlatore: Prof. Arturo LORENZONI

Tesi di Laurea di:

Giorgio BOCCHIO

Matr. n. 664656

ANNO ACCADEMICO 2001-2002

UNA ALTERNATIVA POSSIBILE

"E debbasi considerare come non è cosa più difficile a trattare, ne più dubbia a riuscire ne più periculosa a maneggiare, che farsi capo a introdurre nuovi ordini; perché lo introdurre ha per nimici tutti quelli che degli ordini vecchi fanno bene, e ha per tiepidi defensori tutti quelli che degli ordini nuovi farebbono bene.
La qual tepidezza nasce[…]parte dalla incredulità degli uomini, li quali non credano in verità le cose nuove, se non veggano nata una ferma esperienza […]"

Machiavelli, Il Principe.

INDICE

CAPITOLO 1

OLTRE L'ECONOMIA NEOCLASSICA

- Per una nuova economia pag. 7
- Critica a due concetti dell'economia neoclassica: internalizzazione e scala ottimale pag.25
- Lo sviluppo sostenibile pag.43

Appendice: - L'esternalità pag.61

CAPITOLO 2

L'ENERGIA SOLARE

- Energia e sviluppo pag.77
- La conversione dell'energia solare in energia termica pag.90
- La conversione dell'energia solare in energia elettrica pag.109

Appendici: - I principali inquinanti; sorgenti, caratteristiche, effetti pag.149

- Il solare termico a concentrazione di calore pag.167

CAPITOLO 3

L'ENERGIA SOLARE IN LOMBARDIA

- Lo stato dell'arte pag.177
- Il caso di cascina Castellazzo nel comune di Basiano pag. 187

Appendici: - Accordo volontario settoriale per la promozione dell'utilizzo dell'energia solare pag. 199

- La richiesta di contributo da parte di cascina Castellazzo pag. 207

CAPITOLO 1

OLTRE L'ECONOMIA NEOCLASSICA

PER UNA NUOVA ECONOMIA

Eugene Rabinovitch, capo redattore del "Board of Atomic Scientist" scrive: "I soli animali la cui scomparsa può minacciare l'esistenza biologica dell'uomo sulla terra sono i batteri che abitano normalmente nei nostri corpi. Per il resto non ci sono prove sufficienti che il genere umano non possa sopravvivere anche come unica specie animale sulla terra! Se trovassimo un modo economico per sintetizzare il cibo a partire dalle materie prime, cosa che prima o poi avverrà, l'uomo potrebbe rendersi indipendente persino dalle piante, dalle quali dipende ora come fonti del suo cibo…[…] Io personalmente, e con me, sospetto, una vasta maggioranza del genere umano, temerei alla sola idea di un habitat senza animali e senza piante. Ma i milioni di abitanti delle giungle urbane di New York, Chicago, Londra e Tokyo sono cresciuti e hanno trascorso l'intera loro vita in un habitat praticamente azoico (se escludiamo i ratti, i topi e gli scarafaggi, e altre specie altrettanto odiose), eppure sono sopravvissuti." Inoltre egli deplora che "molte cose razionalmente ingiustificabili siano state scritte recentemente, alcune da scienziati di gran fama, sulla inviolabilità dei sistemi ecologici naturali, la loro instabilità intrinseca e il pericolo causato dall'interferenza umana nei loro confronti."[1]

Cosa è razionale e cosa è inviolabile? L'uomo è padrone o il figlio della natura? Se diventasse "economico" sintetizzare il cibo dai materiali inorganici, "cosa che prima o poi avverrà", se diventassimo indipendenti dalle piante, la connessione fra Terra e civiltà sarà ancora valida? Sarà necessaria? Avrà ancora un senso ?

Affrontare simili domande suggerisce che il "giusto uso" della Terra pone sul tavolo temi non tanto economici o tecnici quanto principalmente metafisici, ontologici, teleologici. Non è certamente questa la sede per cercare di dare una

[1] TIMES, 29 aprile 1972 – in E.F. Schumacher, Piccolo è bello. – Arnoldo Mondadori Editore, Milano 1977, pag. 82

risposta a tali problemi, tuttavia ritengo che sia proprio una visione miope delle basi epistemologiche e metodologiche[2] della economia che ci ha portati – oggi – a trovarci di fronte a gravi problemi di diseguaglianza ed ambientali i quali modificano in negativo il nostro benessere quotidiano.

E' la assenza (o la scarsa presa di coscienza) di domande, di dubbi, di una prospettiva più ampia, del chiedersi a cosa serva l'economia e a qual fine tenda, dell'interrogarsi se la percezione del mondo esterno oggettivamente esistente che l'essere umano ha sia l'unica e la più corretta, del domandarsi quanto del mondo esterno possa essere rilevato e se la percezione particolare del mondo che circonda l'uomo sia determinata dalle possibilità e dalle motivazioni dell'osservatore stesso.

L'economia che ignora la necessità del dubbio, del porsi un motivo di essere e un fine, sarà ed è necessariamente miope, in altre parole non riesce ad inserire nella propria analisi elementi che avrebbero ragione di essere analizzati ma non lo sono a causa di ignoranza (qui usato senza connotazioni ma nel senso etimologico latino).

Il motivo per cui l'economia rischia di essere una "scatola vuota" sta in ciò che Joseph Schumpeter ha chiamato una "visione preanalitica": l'analisi deve avere un punto di partenza, deve esserci qualcosa da analizzare. L'oggetto dell'analisi emerge da un "atto cognitivo" preanalitico che Schumpeter ha chiamato "visione". Ciò che viene omesso dalla visione preanalitica NON può essere colto nelle analisi successive: "…tutti facciamo partire la nostra ricerca là dove si sono fermati i nostri predecessori, vale a dire non partiamo pressoché mai da zero. Quali sono i passi che dovremmo intraprendere? Ovviamente, per poterci porre un problema, dovremmo prima di tutto riconoscere un insieme distinto di fenomeni coerenti come oggetto meritevole del nostro sforzo analitico. In altre parole, lo sforzo analitico è necessariamente preceduto da un atto cognitivo preanalitico che fornisce la

[2] Intese come analisi delle contraddizioni e dei limiti di validità dei procedimenti di indagine e degli strumenti linguistici del sapere scientifico.

materia prima per lo sforzo analitico stesso. […] tale atto cognitivo preanalitico viene chiamato Visione. E' interessante notare che una visione di questo tipo non solo deve precedere storicamente, in qualunque campo, l'emergere dello sforzo analitico, ma può anche entrare nuovamente nella storia di una qualunque scienza costituita ogniqualvolta qualcuno ci insegna a vedere le cose in una luce la cui fonte non è rintracciabile nei fatti, metodi e risultati dello stato preesistente di tale scienza."[3]

Questo discorso ha il duplice scopo di individuare i limiti della scienza economica e di spiegare come una economia ed una politica economica guidate dal principio precauzionale possono essere giustificate, non soltanto dal punto di vista scientifico ma anche dal punto di vista epistemologico.

L'economia standard odierna e l'uso che se ne fa ha come predominante (esclusiva) visione il raggiungimento del profitto e la riduzione di tutto a "prezzo" e "quantità".

Dimentica di essere strumento per il benessere dell'uomo, confonde un simbolo - il denaro - con la ricchezza reale, illusione pericolosa che porta a misurare il benessere materiale con una "unità di misura" che è incapace di misurarlo correttamente e - soprattutto – ha la vista molto corta.

Dimentica del suo originario significato: 0ικονομια legge che governa la casa affinché chi vi vive dentro possa star bene ovvero regole, norme per una convivenza nella scarsità.

Dimentica del suo ruolo si arroga una posizione gerarchica superiore, pretendendo di riuscire a dominare razionalmente la società e la natura (non riuscendo, però, a gestire effetti e conseguenze del proprio agire che nulla hanno a che vedere con il benessere dell'uomo). L'economia classica si rappresenta come un sistema isolato[4] (che non ha – cioè – alcuno scambio di

[3] J.A. Schumpeter, Storia dell'analisi economica, Bollati Boringhieri, Torino 1990, pag. 41.

[4] Per una completa e corretta definizione di sistemi aperti - chiusi - isolati si veda: Bonaiuti M.- La teoria bioeconomica. La "nuova economia" di Nicolas Georgescu – Roegen, Carocci editore, Roma, 2001, pag. 92.

materia ed energia con l'ambiente circostante) che si muove attraverso un processo circolare ricorsivo virtualmente illimitato e sempre uguale a se stesso, in cui la domanda crea una produzione di pari ammontare. Ad essa corrisponde un reddito che, distribuito alle famiglie, alimenta nuova domanda.

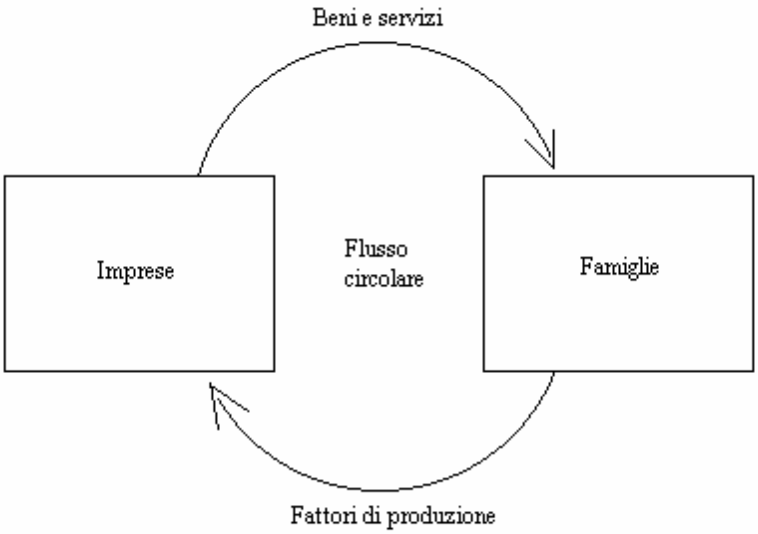


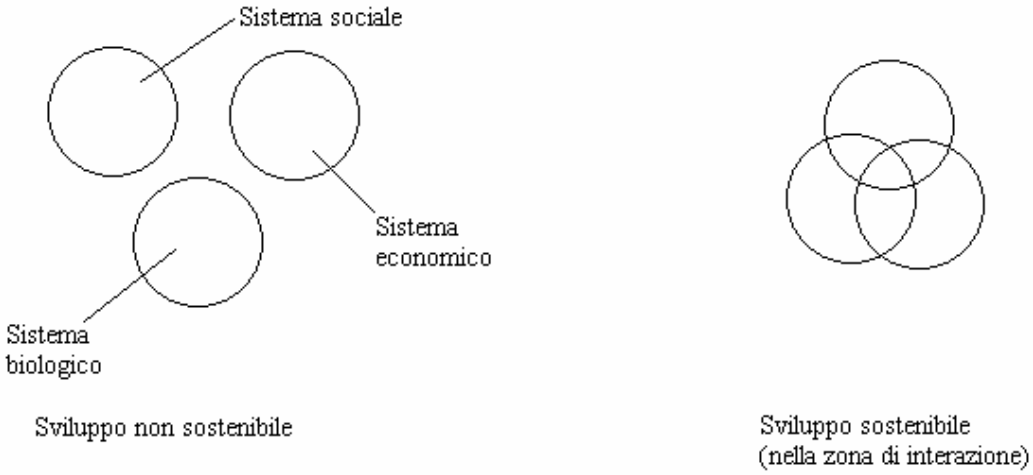
Figura 1: L'economia come sistema isolato. (da H. E. Daly, Olte la crescita. L'economia dello sviluppo sostenibile. Edizioni di comunità, Torino, 2001, pag. 64)

In questo processo circolare ciò che "scorre" è un valore di scambio astratto, astratto dalle dimensioni fisiche dei beni e dei fattori scambiati, indipendente quindi dall'ambiente. Per questo motivo non sorge alcun problema di sfruttamento eccessivo di risorse naturali e di inquinamento e, di conseguenza, non si crea nessuna dipendenza dalla scarsità della natura. Esiste invece – e ne si è sempre più consapevoli – una dipendenza gerarchica della economia dall'ambiente in cui si svolge. Il sistema economico è rappresentabile in modo più realistico come un sottosistema aperto (che

scambia cioè sia energia che materia con l'ambiente circostante) di un ecosistema naturale non illimitato[5].

Questa dipendenza gerarchica dell'economia dall'ecosistema è il motivo che rende indispensabile l'apporto della conoscenza dei fondamenti di altre scienze alla teoria economica (senza questa commistione l'economia è destinata a rimanere miope).

[5] E. Barbier, uno degli economisti che più si è occupato di sviluppo sostenibile , parla di interazione fra tre sistemi: il sistema biologico (e delle altre risorse naturali), il sistema economico ed il sistema sociale. Per ciascuno di questi sistemi individua gli obiettivi da perseguire: il sistema biologico si occupa dalla salvaguardia della diversità genetica , della resilienza e della produttività biologica; il sistema economico si preoccupa del soddisfacimento dei bisogni primari, il rafforzamento delle condizioni di pari opportunità e la maggiore utilità dei beni e servizi prodotti; il sistema sociale, infine, si occupa delle diversità culturale, della stabilità istituzionale, della giustizia sociale e della partecipazione. Barbier sostiene che tutti i sistemi e gli obiettivi vanno considerati simultaneamente, mentre gli economisti sono generalmente riduttivi nel loro approccio in quanto tengono conto unicamente dei sistemi economici. Egli rappresenta così la convergenza dei sistemi.



La convergenza dei sistemi secondo Barbier.
(da E. Barbier, The Concept of Sustainable Development, Earthscan, London, 1987).

Pur condividendo l'ultima affermazione di Barbier , ritengo che la sua rappresentazione difetti in quanto non tiene conto proprio di quella gerarchia di cui parlavo poc'anzi. La quale, a mio parere, è giustificabile in questi termini: non può esistere una società senza un sistema biologico, ma è vero il contrario; non può esistere un sistema economico senza una società ed un sistema biologico, ed anche qui è possibile il contrario.

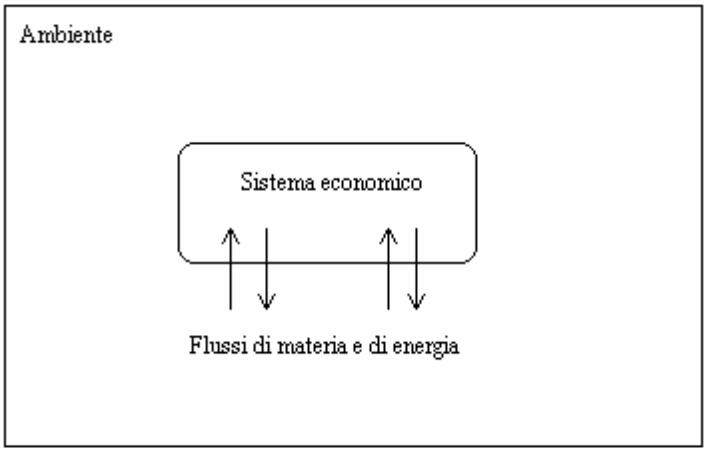


Figura 2: Sistema economico ed ambiente. (da M. Ruth, Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics, Kluwer, Dodrecht 1993).

Inoltre l'antroposfera, cioè la società e l'economia che essa mette in moto, viene oggi attraversata da una crescente quantità di materia ed energia, ma, mentre le dimensioni di questo subsistema (società ed economia) continuano a crescere, l'ecosistema globale no. L'attività economica umana è cominciata relativamente da poco e in un mondo praticamente "vuoto" nel quale l'interferenza umana era trascurabile (ossia veniva metabolizzata dal sistema ecologico). Oggi invece l'antroposfera supera i limiti dell'ecosistema: il mondo è "affollato". L'evoluzione dell'economia umana è passata da un'era in cui il capitale di produzione umana era il fattore limitante nello sviluppo economico a un'era in cui il fattore limitante è diventato il capitale naturale residuo.

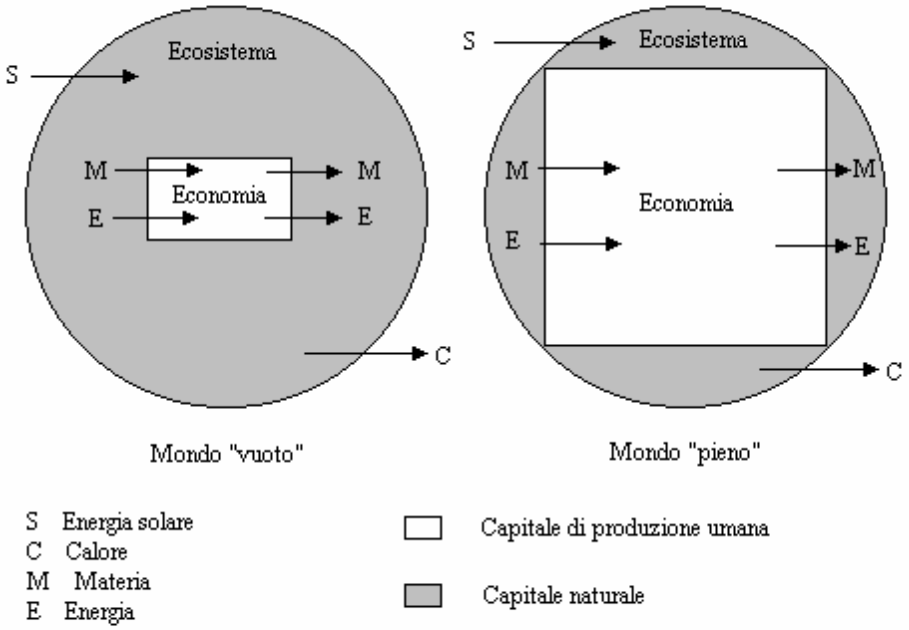


Figura 3: La transizione da mondo"vuoto" a mondo "pieno". (da H.E.Daly, Oltre la crescita. L'economia dello sviluppo sostenibile. Edizioni di comunità, Torino, 2001. pag. 65.)

Inoltre l'economia standard ignora - cosa paradossale - il proprio spazio di riferimento: la scarsità. Si badi bene: non la sola scarsità che fino ad ora è passata attraverso il "sistema dei prezzi", ma una scarsità che solo una lente diversa può osservare: la Terra. Una sola. 4.500 milioni di anni per averla. 6 miliardi di persone in lista di attesa, per averla. La natura entra nell'analisi economica soltanto quando le si attribuisce il ruolo di merce economicamente scarsa e a condizione di poterla misurare in termini monetari. Questa unità spaziale scarsa non è l'intero pianeta, ma la crosta terrestre e la sua atmosfera, una sottile buccia intorno alla Terra: la biosfera, "spazio singolare", dove – per caso – si è sviluppata la vita.

Così la descrive S. Tagliagambe: "…come sistema specifico, per biosfera si intende la zona della crosta terrestre che si trova alla superficie del nostro pianeta e accoglie tutto l'insieme della materia vivente. Si tratta di un sistema interconnesso con quello planetario e profondamente interrelato con l'ambiente che lo circonda, per cui non può essere studiato prescindendo da questo contesto globale. Anche se si infiltra nell'idrosfera (vita acquatica) e

nella parte più superficiale della litosfera (vita terrestre), espandendosi per un'altezza di circa 5 chilometri nella parte più bassa dell'atmosfera (la troposfera), in confronto alle dimensioni complessive della Terra la biosfera è solo una sottile pellicola. Eppure questa minuscola presenza assume un'importanza enorme. Basterebbe ricordare che tutto l'ossigeno dell'aria e dell'acqua l'ha più volte attraversata sin dai tempi remoti in cui sono apparse le prime piante verdi. Se si pensa che la fotosintesi agisce ormai da alcuni miliardi di anni, utilizzando l'enorme disponibilità di energia solare e le grandi riserve di anidride carbonica dell'aria per formare composti organici essenziali alla vita, ci si può fare un'idea dell'importanza di questo fenomeno nel divenire della biosfera. La materia organica vegetale è dunque una forma di accumulo dell'energia solare di enormi dimensioni, e proprio per questo […] la biosfera è una creazione del Sole nella stessa misura di quanto è una manifestazione dei processi terrestri[…]. Essa è il meccanismo planetario che trasforma la radiazione solare in forme nuove e diversificate di energia libera terrestre, energia che cambia radicalmente la storia e il destino del nostro pianeta. Quindi, se la materia vivente è l'insieme globale degli organismi viventi, ne deriva che non la si può studiare partendo dal singolo organismo vivente, in quanto non è la semplice somma di questi organismi a costituire la vita nel suo complesso. La vita è piuttosto un'unità organica sicuramente contraddistinta da un'organizzazione interna profondamente diversificata, ma la cui caratteristica fondamentale è costituita dall'unità della funzione cosmica, consistente nel trasformare l'energia irradiata dal Sole in energia fisica e chimica."[6]

La Terra e la vita che vi si è insediata vengono, troppo semplicemente, considerate come null'altro che fattori di produzione. E sia, possono anche essere fattori di produzione, cioè mezzi per un fine, ma questa è la loro seconda natura, non la prima. Esse hanno caratteri metaeconomici, ed è per

[6] S. Tagliagambe, in Tiezzi – Marchettini (a cura di). Oltre l'illuminismo. CUEN, Napoli 1996, pag. 34.

questo motivo razionalmente giustificabile affermare che esse sono "sacre". Chiarisco quale significato ha per me in questo contesto il concetto di sacro. Sacro nella sua accezione laica ed agnostica (capisco che possa essere visto come un ossimoro, ma ritengo che abbia una sua validità). Laicità che fa si che si consideri la materia, l'energia e le loro interazioni e connessioni alla base del nascere e del perpetrarsi della vita. La "sacralità" della materia e il senso del sacro che ne deriva, permettono di avere un profondo rispetto della natura proprio mentre se ne riconoscono i limiti. Sacro inteso come ignoto e come senso del limite. Agnosticismo che deriva dalla nostra ignoranza, poca consapevolezza ed incapacità di comprendere e governare un mondo così complesso, un mondo che non può essere ricondotto sotto una scienza la cui logica è deterministica e meccanicistica e che spiega ogni accadimento riducendolo ad un processo lineare causa – effetto.

Proprio da questo approccio metodologico partono le critiche all'economia standard, i fondamenti filosofici della quale (o visione preanalitica) incorporano le principali idee del positivismo, tra queste la fede in un progresso illimitato, un antropocentrismo molto forte per cui l'uomo occupa un posto al di sopra della natura (che viene considerata come un semplice beneficio strumentale); la profonda convinzione che l'uomo ha il potere di dominare la natura grazie al metodo scientifico che gli consente di scoprire le leggi naturali e di utilizzare i risultati scientifici per mettere a punto tecnologie da impiegare nello sfruttamento delle risorse.

Il livello di conoscenza oggi raggiunto da tutta una serie di discipline, quali la biologia, la geologia, la fisica, la termodinamica, l'ecologia, ci permettono di affermare che la vita di ogni singolo organismo è parte di un processo su grande scala che coinvolge il metabolismo di tutto il pianeta. L'attività biologica è un unicum del nostro pianeta e ciascuno dei suoi componenti è essenziale per il mantenimento della vita. La legge che la governa è quella della complessità, infinite relazioni che legano i singoli anelli di una rete globale. Globalità significa complessità, e la complessità è necessaria per

l'esistenza del sistema vivente. Semplificazione significa instabilità del sistema, minori difese, minor "resilienza"[7], degradazione.
La visione del "mondo come macchina" non è più sufficiente a comprendere questo mondo. Strumenti di analisi, lenti attraverso le quali osservare in termini meccanicistici e reversibili la realtà non sono più sufficienti. Non sto dicendo – sia chiaro – che siano inutili e che si debba accantonare la razionalità e quell'approccio "scientifico" che proprio l'illuminismo ed il positivismo ci ha dato. Sto affermando che sono necessarie altre categorie di pensiero, di analisi per un'economia nuova che sia capace di comprendere e gestire le sfide che oggi la nostra società si trova di fronte.

Una economia che sia capace di far entrare nelle proprie categorie preanalitiche i concetti di "qualità" (o forma) e di "tempo", intesi non come valori esterni, parametri dati, ininfluenti ai fini del risultato della analisi economica, ma come proprietà integranti dell'oggetto di studio dell'economia. L'osservazione della natura ci insegna che qualità e tempo non sono parametri esterni ma proprietà insite nella materia vivente. La qualità ed il tempo hanno svolto un ruolo fondamentale nell'evoluzione biologica, contribuendo al successo evolutivo delle specie e modellando le forme della vita. Queste due categorie, assunte a fondamento di una "epistemologia del divenire", rappresentano oggi, in una visione ecologica sistemica, veri e propri cardini di cui tener conto sia nella scienza economica sia nelle scelte per uno sviluppo sostenibile. In altre parole si tratta di mettere in discussione ciò che Gregory Bateson[8] chiama "l'assunto antiestetico", proprio sia della fisica di Newton che della filosofia di Cartesio, per cui nella scienza contano solo le quantità, le entità misurabili. Qualità e forma hanno un valore scientifico. L'universo è

[7] Il termine resilienza indica la capacità di un ecosistema di recuperare i propri equilibri, e quindi mantenere costante un certo livello di produttività, quando è soggetto a pressioni o shock esterni. Le pressioni sono rappresentate dai disturbi o danni leggeri ma continui e gli shock da quelli violenti ma occasionali.
[8] G. Bateson, Mente e natura. Adelphi, Milano, 1984, e G. Bateson, Verso un'ecologia della mente. Adelphi, Milano, 1976.

fatto di relazioni tra materia ed energia, ridurlo a modelli matematici e a misure solo quantitative è perdere gran parte della realtà, a discapito proprio della stessa scienza-conoscenza.

Estetica dunque come superamento di una visione scientifica puramente quantitativa e come introduzione della fondamentale categoria della qualità. La qualità della vita ha bisogno del bello. Alla base di una svolta del modo di pensare e fare economia sono necessari valori estetici, continuare ad escluderli significa proseguire lungo una strada di riduzionismo scientifico che ha ignorato l'essenza stessa della natura, la sua complessità.

Questa tendenza ha prodotto molte delle distorte e pericolose scelte tecnologiche e scientifiche del secolo appena conclusosi, allontanando la scienza da una conoscenza realmente profonda della realtà e creando un "tipico" scienziato superspecializzato, refrattario ad aperture mentali transdisciplinari e ad un minimo (un minimo) di sensibilità ecologica. Nelle cosiddette "scienze esatte" si usano potentissimi e complessi strumenti matematici, vi è però chi li considera strumenti e chi invece li innalza a simboli di fede scientifica, adoperandoli anche per affrontare problemi non riducibili a semplici formalismi matematici. La perdita di un senso di "unità estetica" ritengo che sia un errore epistemologico grave dell'economia standard, e ripeto, non sto rinunciando alla razionalità del nostro modo di pensare, ma piuttosto sto chiedendo di recuperare una serie di valori estetici ed ugualmente una serie di valori etici.

Come la qualità, il tempo non è una astrazione, è parte integrante della materia, è nella materia, fa parte di ciò che esiste. Il tempo, inteso come numero di relazioni intercorse e come informazioni immagazzinate nel sistema energia-materia, è ciò che ha permesso di modellare la forma della nostra realtà. Non si può descrivere alcuna teoria politica, sociale, economica se non si tiene conto del tempo e della sua irreversibilità. Il problema del tempo è un

problema fondamentale, perché le "strutture che connettono"[9] noi con la realtà e che sono parti integranti della coevoluzione di uomo e natura hanno il tempo dentro di sé[10]. Senza il concetto di tempo non si può spiegare come tali strutture si modifichino e come progrediscano[11]. Il "sacro" di cui parlavo poc'anzi, è nella materia proprio perché il tempo è nella materia.

L'irreversibiltà ed il ruolo del tempo non trovano dignità scientifica nella economia standard odierna. L'economia riconosce un particolare concetto di tempo, che potrebbe essere riassunto nella frase "il tempo è denaro". Il progresso, la crescita vengono misurati dalla velocità con cui si produce, si arriva addirittura a pensare che quanto più velocemente si adoperano le risorse della natura, tanto più il progresso ed il benessere avanzano. Il tempo della nostra tecnologia, però, non coincide con il tempo della natura. Il tempo "tecnologico" o "economico" è esattamente l'opposto del tempo "biologico", inteso come quella "cosa" con cui si misura l'evoluzione degli organismi viventi. La sua unità di misura per studiare il passato è dell'ordine di grandezza di milioni di anni: miliardi di anni ci separano dall'origine della Terra, centinaia di milioni di anni dalla comparsa della vita, tre milioni di anni dalla comparsa dell'uomo. Ma il tempo biologico è anche quella "cosa" con cui si deve misurare il futuro e la rottura degli equilibri biologici che l'uomo ha prodotto. La realtà obbedisce a leggi diverse da quelle economiche, per usare un termine mutuato dalla termodinamica, la realtà riconosce il tempo "entropico": quanto più velocemente si consumano le risorse e l'energia disponibile del mondo, tanto minore è il tempo che rimane a disposizione per la nostra sopravvivenza. Il tempo tecnologico è inversamente proporzionale al tempo biologico.

---

[9] G. Bateson, Mente e natura, cit. , pag. 31.

[10] Ad esempio, per quanto riguarda il patrimonio genetico riferito a specie che l'intervento umano (o quello naturale) potrebbe far scomparire, qualcuno potrebbe pensare di costruire genoteche e banche dati per la conservazione di ogni sequenza genetica nota e decifrata, ma rimarrebbe comunque il problema di conservare anche la memoria delle strutture, estremamente complesse, degli ecosistemi nei quali le specie sono (o erano) abituate a vivere.

[11] Fra i pochi economisti ad avere una visione dinamica della economia si ricordano Marx, Schumpeter e Veblen.

I limiti delle risorse, i limiti di resistenza del nostro pianeta e della sua atmosfera indicano chiaramente che quanto più acceleriamo la crescita e la produzione, tanto più accorciamo il tempo reale a disposizione della nostra specie. Un organismo che per la sua sussistenza consuma più rapidamente di quanto l'ambiente produca non ha più possibilità di sopravvivere. Rudolph Clasius, uno dei padri della termodinamica, scrisse (nel 1885!): "Nell'economia di una nazione c'è una legge di validità generale: non bisogna consumare in ciascun periodo più di quanto è stato prodotto nello stesso periodo. Perciò dovremmo consumare tanto combustibile quanto è possibile riprodurne attraverso la crescita degli alberi."[12]

Le scelte energetiche rappresentano, per la riconversione "ecologica" dell'economia, un nodo centrale ed è bene sottolineare subito che le energie non rinnovabili (combustibili fossili e nucleare) sono per loro natura incompatibili con uno sviluppo sostenibile. Prendere le energie fossili dalle sacche dove sono state immagazzinate dalla natura (che ha usato queste sacche come pattumiere dell'attività biologica proprio per togliere il carbonio in eccesso dai cicli vitali e realizzare quella giusta miscela di ossigeno e anidride carbonica che è stata fonte di evoluzione biologica e di vita) è come spargere in un solo giorno la spazzatura accumulata da una città in duemila anni nelle sue strade. Per milioni di anni i cicli biologici hanno sottratto il carbonio all'atmosfera relegandolo nelle viscere del pianeta, fuori della biosfera e ora , in meno di un secolo viene reimmesso nell'atmosfera sotto forma di anidride carbonica che causa l'effetto serra e fa saltare la base stessa dell'equilibrio della vita sulla Terra: il ciclo del carbonio. Utilizzare indiscriminatamente combustibili fossili significa non riconoscere la profonda differenza

[12] E. Tiezzi, Fermare il tempo. Un'interpretazione estetico scientifica della natura, Raffaello Cortina Editore, Milano, 1996, pag. 131.

concettuale che esiste tra tempo "biologico" e tempo "economico". Una ulteriore forma di riduzionismo.
Ciò di cui l'economia deve diventare capace è comprendere la irreversibilità e la stocasticità del tempo come proprietà intrinseche della natura che presenta incertezza, instabilità, caos.

Uno dei motivi di questa incapacità è dato dal fatto che l'economia neoclassica standard non riconosce concetti logici dialettici: essendo fondata essenzialmente su concetti aritmomorfici[13] non è in grado di spiegare il proprio cambiamento. Il processo economico rappresentato come processo circolare, privo di "tempo", e sempre uguale a se stesso non può e non riesce a spiegare la propria evoluzione. Questo limite è tanto più grave in quanto i fenomeni di cui la scienza economica si occupa sono soggetti a rapide trasformazioni (si pensi alla tecnologia), molto più rapide di quanto non siano le trasformazioni in atto in biologia. Si noti, tra l'altro, che questo spiega gli insuccessi spesso riscontrati nell'applicare la teoria standard a scopo di

[13] Un concetto aritmomorfico (dal greco ′ριθμΟς, numero e -μορφος dal tema di μορφΗ, forma) è un concetto che possiede gli attributi del discreto; ossia, in altre parole, è un concetto rigorosamente delimitabile. Esempi di questi concetti sono i numeri, come 2 e 3, i simboli *n* e *m*, il concetto di triangolo o di cerchi. I computer sono un ottimo esempio di sistema fondato su una logica aritmomorfica: tutta l'informazione in essi contenuta, infatti, è costruita sulla "più" aritmomorfica delle distinzioni: quella tra zero e uno.
Caratteristica peculiare dei concetti aritmomorfici è la possibilità di distinguerli nettamente l'uno dall'altro. In altre parole essi non hanno confini sfumati e non si "sovrappongono". Questa caratteristica assai particolare fa dei concetti aritmomorfici una categoria particolarmente preziosa nell'ambito dell'attività scientifica, anzi essi divengono, secondo i positivisti logici, gli unici concetti abilitati ad operare nell'ambito della scienza.
Un concetto dialettico è un concetto i cui confini non sono rigidamente determinati ma, al contrario, esso è delimitato da una "penombra" entro la quale si sovrappone al suo opposto.
La ragione secondo cui decidere se un particolare paese sia o meno una "democrazia" può suscitare interminabili discussioni, dipende dal fatto che il concetto stesso di "democrazia" si presenta con una molteplicità di significati. I suoi confini semantici, cioè, sono ben lontani dall'essere rigidamente determinati: il concetto di "democrazia" è pertanto un esempio di concetto dialettico. Caratteristica essenziale dei concetti dialettici è che ad essi non si può applicare il principio fondamentale della logica: il principio di contraddizione. Questo afferma, come noto, che «B non può essere, contemporaneamente, A e non A». Viceversa, per i concetti dialettici, può accadere che B è al tempo stesso parte di A e di non A.
La differenza sta in questo: un concetto dialettico è separato dal suo opposto da una penombra, mentre, nel caso di un concetto aritmomorfico, la separazione è data da uno spazio vuoto: «o l'uno o l'altro».

previsione. Non rilevando concetti dialettici è incapace di percepire quella zona di "penombra" che è propria della realtà e di comprendere che non abbiamo una conoscenza perfettamente chiara di nessuna cosa, essendo ogni nostra esperienza – appunto - circondata da una zona crepuscolare, una penombra di incertezza in cui non siamo ancora penetrati. La mancanza di contorni definiti per gli oggetti della realtà si trasferisce dalla realtà ai concetti che la rappresentano. Questo porta ad affermare che la pretesa di costruire l'intero edificio scientifico sulla base di concetti aritmomorfici si presenta viziata all'origine da un peccato di astrazione.

Altro limite connesso all'impiego prevalente di concetti aritmomorfici è che questi portano a conclusioni teoriche tendenzialmente unificate, ossia valide per ogni società. L'impiego diffuso di strumenti dialettico-descrittivi porterebbe, oltre alla rivalutazione della storia, alla introduzione di distinguo di carattere istituzionale, sociale ed antropologico funzionali alla elaborazione di teorie economiche diverse per contesti culturali diversi. Volendo l'economia descrivere il mondo solo in termini quantitativi, misurabili si scontra con questi limiti e questi limiti sono inscindibilmente connessi al ruolo giocato dal tempo, dal divenire, nella analisi di qualsivoglia oggetto naturale. L'uomo non può "fermare il tempo", è impossibile, ma ignorarne il suo scorrere irreversibile non è una soluzione.

Certo è che il ragionamento logico, fondato su concetti aritmomorfici, presenta maggiori possibilità di controllo, questo tuttavia non sostituisce l'uso di strumenti dialettici, per il semplice motivo che questi ultimi consentono una migliore "economia di pensiero", consentendo di affrontare problemi, o di porre domande che per la loro complessità, non sono ancora affrontabili in termini logico-formali.

H.E.Daly e J.B.Cobb criticando le astrazioni della scienza economica parlano di "fallacia della concretezza mal posta", intendendo con questa espressione quel particolare tipo di errore in cui si incorre considerando una astrazione (ad esempio l'homo oeconomicus) come se fosse la realtà che, mediante tale

astrazione andiamo a rappresentare (nell'esempio l'uomo nella sua "globalità")[14]. Il pericolo connesso alla fallacia della concretezza mal posta è grave: si tratta di riconoscere attributi di concretezza, di realismo, evidenza matematica e simili a concetti che viceversa sono il frutto di determinate astrazioni e, come tali, di scelte metodologiche e, dunque, di valore. Essendo una astrazione una dimenticanza volontaria di "qualcosa" che, pur scomparendo, rimane produttiva di effetti, ignorare questo "qualcosa" porta generalmente a conclusioni errate sulla realtà concreta.

"Il modello è per definizione quello in cui non c'è niente da cambiare, quello che funziona alla perfezione; mentre la realtà vediamo bene che non funziona e che si spappola da tutte le parti; dunque non resta che costringerla a prendere la forma del modello, con le buone o con le cattive"[15]. Palomar, nella novella di Italo Calvino, osserva che se il modello non ha successo nel descrivere la realtà, la soluzione consiste nel forzare la realtà perché prenda la forma del modello. Se non vogliamo scegliere la paradossale soluzione di Mister Palomar, è necessario un cambio di paradigma nei termini introdotti da Thomas Kuhn.[16]

---

[14] H.E.Daly, J.B.Cobb, Un'economia per il bene comune, Red Edizioni, Como, 1994.

[15] I. Calvino, Palomar, Einaudi, Torino, 1983; la citazione è tratta da "Il modello dei modelli".

[16] Lo storico e filosofo statunitense Thomas S. Kuhn (1922 -) è autore di numerose opere, fra cui spicca La struttura delle rivoluzioni scientifiche (1962) , nella quale, utilizzando le sue ricerche di storico della scienza, ha elaborato una sua concezione epistemologica originale, secondo cui le nuove dottrine non sorgono né dalle verificazioni né dalle falsificazioni, ma dalla sostituzione del modello esplicativo vigente (o "paradigma") con uno nuovo. Secondo Kuhn, lo sviluppo storico della scienza si articola in periodi di "scienza normale" e in periodi di "rotture rivoluzionarie".
I primi sono qualificati dal prevalere di determinati paradigmi, ossia di complessi organizzati di teorie, di modelli di ricerca e di pratiche sperimentali "che, per un certo periodo, vengono riconosciute da una determinata comunità scientifica come il fondamento per il suo ulteriore lavoro" (La struttura delle rivoluzioni scientifiche, pag. 29). L'astronomia tolemaica e quella copernicana, la dinamica di Aristotele e quella di Newton, l'ottica corpuscolare e quella ondulatoria ecc., sono altrettanti esempi di paradigmi, che nel loro "normale" periodo di fioritura sono rappresentati da scienziati protesi a consolidare, confermare, sviluppare il modello vigente e dediti per lo più alla soluzione "di una quantità di complessi rompicapi strumentali, concettuali e matematici" (ivi, pag. 57). Kuhn ritiene che la scienza normale entri in crisi per un sommarsi di "anomalie", ossia di eventi nuovi ed insospettati, che gli scienziati del periodo ancora normale, istintivamente portati ad evitare il cambiamento e le novità sensazionali, cercano più o meno faticosamente di incasellare nel vecchio modello esplicativo. Più che di "falsificare" quest'ultimo, si cerca invece di riformularlo e di correggerlo, e di solito lo scienziato del vecchio paradigma si mostra piuttosto ostile verso lo scopritore di anomalie.
Ma proprio il tentativo di conservare ad ogni costo il modello "ufficiale" fa sì che le crepe all'interno del vecchio sistema aumentino. Ad esempio, il tentativo di salvare ad ogni costo il sistema tolemaico non ha fatto che accumulare, giorno per giorno, nuove prove contro di esso: "quanto più esatto e

Kuhn, uno dei più grandi filosofi della scienza contemporanei, ha osservato che con il passare del tempo si scoprono fenomeni, nascono anomalie che le teorie esistenti non sono in grado di inquadrare e di spiegare. Il divario tra la teoria e la realtà può diventare enorme e, conseguentemente fonte di gravi problemi. E' esattamente quello che sta avvenendo oggi tra le vigenti teorie socio-economiche e la realtà naturale del pianeta: occorre rivolgersi a nuove teorie. L'esempio più famoso addotto da Kuhn è quello dell'evoluzione biologica di Charles Darwin. Nello studio delle specie viventi la grande novità introdotta dalla teoria darwiniana era la presenza di un nuovo parametro: il tempo, appunto. Una visione completamente diversa della realtà che i più grandi scienziati di quel momento storico non capirono e non vollero capire. Darwin stesso sosteneva che era impossibile pretendere che i migliori dei suoi colleghi, che avevano speso l'intera loro vita lavorando all'interno di un modello, di una teoria (il vecchio paradigma), potessero accettare una teoria così diversa (il nuovo paradigma).

La stessa cosa avviene oggi per il problema ambientale, che pone sul tappeto la necessità di abbandonare vecchi paradigmi e di cercare una nuova strada: per la prima volta nella storia della umanità si affacciano alcune crisi che potrebbero coinvolgere tutto il pianeta. Il problema demografico, la possibile alterazione permanente dell'atmosfera e del clima, l'esaurimento delle risorse energetiche – o meglio, i limiti imposti dalla natura al loro uso – sono gli

---

ampio è questo paradigma, tanto più sensibile sarà esso come indicatore di anomalie e, quindi, come stimolo per un cambiamento di paradigma" (ivi pag. 89). Alla fine la crisi è tale per cui ci si decide a prendere in considerazione il nuovo paradigma. Quando una teoria scientifica ha raggiunto lo status di paradigma, essa viene dichiarata valida solo se è presente un candidato che possa prenderne il posto: "nessun processo finora messo in luce dallo studio storico dell'evoluzione scientifica ha una qualche somiglianza con il modello metodologico della falsificazione mediante confronto diretto con la natura…La decisione di respingere un paradigma è sempre contemporaneamente anche la decisione di accoglierne un altro, e il giudizio che porta a questa decisione include il confronto dei due paradigmi con la natura e tra loro" (ivi pag. 103). A questo punto è oramai in atto, e trionfante, una rivoluzione scientifica. L'affermarsi del nuovo modello apre a sua volta altri periodi di scienza normale, che lo approfondiscono in tutte le direzioni , sinché, di fronte ad altre anomalie, si prepara la gestazione di una nuova struttura paradigmatica.

Kuhn si rifiuta di pensare questa successione di paradigmi mediante l'idea tradizionale di progresso. A suo parere, l'unica realtà che ci è dato constatare è il fatto che la scienza si sviluppa da determinati stadi precedenti. Ma questo non ci autorizza a sostenere che essa sia in marcia verso qualche meta assoluta, quale sarebbe ad esempio il possesso della verità.

aspetti più eclatanti di una crisi globale (ambientale, energetica, economica) che coinvolge tutto l'equilibrio biologico. Tale crisi non è che la logica conseguenza di un uso dissennato, sia dal punto di vista biologico sia da un punto di vista fisico-termodinamico, delle risorse terrestri (ritenute a torto inesauribili), della natura (ritenuta, a torto, un sistema in grado di riparare eternamente i danni subiti) e dell'uomo (ritenuto, a torto, capace di subire indenne aggressioni di tutti i tipi – da quelle chimiche a quelle psicologiche – o comunque capace, con la propria abilità e le proprie tecnologie, di dominare processi di squilibrio di dimensioni planetarie). La responsabilità ambientale assume quindi un ruolo fondamentale nelle scelte politiche ed economiche e si pone con urgenza il problema della penetrazione a tutti i livelli di una completa e seria cultura della sostenibilità, il rapporto tra economia e ambiente (e le scienze che lo studiano) deve essere (ri-)costruito ed alcuni punti di partenza sui quali cominciare sono evidenti: la natura indica alla economia che esistono costi economici lontani nello spazio (su scala planetaria) e nel tempo (le generazioni future non possono più esser escluse dal mercato); la natura evidenzia la non riducibilità a unità economiche di molti costi ambientali e umani; se la produzione obbedisce solo a leggi economiche neoclassiche ciò che si produce non sarà necessariamente a favore dell'uomo.

CRITICA A DUE CONCETTI DELL'ECONOMIA NEOCLASSICA : INTERNALIZZAZIONE E SCALA OTTIMALE

Il modello neoclassico – nei suoi essenziali presupposti concettuali di base – pone al centro dell'analisi l'individuo (homo oeconomicus) nella sua qualità di consumatore e di titolare delle risorse produttive (capitale e lavoro, gli unici due fattori di produzione contemplati). L'analisi teorica si concentra sull'allocazione efficiente o ottimale di risorse disponibili in quantità limitata, destinabile a fini diversi e ordinabili secondo una scala di priorità, il fine è quello di definire un equilibrio economico generale ovvero trovare una situazione del sistema per la quale esiste un vettore di prezzi e di quantità (per tutti i beni e i servizi dei fattori produttivi) tale che tutti i consumatori massimizzino la loro funzioni di utilità, le imprese massimizzino il loro profitto e tutti i mercati siano in equilibrio. Le proprietà normative di questo approccio sono fondate su un concetto di efficienza o di ottimalità caratterizzato dalla assenza (o da un minimo carico) di giudizi di valore: l'ottimo paretiano.

L'allocazione paretianamente ottima si raggiunge quando è impossibile, mediante una qualsiasi modificazione di tale allocazione, aumentare il benessere di almeno un individuo senza diminuire il benessere di un altro. Léon Walras ha dimostrato matematicamente che, pur inserendo un numero considerevole di variabili restrittive, si arriva, da un punto di vista strettamente teorico, ad individuare un sistema di condizioni di efficienza che descrivono un equilibrio simultaneo sia nella produzione che nel consumo di beni e servizi: il cosiddetto equilibrio economico generale walrasiano.

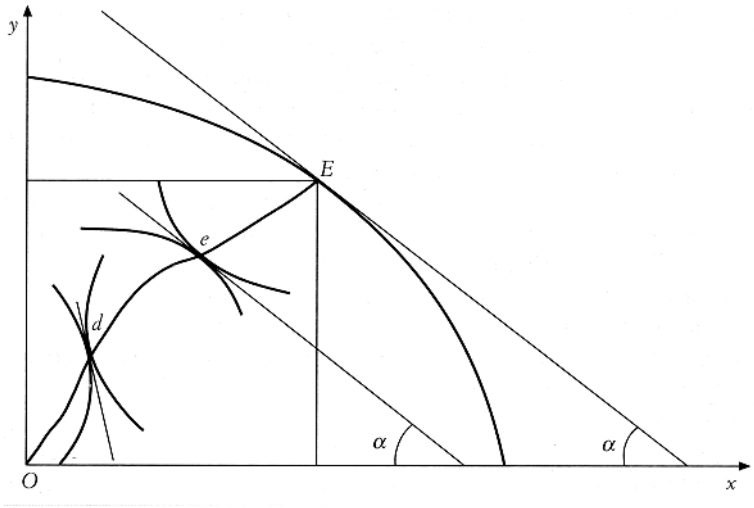


Figura 4: Equilibrio economico generale, efficienza nella produzione e nello scambio. (da R.Artoni, Lezioni di scienze delle finanze, Il mulino, Bologna, 2000, pag. 54).

Il problema successivo che il modello neoclassico si pone è accertare se esiste un meccanismo di mercato in grado di portare il sistema economico in una situazione di ottimo paretiano. La risposta a questa domanda viene dalla formulazione del primo teorema della economia del benessere, secondo il quale date le ipotesi di completezza dei mercati, di assenza di esternalità, di assenza di beni pubblici, di concorrenza perfetta e di informazione completa, il mercato concorrenziale ha la capacità di produrre una configurazione di prezzi e quantità che rispetta tutte le condizioni di ottimalità paretiana.

Questi elementi sono i primi mattoni della costruzione teorica neoclassica moderna e proprio in questi si può trovare esempio di "fallacia della concretezza mal posta": il punto di partenza dell'analisi è una concezione dell'uomo che si dice in grado di dare "forma" alle azioni umane, rendendole utili alla costruzione di una teoria. Così nasce la concezione di homo oeconomicus: un individuo asessuato che opera razionalmente, soppesando sempre le proprie opzioni. L'assunto di un comportamento razionale (che forma il nucleo di molte spiegazioni di teoria economica) implica che l'individuo abbia la possibilità di concepire la situazione ottimale per sé stesso

e, a partire da una infinità di possibili scelte, pesi accuratamente i costi e i benefici di una data decisione in rapporto a tutte le altre. Si presume inoltre che egli sia in grado di elaborare tutte le informazioni disponibili, anche rispetto al futuro.

L'homo oeconomicus è quindi una specie di macchina che massimizza il proprio beneficio secondo i dati disponibili, un modello che non prende in considerazione una qualsiasi motivazione etica ed estetica: un modello distante dalla realtà. Una descrizione siffatta di homo oeconomicus sottolinea il fondamento teorico sul quale la scuola neoclassica basa la sua descrizione della realtà: il mondo neoclassico è ben ordinato e popolato da una moltitudine di "uomini economici" che operano sulla base di interessi individuali e ottimizzano i mezzi per raggiungere i loro obiettivi. La realtà neoclassica è quella in cui i meccanismi di mercato esprimono il loro massimo potenziale, a condizione che tutti i soggetti che partecipano al mercato possano esprimere la loro scelta tra le alternative esistenti, in base alle loro preferenze.

Ma, anche ipotizzando comportamenti razionali, l'effetto finale delle decisioni individuali non porta necessariamente a risultati vantaggiosi per la società. Inoltre si presume che tutti coloro che partecipano ai processi economici siano in possesso di informazione completa. L'informazione, purtroppo, non è completa e non solo non conosciamo molti aspetti della complessa realtà che ci circonda, ma, anche quando sarebbe disponibile, l'informazione viene trascurata o ignorata. Nella sovrabbondante mole di dati che oggi ci giunge, è molto difficile selezionare ciò che è importante e la capacità elaborativa del singolo è messa a dura prova, tanto che i meccanismi di scelta finiscono spesso per essere determinati da fattori psicologici. Le persone sono disponibili a far la fatica di informarsi e ad utilizzare tali informazioni per una scelta ponderata con maggior motivazione individuale se è ridotta la "distanza morale" rispetto a coloro che subiscono le conseguenze delle scelte (reagiamo con meno indifferenza nei confronti di coloro che ci sono vicini), e se le conseguenze delle loro azioni non si estendono oltre certi orizzonti temporali.

Ciò che ci porta ad utilizzare l'informazione ha forti componenti emotive, tutto il contrario della fredda e lucida razionalità dell'homo oeconomicus.
Anche le aziende, dove pure sono gli individui ad assumere decisioni, raramente fissano obiettivi temporali lontani, e consuetudine, routine, costi dell'informazione portano a scelte che non si avvicinano alla massimizzazione dei profitti (si pensi ad esempio all'introduzione di nuove tecnologie a minor impatto che consentono di ridurre fortemente input di materiali con possibilità di ritorno economico in pochi anni.)

Gli unici fattori di produzione che l'homo oeconomicus contempla sono il lavoro ed il capitale. L'ambiente non ha diritto di rientrare in questa categoria. Come ho detto precedentemente, il modello di flusso circolare impedisce di vedere che l'attività economica non potrebbe esistere senza l'ambiente. L'ambiente viene però integrato nella teoria generale, facendolo "entrare" da una porta secondaria: i mercati danno luogo a risultati non desiderabili (dal punto di vista individuale o sociale), presentano dei "difetti", subiscono degli "effetti esterni" in seguito ai quali gli agenti economici vedono modificate le proprie funzioni di utilità in modo non volontario, senza cioè che ci sia stata una scelta e una transazione economica.
L'ambiente, o meglio, le alterazioni ambientali vengono introdotte nella teoria ma vengono classificate come "esterne" al sistema economico e sociale (minimizzando le cause sistemiche che sono alla base di questi effetti), in tal modo l'inquinamento ambientale non entra nelle analisi costo-beneficio degli attori individuali e non ha così alcuna influenza sui loro comportamenti. I responsabili dei costi dell'inquinamento non sono incentivati a tenerne conto nelle loro decisioni.
Già nel 1920, l'economista inglese Arthur C. Pigou, nel suo libro "The Economics of Welfare", delinea la questione nel modo seguente: "[…] il nocciolo del problema consiste nel fatto che quando A fornisce a B un servizio – per il quale viene pagato – incidentalmente determina anche servizi o

disservizi nei confronti di C, D, E. Ma ciò avviene in modo tale che è tecnicamente impossibile che chi ne beneficia debba pagare o che chi viene danneggiato possa ottenere una compensazione".[17]

Il mercato, di fronte all'emergere delle esternalità, fallisce.

Lo stesso Pigou, che per primo ha formulato il concetto di esternalità negative, ci fornisce una soluzione: le esternalità devono essere internalizzate, ovvero, si devono escogitare degli strumenti idonei a incorporare nel quadro decisionale di ogni individuo le conseguenze delle proprie azioni. L'obiettivo è quello di ristabilire gli equilibri di mercato. Pigou suggerisce come mezzo di internalizzazione l'istituzione di una tassa, il cui ammontare sia tale da motivare chi crea il danno a evitarlo. Lo Stato fissa la misura della tassazione idonea a ritornare a una situazione economicamente ottima.

Una alternativa all'imposizione fiscale sono i certificati (o permessi) di emissione, finalizzati a una riduzione sensibile del livello di pressione ambientale: una strategia mediante la quale il regolatore pubblico pre-determina il livello di consumo delle risorse. Agli strumenti di tale strategia ci si riferisce definendoli quali soluzioni quantitative. I singoli attori economici ricevono i diritti d'uso delle risorse (gratis o a pagamento), diritti che possono essere commercializzati attraverso istituzioni specifiche.

Un secondo filone di meccanismi di correzione delle esternalità fornisce soluzioni di natura privata: Ronald Coase[18] dimostra che in certe condizioni (molto restrittive) anche le negoziazioni dirette fra i danneggiatori e i danneggiati possono portare a soluzioni valide, rendendo l'intervento dello Stato potenzialmente non necessario. Prerequisito di questo proposta è la definizione e l'assegnazione dei diritti di proprietà e di uso delle risorse ai singoli. Al comparire di costi esterni, gli agenti economici entrano automaticamente in una fase di contrattazione attraverso la quale si arriva ad

---

[17] A.C. Pigou, Economia del benessere, Torino, UTET, 1960, pag. 159.

[18] R.H. Coase, The problem of Social Cost, in Journal of Law and Economics, 1960 e R.H. Coase, Impresa, mercato e diritto, Bologna, Il mulino, 1996.

un risarcimento considerato ottimale da entrambe le parti, oppure, le parti lese pagano ai danneggiatori un incentivo sufficiente a rinunciare all'attività non desiderata (l'una o l'altra a seconda di come sono stati distribuiti i diritti di proprietà).

Entrambi i filoni identificano una strada di internalizzazione dei costi esterni, ma entrambi si poggiano su forti astrazioni che portano lontano dalla complessa realtà delle relazioni naturali, sociali ed economiche.
Il problema principale dal punto di vista sistemico-ambientale sta nel fatto che una internalizzazione completa è impossibile poiché esistono gravi problemi di conoscenza.
Affinché il meccanismo concorrenziale di mercato funzioni correttamente in presenza di esternalità si deve conoscere non solo dove si verificheranno i potenziali danni, ma anche quanto peseranno, quando si avvereranno e a carico di chi, inoltre non sempre l'esistenza, attuale o potenziale, di un danno per la collettività è nota.[19]
La visione neoclassica dei problemi ambientali non tiene conto delle "strutture che connettono", delle relazioni ecologiche. Le caratteristiche sistemiche – come la complessità della natura, il nostro scarso controllo degli interventi nella biosfera e l'esistenza di processi irreversibili – sono facile oggetto di astrazioni teoriche riduttive. Il metodo *ceteris paribus* usato in economia conduce ad un pensiero unidimensionale e disaggregato che non rappresenta correttamente la realtà. Molti problemi ambientali non sono attribuibili a singoli soggetti con la certezza necessaria al funzionamento dell'internalizzazione. Ogni influenza esterna, cosi come ogni interferenza umana, porta a un cambiamento e, poiché gli equilibri ecologici sono per loro natura soggetti a continui cambiamenti, è difficile stabilire esattamente a quali influenze far risalire certi effetti.

[19] Si pensi, ad esempio, all'inquinamento da DDT o da CFC.

Inoltre si ignora che se le sollecitazioni e pressioni sull'ambiente superano un certo livello, possono determinarsi danni irreversibili e gli uomini di solito percepiscono i cambiamenti in ritardo, sovente dopo molti anni. Si interviene solo quando i problemi sono diventati manifestamente palesi o quando i rapporti causa-effetto sono stati provati scientificamente, accettati dalla opinione pubblica e la necessità di intervenire non può più essere negata. Le nuove teorie sui comportamenti dei sistemi complessi, le teorie del caos o le teorie delle "strutture dissipative" avvertono che anche piccole alterazioni possono avere ampie ramificazioni e conseguenze lontane nel tempo e nello spazio (è il cosiddetto effetto farfalla: un suo battito di ali è capace di provocare, lontano nello spazio e nel tempo, eventi meteorologici di grande intensità). Sottovalutare il nostro impatto sull'ecosistema apre scenari in cui la stessa sopravvivenza dell'uomo, alle mutate condizioni ambientali, è messa in forse. In una prospettiva di teoria scientifica, è ragionevole concludere che gli uomini non potranno mai controllare tutti gli effetti immaginabili, tutte le sinergie e gli antagonismi delle materie e composti presenti nell'ambiente, senza parlare dell'impossibilità di prevedere la dinamica di queste interrelazioni nel tempo e nello spazio con un anticipo adeguato a mettere a punto contromisure di qualche significatività.
In questo modo, basando la teoria su rappresentazioni "ideali", si genera una pericolosa illusione, carica di conseguenze: l'uomo si ritiene capace di controllare e dominare l'ambiente, mentre invece l'intervento dell'uomo sull'ambiente naturale ha conseguenze che superano – in numero ed in complessità – ciò che può essere tenuto sotto controllo.

Una seconda critica che si deve portare alla metodologia dell'internalizzazione delle alterazioni ambientali è relativa all'assunto della incorporazione della natura, nel suo senso più lato, in un sistema economico dominato da logiche monetarie. Come già detto, l'ambiente entra nell'analisi a condizione di poterlo misurare in termini monetari. Ma la valutazione monetaria incontra

seri problemi di metodo: l'imposizione fiscale o la quantità di certificati di emissione messi sul mercato sono alla fine una decisione politica, non certo l'esatta monetizzazione del valore dell'ecosistema e una stima precisa della sua capacità di carico. Anche le negoziazioni di compensazione economica sono generate da preferenze individuali, rapporti di forza e considerazioni costi-benefici che nulla hanno a che vedere con una valutazione ecologica complessiva.

Si crea in questo modo un paradosso: l'economia neoclassica, che pone a suo fondamento normativo il criterio di ottimo paretiano e il meccanismo di mercato (entrambi definiti come asettici, neutrali ed oggettivi), per risolvere i problemi che si determinano nel contesto del proprio paradigma crea degli strumenti che ne contraddicono le stesse ipotesi cardine. Così le soluzioni di natura pubblica e privata alle esternalità finiscono per richiamare più la pianificazione centralizzata che non il libero mercato. In sostanza, la funzione dello Stato diviene quella di definire le prestazioni del mercato a partire da un dato livello di tecnologia e di preferenze individuali; l'internalizzazione diviene una pretesa di avere uno Stato ideale onnisciente, senza considerare che questo è prigioniero – come d'altronde lo sono gli agenti privati – delle conseguenze della incertezza e della ignoranza.

Ciò che è oggetto di critica dunque è sia l'individualismo metodologico a fondamento delle scelte (come detto la somma degli ottimi individuali non corrisponde necessariamente all'ottimo economico della società, né probabilmente quest'ultimo è quello che ci assicura un equilibrio uomo-natura), sia l'assolutizzazione dell'attuale stato dei valori e dei prezzi (il quale emerge più che dal funzionamento della "mano invisibile", dai rapporti di forza e potere della nostra società imperfetta), sia della sua imposizione alle generazioni future.

Dubito che utilizzare le preferenze individuali – come criteri per decidere se un determinato assetto ecologico sia o no desiderabile – sia utile e funzionale, e mi chiedo quali relazioni tali criteri abbiano con la stabilità della biosfera o

con la sostenibilità. Un sistema ecologico complesso ignora se un certo livello di inquinanti, oggettivato in un tabulato, sia economicamente efficiente: esso reagisce "a modo suo" e non si possono escludere modificazioni irreversibili causate dalle crescenti alterazioni ambientali.

E' qui necessaria una precisazione: la critica agli strumenti per l'internalizzazione non è una presa di posizione assoluta. Esiste un patrimonio conoscitivo grazie al quale le politiche ambientali attraverso soluzioni neoclassiche standard, hanno compiuto importanti passi in avanti: sappiamo molto dell'effetto serra, della riduzione dell'ozono stratosferico, delle piogge acide, dei metalli pesanti, dei rischi associati alla energia nucleare e delle cause di molti altri problemi ambientali; questa conoscenza ha portato a grossi risultati: la maggior parte dei fiumi dell'Europa occidentale sono meno inquinati di quanto non lo fossero vent'anni or sono, la qualità dell'aria (misurata attraverso i livelli di alcuni inquinanti) è migliorata in quasi tutte le aree urbane dei paesi OCSE rispetto agli anni Settanta, esistono rigorose regolamentazioni sulle sostanze chimiche etc.

La critica è nei confronti di un loro uso indiscriminato per ogni genere di problema ambientale, che deriva dalla sottovalutazione delle dinamiche e della complessità dei sistemi naturali e sociali e dell'incertezza conoscitiva. Si deve sempre tenere conto che sono strumenti imperfetti e che grazie a questi si limitano le esternalità, non le si risolvono. Le regolamentazioni, le definizioni di soglie di sicurezza, la monetizzazione di costi ambientali comunicano false certezze in merito alle cause ecologiche, agli effetti, ai rischi poiché questi strumenti sono essi stessi il risultato di decisioni e compromessi politici; se lo si tiene a mente non li si utilizzeranno come panacea o come simboli di fede scientifica. Anche perché- e questa è la loro caratteristica più pericolosa – essi sono sempre strumenti di reazione, non di prevenzione. La inadeguatezza delle attuali politiche ambientali , da un punto di vista ecologico, sta proprio in questo: sono orientate a curare i sintomi invece di aggredire le cause.

Un esempio può essere chiarificatore: le tecnologie di disinquinamento "end of the pipe" a valle del processo produttivo, dominano il mercato delle tecnologie ambientali e consentono ottimi affari, proprio sulla spinta delle attuali politiche di comando e controllo. Si installano filtri nelle ciminiere, si individuano nuovi metodi per lo smaltimento dei rifiuti tossici e si impone l'adozione di marmitte catalitiche. Ma i problemi vengono trasferiti da un luogo ad un altro (aria, acqua, suolo): le polveri finiscono nelle discariche per rifiuti tossici, i fanghi di depurazione finiscono in discarica o inceneriti etc.

Un più moderno concetto di protezione ambientale, integrata nella produzione, non si colloca a valle dei processi produttivi, ma cerca di ristrutturarne il processo stesso in modo da evitare le emissioni: questa dovrebbe essere la vera direzione del progresso.

E non mi riferisco solo ad una limitata categoria di sostanze, poiché tutti i flussi di materiali (anche quelli "ecologicamente neutrali") utilizzati nel metabolismo industriale colpiscono l'ambiente. Infatti le conseguenze irreversibili dei flussi di materiali messi in moto dall'uomo fanno dubitare dell'efficacia di interventi su singole sostanze. Quando i limiti vengono superati, l'ambiente (analogamente all'economia) non si lascia facilmente riportare all'equilibrio precedente, come la visione meccanicistica della economia neoclassica vuole invece far credere. Quando l'uomo introduce nell'ambiente prodotti, emissioni e rifiuti solidi, la loro influenza, a volte ecologicamente nociva, è solo parzialmente reversibile. L'estrazione di risorse e la conseguente movimentazione di masse di materiali privi di valore economico (ad esempio l'acqua di falda che viene pompata via) sono processi completamente irreversibili. Si tratta di alterazioni della relazioni sistemiche ecologiche naturali che non possono essere recuperate con strumenti tecnici.

L'obiettivo di trovare quale sia il valore economico "oggettivo" della esternalità onde poterla internalizzare con uno qualsiasi dei numerosi strumenti economici a disposizione è utopistico, per non dire privo di senso. Gli immensi costi di ricerca necessari (dal lavoro di raccolta dei dati a quello

della stima delle principali esternalità) potrebbero essere invece instradati nella direzione di una innovazione industriale che riducesse drasticamente i flussi di materiali che attraversano il sistema economico.

D'altro canto il modello neoclassico ha sviluppato all'interno del proprio sistema teorico un concetto di fondamentale importanza intorno al quale ruota la maggior parte dell'analisi microeconomica: la scala ottimale.
Dopo aver fornito ottime giustificazioni a sostegno dell'affermazione che i costi marginali crescano e i benefici marginali diminuiscano all'aumentare della scala della attività, la microeconomia fornisce le condizioni che definiscono la scala ottimale: "… quale quantità di output deciderà di produrre una impresa concorrenziale? Essa produrrà la quantità di output in corrispondenza della quale il rincaro marginale è uguale al costo marginale – dove cioè il ricavo addizionale derivante da un'unità addizionale di output è esattamente uguale al costo addizionale che si sostiene per produrla."[20].

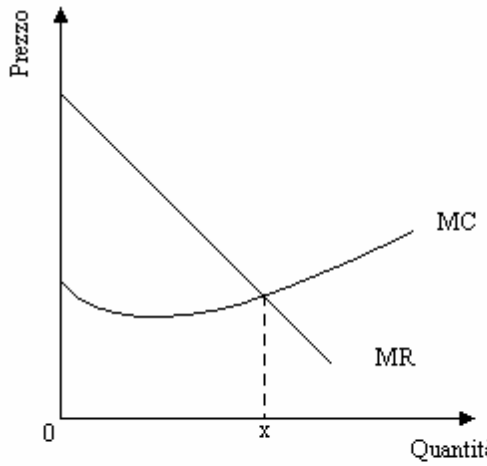


Figura 5: La scala ottima in microeconomia. (da M.L. Katz, H.S. Rosen, Microeconomia, McGraw-Hill,Milano 1996, pag. 254)

[20] H. R. VARIAN, *Microeconomia*, ed. Cafoscarina, Venezia, 1993, pag. 348.

Se ci si sposta alla macroeconomia, tuttavia, non si sente più parlare di scala ottimale. Non sembra esserci alcuna scala ottimale per la macroeconomia. Non esistono funzioni di costo e di beneficio per l'aumento della scala dell'economia nel suo insieme: non importa quante persone vivano sulla terra, e quanto ciascuna di esse consumi, o quale sia il flusso di materiale che attraversa l'insieme dell'economia. Sembra dunque che fra gli assunti della microeconomia e quelli della macroeconomia sorga una evidente contraddizione: se ogni attività micro ha una scala ottimale, come mai l'aggregato di tutte le attività micro non ce l'ha?

L'assenza totale in macroeconomia del concetto più basilare della microeconomia risulta indubbiamente un'anomalia. L'indifferenza della macroeconomia alla scala è dovuta alla visione preanalitica dell'economia come sistema isolato – della cui inappropriatezza ho già accennato nel paragrafo precedente.

Il primo passo è, forse, una definizione macroeconomica di "scala ottima": è questa sicuramente una scala fisica, non solo monetaria, che indica la dimensione della presenza umana nell'ecosistema, misurata *in primis* dalla popolazione e dall'uso pro capite che questa fa delle risorse naturali.

L'introdurre, nella visione preanalitica dell'economia, il concetto di sottosistema aperto di un ecosistema è ciò che ci permetterebbe di comprendere che la maggior parte della trasformazioni di materia ed energia che avvengono nella biosfera non sono soggette al controllo umano né attraverso un sistema di prezzi, né tramite una pianificazione centralizzata. In un sistema finito, soggetto a conservazione della massa, maggiore è la quota indotta sotto il nostro controllo e minore è quella che rimane sotto il controllo spontaneo della natura. Con l'aumentare della scala delle nostre estrazioni dall'ecosistema e delle nostre immissioni di ritorno in essa, aumenta anche il cambiamento qualitativo imposto all'ecosistema.

Nicholas Georgescu-Roegen, spingendosi oltre il paradigma neoclassico, ci spiega che ciò avviene per due ragioni: la prima è una diretta conseguenza

della prima legge della termodinamica, il principio della conservazione di materia ed energia[21]. Estrarre materia ed energia dall'ecosistema influenza necessariamente il funzionamento di tale sistema anche se non venisse fatto nulla alla materia e all'energia prelevate: la loro semplice assenza ha necessariamente un effetto. In modo analogo, la semplice inserzione di materia ed energia in un ecosistema provoca delle alterazioni; ciò e vero indipendentemente dal degrado qualitativo della materia e dell'energia spostate. La seconda ragione discende dalla seconda legge della termodinamica, la quale garantisce che la materia e l'energia estratte sono qualitativamente diverse da quelle reintrodotte. Vengono estratte materie prime a basso livello di entropia e restituiti all'ambiente residui ad alto livello di entropia. Questo degrado qualitativo del flusso di materie prime e di energia che attraversano il processo produttivo, insieme con la semplice dislocazione quantitativa delle stesse, induce cambiamenti nella biosfera che ci stanno cogliendo di sorpresa, poiché il sistema di informazione e di controllo dell'economia (i prezzi) ipotizza assenza di scarsità delle funzioni, svolte dall'ambiente, come fonte di risorse e ricettacolo per gli scarti. Il calcolo economico sta per essere messo in crisi da reazioni impreviste ed incerte da parte di un ecosistema sottoposto allo stress eccessivo di un sottosistema economico eccessivamente esteso.

La teoria economica standard ha semplicemente ignorato le determinanti fisiche sottostanti al processo economico. Tutta imbevuta dell'epistemologia meccanicistica essa ha sostenuto, e continua implicitamente a sostenere, la visione di un sistema economico chiuso e di un processo economico circolare.

Quali che siano le ragioni storiche che hanno portato gli economisti a sposare questa tesi, rimane il dato che nulla è più palesemente evidente del fatto che il sistema economico è un sistema sostanzialmente aperto. D'altra parte la legge di entropia ha mostrato come, da un punto di vista fisico, il processo

[21] N. Georgescu – Roegen, The Entropy Law and the Ecconomic Process, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1971

economico sia un processo sostanzialmente unidirezionale. Le circolarità della teoria neoclassica, come quelle fra produzione e consumo, richiedono, secondo Georgescu-Roegen, di essere inserite all'interno di una rappresentazione di tipo evolutivo.

La questione della scala ottimale del sottosistema "economia" rispetto all'ecosistema globale, chiuso e limitato, è la domanda centrale che una macroeconomia ambientale deve cercare – e velocemente – di risolvere.

Se la microeconomia, grazie al meccanismo di mercato, ci porta ad una allocazione ottimale (di una data scala del flusso di risorse) fra usi diversi, la macroeconomia dovrà trovare strumenti e strategie per affrontare il problema della scala ottimale.

Questi aspetti (allocazione e scala) rimangono due problemi distinti. H.E. Daly e J.B. Cobb utilizzano una intelligente analogia per chiarire questo passaggio: "[…] il problema dell'allocazione micro è analogo a quello di distribuire in modo ottimale un dato peso a bordo di un'imbarcazione. Una volta che la distribuzione ottimale del peso sia stata determinata, rimane la questione del peso complessivo che è corretto imbarcare. La scala ottimale assoluta di carico è conosciuta, nella terminologia nautica, come linea di Plimsoll, o linea di galleggiamento a pieno carico. Quando l'acqua raggiunge la linea di Plimsoll l'imbarcazione è piena: ha raggiunto la sua massima capacità portante, oltre la quale non è più sicura. Ovviamente se il peso è distribuito male il livello dell'acqua raggiungerà la linea di Plimsoll più in fretta. Tuttavia man mano che il carico aumenta l'acqua raggiungerà la linea di Plimsoll anche se il peso è stato distribuito in modo ottimale. Imbarcazioni il

cui carico è distribuito perfettamente affonderanno comunque sotto un peso eccessivo."[22]

Il paradigma corrente riconosce due questioni: quella allocativa e quella distributiva. La soluzione dell'allocazione ottima viene affidata al mercato concorrenziale; il problema distributivo, dal momento che il mercato si mostra incapace a risolverlo, trova invece la sua soluzione in politiche pubbliche di redistribuzione del reddito. Il problema di scala non solo non ha strumenti, ma non è neppure un'istanza accettata dalla comunità degli economisti, o, meglio, è stata riconosciuta ma si è cercato di includerla o nella questione allocativa o in quella distributiva: nel primo caso si sostiene che, se i prezzi sono quelli corretti, automaticamente non si pone alcun problema di dimensioni. Quando l'estensione del sistema economico è modesta, il giusto prezzo per i servizi che l'ambiente fornisce (che non sono scarsi) è nullo (è il caso del "mondo vuoto"). Nel momento in cui tali servizi divengono scarsi ("mondo pieno"), la soluzione è, semplicemente, trovare un prezzo adeguato ed il mercato allocherà tutto in modo efficiente. E' vero che dare una valutazione economica (un prezzo) a risorse divenute scarse è necessario per risolvere la questione allocativa; l'errore è supporre che si risolva così anche il problema della dimensione. E' anche facilmente contestabile l'affermazione con la quale si asserisce che, se la scala più grande esiste, vuole dire che gli individui l'hanno scelta nel corso di numerose decisione microeconomiche in cui sono stati disposti a pagare, in termini di qualità ambientale, il costo marginale di far crescere la scala dell'economia, valutandolo inferiore al beneficio marginale. Una simile asserzione presuppone – come ho già detto – assunzioni "eroiche" sulla nostra conoscenza di costi esterni, conseguenti al dissesto degli

[22] H.E. Daly, J.B. Cobb, Un'economia per il bene comune. Il nuovo paradigma economico orientato verso la comunità, l'ambiente e un futuro ecologicamente sostenibile. Red edizioni, Como, 1994, pag. 67. La linea (od occhio) di Plimsoll è il nome del marchio circolare regolamentare internazionale del bordo libero, che si suole incidere sulle murate delle unità mercantili di tutto il mondo. Esso prende il nome da Samuel Plimsoll (1824-1898) mercante e parlamentare inglese, che ai Comuni propugnò le disposizioni legali sulla massima immersione delle navi mercantili, in rapporto alla sicurezza della navigazione. Tali disposizioni furono approvate dal parlamento britannico con il Merchant Shipping Act dal 1876.

ecosistemi, e di come imputare tali costi alle decisioni individuali che li hanno generati.

Nel secondo caso, ossia l'inclusione della scala ottima nel problema distributivo, la tesi portata avanti sostiene che una dimensione eccessiva dell'economia erode la portata ecologica del sistema e infligge così un costo alle future generazioni. La scala sostenibile non sarebbe dunque altro che una distribuzione intergenerazionale delle risorse, che sia equa nei confronti del futuro. L'argomentazione è sicuramente corretta, ma ritengo che non esaurisca la questione di dimensione ottimale. E' infatti possibile che la crescita del sottosistema economico sia eccessiva e quindi sub-ottimale anche e più semplicemente per il presente. Inoltre la scala potrebbe essere eccessiva, anche se ancora sostenibile. Per questi motivi la scala non va inclusa completamente nella distribuzione, anche se i problemi di scala si sovrappongono con una parte della questione distributiva, quella intergenerazionale.

Esiste dunque oggi la necessità di delineare una istituzione economica, analoga alla linea di galleggiamento a pieno carico, per evitare che il peso – la scala assoluta – dell'economia faccia "affondare" la nostra biosfera. La definizione di scala dovrà avere un limite massimo identificato o nella capacità di rigenerazione o in quella di assorbimento dell'ecosistema (la minore delle due). E non ci si potrà esimere dall'introdurre valori metaeconomici, etici, nella sua strutturazione (pena la miopia).

Un esempio (più per chiarezza espositiva che per formalizzare una definizione) : si dovrà decidere se indirizzare la società verso un ottimo antropocentrico, in cui si espande la dimensione sino al punto nel quale il beneficio marginale per gli esseri umani di un'ulteriore unità di capitale fisico, prodotto nell'economia, è uguale al costo marginale che l'umanità sopporta per il capitale naturale sacrificato, e dove tutte le specie viventi non umane e i loro habitat vengono valutati solo strumentalmente in base alla loro capacità di soddisfare bisogni umani e, di conseguenza, il loro valore intrinseco è assunto pari a zero. Oppure scegliere di indirizzare la società verso un ottimo

biocentrico - dove altre specie e i loro habitat sono preservati più di quanto necessario ad evitare un collasso ecologico e oltre il punto di massima convenienza strumentale – sulla base dell'attribuzione alle altre specie di un valore intrinseco indipendente dal loro valore strumentale per gli esseri umani. E, in quest'ottica, la dimensione ottimale della nicchia umana è inferiore a quella dell'ottimo antropocentrico. Il discrimine fra le due scelte sarà sicuramente dato da valori metaeconomici.

L'introduzione di un concetto economico analogo alla linea di Plimsoll trova di fronte a sé enormi ostacoli: introdurre limiti biofisici nella teoria comporta minare alla base il concetto di crescita, *deus ex machina* dell'attuale sistema teorico. E' infatti attraverso di esso che il paradigma economico neoclassico (ed alcune fra le principali istituzioni economiche mondiali, quali la World Bank ed il Fondo Monetario Internazionale) vuole risolvere ogni problema, dalla sovrappopolazione allo sviluppo , dalla povertà alle stesse questioni ambientali. "La crescita economica non è una panacea per la qualità ambientale"[23] ed oltre ad essere una falsa cura, è probabilmente una delle principali cause del degrado ecologico. Una crescita in senso fisico che non riconosce alcuna linea di Plimsoll è possibile che superi il limite oltre il quale diventa antieconomica: i costi – al margine – dell'aumento del volume fisico di produzione sono superiori ai benefici della stessa, il benessere diminuisce.

Anche l'appellarsi alle infinite possibilità della tecnologia e alla sostituibilità delle risorse come giustificazione alla non-introduzione dell'assunzione di risorse limitate è viziata sotto diversi punti di vista: in primo luogo , tecnologia e completa sostituibilità consentono solo che una forma di materia/energia a basso livello di entropia, venga sostituita con un'altra, all'interno di un insieme finito e decrescente di risorse a basso livello di entropia. Tale sostituzione è spesso molto vantaggiosa, ma non è possibile, in termini netti, sostituire rifiuti a elevato livello di entropia con risorse a basso livello di

[23] K. Arrow e al., Economic growth, carrying capacity and the environment, in Science, 28 aprile 1995.

entropia. In secondo luogo, si sostiene spesso che il capitale riproducibile, di produzione umana, è un sostituto quasi-perfetto delle risorse naturali. Ma questo significa supporre che il capitale possa essere prodotto indipendentemente dalle risorse, il che è assurdo. Inoltre ciò si scontra con la ovvia complementarietà nella produzione di capitale e risorse. "Lo stock di capitale funziona da agente per la trasformazione del flusso delle risorse da materia prima a prodotto."[24] Una maggiore quantità di capitale non sostituisce minori quantità di risorse, se non in un margine molto ristretto.

Ancora, e chiudo, il concetto di limite alla crescita minaccia strutture di potere e interessi costituiti: i cittadini (dei paesi ricchi) temono che la loro posizione sociale e la loro libertà vengano messe a rischio, gli imprenditori sottolineano i costi e la perdita di competitività, i politici paventano che provvedimenti di questo genere non siano graditi e mettano quindi in gioco una loro eventuale rielezione. Frank Decker parla espressamente della "dominanza degli interessi industriali e commerciali nei sistemi economici e politici"[25]; e non a caso è stato affermato che il concetto di limite alla crescita "minaccia strutture di valore in cui sono state investite delle vite […]. L'aver smesso di credere nel moto perpetuo ha costituito un passo fondamentale verso il riconoscimento della reale condizione umana. E' significativo che gli economisti tradizionali non abbiano mai abbandonato tale fede, e non accettino la rilevanza per il processo economico della seconda legge della termodinamica; se lo facessero, la loro posizione di sommi sacerdoti dell'economia di mercato diverrebbe insostenibile"[26].

[24] N. Georgescu-Roegen, op. cit., pag. 90.
[25] F. Decker, *Ecologia e distribuzione: una analisi delle conseguenze sociali dell'ambientalismo*, Ed. Dehooniane, Bologna, 1994, pag. 48.
[26] E. Cook, *The consumer as creator. A criticism of faith in limitless ingenuity*, in "Energy exploration and explotation", I, n. 3, p. 194.

LO SVILUPPO SOSTENIBILE

In conseguenza della critica che si è rivolta al paradigma dell'economia neoclassica, si possono effettuare alcune riflessioni e trarre alcuni stimoli per rendere la teoria economica più aderente alla realtà e, quindi, prospettare una nuova metodologia di azione.

La più ovvia delle riflessioni è la necessità di evitare che la scienza economica (e non), sia solo strumento per dominare il mondo e la natura; essa deve invece essere una via conoscitiva per vivere in armonia con la stessa. Basilare al fine di questo risultato è allontanarsi da un "pensiero unico" omologante, che non rispetta tempi e modi della natura e che non riconosce vincoli e limiti, per giungere ad un approccio transdisciplinare. L'economia deve avere il coraggio di affrontare la contaminazione (cross-fertilization) di altre discipline (ecologia, fisica, biologia, scienze sociali, termodinamica etc.)

Le idee della cosiddetta "scienza post-normale"[27] potrebbero rappresentare un valido spunto per l'analisi dell'attuale cortocircuito fra economia e problemi socio-ambientali. Il tentativo dovrebbe essere quello di superare le barriere tra le diverse scienze focalizzando l'attenzione sui problemi concreti.

Vi è l'esigenza di risposta politica a temi largamente dominati dall'incertezza, dalla necessità di giudizi di valore e di decisioni urgenti. Non è più lo scienziato o l'analista del rapporto costi-benefici che potrà decidere da solo se una strada potrà passare attraverso una riserva naturale: la vecchia idea di "verità scientifica" è definitivamente sul viale del tramonto.

Sarà sempre più necessario un approccio che tenga conto della ignoranza, non tanto perché non si distinguerà più il parere di uno scienziato da quello della

[27] Viene così chiamata da Silvio O. Funtowicz in S.O. Funtowicz, J.R. Ravetz, Problemi ambientali globali e scienza post-normale, in Oikos, n° 3, 1991. Pp. 103-123. La scienza "normale" si dedica invece a risolvere questioni in cui l'esistenza della soluzione è assicurata.(Kuhn, op.cit, pag. 37).

persona "comune", ma perché dobbiamo fornire alla scienza la possibilità di vera partecipazione ai processi decisionali. Un conto è intervenire quando le conoscenze sono disponibili, altro è capire come comportarsi in assenza di conoscenza e in presenza di forti incertezze previsionali. Se non si accettano questi limiti e vincoli all'interno dei quali muoversi, la smithiana "mano invisibile" con le sue "eroiche" ipotesi ed astrazioni non farà altro che "brancolare nel buio"[28].

E' necessaria dunque una comprensione pluralistica della realtà che ricorra a diverse teorizzazioni (pur cautelandosi dalla loro pretesa di spiegare tutto): ogni tema può essere analizzato da più punti di vista teorici diversi e utili, metterli insieme consente di ricostruire una visione più ampia, anche se non sempre coerente. Se guardiamo la pianta del piano terreno di un edificio, capiremo ben poco dell'ultimo piano, se analizziamo il prospetto sapremo ben poco della struttura di base; se mettiamo insieme le due cose possiamo ricostruire mentalmente meglio la vera forma dell'edificio.

Ci si deve dotare di nuovi strumenti per studiare il rapporto tra realtà (ambiente/biosfera) ed economia, strumenti capaci di governare la complessità con la complessità, che rifuggano il riduzionismo (conseguente alla superspecializzazione del sapere) caratteristico di buona parte della scienza contemporanea.

Spunti interessanti vengono dai nuovi, recenti sviluppi della filosofia della scienza, delle teorie dei sistemi complessi, della teoria delle strutture dissipative (FFESODS), delle teorie del caos e delle catastrofi[29].

---

[28] F. Schmidt-Bleek.The fossil Makers: Factor 10 and Beyond, Boston University Press, 1997, pag. 74.

[29] Sul riduzionismo caratteristico di parte della scienza contemporanea ed in particolare sulle connessioni tra questo e la superspecializzazione del sapere è molto interessante la lettura degli scritti del filosofo francese Edgar Morin: E. Morin, Per uscire dal ventesimo secolo, Lubrina, Bergamo, 1989.

L'acronimo FFESODS sta per Far From Equilibrium Self-Organising Dissipative Structure. Per i sistemi aperti è fondamentale mettere insieme l'entropia negativa prodotta all'interno del sistema con l'entropia positiva scaricata da questo sull'ambiente e calcolare la variazione totale di entropia. Si vedrà così che se talvolta il disordine degenera in ordine, tutto ciò è solo una facciata del problema, un'apparenza di ordine a spese di un disordine ancora maggiore prodotto nell'ambiente circostante. I sistemi viventi hanno perciò bisogno, per mantenere le loro strutture, di un flusso continuo di entropia

Tutti questi elementi assumono il ruolo di protagonisti in un necessario cambio di paradigma. Un cambio di paradigma molto particolare perché non deve prevedere né pretendere di costruire un nuovo paradigma, ma semplicemente di superare sia la rigidità dei vecchi assunti della razionalità newtoniana-cartesiana, sia una visione strettamente antropocentrica, entrambi mancanti del parametro di tempo e dell'interazione uomo-natura-società.

Una nuova visione quindi che rifugga da posizioni assolute e da stereotipi fondamentalisti, primo fra tutti il mito dell'oggettività e della neutralità della scienza e le certezze che necessariamente se ne vogliono derivare. Un'economia che deve essere capace di accettare che "nessuna scienza p[ossa] essere sempre 'neutrale' o semplicemente fattuale e nemmeno obiettiva nel senso tradizionale di questi termini. La ricerca è sempre necessariamente logica basata su valutazioni morali e politiche, e il ricercatore dovrebbe essere obbligato a renderne conto in modo esplicito"[30].Un'economia che sia consapevole che "le valutazioni sono necessariamente implicate già nello stadio in cui osserviamo i fattori e in cui svolgiamo l'analisi teorica"[31].

Una scienza economica che adotti inoltre come principio guida una strategia di tipo precauzionale, la quale potrebbe risultare decisamente più idonea a evitare danni potenziali se mirasse a ridurre il consumo globale di risorse naturali,

---

negativa dall'ambiente esterno e di cedere a questo un'ancor maggiore quantità di entropia positiva. Ilya Prigogine ha chiamato queste strutture di non equilibrio in sistemi aperti "strutture dissipative". Sistemi lontani dall'equilibrio producono strutture, purché vengano mantenuti lontano dall'equilibrio. Il flusso di energia provoca fluttuazioni nella struttura dissipativa. Questa si riorganizza tendendo a un livello più alto di complessità. Ciò che rende interessante lo strumento concettuale delle strutture dissipative è la capacità di includere, all'interno dello stesso modello concettuale, strutture biologiche e non biologiche (l'economia, per esempio), senza ridurre la dimensione ecologica a quella economica e viceversa. Interessanti in tal senso le opere di Ilya Prigogine: I. Prigogine, I. Stengers, Tra il tempo e l'eternità, Bollati Boringhieri, Torino, 1989. I. Prigogine, The Arrow of Time, in C. Rossi, E. Tiezzi (a cura di) Ecological Phisical Chemistry, Amsterdam, 1991. I. Prigogine, La fine delle certezze, Bollati Boringhieri, Torino, 1997. Inoltre sulla teoria della complessità si veda: G. Bocchi, M. Ceruti (a cura di), La sfida della complessità, Feltrinelli, Milano, 1997.

Sulle teorie del caos illuminante è il saggio: N.Hall (a cura di), Caos. Una scienza per il mondo reale, Ed. Muzio, Padova, 1992. Sulla teoria delle catastrofi e sul contributo da essa fornita alla ricerca delle funzioni di resilenza dell'ecosistema, nel tentativo di prevedere i "livelli critici" connessi a tali funzioni si veda invece: R. Thom, Parabole e catastrofi, Il saggiatore, Milano, 1980.

[30] Gunnar Myrdal, L'obiettività nelle scienze sociali, Einaudi, Torino, pag. 74.

[31] G. Myrdal, L'elemento politico nella formazione delle dottrine dell'economia pura, Sansoni, Firenze, 1981, pag. VII.

solo così infatti è possibile evitare ab ovo le successive correzioni, costose e spesso del tutto irrealizzabili. L'approccio precauzionale implica azioni mirate al lungo termine che richiedono interventi anche in assenza di certezza sui rapporti causa-effetto. Una strategia che si ponga come uno dei principali obiettivi la minimizzazione del potenziale distruttivo dei metodi di produzione: anziché affidarsi alla fiducia nella realizzabilità del ripristino ambientale e nella forza del progresso tecnologico[32] è ambientalmente, socialmente ed economicamente meglio impostare una politica preventiva che riduca il rischio all'origine.

Perché presentare critiche al paradigma economico dominante e indicazioni su possibili nuove strade da percorrere?
La risposta sta in due parole chiave: globalizzazione e sostenibilità. La prima se gestita male e fondata su assunti miopi - come fatto fino ad ora – è il problema; la seconda, si spera dovrebbe esserne la soluzione.

[32] Gli economisti neoclassici si sono sempre opposti ai ragionamenti di lungo periodo basati su di una tecnologia data, argomentando che in futuro si troveranno, come è avvenuto in passato, le soluzioni tecnologiche che oggi ci mancano(Georgescu-Roegen opponendosi a questa posizione , la definiva come la "legge di Walt Disney": basta desiderare intensamente una cosa perché questa si avveri). Recentemente nuovi e più efficaci argomenti sono venuti ad affiancarsi alle posizioni tradizionali. Questi evidenziano il ruolo che le nuove tecnologie (informatiche e non) assumono nella new economy, consentendo una significativa "smaterializzazione del capitale". Si starebbe passando ad una economia leggera, ad un processo produttivo pulito, caratterizzato da un bassissimo consumo di risorse materiali e quindi da un ridottissimo inquinamento. Si tratta indubbiamente di un fenomeno importante. Non esente però da significative obiezioni: è certamente corretto affermare che il settore delle tecnologie informatiche, e più in generale, i settori della new economy siano capaci di produrre reddito con un minore impiego di risorse naturali. Mi domando però, fino a che punto queste nuove tecnologie rappresentino un sostituto e non piuttosto un complemento delle tecnologie tradizionali. Per quanto riguarda il fattore lavoro, non vi è dubbio che stiamo assistendo alla sostituzione di manodopera non specializzata con manodopera capace di gestire le nuove tecnologie. Tale effetto di sostituzione relativo al fattore lavoro non va esteso indebitamente alle risorse naturali. Ciò è confermato dal fatto che, mentre i consumi di numerose risorse per unità di prodotto sono effettivamente diminuiti nei paesi più avanzati, i consumi assoluti di molte risorse chiave continuano ad aumentare. Alcuni dati bastano a chiarire questo punto: una unità di PIL può essere prodotta con meno energia oggi che all'inizio degli anni settanta. L'intensità energetica (misurata come energia per unità di PIL) è diminuita del 25% (media OECD) nei paesi OECD dal 1970 al 1998. Ma questa diminuzione dell'intensità di energia non ha portato ad una riduzione dell'uso totale di energia. L'uso totale di energia (primary energy consumption) è aumentato del 30% nello stesso periodo. (OECD, The World in 2020: Towards a New Global Age, OECD, 1997).

Globalizzazione, un termine "sgraziato", come lo definisce Anthony Giddens[33], che sta diventando una parola abusata. Quando si abusa troppo di una parola si rischia di non capire più di che cosa si stia parlando. Una definizione possibile: " [la globalizzazione può essere intesa come] un allargamento, fino a raggiungere dimensioni planetarie, del contesto in cui ciascuno di noi opera quotidianamente, ovvero come un'estensione, fino a comprendere l'intero globo, della rete delle interdipendenze che ci collega alla realtà. Significa dunque vivere in un mondo aperto, soggetto alle interdipendenze più disparate, senza possibilità di astrarsi dal contingente e di sottrarsi a un destino comune"[34].

E' bene chiarire subito che i fenomeni di globalizzazione - che sono al centro di una seria analisi critica da parte di molte realtà non governative, nonché di proposte costruttive di mutamento di rotta – riguardano lo straordinario e pervasivo fenomeno di economia e finanza planetari, oggi in atto.

Tale fenomeno è certamente una continuazione di tendenze che sono già all'opera da lungo tempo, ma che ha avuto una particolare e fortissima accentuazione in quest'ultimo decennio, in particolare dopo la caduta del muro di Berlino. Tale fenomeno presenta alcune caratteristiche peculiari, tra cui si possono segnalare, in un elenco che non risponde certo ad un ordine di importanza, le seguenti:

Le economie nazionali subiscono una notevole ingerenza da parte di istituzioni internazionali (FMI, Banca Mondiale, WTO etc) per quanto riguarda la spinta alla liberalizzazione dei commerci dei prodotti di esportazione, nonché ingerenze che mirano persino alla liberalizzazione di servizi fondamentali per le singole politiche nazionali dei singoli stati.

L'espansione ed il ruolo dei mercati finanziari operanti in tempo reale è divenuto francamente abnorme. Oramai migliaia di miliardi di dollari vengono

---

[33] A. Giddens, La terza via, Il saggiatore, Milano, 1999.

[34] D. Viaggi, G. Zanni, La valutazione di impatto ambientale in Italia, Franco Angeli editore, Milano, 1999, pag. 25.

scambiati quotidianamente nelle transazioni valutarie. Negli ultimi quindici anni la proporzione fra scambi finanziari e scambi commerciali è cresciuta di un fattore cinque. Le speculazioni finanziarie hanno assunto un livello eccessivo e mettono a rischio economie di interi paesi.
Il ruolo degli stati nazione sta scemando, non certo per dichiarata pubblica ammissione, ma per il costante e progressivo "svuotamento" dei poteri politici delle diverse leggi nazionali, attivato e favorito dalla globalizzazione economica, finanziaria e commerciale.
Il ruolo della politica è sempre più svuotato, incapace di fornire regole e ambiti comportamentali all'economia ed alla finanza internazionali.
Le corporazioni multinazionali assumono sempre più poteri (spesso il fatturato delle grandi imprese o dei cartelli è superiore al PIL di numerosi paesi poveri), si diffondono e si ramificano con grande rapidità, procedono a fusioni di grande valore strategico per la penetrazione di sempre nuovi mercati, assumono un ruolo politico e di difesa dei propri interessi sempre più rilevanti.

D'altra parte, la precedente definizione, rapportata alle tematiche ambientali, comporta la necessaria considerazione del nostro pianeta come unico ecosistema complesso e le conseguenze della globalizzazione complicano la ricerca di soluzione dei singoli problemi locali, poiché aumenta il numero di variabili da tenere in considerazione e soprattutto perché tali soluzioni devono essere inquadrate in un'azione globale, la cui identificazione, pianificazione e realizzazione presenta delle serie difficoltà.
A fronte di questi elementi, che francamente non si può non ritenere oggettivi, la situazione ambientale e sociale del nostro pianeta appare sempre più grave e compromessa: il 12 ottobre 1999 sono stati raggiunti i 6 miliardi di esseri umani sul pianeta, all'inizio del Novecento se ne contavano un miliardo e seicento milioni; l'ultimo World Population Prospect 2000 delle Nazioni Unite, ha aggiornato le previsioni di cresciuta della popolazione umana entro il 2050. Il documento precedente, quello del 1998, indicava una proiezione

bassa, al 2050, di 7,3 miliardi di abitanti, una media di 8,9 ed una alta di 10,7 miliardi. Il nuovo documento del 2000 indica una proiezione bassa, al 2050, di 7,9 miliardi, una media di 9,3 ed una alta di 10,9 miliardi. Per raggiungere il sesto miliardo è occorso un tempo inferiore (12 anni) che per ogni precedente miliardo, nonostante un tasso annuale di crescita ai più bassi livelli degli ultimi 50 anni, solo l'1,3%. Ma poiché questo tasso si applica alla più grande popolazione mai registrata, in termini di unità, il mondo si è accresciuto maggiormente nel 1999, quando ha raggiunto i 6 miliardi, che nel 1963, quando il tasso annuale di crescita era attestato al 2,2%[35]. Le ragioni di questa crescita sono connesse al progresso della scienza e specialmente della medicina occidentale. "Non è perché abbiamo cominciato a riprodurci come conigli, ma piuttosto perché abbiamo smesso di morire come mosche"[36].

Il rapporto (24 aprile 2001) della FAO (Food and Agriculture Organization), un'organizzazione non sospetta di protezione della natura, ma dedita esclusivamente a interessi umani legati all'alimentazione, ci conferma che le condizioni del pianeta sono in uno stato drammatico. Oggi la produzione cerealicola mondiale è di 1,8 miliardi di tonnellate, se riuscisse a raggiungere i 2 miliardi di tonnellate, potrebbe dare da mangiare a 10 miliardi di persone con uno stile alimentare analogo a quello degli abitanti dell'India (dove un cittadino medio consuma 200 kg annui di cereali) o solo 2,2 miliardi di persone con uno stile alimentare quale quello statunitense (dove un cittadino medio consuma 900 kg di cereali annui). Già oggi abbiamo 1,1 miliardi di persone che vivono con meno di un dollaro al giorno, 2,8 miliardi che vivono con meno di 2 dollari al giorno e 1,2 miliardi di persone che non hanno

---

[35] United Nations, Poulation Division, Department of Economics and Social Affairs, World Population Prospect 2000, United Nations, 2001.

[36] Nicholas Eberstadth, demografo all'American Enterprise Institute, il quale afferma inoltre: "…un suicidio dell'umanità, dovuto al suo stesso successo biologico? Cosa succede del surplus umano? Eliminato attraverso l'infanticidio, come tra i Cinesi, nelle povere società agrarie? Muore di fame, laddove non c'è abbastanza cibo? Muore di epidemie o guerre fratricide? Emigra dove c'è un surplus di cibo?…… (da M.L. Cohen, Crescita economica e crescita demografica, in Economia e Ambiente, n°1-2 , gennaio – aprile 2001, pag. 7).

accesso all'acqua potabile (Sicilia compresa). Il prodotto mondiale lordo ha ormai superato i 42.000 miliardi di dollari nel 1999, mentre nel 1950 era di 6.400 miliardi di dollari. Nel 1998 i paesi poveri ed indebitati hanno pagato 13 dollari per ogni dollaro ricevuto dai paesi ricchi, mentre ne pagavano 9 ogni dollaro nel 1996. I prestiti ai paesi poveri sono calati da 35 miliardi di dollari nel 1991 a 23 miliardi nel 1998. Il debito dei paesi poveri è cresciuto giungendo a 2.500 miliardi di dollari nel 1998 (nel 1980 il debito totale dei paesi poveri ammontava a 603 miliardi)[37].

Agli inizi del Novecento si utilizzavano una ventina tra gli elementi chimici fondamentali presenti nella tavola periodica, oggi si utilizzano tutti i 92 elementi presenti in natura; non solo, ma con l'industria chimica, sono stati realizzati ed immessi oltre 100.000 composti chimici nei cicli dei sistemi naturali. Non si conoscono, per la gran parte di questi, gli effetti che possono avere sulla natura e sul nostro stesso organismo; l'uomo ha profondamente modificato e trasformato gli ambienti naturali, provocando l'estinzione di una quantità imprecisata di esseri viventi; per la prima volta nella storia della vita sulla Terra un grande fenomeno di estinzione è provocato da una specie vivente e dagli effetti del suo pesante intervento sui sistemi naturali. Secondo il Living Planet Report 2000 curato dal WWF, dal World Conservation Monitoring Center dell'UNEP, la nostra "impronta ecologica"[38], un indicatore

---

[37]Questi dati sono tratti da : L.R. Brown, Cancellare la fame: una sfida sempre più dura, in State of the World 2001. Stato del pianeta e sostenibilità. Rapporto annuale, Edizioni Ambiente, Milano, 2001. Da The State of Food Insecurity in the World 2001, visto sul sito FAO: www.fao.org . Da AA.VV – UNDP - . La qualità della vita nel mondo. Social Watch Report 2001, EMI, Milano, 2001. Nel 1974, il Segretario di Stato americano Henry Kissinger fece una promessa alla World Food Conference (conferenza mondiale sull'alimentazione) tenutasi a Roma: "…dal 1984 nessuno, uomo, donna o bambino, andrà a letto affamato"…!L'Italia attualmente destina circa lo 0,16% del Pil per la cooperazione allo sviluppo nei PVS.

[38] L'impronta ecologica (Ecological Footprint, EF), l'indicatore aggregato elaborato da William Rees e Mathis Wackernagel, cerca di rendere conto dell'area necessaria di ecosistemi terrestri ed acquatici richiesta per produrre le risorse che una determinata popolazione consuma e per assimilare i rifiuti che essa produce. L'impronta ecologica viene data dalla somma di sei diverse componenti: la superficie di terra coltivata necessaria per produrre gli alimenti, l'area di pascolo necessaria per fornire i prodotti animali, la superficie di foreste necessaria per produrre legname e carta, la superficie marina necessaria per produrre pesci e frutti di mare, la superficie di terra necessaria per ospitare infrastrutture e la superficie forestale necessaria per assorbire le emissioni di anidride carbonica derivante dal nostro stile di consumo. L'impronta ecologica e' misurata in "unita' di superficie" che

aggregato che dà conto del nostro impatto sulle capacità produttive biologiche degli ecosistemi, nel periodo 1961-1996 è incrementata, a livello mondiale, di quasi il 50%. Intorno alla metà degli anni settanta ha sorpassato il livello di rigenerazione degli ecosistemi da noi utilizzati.

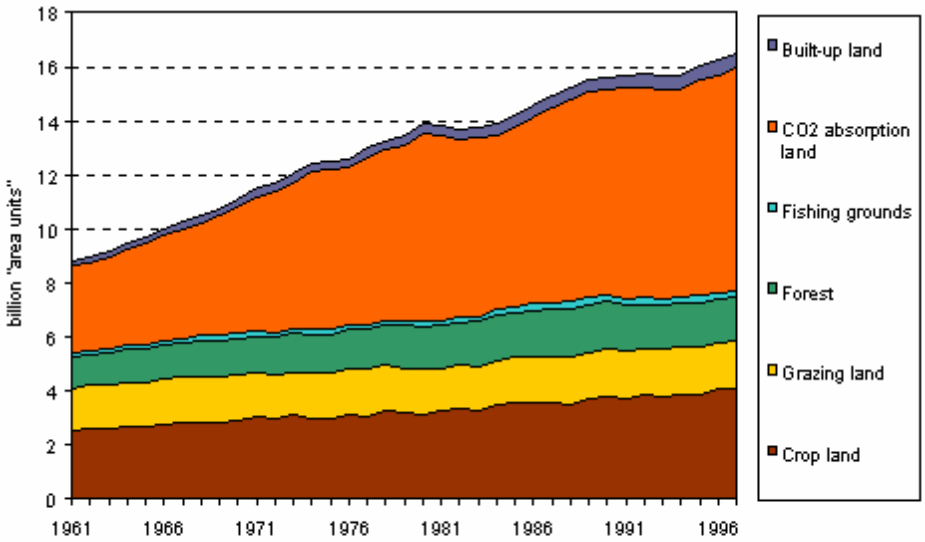


Figura 6: L'impronta ecologica mondiale, 1961-1997.(da WWF, UNEP-WCMC, Living Planet Report 2000, WWF ed., 2000)

Anche l'ultimo rapporto del World Resources Institute (il quale fa capo al UNEP, al UNDP ed alla WB), che presenta i risultati del PAGE (Pilot Analysis of Global Ecosystem) sottolinea come i cinque grandi ecosistemi della Terra, che sono alla base della nostra sopravvivenza (foreste, acque interne, zone costiere, praterie ed aree agricole) sono tutti sottoposti a stress eccessivi, che ne indeboliscono la capacità di reazione e di rigenerazione (resilienza) e quindi le possibilità di sostenere una popolazione umana che

---

equivale ad un ettaro della produttività media del pianeta. Dal 1961 al 1996 l'impronta ecologica globale e' aumentata di circa il 50%. Secondo i dati presentati nel rapporto "Living Planet Report 2000" la crescita dell'impronta ecologica umana intorno alla meta' degli anni Settanta e' stata tale che l'umanità ha superato il punto in cui viveva entro i limiti della capacita' rigenerativa globale degli ambienti del pianeta. L'Italia presenta un'impronta ecologica di 5,51 unita' di superficie pro capite a fronte di una sua capacita' biologica di 1,92 unita' di superficie a persona, il che significa che abbiamo un deficit ecologico di 3,59 unita' di superficie a persona (in pratica per mantenere la nostra popolazione agli attuali livelli di consumo ci vogliono altre due Italie). L'impronta ecologica più alta e' quella degli Emirati Arabi Uniti di 15,99 unita' di superficie, seguiti da Singapore con 12,35 unita' di superficie e gli Stati Uniti con 12,22 unita' di superficie. Alla fine della lista, ultima, e' l'Eritrea con 0,35 unita' di superficie, preceduta, nell'ordine, da Afganistan con 0,58 unita' di superficie e Bangladesh con 0,60 unita' di superficie. I dati sono tratti da WWF, UNEP-WCMC, Redefining Progress, Center for sustainability Studies, Living Planet Report 2000, WWF Ed., 2000.

cresce nel numero e nei modelli di consumo. I grandi servizi che gli ecosistemi quotidianamente forniscono al normale funzionamento dei sistemi naturali ed alla nostra stessa sopravvivenza sono a rischio a causa del nostro pressante e pesante intervento[39]. Tra questi: la produzione di ossigeno, il mantenimento della diversità genetica e biologica, l'immagazzinamento, il ciclo e la distribuzione dell'acqua, la regolazione della composizione chimica dell'atmosfera, la purificazione dell'aria e dell'acqua, il mantenimento degli habitat riproduttivi delle specie selvatiche, la decomposizione dei rifiuti organici, la degradazione e la detossificazione dei rifiuti umani e industriali, la produzione di serbatoi genetici per le attività umane, la fissazione dell'energia solare, la regolazione dell'erosione dei suoli, la prevenzione e la regolazione delle piene e delle alluvioni, la protezione dalle radiazioni cosmiche pericolose, la regolazione della composizione chimica degli oceani, la regolazione del clima locale e globale etc. Il nostro continuo irresponsabile impatto non fa altro che produrre serie difficoltà a tutti questi servizi. Servizi che, in un provocatorio articolo pubblicato nel maggio del 1997 su "Nature", dal titolo "The value of the world's ecosystem services and natural capital"[40], sono "stimati tra 16 e 54 trilioni (10^{12}) di dollari (USA) all'anno, con una media di 33 trilioni di dollari. Data la natura delle incertezze, deve essere considerata una stima minimale"[41].

"Detto semplicemente: il sistema economico mondiale è incapace di affrontare insieme il problema della povertà e quello della protezione ambientale. Curare i mali ecologici della Terra separatamente dai problemi legati a situazioni debitorie, squilibri commerciali, sperequazioni nei livelli di reddito e di consumo è come cercare di curare una malattia cardiaca senza combattere l'obesità del paziente e la sua dieta carica di colesterolo: non esiste possibilità

[39] World Resources Institute, UNEP, UNDP e World Bank, World Resources 2000-2001. People and Ecosystems: the Fraying Web of Life, WRI, 2000.
[40] R. Costanza, R.D'Arge, R. de Grott, S. Farber, M.Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naaem, J. Paruelo, R.Raskin, P. Sutton, M. van den Belt, The value of the world's ecosystem services and natural capital, in "Nature", 15 May 1997, n° 387, pp. 253-60.
[41] Ibidem.

di successo finale"[42]. Il fenomeno di globalizzazione economica e finanziaria non sta affatto contribuendo a risolvere questi problemi, ma, purtroppo, li aggrava.

Ma la globalizzazione non va vista solamente come una minaccia nei confronti nostri e dell'ambiente, può rappresentare al contrario una grande opportunità per cercare e trovare soluzioni adeguate a problemi così complicati; l'obiettivo è l'individuazione del corretto sentiero da seguire per raggiungere ciò che è chiamato "sviluppo sostenibile".

Il concetto di sviluppo sostenibile prende forma dalle discipline che hanno come oggetto i processi economici, sociali e l'ambiente, settori che tradizionalmente sono stati mantenuti separati, ma che indipendentemente l'uno dall'altro hanno subito negli ultimi decenni un processo di evoluzione delle idee che ha dato corpo a nuovi concetti e contenuti. Questo processo di cambiamento culturale è avvenuto soprattutto grazie all'appoggio delle scienze ecologiche che, in base ad una nuova rappresentazione olistica del pianeta Terra, per prime hanno lanciato l'allarme sul pericolo di conservazione dell'integrità ambientale - pericolo dato da un eccessivo deterioramento e sfruttamento delle risorse naturali - incidendo sull'opinione pubblica e sull'atteggiamento di scienziati, politici, amministratori ed economisti, tanto da imporre una visione dell'ecosistema più complessa e globale. Il concetto in esame è molto vasto e comprende varie problematiche, quali la crescita demografica, il degrado ambientale, la crescita del reddito, nonché il ruolo delle istituzioni a livello nazionale ed internazionale. In modo estremamente schematico e riduttivo, si può affermare che analizzare lo sviluppo sostenibile significa analizzare le interazioni tra ambiente, società ed economia, ponendo attenzione al modo con cui la società cerca di conseguire il proprio benessere.

La più citata definizione è probabilmente contenuta nel rapporto Our common future della WCED (World Commission on Environment and Development), nota anche come Commissione Brundtland: "lo sviluppo sostenibile è uno

[42] S. Postel, in L.Brown et al., State of the World 1992, ISEDI, Milano, 1992.

sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri"[43]. Questa, tuttavia, rappresenta soltanto una delle tante definizioni date dell'espressione a dimostrazione dell'esistenza di un acceso dibattito sul tema, in cui vi è una forte contrapposizione sia in termini scientifici che in termini di pratica di governo.

In estrema sintesi, seguendo la categorizzazione offerta da Turner, Pearce e Bateman[44], è possibile riassumere le diverse posizioni nei confronti dello sviluppo sostenibile in quattro scuole di pensiero:

- la prima, e la meno diffusa, rifiuta in sostanza il concetto di sviluppo sostenibile e si concentra solo sul problema economico. Poiché ripone la massima fiducia nel progresso tecnologico, considerato come l'unica risposta al problema ambientale, viene incoraggiata la crescita economica in un'ottica di sfruttamento;
- la seconda riconosce una relazione tra economia e ambiente, ma nel contempo afferma che sono possibili politiche di crescita svincolate dai processi di degrado ambientale (viene però introdotta la categoria di capitale "critico", non sostituibile) e di consumo delle risorse non rinnovabili; non ritiene quindi necessario rivoluzionare l'attuale modello di "sviluppo";
- la terza indica la necessità di un cambiamento culturale ed economico che porti ad un miglioramento qualitativo senza ampliare la base fisica dell'economia: pone dei limiti a priori sullo sfruttamento delle risorse naturali e l'obiettivo per la politica ambientale diviene la massima tutela della natura (vista in senso strumentale);
- la ultima presuppone, infine, una drastica trasformazione dei modelli di relazione uomo-natura: è necessaria una riduzione della scala dell'economia,

---

[43] ONU-UNEP, Il futuro di noi tutti, Garzanti, Milano, 1987. Si tratta probabilmente di una definizione non migliore di altre, tuttavia essa ha avuto il merito di porre in evidenza il tratto comune ad ogni approccio allo SS: la tensione intergenerazionale.

[44] R.K.Turner, D.Pearce, I. Bateman, Economia ambientale, un'introduzione elementare, Il Mulino, Bologna, 1996.

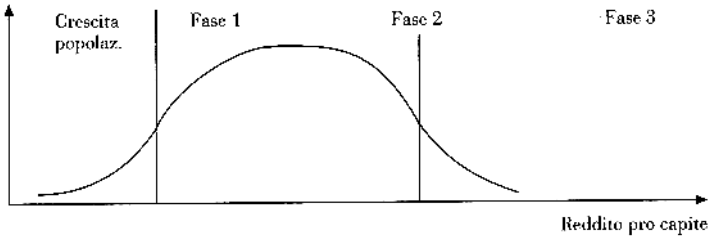
della popolazione e del prelievo delle risorse. La natura ha un valore intrinseco indipendente dal valore strumentale per gli esseri umani.

Al fine di evitare errate interpretazioni, è necessario precisare cosa si intende sia per sviluppo che per sostenibilità.

Occorre innanzitutto distinguere tra sviluppo e crescita economica. Senza dubbio esiste una correlazione tra crescita economica e qualità ambientale: alcuni studiosi sostengono che tale legame sia caratterizzato da una relazione inversa, per cui al crescere di una variabile diminuisce l'altra; altri ipotizzano invece una vera e propria complementarietà tra crescita e ambiente, che sarebbe confermata dalla considerazione che la recente crescita economica di molti paesi industrializzati sta portando alla nascita di parecchi posti di lavoro nel settore dei sevizi per la tutela ambientale e per il controllo e la riduzione dell'inquinamento, oltre alla importante considerazione che la crescita demografica tende ad arrestarsi al crescere del reddito pro capite.[45]

Il concetto di sviluppo però non può essere considerato un sinonimo di crescita: esso comprende infatti una serie di categorie non strettamente economiche, caratterizzate da elementi qualitativi e riferiti a livelli e condizioni di vita. Ciò significa che il benessere di una società non può essere valutato misurando semplicemente la crescita del PIL nazionale: tale indicatore è totalmente inadeguato a spiegare una categoria cosi articolata come quella di benessere.[46]

[45] La considerazione che la crescita demografica tenda ad arrestarsi al crescere del reddito è cosa vera e ampiamente spiegata dalla teoria della transizione demografica.



Ciò che non è logico dedurre da una simile teoria è che essere 10 miliardi di umani con un tasso di crescita zero impatti sull'ambiente meno che essere 1,2 miliardi con tasso di crescita 2.2%!

Passando a considerare il concetto di sostenibilità, le diverse definizioni concordano sulla necessità di equità distributiva intra e inter generazionale, i problemi sorgono nella quantificazione e qualificazione dello stock di capitale che deve essere trasferito. L'elemento chiave è il tipo ed il grado di sostituibilità riconosciuto tra le diverse forme di capitale (naturale e prodotto dall'uomo).

Gli economisti di matrice neoclassica definiscono la sostenibilità nei termini della costanza del capitale complessivo, rappresentato dalla somma del

---

[46] Dalla conferenza di Rio(1992) ad oggi è diventata sempre più evidente l'importanza dell'utilizzo di altri indicatori che ci consentano di misurare e valutare meglio una determinata situazione e, analizzandone il trend, di misurarne e valutarne l'andamento per capire se si va verso un progresso o meno. Gli indicatori si dimostrano guide cruciali per prendere decisioni in un'ampia varietà di modi; essi infatti possono tradurre le conoscenze scientifiche in campo fisico e sociale in unità di informazioni gestibili che facilitano i processi di decisione. Possono aiutare a misurare e calibrare i progressi verso obiettivi di sostenibilità. Cito una sola ricerca sugli indicatori tra tante e solo per dare "concretezza" all'aggettivo "inadeguato" che ho riferito poco sopra al PIL: la Commissione sullo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, dopo un lavoro durato 6 anni, ha individuato un set di 57 indicatori "necessari ad avere un quadro della situazione del benessere e della ricchezze di una nazione", questi sono: - percentuale della popolazione che vive sotto la linea di povertà, - indice di Gini di ineguaglianza del reddito, - tasso di disoccupazione, - rapporto delle paghe femminili rispetto a quelle maschili, - stato nutrizionale dei bambini, - tasso di mortalità sotto i 5 anni di età, - aspettativa di vita alla nascita, - percentuale della popolazione con adeguate facilitazioni di gestione dei rifiuti, - popolazione con accesso ad acqua potabile, - percentuale di popolazione con accesso a facilitazioni per le cure primarie di base, - immunizzazione contro le infezioni delle malattie infantili, - tasso di presenza dei contraccettivi, - rapporto del completamento delle scuole primarie o secondarie, - tasso di alfabetizzazione degli adulti, - area di abitazione disponibile per persona, - numero di crimini registrati per 100.000 persone ,- tasso di crescita della popolazione ,- popolazione vivente in abitazioni urbane formali ed informali, - emissione di gas serra ,- consumo di sostanze dannose alla fascia di ozono, - concentrazione di inquinanti dell'aria nelle zone urbane , - area agricola arabile, - utilizzo di fertilizzanti, - utilizzo di pesticidi in agricoltura , - area forestale come percentuale della superficie di terra, - intensità di sfruttamento del legno , - superficie affetta da desertificazione, - area di insediamenti urbani formali ed informali, - concentrazione di alghe nelle acque costiere, - percentuale della popolazione totale vivente in zone costiere, - cattura delle maggiori specie alieutiche, - sottrazione annuale delle acque sotterranee e di superficie come percentuale sull'acqua totale disponibile, - BOD nei corpi d'acqua, - concentrazione di coliformi fecali nelle acque dolci , - area di ecosistemi chiave , - percentuale di aree protette sulla superficie totale, - abbondanza di specie chiave, - prodotto interno lordo pro capite, - parte di investimento rispetto al prodotto interno lordo, - bilancio del commercio in beni e servizi, - rapporto del debito rispetto al prodotto interno lordo, - totale di assistenza ufficiale allo sviluppo data o ricevuta come percentuale del prodotto interno lordo, - intensità dell'uso dei materiali, - consumo di energia annuale pro capite, - consumo di risorse energetiche rinnovabili, - intensità dell'uso di energia, - generazione di rifiuti solidi industriali ed urbani, - generazione di rifiuti pericolosi, - generazione di rifiuti radioattivi, - riciclaggio e riutilizzo dei rifiuti, - distanza percorsa pro capite per modo di trasporto, - strategia nazionale per lo sviluppo sostenibile, - implementazione della ratifica degli accordi globali, - numero di abbonati internet per 1.000 abitanti, - linee telefoniche per 1.000 abitanti, - spese per ricerca e sviluppo come percentuale del prodotto interno lordo, - perdite economiche ed umane dovute ai disastri naturali.
(la lista e' tratta da Commission on Sustainable Development "Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies" Background Paper no.3, 2001).

capitale prodotto dall'uomo Ku e del capitale naturale Kn. Analogamente a quanto avviene lungo gli isoquanti della tradizionale teoria della produzione, lo sviluppo è considerato sostenibile per tutte quelle combinazioni di Ku e Kn per cui Ku + Kn = K*. Accogliere questa definizione significa credere nella perfetta sostituibilità fra le due forme di capitale, non riconoscendo come esse svolgano funzioni qualitativamente diverse: di sostegno alla vita il Kn e di sostegno alla produzione il Ku. Se, ad esempio, una foresta viene distrutta per fabbricare mobili, lo sviluppo è da ritenersi sostenibile se il valore monetario degli alberi (Kn) è inferiore a quello dei mobili (Ku). Inoltre, come già sottolineato, le interazioni tra economia e società sono caratterizzate dalla presenza di incertezza ed irreversibilità. Quando ci troviamo di fronte a processi irreversibili è assai pericoloso parlare di sostituibilità fra capitale naturale e umano (pensiamo ad esempio all'estinzione di una specie). Dunque, ogni scelta fra diverse allocazioni di Ku e Kn è qualitativamente unica e caratterizzerà il futuro del sistema.

Altri teorici, come D. Pearce e la scuola di Londra, ma anche H. Daly, ritengono che per garantire la sostenibilità, occorra mantenere costante (o accrescere) il capitale naturale. Anche questo approccio, però, presenta significativi limiti epistemologici: è impossibile pensare ad un capitale naturale costante per quanto riguarda le risorse non rinnovabili. Per superare questa empasse Daly propone tre regole di sostenibilità delle risorse[47]: se la risorsa è rinnovabile, il tasso sostenibile di impiego non può essere maggiore del tasso di rigenerazione della risorsa stessa; se la risorsa non è rinnovabile, il tasso sostenibile di impiego non può essere maggiore di quello al quale è possibile sostituirla con una risorsa rinnovabile, impiegata in modo sostenibile; se trattiamo di un agente inquinante, il tasso di sostenibilità di emissione non può essere maggiore di quello al quale l'agente stesso può essere riciclato, assorbito o reso inoffensivo dall'ambiente. L'argomento che

[47] H.Daly, Toward some optional principles of sustenaible developement, in Ecological Economics n° 2, 1990.

mina quest'approccio, basato sulla costanza del capitale naturale, è che il sistema globale è composto di uno stock finito di risorse, sistema all'interno del quale è in atto un irreversibile processo di degradazione energetica e materiale (è la legge dell'entropia). Ciò implica necessariamente che il capitale naturale, in tutta la sua diversità, sarà soggetto ad un irreversibile processo di esaurimento - almeno per quanto riguarda le sue componenti non rinnovabili - e che ciascun possibile sostituto avrà comunque caratteristiche qualitativamente diverse. Come, allora, elementi qualitativamente diversi possono essere perfetti sostituti l'uno dell'altro? Chi sarà in grado di garantire che in futuro noi non avremo bisogno esattamente di quelle caratteristiche qualitative degli elementi esauriti o in via di esaurimento? Una rigorosa analisi ci mostra che lo sviluppo economico ha comunque un costo e questo costo non può essere uguale a zero. Degradazione, esaurimento, evoluzione fanno parte del gioco. Le interazioni tra sistema economico e ambiente danno origine a una miriade di trasformazioni qualitative, di processi irreversibili, evolutivi, dissipativi. Questo carattere non può essere colto per mezzo di un concetto fondamentalmente statico come quello di costanza del capitale naturale.

Recentemente, in seno alla scuola dell'Ecological Economics, si è giunti ad una specificazione nuova che promette di essere realmente interdisciplinare e complessa e che trae spunto dal concetto di resilienza: un sistema soddisfa le condizioni di sostenibilità quando i cambiamenti causati in esso dallo sviluppo economico, sono tali da non compromettere, né oggi né poi, la resilienza dell'ecosistema di cui fa parte. Caratteristica essenziale di tale definizione è la natura al tempo stesso economica e ecologica che porta a non perdere quelle informazioni di natura qualitativa di cui si ha bisogno per esprimere un giudizio sulla sostenibilità del sistema in oggetto. Abbandona l'illusione di mantenere costante il capitale (totale o naturale) e mira ad identificare come invariante la capacità - dei sistemi considerati – di mantenere la propria struttura organizzativa nel tempo. E' quindi un modello che dovrebbe essere in grado di tenere conto del proprio cambiamento nel tempo poiché pone in

evidenza la relazione circolare e ricorsiva, dunque necessariamente evolutiva, tra il sistema economico e il suo ambiente

APPENDICE

ESTERNALITA'

Introduzione

Le funzioni economiche dell'ambiente[48] sono molteplici: esso può essere usato come bene pubblico, come ricettacolo delle emissioni e dei rifiuti prodotti dalle attività economiche di produzione e di consumo, come fornitore di risorse naturali. Queste funzioni danno luogo ad un problema di allocazione ottimale del bene ambientale sia tra usi diversi che tra generazioni successive. L'allocazione ottima di risorse ambientali tra usi e generazioni non viene raggiunta attraverso il mercato per varie ragioni, tra cui la natura di bene pubblico di molte risorse ambientali; la presenza di esternalità locali e transnazionali ecc.

Si ritiene, in genere, che il famoso economista Alfred Marshall (1842-1924) abbia coniato il termine "Esternalità". Marshall si riferiva a effetti indesiderabili dell'impatto di un'azienda sull'esterno (cioè sistema sociale e ambiente circostante).

Nella terminologia economica di base una esternaliltà "è un costo o un beneficio, che emerge da una transazione economica, che ricade su una terza parte e che non è messa in conto da coloro che effettuano la transazione" [49].

In un'economia di mercato questo generalmente significa che una esternalità si manifesta là dove c'è

> "un effetto diretto delle azioni di una azienda o di una persona sul benessere di un'altra azienda o persona in maniera che non è riflessa dai prezzi di mercato" [50].

---

[48] C.Carraro, M.Galeotti, Ambiente, occupazione e progresso tecnico: un modello per l'Europa, Il Mulino, Bologna, 1995.

[49] D.McTaggart, C.Findlay, M.Parkin, Economics, Addison Wesley Publishers Ltd, Sydney, 1992, pag. 467.

[50] M Katz, H Rosen, Microeconomia, McGraw-Hill, Milano, 1996, pag. 704.

Questa esternalità può emergere dagli

> "effetti che il consumo di un prodotto o servizio da parte di un consumatore producesul benessere di altri" [51]

o anche dagli

> "effetti che la produzione di un prodotto può avere sulla possibilità di produzione di altri" [52].

Le esternalità possono prendere due forme: esistono infatti esternalità negative e esternalità positive. Una esternalità negativa si manifesta nel momento in cui consumi o produzione di merci generano un costo a carico di *qualcuno* al di fuori della produzione o consumo di quella merce. Una esternalità negativa nel consumo potrebbe per esempio essere l'inquinamento dell'aria prodotto guidando una macchina o il danno fatto alle dune di sabbia da turisti che utilizzano un veicolo 4X4 in aree fragili.
Ovviamente, e reciprocamente, un'esternalità positiva si manifesta nei casi in cui viene prodotto un beneficio a favore di qualcuno posto al di fuori della produzione o del consumo di una merce. Un esempio di esternalità positiva potrebbe essere quello prodotto da individui che utilizzano il vaccino contro il virus dell'influenza: quelli che non sono vaccinati ricevono il beneficio di vedere ridotta la presenza del virus nella comunità. La costruzione di una diga a fini idroelettrici può comportare anche disponibilità d'acqua a fini agricoli e turistici.

La prevalenza di esternalità in economie di mercato suggerisce che le regole di ottimo normalmente assunte per conseguire una efficienza nell'allocazione possono di fatto non portare alle soluzioni più efficienti sotto un profilo sociale. La presenza di esternalità rappresenta perciò un esempio di fallimento del mercato nella ricerca

[51] R Leftwich & R Eckert, The Price System and Resource Allocation, The Dryden Press, Sydney, 1995, pag. 594.
[52] R Leftwich & R Eckert, op. cit., pag. 596.

dell'allocazione ottima. La figura illustra le conseguenze di esternalità negative sull'efficienza dell'allocazione.

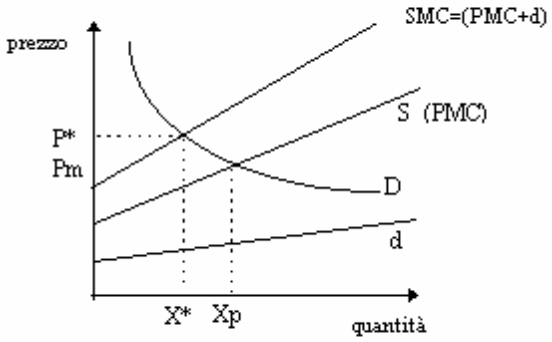


Fig.1: effetti di esternalità negative sull'efficienza allocativa.

In un libero mercato, dove le leggi dell'ottimizzazione sono seguite, le quantità prodotte si verificheranno al punto Xp e al prezzo Pm, il punto dove la domanda (D) eguaglia il costo marginale per il privato acquirente (PMC).
Quando esiste una esternalità negativa, il mercato fallisce nel produrre il livello di produzione socialmente ottimo.
Questo perché il costo del danno marginale (d), generato dalle esternalità negative, è un costo non preso in considerazione dal mercato. Usando una curva di costo sociale marginale (SMC), è possibile vedere che il livello socialmente ottimo della produzione diviene X* e che il prodotto dovrebbe essere venduto ad un prezzo più alto P* per riflettere il fatto che il vero costo sociale del prodotto è più alto del costo privato.

Anche le esternalità positive hanno le loro implicazioni nel raggiungimento dell'efficienza dell'allocazione. La figura seguente illustra le conseguenze di una esternalità positiva. Il punto di equilibrio del mercato in questa situazione si pone alla quantità Qp e ad un prezzo Pm dove il beneficio marginale del privato (PMB) per quella merce uguaglia il suo costo marginale. Quando viene prodotto un beneficio esterno (b) questo non è preso in conto dal mercato. La quantità socialmente ottima della merce si pone dove la curva del beneficio

marginale (SMB), derivata dalla somma del beneficio marginale privato ed esterno, uguaglia il costo di produzione della merce.

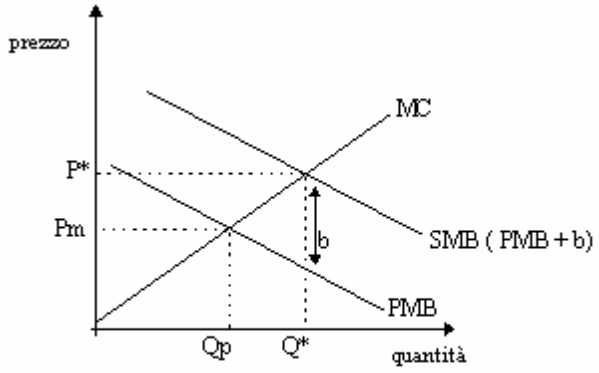


Fig.2: effetti di esternalità positive.

Questa analisi suggerisce che le situazioni di efficienza dell'allocazione appaiono alla quantità Q* e la prezzo P*.

La conclusione che può essere raggiunta da questo è che la vera efficienza nell'allocazione non sarà raggiunta a meno che i benefici esterni e i costi associati con le esternalità siano presi in considerazione quando si effettua un'analisi economica.

Soluzioni alle esternalità

Un approccio per trattare le esternalità negative è attraverso le convenzioni sociali e la tradizione. L'argomento qui è che

> "certe convenzioni sociali possono essere viste come tentativi di forzare gli individui a tenere conto delle esternalità che essi stessi generano" [53]

e attraverso la tradizione la quale

> "riconosce i segnali e fornisce le adeguate risposte instillate come parte della cultura"[54].

L'esempio che può essere fornito è quello dell'educazione a comportamenti ambientalmente corretti fin da giovane età, favorendo la consapevolezza che

[53] M Katz, H Rosen, Microeconomia, McGraw-Hill, Milano, 1996, pag. 712.
[54] I.Wills, Schools Brief : Environmental Problems, Policy, vol. 11 num. 4, 1995.

vi è anche un costo da sostenere associato al portare i rifiuti fino al prossimo raccoglitore, costo che deve comunque essere affrontato in quanto esisterebbe altrimenti un altro costo associato alla sporcizia che si crea.
Quest'approccio può apparire certo suggestivo anche se spesso fornisce più domande che risposte. Per esempio un individuo (o un'azienda) seguirà le convenzioni sociali quando vi è un costo associato ad esse? E fino a che livello? Per questi motivi le convenzioni sociali possono essere competitive nel trattare con alcune esternalità socialmente inaccettabili ma l'utilità dell'approccio potrebbe essere limitata ad esternalità di costo contenuto generate da individui.

Un altra possibile soluzione può essere quella dell'unificazione delle diverse parti coinvolte. Se, per esempio, i profitti di un'azienda di pesca sono minacciati dall'inquinamento prodotto da un'acciaieria allora il problema può essere affrontato con l'unione delle due aziende e conseguentemente internalizzando gli effetti. Se per esempio

> "L'acciaieria compra l'azienda di pesca essa sarebbe incline a produrre meno acciaio di prima, perché il margine dell'azione aumenterebbe i profitti della sussidiaria più di quanto decrementerebbe i profitti dell'acciaio"[55].

Ma questo tipo di soluzione può comportare numerosi problemi che la rendono di difficile implementazione. Questa soluzione potrebbe magari essere adottata per alcune aziende ma lascerebbe certamente aperta la questione del comportamento dei singoli individui. Come immaginare, per esempio, l'unione tra aziende che emettono inquinanti in atmosfera e le popolazioni che sono affette da quest'inquinamento? E anche l'ingenuo suggerimento che la gente potrebbe comprare queste aziende, per, in teoria, internalizzarne gli effetti, è in pratica inattuabile. Per cui anche la soluzione

[55] I.Wills, Schools Brief : Environmental Problems, Policy, vol. 11 num. 4, 1995.

dell'unificazione mentre suggerisce soluzioni teoriche al problema delle esternalità, in molti casi non offre soluzioni pratiche.

L'approccio più comune nel trattare il problema, specialmente per quanto riguarda l'inquinamento, è l'imposizione di limiti di legge sull'ammontare delle esternalità prodotte e l'imposizione di multe per quegli agenti che producono esternalità oltre i limiti consentiti. Quest'approccio sembra offrire una semplice soluzione per limitare le esternalità, richiedendo a tutte le aziende di ridurle allo stesso ammontare o allo stesso livello; nella realtà, esso può rilevarsi non efficiente. Si veda per esempio la figura seguente che rappresenta la situazione di due aziende ("a" e "b") con costi identici ma differenti curve marginali di ricavo (Mba e MBb). In una situazione di libero mercato, senza interventi legislativi, esse produrranno le quantità Xp di inquinamento al punto dove le curve di profitto marginale delle aziende intersecano la curva del costo marginale del privato (PMC). Quando le aziende prendono in carico il costo del danno prodotto (d) che esse causano i livelli di inquinamento, per ogni azienda, divengono Xa e Xb.

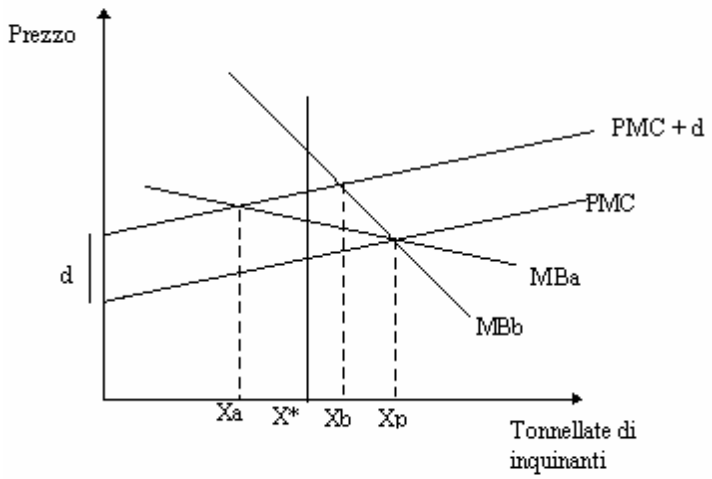


Fig.3 : Inquinamento

Date differenti curve marginali di profitto, muovere per legge tutte le aziende a ridurre il loro inquinamento dello stesso ammontare, cioè fissarne i limiti su uno stesso livello X*, può essere una soluzione non efficiente. In altri termini, l'utilizzo di limiti di leggi e di sanzioni associate può apparire una soluzione semplice, ma certamente non è una soluzione efficiente. Inoltre, questa soluzione implica una struttura di monitoraggio atta a rilevare le possibili violazioni della legge.

Un'altra possibile soluzione al problema delle esternalità negative, come l'inquinamento, è l'imposizione di tasse correttive progettate per indurre i produttori a limitare l'inquinamento nella produzione di una merce a livelli di allocazione socialmente ottimi.

Una tassa pigouviana è "una tassa che somma, su ogni unità di inquinamento, un costo che è uguale al danno marginale che infligge sulla società al livello ottimo di produzione"[56].

La figura successiva mostra l'equilibrio di mercato che viene raggiunto quando la domanda D uguaglia il costo marginale di produzione (PMC). Questo accade alla quantità X_1.

L'ottimo ammontare della produzione si pone al livello X* dove il costo marginale (SMC), che tiene conto del danno (MD) causato dal produrre la merce, uguaglia D.

Si noti che l'effetto di introdurre una tassa pigouviana (t) uguaglia il danno marginale (MD) dell'esternalità al livello dell'ottimo. Con l'introduzione della tassa la curva di produzione è divenuta il suo costo marginale più la tassa. Come risultato vi è un aumento nel prezzo della merce e una contrazione della domanda. Questa efficienza allocativa è raggiunta al prezzo P1 e alla quantità X*.

[56] M Katz, H Rosen, Microeconomia, McGraw-Hill, Milano, 1996, pag. 719.

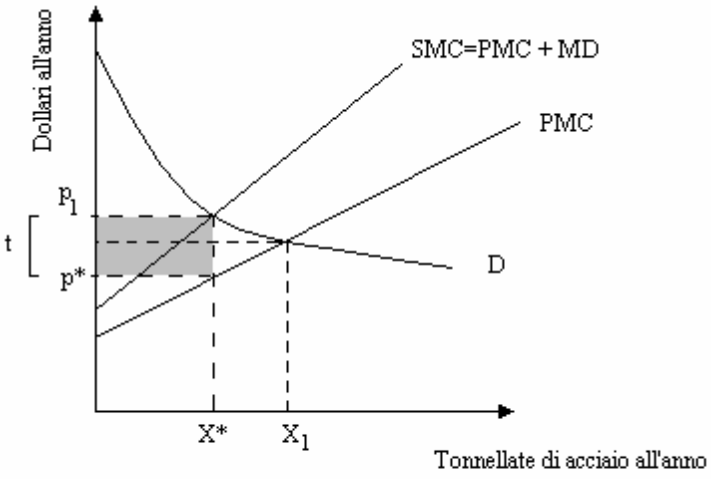


Fig. 4: Tassa Pigouviana.

Le tasse pigouviane offrono pertanto uno strumento più efficiente nel raggiungere l'ottimo dell'allocazione in confronto ai semplici regolamenti limitativi. D'altra parte le tasse pigouviane ancora si portano alcuni difetti e debolezza delle legislazioni di regolazione dell'inquinamento. Per tassare le aziende inquinanti lo Stato e i suoi organi dovrebbero essere in grado di determinare quali attività producono inquinamento e soprattutto determinare quale inquinante produce danno e ulteriormente quantificare questo eventuale danno causato.
Questo significa che già oggi la tassa ci muoverebbe più vicino al punto ottimo. Con lo sviluppo della tecnologia e una più grande comprensione delle cause e degli effetti ambientali le tasse pigouviane possono divenire sempre più efficaci nel muovere verso un livello ottimale della produzione delle aziende con presenza di esternalità.

Una cornice alternativa è il rafforzamento dei diritti di proprietà privata per risolvere le esternalità. I diritti di proprietà privata offrono numerose soluzioni al problema posto dalle esternalità. Innanzitutto lo stabilire e il rinforzare, da parte del sistema legale, i diritti della proprietà privata permetterebbe alle

vittime di esternalità negative di trascinare in giudizio la parte in causa per ottenere compensi per il danno subito. Per esempio, se il diritto di proprietà di una sezione di un fiume fosse attribuito ad un club di pesca, allora il club potrebbe trascinare avanti ad un tribunale un'eventuale fabbrica di prodotti chimici che inquina il fiume e uccide i pesci nella sezione di proprietà del club stesso.

Un altro modo attraverso il quale i diritti di proprietà possono assistere nel raggiungimento di un'efficienza allocativa è il fornire una struttura nella quale la contrattazione possa aver luogo. Consideriamo la situazione della figura seguente, costruita sull'esempio del club di pesca.

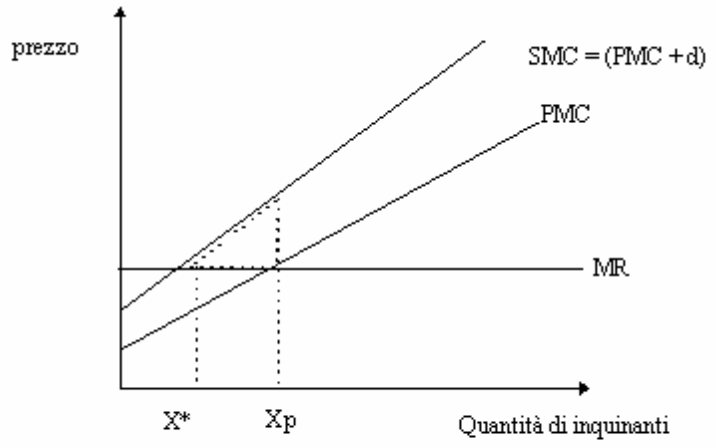


Fig. 5: Diritti di proprietà e contrattazione

Il teorema di Coase suggerisce che

> "l'efficienza della soluzione può essere raggiunta indipendentemente da chi ha i diritti di proprietà fintanto che questi diritti sono assegnati a qualcuno"[57].

Il ragionamento su cui si fonda è il seguente: se la fabbrica chimica dell'esempio possedesse il diritto di proprietà, il club di pesca sarebbe pronto a pagare alla fabbrica un ammontare, dell'importo del danno che sarebbe

[57] M Katz, H Rosen, Microeconomia, McGraw-Hill, Milano, 1996, pag. 714 .

causato, per ottenere una riduzione della produzione su ogni punto oltre X* dove il danno che sarebbe causato eccederebbe i profitti della fabbrica nel produrlo; in maniera simile se il diritto di proprietà fosse attribuito al club di pesca questo non permetterebbe alla fabbrica di produrre oltre X* poiché il danno prodotto al club di pesca sarebbe superiore a ogni potenziale risarcimento e dunque la fabbrica accetterebbe. Lo stabilire diritti di proprietà crea una cornice all'interno della quale trova spazio la contrattazione e il raggiungimento di una soluzione socialmente ottima.

Ma anche i diritti di proprietà presentano diversi problemi. Ci possono essere problemi nell'assegnare e definire i diritti di proprietà che potrebbero coinvolgere un numero significativo di cambiamenti nella attuale struttura legislativa. Ci sono anche problemi legati al modello di contrattazione, quali ad esempio il costo di tale attività, le differenze di potere contrattuale, la definizione e la quantificazione del danno causato etc. Per cui, mentre i diritti di proprietà possono offrire una soluzione innovativa al problema delle esternalità, permangono ancora molte difficoltà ed ostacoli per poter riuscire ad intravedere un risultato ottimo sulla base dell'assegnazione dei diritti di proprietà.

Un altro approccio, che è stato recentemente suggerito, è la creazione di un mercato dei

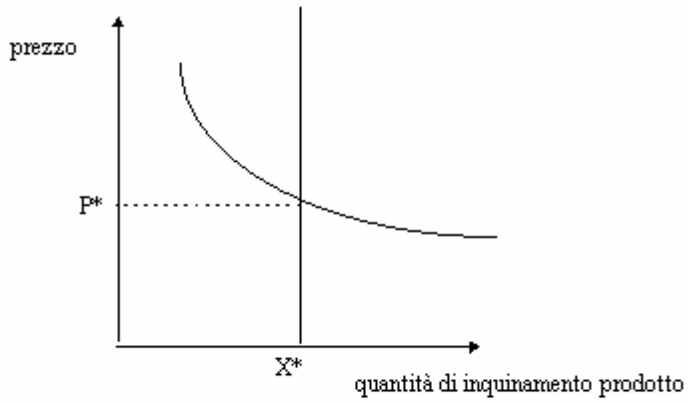


Fig.6: Mercato dei permessi di inquinamento.

diritti o permessi di inquinamento o più in particolare di emissione. Questo è illustrato nella figura 6. I diritti di emissione e più in generale di inquinamento coinvolgono lo Stato nel creare un mercato per questi diritti. L'offerta dei diritti di inquinamento, e quindi la quantità di inquinante prodotto, è fissata alla quantità X*. Le aziende non pronte a pagare il prezzo di mercato P* necessario a comprare i diritti devono o ridurre il loro inquinamento attraverso una riduzione della produzione o adottare tecnologie che riducono l'esternalità. Il mercato dei permessi può aiutare a raggiungere l'efficienza nell'allocazione mediante un incremento o decremento della domanda che riflette il cambiamento dei prezzi dei diritti, ma l'ammontare dell'inquinamento prodotto non eccederà il livello “ottimo” determinato dal numero di diritti disponibile.

Anche l’applicazione del metodo della compravendita dei diritti ad inquinare solleva numerosi problemi che richiedono ancora una loro piena definizione. Per esempio, lo stabilire il numero dei permessi che possono essere venduti dallo Stato che deve determinare il punto dove

> "il costo marginale dell'inquinamento uguaglia il costo di abbattimento"[58].

[58] G.Currie, K.Jackson, S.Jacob, Economics, McGraw-Hill, Sydney, 1992, pag. 342.

Questo riporta al problema che il regolatore pubblico dovrebbe ricomprare, o viceversa emettere ancora, diritti appena si presenti un cambiamento in questi fattori. Naturalmente rimane anche il problema del monitoraggio delle aziende per assicurare che esse non stiano producendo più esternalità di quanto in loro diritto. Ancora, il mercato dei diritti rappresenta una soluzione, basata sul mercato, che può divenire più appetibile con gli sviluppi della tecnologia e della scienza.

Al contrario di quanto esposto per le esternalità negative la debolezza dell'offerta per prodotti che comportano esternalità positive richiede proprie soluzioni. La soluzione tipica è quella che fa uso di sussidi ed è illustrata dalla figura dove si mostra come il pagamento di un sussidio al produttore di una esternalità positiva può aumentare l'efficienza allocativa.

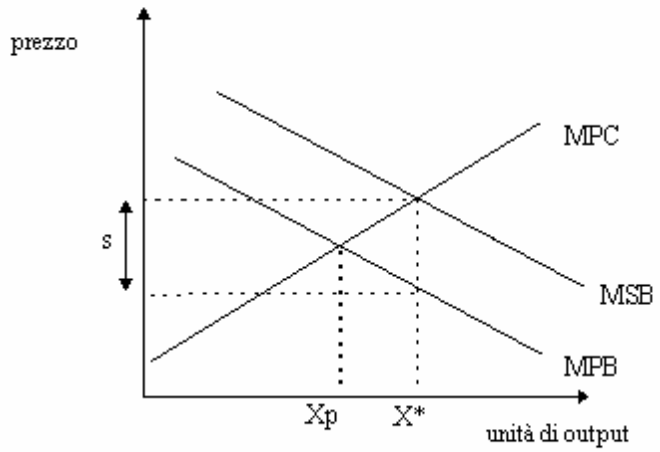


Fig. 7: Sussidio al produttore di esternalità positive.

Pagando un sussidio (s) uguale all'ampiezza del beneficio sociale della produzione della merce si ottiene che la produzione stessa è incoraggiata ad espandersi da Xp al punto di livello ottimale X*. I sussidi offrono quindi una soluzione al problema della sottoproduzione di merci con esternalità positive. I sussidi possono comunque essere criticati su un terreno che vede la necessità

di quantificare i benefici sociali e la conseguente difficoltà nello stabilirne l'ammontare. Altrimenti la perdita di efficienza nella zona dove i sussidi sono raccolti potrebbe essere maggiore del ricavo dell'industria che riceve il sussidio stesso. Inoltre deve essere tenuto in conto il costo addizionale di raccolta e distribuzione dei sussidi se si vuole realmente raggiungere l'ottima allocazione.

In conclusione allora si può affermare che l'esistenza di esternalità e il fallimento del mercato nel trattare adeguatamente il problema ha una seria implicazione per il raggiungimento dell'efficienza nell'allocazione in un sistema economico. Mentre esistono diversi possibili approcci per correggere il fenomeno ognuno di essi porta con sé nuovi problemi, che devono essere risolti, perché la società abbia strumenti efficaci per trattare i problemi posti dalle esternalità.

CAPITOLO 2

L’ENERGIA SOLARE

ENERGIA E SVILUPPO

Per realizzare lo sviluppo sostenibile si deve intervenire su un sistema estremamente complesso e caratterizzato da strutture fisiche (infrastrutture, sistemi di produzione, di trasporto, città) e immateriali (ideologie, concezioni, tradizioni), diversificate e consolidate e, quindi, con un'enorme inerzia. Tra le problematiche aperte ve ne sono alcune fondamentali e condizionanti che la società umana dovrà affrontare negli anni a venire a tutti i livelli – planetario, nazionale e locale – tenendo ben presenti quegli aspetti che le caratterizzano profondamente, dalla globalizzazione – con le interdipendenze che essa crea, e l'esigenza di non assumere di fronte ad essa atteggiamenti difensivi, avversandola o subendola passivamente, ma di affrontarla in termini di complessità – alla straordinaria accelerazione del cambiamento caratterizzato anche da eventi e sviluppi imprevedibili, alle incertezze che ne derivano. Queste tematiche devono essere affrontate tenendo presente l'esigenza di "equità" nelle relazioni economiche, sociali, ambientali (intra ed intergenerazionali) dal livello individuo a quello di stato, area geopolitica, cooperazione Nord-Sud, precisando inoltre chiaramente cosa si deve intendere per "equità".

I punti nodali da affrontare sono:

- l'evoluzione demografica nelle diverse aree geopolitiche e delle problematiche connesse, dall'invecchiamento delle popolazioni autoctone dei paesi industrializzati all'emigrazione, alle nuove e diverse ripartizioni territoriali con particolare riferimento alle strutture urbanizzate, al modo col quale i popoli usano le risorse e al conseguente impatto ambientale;

- l'evoluzione economica nelle diverse aree geopolitiche: paesi industrializzati e paesi in via di sviluppo, paesi in fase di decollo e paesi che richiedono nuove soluzioni per uscire dal sottosviluppo, temi critici quali disoccupazione, ridistribuzione di ricchezza e risorse etc;
- l'evoluzione sociale: se pur mutamenti radicali hanno già storicamente interessato la società umana, la contrazione del tempo e la dilatazione dello spazio intervenuti nel cambiamento delle condizioni di vita, pongono sulla scena la necessità di adeguare strutture organizzative, leggi, mentalità e comportamenti, regole e sistemi di governo, sistemi educativi, strutture culturali alle sopravvenute nuove situazioni.
- il complesso energia, risorse, tecnologia: vi è la spontanea tendenza ad usare più risorse naturali ed energia per sostenere la crescita economica e ad assegnare alla tecnologia un ruolo protagonista nel contenerne o addirittura ridurne il fabbisogno; nuove istanze richiedono conoscenze scientifiche rigorose e necessità di decisioni in condizioni di conoscenze incomplete, ciò richiede o di adottare politiche preventive (che non diano luogo a "rimpianti" nel caso in cui non si verificasse l'evento temuto – no regret policies), o politiche adattive che portino comunque ad un equilibrio sostenibile.

Lungo tutta la storia del genere umano, l'energia è stata un fondamentale fattore di crescita e sviluppo. La disponibilità e lo sfruttamento di nuove fonti energetiche hanno accompagnato le successive trasformazioni economiche e sociali, a partire dall'uso del fuoco, che consentì la cottura e la conservazione del cibo e la protezione dell'uomo dal freddo.

La rivoluzione industriale all'inizio del XIX secolo fu possibile grazie all'energia idraulica, ma decollò solo in seguito all'invenzione della macchina a vapore e all'impiego sempre più esteso e intensivo del carbone. Carbone e macchina a vapore stimolarono l'industria mineraria, quella metallurgica,

quella tessile e la manifattura in generale, oltre al trasporto navale e, successivamente, quello ferroviario. All'inizio del XX secolo, il 75% dell'intera flotta mondiale era formato da navi a vapore. In parallelo si svilupparono l'industria chimica con i grandi prodotti di sintesi, i fertilizzanti, i farmaci, i fitofarmaci, e l'agricoltura ne fu la prima beneficiaria. Aumentò rapidamente la popolazione, migliorarono salute ed istruzione, si allungò la vita media, crebbe il benessere. L'alleanza fra carbone e vapore aveva dato vita ad un nuovo sistema energetico destinato ad incidere profondamente sulla crescita economica e sociale nel mondo, a partire dall'Europa.

Fu invece negli Stati Uniti che nel 1859, con la trivellazione dello storico pozzo di Titusville (PA), si crearono le premesse per l'avvento di una nuova, abbondante e flessibile fonte di energia: il petrolio. Il boom del petrolio fu rapidissimo: nel 1860 la produzione annua mondiale non superava le 100.000 tonnellate, all'inizio del ventesimo secolo aveva raggiunto i 50 milioni di tonnellate. Alla produzione americana si era aggiunta quella russa (dai giacimenti di Baku), quella rumena e quella delle Indie Olandesi. Il petrolio illuminante era il prodotto più richiesto, mentre le benzine erano sottoprodotti poco pregiati, fino a che, nel 1907 Henry Ford mise in produzione l'autovettura modello T con motore a scoppio: questo fece della benzina il combustibile per eccellenza. La diffusione dell'automobile, dei trasporti via ferro e via aria e il parallelo sviluppo della petrolchimica, con un enorme varietà di prodotti e applicazioni, hanno concorso a far diventare il petrolio, a partire dal secondo dopoguerra, la fonte egemone di energia a livello mondiale. Così come il carbone, un secolo prima, aveva determinato il decollo della società industriale, il petrolio ha caratterizzato la società moderna soprattutto sotto l'aspetto della mobilità e del trasporto di persone e merci. La facilità di trasporto del petrolio, la molteplicità e flessibilità dei suoi usi e il suo basso prezzo, hanno consentito uno sviluppo industriale senza precedenti anche a paesi non dotati di risorse energetiche proprie, come dimostrano i casi di Giappone ed Italia, che dipendono dall'importazione per oltre l'80% del

loro fabbisogno di energia. Si può affermare che la crescita senza precedenti dell'economia mondiale nei primi decenni del secondo dopoguerra sia stata resa possibile, e in un certo senso drogata, dalla disponibilità di petrolio facile a basso costo.

Questo conciso quadro storico va necessariamente integrato con un breve accenno alla energia elettrica, la quale è stata senza dubbio l'innovazione tecnologica più importante in campo energetico e che ha trovato applicazione, fin dagli ultimi decenni del diciannovesimo secolo, in una serie pressoché infinita di ambiti: illuminazione, metallurgia, elettrochimica, motori elettrici adatti agli usi civili e industriali più svariati. Corrente alternata e trasformatori hanno consentito il trasporto dell'elettricità a lunga distanza e capillarmente, ciò la ha resa sempre più pervasiva.

Poco dopo la pubblicazione di "Limits to growth" (1972) [1], nell'ottobre del 1973 sopravvenne la prima grande crisi petrolifera, scatenata dalla guerra del Kippur fra Israele e i paesi arabi. Furono molti a ritenere che le previsioni apocalittiche del Club di Roma stessero per avverarsi. Oggi sappiamo che le crisi petrolifere degli anni '70 (a quella del 1973 ne fece seguito un'altra, ancora più dirompente, nel 1979-80, che prese spunto dalla cacciata della Scià dall'Iran, e dalla guerra Iran-Iraq) non erano dovute a carenza fisica di petrolio per imminente esaurimento. Gli aumenti di prezzo del petrolio decisi dall'OPEC (l'Organizzazione dei Paesi Esportatori di Petrolio), e in buona misura assecondati dalle grandi compagnie petrolifere internazionali (le famose "sette sorelle"), avevano tutt'altra ragione. Pur essendo chiaramente di dimensioni finite, le risorse petrolifere non sono oggi, e non lo saranno per

[1] "Limits to growth" (I limiti dello sviluppo) è il primo rapporto, redatto per conto del Club di Roma da un gruppo di ricercatori del Massachusetts Institute of Technology (MIT), col quale si ha l'avvio della riflessione intorno ai possibili equilibri per il futuro del pianeta con un approccio scientifico e modellistico. Le principali questioni sul tappeto sono la crescita demografica e l'esaurimento delle risorse del pianeta. Destò enorme attenzione, scosse e sensibilizzò opinione pubblica e responsabili economici e politici su quella che venne chiamata la "problematica globale". D.H. Meadows et al., I limiti dello sviluppo, Mondadori, Milano, 1972.

molti decenni ancora, in esaurimento, tanto è vero che il rapporto fra riserve accertate e produzione (sarebbe più corretto parlare di estrazione) annua – che era pari a 33 nel 1970 – è oggi salito a 43, nonostante gli enormi consumi intervenuti da allora ad oggi. Questo vale anche per il gas naturale, il cui rapporto riserve/produzione nello stesso periodo è passato da 43 a 65, e per il carbone, che negli ultimi dieci anni ha visto passare questo rapporto da 210 a 235. I combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) costituiscono nel loro insieme la fonti energetiche oggi prevalenti a livello mondiale: essi coprono, infatti, quasi il 90% dell'energia che è oggetto di scambi commerciali, e circa l'80% di tutta l'energia consumata ogni anno nel pianeta (la quale include le fonti di energia non scambiate sul mercato, si tratta per lo più di biomassa usata nei paesi in via di sviluppo – d'ora innanzi: PVS).

Se diamo uno sguardo al futuro, le proiezioni di domanda di energia ci dicono che da oggi al 2020 è previsto un aumento del 57%[2] della domanda di energia primaria, crescendo ad un tasso medio annuo del 2% e superando i 13.700 miliardi tep (tonnellate equivalenti di petrolio). L'insieme dei combustibili fossili dominerà ancora la scena energetica, soddisfacendo il 90% della domanda di energia primaria al 2020. Nucleare e rinnovabili si spartiranno equamente il restante 10%.

Per quanto concerne la distribuzione geografica della domanda, i 2/3 dell'incremento della domanda energetica mondiale dei prossimi due decenni proverranno dai PVS, grazie alla rapida crescita economica, all'espansione industriale, alla crescita della popolazione ed all'aumento del tasso di urbanizzazione.

Il peso dei PVS nella domanda energetica passerà dal 44% del 1997 al 54% del 2020. La sola Cina rappresenterà il 14% della domanda mondiale. Nonostante questi tassi di crescita, è bene sottolineare che il consumo in

[2] Questo e gli altri dati inseriti nel presente paragrafo provengono da: Agenzia Internazionale per l'Energia (d'ora innanzi AIE), World Energy Outlook 2000, AIE, Parigi, 2001, (si veda anche www.iea.org/weo/index) ; Notizie Petrolifere, Anno XV- Aprile 2001, Ed. Unione petrolifera, Roma,

Canada e Stati Uniti al 2020 (quasi 3.000 mil. tep a fronte di una popolazione di 350 milioni di persone) sarà superiore a quello di Cina e India insieme (2.600 mil. tep e 2,7 miliardi di abitanti).

Per quanto riguarda l'intensità energetica (misurata come domanda di energia primaria per unità di PIL) è previsto un decremento medio annuo pari all'1,1%. L'intensità energetica decrescerà più lentamente nei paesi OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) nei prossimi due decenni rispetto al passato, mentre il fenomeno inverso sarà riscontrabile nei paesi non-OCSE. I miglioramenti più importanti sono previsti nelle economie in transizione, dove è ampio lo spazio per incrementi dell'efficienza su tutta la filiera energetica (produzione, distribuzione, usi finali).

Nel 2020 saranno necessari 115 mil. bbl/g (barili/giorno) per soddisfare la domanda di petrolio e derivati, più di una volta e mezzo il volume odierno. Secondo la più recente stima dell'U.S. Geological Survey[3], le riserve recuperabili di greggio ammontano a 3.345 miliardi di barili. Questo volume (insieme ad ipotesi di prezzo che vedono il mercato stabilizzarsi, in termini reali, a 21 dollari/barile fino al 2010 ed in seguito spingersi progressivamente sino a 28 dollari/barile nel 2020[4]) non fa prevedere vincoli al soddisfacimento della domanda nei prossimi due decenni.

Dalle proiezioni di offerta di petrolio emerge una questione chiave: l'offerta di greggio dei paesi OPEC crescerà da circa 30 mil.bbl/g nel 1997 a circa 62 nel 2020. E' importante sottolineare che dei 19 mil.bbl/g dell'incremento di domanda che si verificherà tra il 2010 e il 2020, l'OPEC ne soddisferà ben 17,7. Il 91% di questa produzione verrà dai paesi del Medio Oriente (Arabia Saudita, Iran, Iraq, Kuwait, Emirati Arabi Uniti e Qatar). Le ripercussioni geopolitiche di questa ulteriore concentrazione della produzione in Medio

---

2001; AIE, Oil Market Report, Aprile 2000; OCSE, The World in 2020: Towards a New Global Age, OCSE, 2000.

[3] United States Geological Survey, World Petroleum Assesment 2000, USGS, 2000.

[4] Il WEO avverte che queste ipotesi non devono essere interpretate come una previsione di stabilità assoluta dei prezzi. Al contrario, la prevista concentrazione geografica della produzione di greggio fa prevedere un aumento della volatilità del mercato.

Oriente sono chiare. I paesi OCSE e i paesi asiatici diventeranno ancora più dipendenti dalle importazioni. Particolarmente rilevante è il caso della Cina che, se fino al 1992 esportava greggio, ora ci si aspetta debba importare nel 2020 circa l'80% della domanda (pari a più di 8 mil.bbl/g).

	1997	2010	2020
Nord America	44,6	52,4	58,0
Europa	52,5	67,2	79,0
Pacifico	88,8	91,5	92,4
Media OCSE	54,3	63,3	70,0
Cina	22,3	61,0	76,9
Sud-Est Asiatico	53,7	70,5	80,7

Tabella 1: Tasso di dipendenza da importazioni di petrolio (%). (da: AIE, World Energy Outlook 2000, AIE, Parigi, 2001.)

La domanda mondiale di gas è prevista crescere a un tasso del 2,7% dal 1997 al 2020, passando da circa 1.900 mil. tep ad oltre 3.500 e sarà trainata, nella maggioranza delle regioni, dai fabbisogni della generazione elettrica. L'alta efficienza dei cicli combinati, unita alle basse emissioni atmosferiche (rispetto agli altri combustibili fossili) e alla liberalizzazione dei mercati, ha fatto si, nel recente passato, e farà sì ancor più nel futuro, che il gas rappresenti la fonte preferita per la capacità addizionale di generazione elettrica. Come il petrolio, le riserve mondiali di gas si dimostrano più che sufficienti a soddisfare la domanda. Le riserve sono stimate essere tra i 145.000 m^3 e i 158.300 $m^{3.}$ La maggior parte delle riserve è concentrata nelle economie in transizione e in Medio Oriente, ovvero lontano dai centri di domanda. Anche in questo caso i paesi OCSE saranno costretti a far sempre più ricorso alle importazioni. Il problema dei costi di trasporto rappresenta un punto chiave per lo sviluppo futuro nel mercato del gas. L'aumentare delle distanze tra centri di consumo e centri di produzione rappresenta una pressione al rialzo per il prezzo finale del

gas, nonostante i miglioramenti della tecnologia tendano ad alleviare questa pressione.
Nei prossimi due decenni la domanda di energia elettrica avrà il più alto tasso di crescita tra tutti gli usi finali dell'energia. Con un tasso medio annuo del 2,8%, il suo consumo raddoppierà tra il 1997 e il 2020. Nei PVS il tasso di crescita medio annuo sarà pari al 4,6%, trainato dal settore residenziale. L'aumento dell'elettrificazione e la diffusione delle apparecchiature elettriche spingeranno la crescita. Ancora una nota sul livello di consumi pro-capite: nel 2020 un abitante dei paesi OCSE consumerà in media 6 volte l'elettricità di un abitante dei PVS ovvero i 4/5 della popolazione mondiale consumeranno meno della metà della produzione elettrica mondiale.

Il problema, dunque, almeno per i prossimi decenni, non è la scarsità di fonti energetiche fossili (anche se la crescente richiesta mondiale di energia pone come vincolo un uso razionale di tali combustibili). Il problema è che l'energia prodotta da fonti fossili è una delle maggiori cause del deterioramento ambientale. L'approccio fino ad ora dominante e che riteneva l'ambiente capace di rigenerazione illimitata, è gravemente insufficiente. L'ambiente, come ho già ampiamente argomentato nel primo capitolo, è una risorsa finita e dall'equilibrio estremamente delicato. Solo in parte esso è rinnovabile, ha una limitata capacità di carico, nel senso che riesce ad assorbire una quantità limitata di inquinanti e, una volta superata una certa soglia, il danno non riesce ad essere assorbito in tempi ragionevoli: l'effetto è irreversibile. E' quindi l'ambiente nel suo complesso a dover essere considerato una risorsa esauribile.
Una politica energetica che non tenga conto, nei propri assunti base, del deterioramento ambientale conseguente all'uso indiscriminato di fonti fossili è, per definizione, una politica miope e portatrice di interessi di parte: ossia di poche industrie petrolifere, non dell'umanità.

Come già detto, l'economia neoclassica vuole riportare, all'interno del proprio modello, gli effetti non voluti dell'attività di un agente sul benessere di un altro agente attraverso il concetto di esternalità. Si sono già messi in luce i gravi limiti di questa linea teorica dominante, limiti particolarmente evidenti nel caso dell'inquinamento e del deterioramento ambientale, che sono un esempio classico di esternalità: l'efficienza economica (ottimo paretiano) richiederebbe, per ogni livello di produzione e consumo che il valore marginale dei beni uguagli il suo costo marginale, inteso come somma dei costi privati e sociali. Nel settore energetico, dalla estrazione al consumo di fonti fossili si pone quindi la questione di incorporare i costi sociali di utilizzo di energia nel decidere le strategie. Fino ad oggi i prezzi, nella loro funzione di meccanismi di direzione dell'economia di mercato, sono stati ampiamente deficienti (inteso nel senso latino del termine). I prezzi avrebbero dovuto identificare, quantificare e monetizzare i costi esterni dell'uso di combustibili fossili (sempre ovviamente in un ottica di lungo periodo). Ma vi sono conseguenze che non sono note, altre che possono essere descritte qualitativamente senza essere passibili di una precisa e completa quantificazione e ancor meno monetizzazione, anche quelle che apparentemente lo sarebbero, almeno in via approssimativa.

Gli effetti esterni dell'uso di energia hanno molte dimensioni: diretti ed indiretti; a breve e a lungo termine; su scala geografica locale, regionale, nazionale, globale.

Due possono essere le macrocategorie nelle quali inquadrare i costi sociali dell'uso delle fonti fossili per la produzione di energia[5]: l'inquinamento

[5] Evidenzio qui solo due aspetti dell'inquinamento da utilizzo di combustibili fossili, questo non significa che altri impatti ambientali siano da minimizzare: mi riferisco ad esempio alle alterazioni ambientali che si verificano nei siti di estrazione, durante il trasporto, durante la sintesi dei sottoprodotti, durante lo smaltimento dei residui di combustione etc. Costi sociali anche questi non compresi nel prezzo finale dei combustibili.

atmosferico (con tutte le ripercussioni a cascata su suolo ed acque) e l'inquinamento termico[6].

Non è facile adottare politiche energetiche drastiche che implichino il contenimento e la riduzione delle emissioni degli inquinanti e dei gas serra in atmosfera, in un contesto globale che prevede un forte aumento della popolazione, necessita di un consistente sviluppo del benessere del Terzo Mondo ed esige la riduzione degli intollerabili divari socio economici esistenti in molti paesi, anche industrializzati. Ciò richiede e richiederà sforzi senza precedenti di innovazione, non solo scientifico tecnologica, ma anche economica e politico – istituzionale, sforzi per i quali non sembra esista ancora né una diffusa volontà, né condizioni sociali e culturali adatte. Hanno allora gioco facile coloro i quali indicano la necessità di svolgere ulteriori ricerche per accertare senza ombra di dubbio se si va incontro al riscaldamento globale[7] e di quale entità questo riscaldamento potrebbe essere, o coloro i quali sono favorevoli ad affrontare le conseguenze del riscaldamento piuttosto che mettere in atto politiche per evitarlo.

E' un dibattito/scontro tra chi privilegia l'ottica a breve termine rispetto a quella a lungo, fra chi sostiene che il mercato ha in sé la qualità per affrontare e risolvere tutti i problemi e chi invece vede nelle forze del mercato lasciate a se stanti un elemento pericoloso, accentuatore di divari e polarizzazioni che si devono cercare di evitare.

In fondo il tema dei limiti allo sviluppo, che sembrava sopito dopo la soluzione delle crisi energetiche degli anni settanta, è tornato alla ribalta in

[6] Per una breve trattazione dei due problemi si veda l'appendice 1 del presente capitolo.

[7] Uno tra gli scettici più noti è S.Fred Singer, un professore che non fa ricerca da anni, il quale viene citato, anche dalla stampa italiana, come uno tra i più ascoltati esperti americani in tema di riscaldamento globale; di lui parla Ross Gelbspan nel libro The Climate Crisis. The Cover Up. The Prescription, New York, 2001, p. 46: "Singer non nega di aver ricevuto fondi dalle compagnie del petrolio Exxon, Shel, ARCO, Sun Oil, ma replica che le sue posizioni sono oneste perché lui è sempre stato scettico, anche prima di ricevere quei soldi" (sic!). Un altro scettico è Bjorn Lomborg, docente di statistica dell'università di Copenaghen, il quale ha pubblicato " The Skeptical Environmentalist. Misuring the Real State of the World", Hodder and Stoughton, Londra, 2001. Il volume è stato

forma diversa. Gli approfondimenti nella problematica globale identificata trenta anni fa dal Club di Roma e le considerazioni del rapporto Brundtland (che sono state fondamentali per la riuscita della Conferenza di Rio e i successivi appuntamenti internazionali), costituiscono punti di partenza nella ricerca della compatibilità fra salvaguardia dell'ambiente, sviluppo e relativo fabbisogno di risorse primarie, in primo luogo energetiche.

Mentre per il nord è possibile pensare a uno sviluppo di tipo essenzialmente qualitativo, che non si traduca cioè in maggiori sprechi e maggiori consumi di energia e materiali, ma possa anzi ottenersi con una loro riduzione, nei PVS la crescita quantitativa continuerà per molto ad essere indispensabile (insieme, ritengo, ad una decisa politica tesa alla stabilizzazione della popolazione). E' difficile pensare che questo possa avvenire senza portare a un incremento del consumo mondiale di risorse ed energia, ma le fonti di energia che rappresentano le opzioni "migliori", se considerate solo in base alla disponibilità e al prezzo (ovvero idrocarburi e carbone), sono in realtà le meno attraenti sotto il profilo ambientale.

Una prevenzione, o almeno un rallentamento delle emissioni inquinanti e del riscaldamento globale del clima, potrebbe venire solo da azioni concordate a livello mondiale. Ma, data la complessità della situazione, i costi in gioco sono così elevati e distribuiti in modo eterogeneo e le posizioni di partenza così accentuatamente diverse, che un negoziato internazionale riguardante le politiche energetiche e quelle di protezione dell'ambiente non potrà che essere lungo, difficile e di esito incerto. Vi è però un criterio di priorità sul quale la maggior parte degli interlocutori potrebbe trovarsi d'accordo: cominciare da quelle misure che sarebbero utili e auspicabili anche se la minaccia dell'effetto serra e del raggiungimento di soglie di non ritorno di distruzione ambientale, non ci fossero. Si rende necessario negoziare una soluzione che sia accettabile anche dai paesi che oggi, sotto la pressione economica e demografica,

---

stroncato dalle riviste scientifiche più prestigiose al mondo: "Nature" e "Science". (Si veda anche: Altreconomia, n°26, marzo 2002, pag. 34).

sfruttano il proprio ambiente in modo distruttivo. Spetta comunque ai paesi industrializzati farsi carico della riduzione delle emissioni di inquinanti e di gas serra. Questo può avvenire sostanzialmente in tre modi. Prima di tutto - ed è un intervento sul quale , almeno in linea di principio, vi è un accordo generale – riducendo gli sprechi di energia e aumentandone l'efficienza d'uso. In secondo luogo effettuando qualche spostamento all'interno dei consumi di combustibili fossili, soprattutto verso il gas naturale che emette meno biossido di carbonio rispetto al petrolio e ancor meno rispetto al carbone. Infine sviluppando e diffondendo fonti energetiche diverse dai combustibili fossili: le fonti rinnovabili, alcune delle quali sono particolarmente promettenti.

Tutta la storia della vita sulla Terra, la storia della fotosintesi e la storia dell'evoluzione, si può leggere come la storia di un pianeta singolare che ha imparato a catturare l'energia solare e a nutrirsi di entropia negativa dall'universo fino a creare strutture complesse: gli organismi viventi. Purtroppo, con lo spreco energetico e con tecnologie non integrate nella natura, l'uomo rischia di far saltare questo meccanismo vitale. I limiti al processo fotosintetico non sono infatti imposti dalla sorgente di energia, il Sole, praticamente infinita, ma dal folle modo di produrre adottato attualmente dall'uomo.

Il Sole, classificato dagli astronomi fra le stelle nane di classe spettrale G2, è un'enorme macchina che produce energia e offre al pianeta terra la possibilità di ricevere, di conseguenza, grandi quantità di entropia negativa, permettendo un bilancio globale complessivo che non contraddice il secondo principio della termodinamica. La potenza del sole risulta pari a $3,84 \cdot 10^{20}$ W. La massa convertita in energia in un secondo per effetto delle reazioni di fusione nucleare è di $4,27 \cdot 10^{9}$ kg, alla quale corrisponde una perdita di massa dello 0,0067% in un miliardo dei anni. Di questa potenza solo una piccola frazione, pari a $1, 73 \cdot 10^{17}$ W, viene intercettata dalla Terra.

Considerando che mediamente in un anno solo un terzo di questa radiazione raggiunge la superficie terrestre e che il 70% di questa cade sugli oceani, l'energia solare annua incidente al suolo è pari a circa $1,515 \times 10^{17}$ kWh, 1.536 volte più grande del fabbisogno energetico mondiale annuo (pari a $9,55 \times 10^{13}$ kWh nel 1990). E' come se il Sole inviasse sulla Terra una quantità di 260 tonnellate a fronte di consumo annuo di 50 chilogrammi. Al massimo dell'intensità e in condizioni ottimali, l'energia direttamente depositata dal sole sulla superficie della Terra è all'incirca 1 kW/m^2. In località favorevoli e possibile raccogliere annualmente circa 2000 kWh da ogni metro quadrato di superficie, il che è l'equivalente energetico di 1,5 barili di petrolio per m^2, cioè

pari a quello di uno strato annuo di petrolio di circa 20 cm di spessore sull'insieme della superficie (orizzontale) di raccolta.
Due sono le forme di sfruttamento attivo[8] dell'energia solare: la conversione in energia termica e la conversione in energia elettrica.

LA CONVERSIONE DELL'ENERGIA SOLARE IN ENERGIA TERMICA

La radiazione solare incidente può essere utilizzata per riscaldare fluidi (acqua, aria o soluzioni di vario calore specifico) da far circolare in scambiatori di calore o direttamente in tubazioni e corpi radianti posti nei locali da riscaldare, o per far evaporare le sostanze volatili che vengono utilizzate nei cicli di refrigerazione.
I metodi per raccogliere l'energia solare sotto forma di energia termica sono due:
- con concentrazione, mediante specchi o lenti che riflettono la radiazione verso pannelli o caldaie per l'utilizzo diretto dell'acqua calda o per la produzione di vapore da convogliare a turbina[9];
- senza concentrazione, mediante pannelli applicati o integrati nelle chiusure degli edifici.

In entrambi i casi le superfici possono essere orientabili o no.
Per economicità e semplicità di gestione, soprattutto per le applicazioni su piccola scala, è senz'altro preferibile raccogliere direttamente l'energia solare su pannelli fissi, opportunamente orientati.

---

[8] Tralascio , in questa sede, di occuparmi di un altra affascinante e promettente forma di sfruttamento dell'energia solare cioè l'utilizzo di sistemi passivi, i quali si servono delle strutture degli edifici come collettori, accumulatori e meccanismi di trasferimento dell'energia. Ne farò comunque cenno nello svolgere il presente capitolo poiché l'utilizzo simultaneo di principi di bioarchitettura e di sistemi attivi e passivi nell'impiego della radiazione solare comportano importanti riduzioni di costo.
[9] Per un breve approfondimento sullo stato dell'arte delle tecnologie solari termoelettriche si veda l'appendice 2 al presente capitolo.

Il primo pannello solare pare sia stato costruito nel diciottesimo secolo dallo scienziato svizzero Horace Benedict de Saussure[10]. Si trattava di una semplice "scatola" di legno con un vetro nella parte esposta al sole e la base di colore nero, capace di assorbire la radiazione solare termica intrappolata nella scatola stessa grazie a un locale "effetto serra" e alla scarsa dispersione dovuta alle caratteristiche termiche isolanti del legno. Il pannello consentiva di raggiungere temperature del fluido vettore di circa 77 ºC. Un nuovo forte impulso allo sviluppo di questa tecnologia fu dato dalla crisi petrolifera agli inizi degli anni '70 del ventesimo secolo.

Un sistema solare per la produzione di acqua calda consiste essenzialmente del pannello solare o collettore solare piano, che può essere con vetro (vetrato) o in polipropilene, polietilene, PVC (non vetrato, solo per uso estivo, generalmente piscine[11] o impianti balneari), di un serbatoio termicamente isolato, destinato all'accumulo dell'acqua calda, di un circuito di collegamento di questi due componenti e dei relativi sistemi di regolazione e controllo. Il problema dell'accumulo dell'energia intrappolata dai pannelli non ha l'unica soluzione del serbatoio coibentato, anche se è la più pratica e forse l'unica per edifici già esistenti.

Recenti applicazioni "ibride" riscaldano il fluido vettore utilizzando il retro di pannelli fotovoltaici, ottenendo anche il risultato di abbassare la temperatura di questi ultimi, con beneficio per la loro efficienza.

---

[10] J. Perlin, Dal Sole. L'energia solare dalla ricerca spaziale agli usi sulla Terra. Edizioni Ambiente, Milano, 2000.

[11] Il riscaldamento dell'acqua con energia solare è uno dei migliori e più efficaci modi di riscaldamento. Le piscine infatti richiedono temperature dell'acqua comprese tra i 25 ed i 28 °C in corrispondenza delle quali i collettori solari sono molto efficienti. Possono essere utilizzati collettori vetrati o non vetrati. Le piscine scoperte normalmente utilizzano collettori non vetrati perché utilizzate prettamente d'estate, periodo in cui le prestazioni dei due sistemi sono pressoché equivalenti. Se la piscina da "solarizzare" è collocata in una zona a clima freddo i collettori non vetrati in plastica o gomma non forniranno abbastanza energia in inverno ma potrebbero essere economicamente convenienti nell'utilizzo estivo per il loro costo iniziale contenuto. I sistemi vetrati sono molto più costosi, perché normalmente utilizzano assorbitori in rame selettivo che richiedono un fluido termovettore anticongelante ed uno scambiatore per trasferire il calore solare all'acqua della piscina. I sistemi scoperti sono normalmente realizzati in plastica o gomma e l'acqua della piscina è fatta scorrere
direttamente nel collettore. Nessuno dei due sistemi necessita di sistema di accumulo. E' la piscina stessa che funge da accumulo termico.

La circolazione dell'acqua tra il collettore e il serbatoio può avvenire per effetto dell'azione di una pompa (sistemi attivi) o per circolazione naturale, sfruttando le differenze di temperatura del circuito (sistemi passivi o a "termosifone"). Con i pannelli piani senza concentrazione la temperatura massima raggiungibile si aggira intorno agli 80°C e sarà di poco superiore nel caso la base assorbente sia stata trattata con speciali vernici in modo da ottenere una superficie selettiva o anti-raggiante. Temperature più elevate, anche per produrre vapore, possono essere ottenute con tecnologie più sofisticate come quella dei collettori solari con tubi sottovuoto o con piastre che sfruttano il principio della "Non Imaging Optics", che consente di realizzare una debole concentrazione. Nei paesi dove non ci sono problemi di congelamento dell'acqua, si tende ad avere il serbatoio di accumulo integrato nello stesso collettore, con una notevole semplificazione e riduzione dei costi di tutto il sistema. I sistemi più sofisticati sono in genere utilizzati nei paesi più freddi o per utenze che richiedono calore a temperature elevate, quali quelle di tipo ospedaliero per la sterilizzazione o quelle industriali.

Negli ultimi decenni sono stati installati nel mondo circa 30 milioni di metri quadrati[12] di pannelli solari, di cui 5.600.000 in Europa: il 40% del mercato mondiale dei collettori solari è nei paesi europei e del mediterraneo. In quelli europei è più sviluppato nei paesi a minore insolazione, come l'Austria, la Danimarca, la Svezia e la Germania, che in Italia, Spagna e Francia, caratterizzati da una buona insolazione: tale contraddizione deriva in particolare dalla diversa sensibilità ambientale, che ha costituito un importante fattore di stimolo all'adozione di specifiche politiche industriali per lo sviluppo del solare nei paesi del Nord Europa.

L'Unione Europea sovvenziona l'installazione di alcune migliaia di scaldacqua solari in nuovi complessi residenziali di medie e grandi dimensioni con lo

[12] I dati sono tratti da : " Ilsoleatrecentosessantagradi" ed. ISES Italia, n° 6, 8, 11, a. 2001; sito IEA SolarPaces Program, www.solarpaces.org/resources; sito Agenzia Europea dell'Ambiente, www.eea.eu/int.

scopo di dimostrare la possibilità di ridurre i costi degli stessi attraverso interventi su larga scala; la disponibilità di nuove tecnologie per la costruzione di edifici (per esempio i nuovi materiali isolanti trasparenti alla luce) sta aprendo la strada all'utilizzo di pannelli solari nella climatizzazione invernale e estiva di abitazioni e edifici.

La diffusione dei sistemi solari per l'acqua calda è tuttavia oggi significativa solo in pochi paesi del mondo, quali Israele, Cipro, Grecia e Giordania, dove sono installati più di 100 m^2 di collettori solari ogni 1000 abitanti (in Italia sono installati 6 m^2 per ogni 1000 abitanti). In Europa il mercato dei collettori solari si è sviluppato a partire dal 1989 a un tasso del 18% e, in base agli obiettivi proposti dall'European Solar Industry Federation (ESIF) [13], potrebbe crescere nei prossimi anni del 23% per poi arrivare, nel 2005, alla produzione e alla vendita annuale di oltre 5 milioni di m^2 di pannelli. Nel 1994 4.400.000 m^2 di pannelli vetrati e 1.200.000 m^2 di pannelli non vetrati hanno consentito nel nostro continente di produrre 2,6 TWh, e di evitare l'immissione nell'atmosfera di 1,8 milioni di tonnellate di CO_2.

Purtroppo, la carenza di un quadro normativo organico a livello europeo e la stessa complessità e onerosità delle procedure di certificazione creano dei gravi ostacoli al commercio continentale di questi prodotti: su proposta dell'ESIF è stato creato l'European Standards Technical Committee CEN/TC 312 nell'ambito del programma comunitario Altener, con lo scopo di stabilire degli standard europei di riferimento che consentano di assicurare la qualità dei prodotti e dei servizi post-vendita.

Per quanto riguarda l'Italia, le previsioni dell'ESIF al 2005 indicano in 500.000 m^2 il totale dei collettori installati a quella data contro gli attuali 350.000[14] m^2 (con 6 m^2 di pannelli per 1000 abitanti). Le prime ricerche sistematiche per il riscaldamento solare dell'acqua furono effettuate, in Italia, agli inizi degli anni '60 dal Politecnico di Milano nell'ambito di un programma finanziato dal

[13] Si veda http//:erg.ucd.ie/esif
[14] Dato del Ministero dell'Ambiente al 30/04/2001

CNR, che comprendeva la sperimentazione di diverse tipologie di impianto a Cortina d'Ampezzo.

Con la denominazione di "collettori solari" si indicano quelle superfici destinate a raccogliere la radiazione solare e relative cavità per il passaggio di un fluido vettore; i sistemi solari che possono essere installati per integrare o provvedere in toto alle necessità di acqua calda sanitaria e/o per riscaldamento di un edificio sono i più disparati, ed ai modelli posti in opera si aggiungono di continuo sistemi di nuova concezione o che si avvalgono di nuovi materiali.
Quello che si può fare in questa sede è una "foto di gruppo" che, come tale, è parziale ed istantanea, e si limita in particolare allo stato dell'arte dei sistemi solari di piccola scala di miglior rapporto rendimento/costi: questo identikit quindi esclude i sistemi a concentrazione e quelli ad inseguimento, i cui costi di installazione e manutenzione vanificano il miglior rendimento.
I sistemi a pannelli fissi sono quindi una scelta "obbligata" specialmente per il residenziale, la cui committenza è particolarmente sensibile sia ai costi che all'impatto visivo dell'impianto.
I collettori solari possono avere forma ed aspetto i più vari possibile, a volte possono non sembrare neanche pannelli (è il caso, ad esempio, dei vetri camera a circolazione forzata per infissi).
Un collettore solare piano è costruito per funzionare come un "corpo nero": una piastra (solitamente metallica) assorbe le radiazioni solari e si riscalda, riscaldando il fluido che in esso circola. Riscaldandosi, emette radiazioni con il massimo d'intensità nel campo dell'infrarosso. Per evitare la dispersione di questa radiazione di corpo nero, il collettore è solitamente coperto da una lastra di materiale trasparente alla radiazione solare ma opaco agli infrarossi, in modo da creare un "effetto serra" che fa aumentare notevolmente la temperatura all'interno del collettore. Le parti non trasparenti del collettore

sono opportunamente coibentate per ridurre la parte di calore assorbito che non viene trasferita al fluido vettore.

Esaminiamo ora ciascuno dei componenti di un collettore solare.

Nella progettazione di un collettore, il numero di lastre trasparenti da impiegare (distanti fra i 12 ed i 24 mm) è un parametro che dipende essenzialmente dalla velocità e natura del fluido vettore e dalla temperatura esterna: più lentamente circola il fluido, più la piastra è calda ed è necessaria più di una lastra per trattenere la parte infrarossa della radiazione di corpo nero; più bassa è la temperatura esterna, più occorre inserire almeno un'altra lastra trasparente che intercetti buona parte della radiazione di corpo nero, in modo da ridurre il differenziale termico fra le facce della lastra più esterna (e quindi le perdite per conduzione). Si tenga comunque presente che più lastre si impiegano, più radiazione solare assorbono e riflettono, quindi meno radiazione raggiunge effettivamente la piastra.

Sia la radiazione solare, da un lato, sia la radiazione di corpo nero dall'interno sono in parte riflesse (circa il 4% ad ogni interfaccia lastra-aria) ed in parte assorbite, per essere poi emesse in entrambe le direzioni (avendo anche la lastra un blando comportamento di corpo nero).

Il materiale che riunisce prestazioni ed economicità non esiste ancora: i vetri hanno ottime proprietà ottiche, ma non possono avere luci troppo grandi (fragilità alla grandine) e sono costosi; le materie plastiche sono più economiche, leggere e resistenti del vetro, ma presentano una maggiore trasmissività alle lunghezze d'onda delle radiazioni infrarosse emesse dalla piastra ed una minore stabilità delle proprietà geometriche e fisiche nel tempo.

La scelta delle parti trasparenti va quindi fatta cercando di ottenere al minor costo queste prestazioni: basso coefficiente di assorbimento, bassa conducibilità termica, buona resistenza alle sollecitazioni meccaniche e termiche, accettabile resistenza agli agenti chimici (detersivi) ed atmosferici, durata nel tempo e facile sostituibilità.

La piastra assorbente viene solitamente verniciata di nero opaco per aumentare l'assorbenza propria del materiale.

L'efficienza "istantanea" (monitoraggio standard di 15 minuti) del collettore è definita come il rapporto tra la potenza utile (ceduta al fluido termovettore) e la potenza radiante incidente sul collettore.

Un monitoraggio oltre il quarto d'ora consente di calcolare l'efficienza media. Ad oggi i rendimenti raggiungibili in media, in funzione delle temperature in gioco e dell'utilizzo di componenti più o meno sofisticati, sono dell'ordine del 50/80 %.

Il fluido vettore (aria, acqua o un fluido ad esempio a basso punto di ebollizione) può circolare in tubi metallici inglobati o saldati alla piastra, oppure liberamente fra la piastra e le parti trasparenti: nel primo caso è critica la dispersione per irraggiamento dalla piastra, nel secondo le perdite maggiori sono dovute a convezione dello stesso fluido vettore.

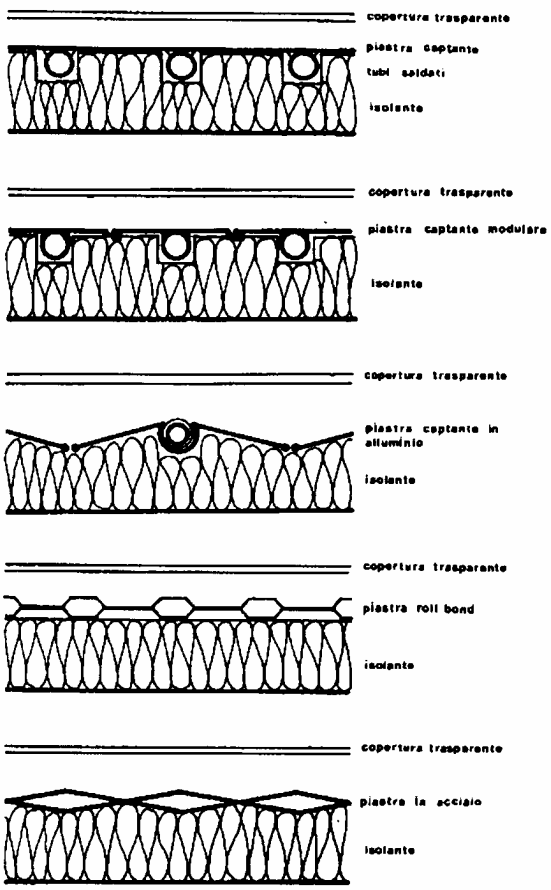


Figura 1: Tipologie di collettori a liquido

In definitiva, la scelta della piastra assorbente va fatta cercando di ottenere al minor costo queste prestazioni: un coefficiente di assorbimento molto elevato, il più vicino possibile all'unità; un coefficiente di emissione basso; una elevata conducibilità termica (per cedere molto calore nell'unità di tempo al fluido termovettore); una buona resistenza alle sollecitazioni derivanti dalla dilatazione termica; facile sostituibilità e durata nel tempo.

Le soluzioni tecnologiche per aumentare l'efficienza dei collettori sono le più svariate: merita una citazione un brevetto norvegese della ditta SolarNor[15], che riesce ad aumentare la temperatura dell'acqua in uscita dal pannello (e a tenerla alta anche molti minuti dopo il tramonto o il rannuvolamento) grazie a tante piccole pellets ceramiche nere disposte nella piastra captante (plastica) cava, che costringono il liquido a venire a contatto con la grande superficie delle loro minuscole porosità.

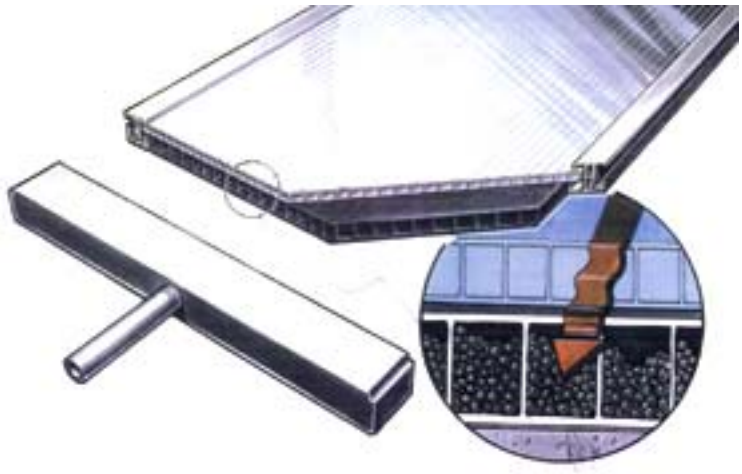


Figura 2: Collettore solare a pellets ceramiche

Le parti non trasparenti del pannello solare devono avere resistenza alle sollecitazioni meccaniche e termiche ed impedire la dispersione del calore intercettato; per queste ragioni il contenitore deve essere rigido ma preferibilmente non metallico, ed avere un adeguato isolamento termico che

[15] i dati sono tratti dal sito dell'azienda: www.solarnor.com.

garantisca queste prestazioni: un basso coefficiente di trasmissione termica, in modo da poter contenere il suo spessore e peso; stabilità delle caratteristiche fisico-chimiche alle temperature di esercizio; compatibilità fisico-chimica con i materiali con cui viene a contatto; facile adattamento alle geometrie dei componenti del collettore; buona durata nel tempo.

Il cuore di un sistema a pannelli solari è il fluido termovettore, che permette di trasportare il calore del Sole ai sistemi di accumulo che si è scelto di adoperare: come già accennato, può essere di varia natura; se è acqua, può essere usato direttamente come acqua calda sanitaria, oppure può cedere il suo calore in uno scambiatore (nel caso venga addizionata di antigelo o l'acqua di rete contenga troppi carbonati metallici); liquidi a bassa temperatura di ebollizione vengono usati in cicli frigoriferi e pompe di calore.

L'aria è un fluido vettore che ha vantaggi e svantaggi il cui peso relativo varia in funzione dell'impianto e dell'edificio: fra i vantaggi il costo zero, l'immediata utilizzabilità per il riscaldamento degli ambienti, nessun problema di corrosione o congelamento, la semplicità dei sistemi di controllo; fra gli svantaggi, il minore aumento della temperatura del pannello e il ridotto scambio termico con la piastra per il basso calore specifico dell'aria, che comporta un basso rendimento del pannello. Per aumentare lo scambio termico bisogna imporre un moto turbolento all'aria che circola nel collettore, dando un profilo frastagliato e ruvido alla piastra assorbente, badando però a non indurre grosse perdite di carico da compensare con potenti ventole; un altro metodo può essere quello di far circolare l'aria in una piastra cava, lasciandola espandere in condotti trasversali rispetto al moto naturale, per poi raccoglierla lateralmente.

Per incrementare l'efficienza dei collettori, oltre ad utilizzare una superficie selettiva per la piastra, si può praticare il vuoto fra la piastra e la copertura: è una soluzione poco adottata per i collettori piani (problemi di fragilità e tenuta stagna), mentre è molto diffusa per i tubi a vuoto, i quali sono dei tubi di vetro in cui vengono inserite delle lamine di materiali selettivi e, posteriormente a

queste dei tubi metallici, in cui scorre un fluido bassobollente (dannosi i CFC, si utilizza pentano o a volte acqua), asportano il calore verso uno scambiatore posto in cima alla serie di tubi a vuoto. Il sistema è molto reattivo ed efficiente, risente poco delle temperature rigide e per la potenza che può fornire è indicato per gli impianti che integrano il riscaldamento domestico.

L'integrazione dei pannelli solari (come pure dei moduli fotovoltaici) nell'architettura degli edifici è sempre stata una questione problematica, per ragioni di superficie e di estetica.

Recentemente, i produttori di pannelli hanno smesso di ignorare il problema, lanciando sul mercato pannelli di aspetto sempre più gradevole, dalle forme più svariate, che possono essere posti in opera sui tetti piani senza occupare troppa superficie, o che somigliano a grossi lucernari sugli spioventi; alcuni, costruiti su misura, prendono il posto dei parapetti dei balconi esposti a sud.

Il problema si intreccia con quello dell'installazione di moduli ibridi fotovoltaico-termici[16] – come è noto i moduli fotovoltaici perdono efficienza all'aumentare della temperatura di esercizio - se si vuole integrare un sistema di tubazioni sul retro dei moduli di celle al silicio cristallino, per asportare calore (fino a 2 kWh_t per kWh_{el}) ed aumentare così il loro rendimento.

Per l'ingombro nullo e la praticità di utilizzo sono imbattibili le soluzioni che utilizzano le superfici finestrate esposte a sud per riscaldare acqua nell'intercapedine interna di un infisso a triplo vetro: purtroppo l'impianto è costoso, fragile e richiede una circolazione forzata, essendo obbligatorio l'uso di condotti flessibili di ridotto diametro; può andare meglio se si rendono inamovibili gli infissi.

In generale, si tende ad evitare l'utilizzo di appositi sostegni metallici (che hanno il loro costo, anche di manutenzione) e si cerca di utilizzare le chiusure esterne degli edifici per fissarvi i pannelli solari, che avranno forme e condotti di basso impatto visivo: l'insieme di questi accorgimenti, unitamente alle

[16] Si veda ad esempio: S. Krayter, S. Schroer, Combined PV and Thermal System for Facade Integration and Building Insulation. Atti della conferenza ISES, Tel Aviv, 1999.

agevolazioni finanziarie di legge, rendono la committenza sempre più disposta verso l'impianto solare, sia su edifici esistenti (impianti retrofit) che nuovi.

Gli impianti solari per la produzione di acqua calda sanitaria e/o il riscaldamento di edifici, che utilizzino collettori a liquido o ad aria, non sono in grado di fornire l'intero fabbisogno di una utenza media: ciò per lo sfasamento fra richiesta e disponibilità di energia solare e l'alternarsi delle stagioni, a meno che non si disponga di un accumulatore interstagionale a calore sensibile (massa riscaldata in estate che cede calore in inverno) o latente (sali liquidi che solidificano cedendo calore). La radiazione solare può essere immagazzinata anche sotto forma di idrogeno, ma questo è un aspetto del problema "conservazione dell'energia solare" che non affronterò in questa sede.

Si è già accennato alla classificazione principale degli impianti a seconda del fluido termovettore: concentriamo l'attenzione sugli impianti a vettore liquido. L'impianto più semplice è quello a circolazione naturale (o a termosifone), che può essere utilizzato ogni volta che si riesce a porre il serbatoio d'accumulo al di sopra dei collettori (l'acqua calda vi sale per differenza di densità rispetto all'acqua di rete). Essendo abbastanza rari questi casi, gli impianti a circolazione forzata sono più diffusi: a volte dispongono di un serbatoio di preriscaldamento che permette ai collettori di lavorare su una differenza di temperatura minore, con beneficio per la loro efficienza; sempre, hanno una valvola di non ritorno a monte dei collettori ad evitare l'inversione della circolazione durante le ore notturne, ed un termostato differenziale che avvia la pompa appena la temperatura dell'acqua nei collettori supera quella del serbatoio di un certo valore fissato.

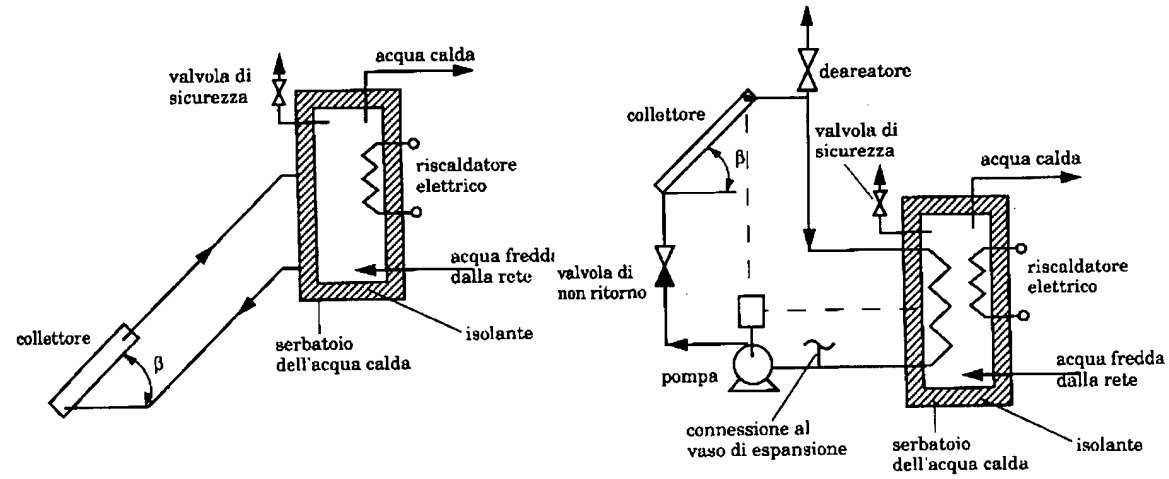


Figura 3: Un impianto a circolazione naturale (a) ed uno a circolazione forzata (b)

La soluzione con serbatoio di preriscaldamento disposto in serie al principale è ideale quando c'è pericolo di congelamento a livello dei collettori, e si deve usare una miscela anticongelante (di solito acqua e glicole) come fluido vettore, o in tutti quei casi in cui non è possibile mandare ad utilizzo il fluido che circola nei collettori. L'impianto ausiliario di integrazione (elettrico, a pompa di calore, a caldaia o a cella a combustibile), utile soprattutto a coprire il carico richiesto dal riscaldamento, può essere variamente collocato rispetto a quello solare: si può porre in serie, in parallelo, o può rifornire d'acqua calda lo stesso accumulatore dell'impianto solare; ancora, ne può essere del tutto indipendente, rifornendo un serbatoio cui fanno capo corpi scaldanti diversi da quelli utilizzati dall'impianto solare: è il caso più comune quando l'impianto solare viene posto in opera in un edificio esistente. In quest'ultimo caso, più che per gli impianti progettati ex novo, può essere vantaggioso utilizzare un impianto ad aria, anche se l'efficienza istantanea di un collettore ad acqua è generalmente più alta, a parità di temperatura di ingresso del fluido: la convenienza va valutata caso per caso, a seconda dell'interazione con l'intero

sistema di gestione energetica dell'edificio e delle esigenze dell'utenza. E' comunque raro per gli impianti ad aria che l'accumulatore sia una massa d'acqua, a causa della bassa efficienza dello scambio termico aria-acqua: si preferiscono grandi masse solide di elevata capacità termica e grande superficie di scambio, come ad esempio un letto di pietre in una fondazione scatolare coibentata.
I punti più deboli dell'impianto ad aria sono i maggiori costi per il trasporto del fluido (potenza del ventilatore fino al 100% maggiore di quella richiesta da una pompa per liquido) e per posa in opera ed isolamento dei condotti (più grandi). Se non si dispone o non si ha budget sufficiente a realizzare un letto di pietre, si ricorre all'impianto ad aria senza accumulo, da utilizzare solo se la temperatura dell'aria nei collettori lo permette: l'impianto solare serve così solo a risparmiare combustibile nelle giornate invernali soleggiate. Un impianto ad aria che invece fornisce calore ad un letto di pietre è in grado di immagazzinare l'energia intercettata e non richiesta per fornirla quando c'è richiesta ma i collettori sono freddi: l'aria calda aspirata dall'accumulatore può essere utilizzata direttamente per il riscaldamento degli ambienti e/o per la produzione di acqua calda tramite uno scambiatore aria-acqua. L'immagazzinamento a calore latente (il calore è assorbito dalla fusione di sali idrati, e restituito dalla ricristallizzazione) è costoso (la sostanza non è economica e dopo un certo numero di cicli deve essere sostituita) e dà problemi di manutenzione per corrosione del contenitore, ed è caduto in disuso.

Quali le ragioni che spingono ad adottare il solare termico per la produzione dell'acqua calda sanitaria? I benefici ottenibili sono notevoli se confrontati con le tecnologie tradizionali (caldaia a metano, boiler elettrico, stufa a legna) non solo in termini di riduzione dell'inquinamento ambientale, ma anche riguardo al risparmio economico ed energetico.

Essendo l'energia solare una fonte aleatoria sulla superficie terrestre, i collettori solari termici vanno realisticamente considerati integrativi rispetto alle tecnologie tradizionali; essi vanno quindi considerati capaci di fornire direttamente solo parte dell'energia necessaria all'utenza, energia che altrimenti dovrebbe essere prodotta dalla caldaia tradizionale. La percentuale di energia termica prodotta annualmente da un collettore solare termico prende il nome di fattore di copertura del fabbisogno termico annuo. Alle nostre latitudini, per un sistema che ottimizzi il rapporto costi/energia prodotta, questo fattore non supera il 65%. Questo limite è comune a moltissime tecnologie basate su fonti rinnovabili, il più delle volte caratterizzate da disponibilità aleatoria o periodica. A causa di ciò, con il crescere delle dimensioni dell'impianto, cresce il fattore di copertura del carico termico, ma la relazione tra il costo dell'energia e l'energia prodotta resta lineare fino al 55/60%. Superato questo valore, il costo continua ad aumentare linearmente con le dimensioni dell'impianto, mentre l'energia prodotta aumenta meno rapidamente, il che si traduce in un maggiore costo dell'unità di superficie di collettore. E' per questo motivo che un collettore solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria dimensionato correttamente viene progettato per soddisfare il 60/65% del fabbisogno termico, riducendo in stessa percentuale la richiesta di combustibili fossili.

In ambito urbano, ma non solo, l'acqua calda sanitaria è per la maggior parte dei casi prodotta con scaldabagni elettrici o caldaie a gas. La produzione di acqua calda sanitaria, con l'uso di energia elettrica dissipata dalla resistenza presente nello scaldabagno, risulta un processo costoso dai punti di vista energetico, ambientale ed economico, se confrontato con la produzione di acqua calda con caldaie a gas. L'introduzione aggiuntiva di un collettore solare termico, che sostituisca parte della produzione di calore, comporta benefici ancora maggiori.

Si analizzeranno qui di seguito, brevemente, gli effetti energetici, economici ed ambientali che l'introduzione di diverse tipologie di impianti per il riscaldamento per acqua sanitaria possono conseguire, in relazione all'introduzione di un sistema solare termico attivo.

Per il calcolo del risparmio energetico si fa qui un confronto semplificato con la produzione di acqua calda mediante boiler elettrico e caldaia a metano. Il consumo ipotizzato viene assunto pari a 200 litri di acqua al giorno ad una temperatura di 45°C, questo quantitativo è considerato il consumo medio di una famiglia di quattro persone. Ciò implica un fabbisogno energetico netto pari a circa 1,7 kWh pro capite giorno.

In questo caso, l'utilizzo di energia termica per produrre acqua sanitaria comprende una doppia trasformazione. In una prima fase occorre produrre energia elettrica (tipicamente, in centrali termoelettriche, più raramente in idroelettriche). L'energia elettrica prodotta, poi, trasportata all'utenza, dovrà a sua volta trasformarsi in energia termica per essere conferita all'acqua. Per produrre con uno scaldabagno elettrico 1,7 kWh termici, sono necessari circa 1,94 kWh elettrici, avendo stimato l'efficienza di conversione dello scaldabagno elettrico pari al 90%. Mediamente, una famiglia di quattro persone utilizza, quindi, 7,74 kWh elettrici al giorno per la produzione di acqua calda sanitaria. Ma è da considerare che, per la produzione di ogni kWh elettrico, vengono consumati dal parco di centrali elettriche italiane, circa 2,54 kWh[17], sotto forma di energia primaria.

Considerando questa doppia trasformazione da energia primaria in energia elettrica e da elettrica a termica, emerge che, per produrre l'acqua calda necessaria giornalmente per soddisfare il fabbisogno pro capite sono necessarie 2,54 . 1,94 = 4,93 kWh. In tal modo solo il 35% dell'energia primaria consumata viene effettivamente utilizzata dall'utente. Nel caso, poi, di una famiglia di quattro persone, si arriva a 17,72 kWh_t .

[17] ENEA, Funzione Centrale Studi, L'energia e i suoi numeri. Italia 2000. ENEA, Roma, Maggio2001.

Gli scaldabagni elettrici sono sempre dotati di un serbatoio, non essendo possibile riscaldare istantaneamente l'acqua per via elettrica. Benché esso sia coibentato e si trovi immerso in aria ad una temperatura prossima ai 20°C, le perdite di calore verso l'esterno si possono valutare nell'ordine di 0,8-1,5 kWh/giorno, ossia il 12-22% del fabbisogno termico necessario per innalzare la temperatura dell'acqua sanitaria fino al valore desiderato.

Nel caso di una caldaia a metano l'acqua sanitaria viene prodotta mediante la combustione del gas, combustione che ha una resa energetica diretta più alta. Una caldaia a gas ha ovviamente una resa energetica diretta più alta, perché evita la conversione più energivora che consiste nel passaggio energia termica - energia elettrica. Per questo la resa globale si aggira intorno al 80/85%. La produzione di calore e il conseguente riscaldamento dell'acqua sanitaria avviene per combustione diretta del metano (la caldaia può essere istantanea o meno, a seconda che riscaldi l'acqua stessa al momento dell'uso o come avviene in un boiler elettrico, richiedendo in tal caso la presenza di un serbatoio di accumulo). Nel caso peggiore di rendimento del 80%, per produrre 1,7 kWh sono quindi necessarie in un giorno 2,18 kWh. Nel caso di una famiglia di quattro persone si arriva a 8,72 kWh.

Appare evidente il risparmio energetico rispetto al caso precedente, visto che basta un quantitativo di energia più che dimezzato. Ciò del resto era preventivabile, se si tiene conto del fatto che, qui, viene realizzata una sola trasformazione energetica: l'energia chimica del combustibile è convertita in energia termica, ceduta all'acqua. Nel caso del boiler elettrico, invece, si ha la seguente catena di passaggi: energia chimica, termica, meccanica, elettrica, termica, che non può che condurre ad una maggiore caduta di rendimento. I vantaggi della caldaia a gas sono il costo contenuto per chilowattora termico prodotto, la maggior efficienza energetica ed il minore impatto ambientale (legato sia al rendimento superiore, sia alla minore emissione del metano rispetto agli altri idrocarburi) rispetto allo scaldabagno elettrico.

Gli svantaggi sono dovuti all'installazione più complessa, che richiede personale autorizzato, oltreché specializzato, e la necessità di manutenzione periodica a causa dei rischi connessi con l'utilizzo di gas (possibilità di esplosione). Il costo della caldaia a gas è inoltre superiore a quello del boiler elettrico.

Confrontando il fabbisogno energetico necessario per la produzione di acqua calda sanitaria con uno scaldabagno elettrico, con una caldaia a gas, con un sistema caldaia gas/collettore solare termico e con un sistema scaldabagno elettrico/collettore solare termico - ferme restando le ipotesi sopra enunciate ed il quantitativo pro capite di acqua necessaria - si osserva allora che, nel passaggio dalla soluzione con scaldabagno elettrico a quella con caldaia a gas integrata da collettori solari, il consumo energetico pro capite passa da 4,93 a 0,87 kWh. E' il caso più interessante, dunque, che porta ad una riduzione del 82% del consumo energetico, a parità di servizio reso.

Nel confronto tra il sistema basato sull'integrazione di collettore solare con una caldaia a gas e la caldaia stessa, si nota come il consumo passi da 2,18 kWh, per il caso della sola caldaia, a 0,87 kWh, per il sistema integrato. Nel passaggio dal solo scaldabagno elettrico ad uno scaldabagno integrato da collettori solari, il consumo energetico scende da 4,93 a 1,97 kWh[18].

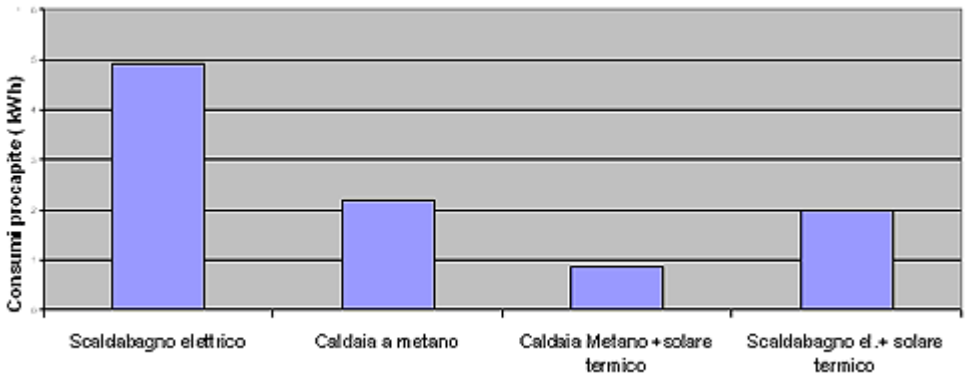


Figura 4: Confronto dei consumi energetici in diverse tipologie di impianti per il riscaldamento di acqua sanitaria. (da Ministero dell'Ambiente)

[18] Dal sito del Ministero dell'Ambiente, cit.

Nella valutazione economica delle diverse ipotesi, il costo dei collettori solari al metro quadro è, in realtà, poco indicativo poiché il vero costo deve essere correlato alla quantità di acqua calda prodotta in un anno. Una famiglia di 4 persone che consuma 50/60 litri di acqua calda a persona ogni giorno, per un totale di 80/100 mila litri annui spende circa 520 euro per riscaldare l'acqua con energia elettrica e 380 euro se la scalda con caldaia a metano. Se l'impianto solare integra la caldaia per un 60/70% il risparmio annuo oscilla tra 260 e 365 euro ed in 5 anni si ammortizza una spesa di 1.300/1800 euro.

Un primo indicatore di confronto tra le diverse tecnologie a disposizione può essere ritenuta la quantità di anidride carbonica mediamente immessa nell'ambiente per produrre, nelle stesse condizioni, acqua calda sanitaria. Nel corso dell'analisi energetica, si è stimato che il fabbisogno di energia elettrica di un'utenza monofamiliare (4 persone) per produrre acqua calda sanitaria con uno scaldabagno elettrico è pari a 7,74 kWh_{el} /giorno. In Italia, per produrre un kWh elettrico, le centrali termoelettriche emettono nell'atmosfera in media 0,58 kg di anidride carbonica (CO_2), uno dei principali gas responsabili dell'effetto serra[19]. Pertanto, lo scaldabagno in esame è indirettamente responsabile dell'immissione nell'atmosfera di:

0,58 kg CO_2/kWh_{el} · 7,74 kWh_{el}/giorno = 4,5 kg CO_2/giorno

Questo significa che, per la sola acqua calda sanitaria, utilizzando lo scaldabagno elettrico, una famiglia immette quotidianamente nell'ambiente 4,5 kg CO_2 (con una media pro capite di 1,125 kgCO_2/giorno).

Nel caso di una caldaia a metano, nella combustione si formano 0,25 kg CO_2 per ogni kWh_t; una famiglia di 4 persone dà quindi origine alla seguente produzione giornaliera di anidride carbonica:

0,25 kg CO_2 · 6.97 kWh_t = 1,74 kg CO_2/giorno

con una media pro capite di 0,435 kgCO_2/giorno.

[19] ENEA, Rapporto energia e ambiente 2000, ENEA, Roma, 2001.

Nel caso di impianti ibridi solare/gas, ossia impianti solari posti ad integrazione della caldaia a gas, assicurando lo stesso comfort durante tutto l'arco dell'anno, è possibile risparmiare, alle nostre latitudini, il 60% del consumo di gas: la stessa famiglia produrrà, allora, giornalmente 0,69 kg CO_2, con una media pro capite di 0,174 kgCO_2/giorno.
La figura seguente riepiloga le emissioni di anidride carbonica generate nei diversi casi analizzati. La riduzione delle emissioni di CO_2 ottenuta con il sistema ibrido è notevole soprattutto rispetto al primo scenario: si passa da 1,125 kg di CO_2 emessi a 0,22 kg di CO_2 , con una riduzione percentuale del 80%. Tra il caso di impiego della caldaia a metano e quello di integrazione di questa con i collettori si verifica una riduzione, in valore assoluto, di 0,33 kg di CO_2 pro capite, mentre lo scaldabagno elettrico, se impiegato con il solare, porta ad una riduzione di 0,675 kg di CO_2.

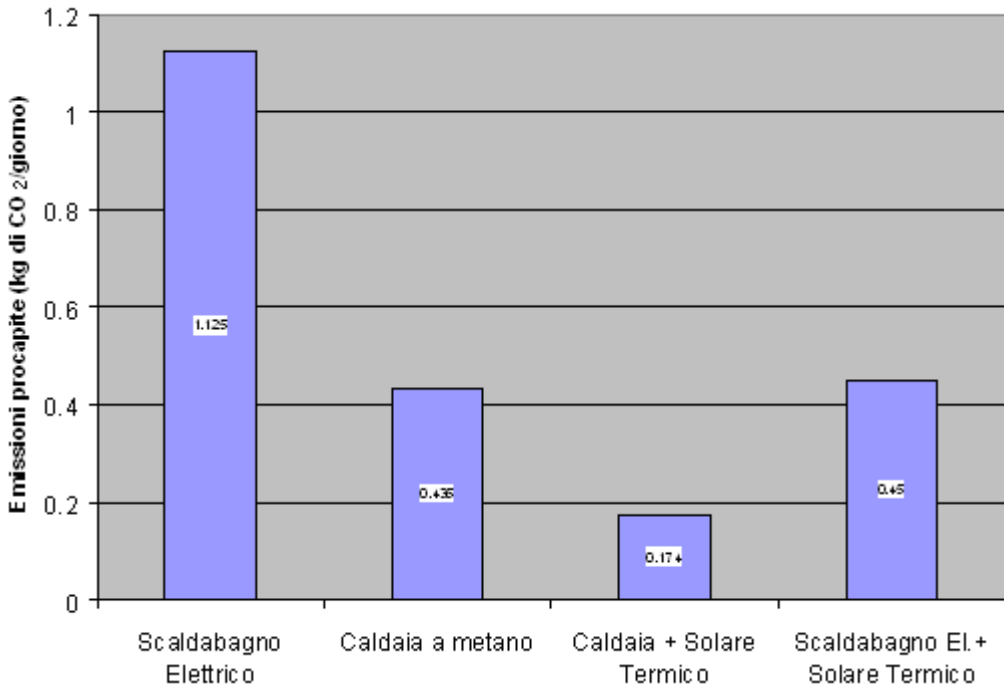


Figura 5: Confronto sulle emissioni di anidride carbonica causate dalle diverse fonti energetiche. (da: Ministero dell'Ambiente)

CONVERSIONE IN ENERGIA ELETTRICA

Qualunque radiazione elettromagnetica è composta di fotoni, particelle elementari elettricamente neutre dalla doppia natura materiale e ondulatoria: a seconda della lunghezza d'onda della radiazione si ottengono onde radio (λ dell'ordine di parecchi metri), onde televisive, microonde, luce, ultravioletti, raggi X e raggi γ (λ dell'ordine dei raggi atomici).

La tecnologia fotovoltaica (FV) consente di trasformare direttamente l'energia associata alla radiazione solare in energia elettrica. Essa sfrutta il cosiddetto **effetto fotovoltaico** che è basato sulle proprietà di alcuni materiali semiconduttori (fra cui il silicio, elemento molto diffuso in natura) che, opportunamente trattati ed interfacciati, sono in grado di generare elettricità se colpiti dalla radiazione solare, senza quindi l'uso di alcun combustibile.

Il dispositivo più elementare capace di operare una tale conversione è la cella fotovoltaica: un modulo fotovoltaico tipo, formato da 36 celle, ha una superficie di circa mezzo metro quadrato ed eroga, in condizioni ottimali, circa 50W. Un metro quadrato di moduli produce una energia media giornaliera tra 0,4 e 0,6 kWh, in funzione dell'efficienza di conversione e dell'intensità della radiazione solare. Un insieme di moduli, connessi elettricamente tra loro, costituisce il campo FV che, insieme ad altri componenti elettrici ed elettronici, consente di realizzare i sistemi FV.

Il sistema FV, nel suo insieme, capta e trasforma l'energia solare disponibile e la rende utilizzabile per l'utenza sotto forma di energia elettrica. La sua struttura può essere molto varia a seconda del tipo di applicazione. Una prima distinzione può essere fatta tra sistemi isolati *(stand-alon*e) e sistemi collegati alla rete *(grid connecte*d). Nei sistemi isolati, in cui la sola energia è quella prodotta dal FV, occorre prevedere un sistema di accumulo (in genere costituito da batterie simili a quelle utilizzate per le auto e dal relativo apparecchio di controllo e regolazione della carica) che è reso necessario dal

fatto che il generatore FV può fornire energia solo nelle ore diurne, mentre spesso la richiesta maggiore si ha durante le ore serali (illuminazione o apparecchi radio-TV). E' opportuno prevedere quindi un dimensionamento del campo FV in grado di permettere, durante le ore di insolazione, sia l'alimentazione del carico, sia la ricarica delle batterie di accumulo. Poiché l'energia prodotta dal generatore FV è sotto forma di corrente continua (CC), qualora si debbano alimentare apparecchi che funzionino con corrente alternata (CA), è necessario introdurre nel sistema un dispositivo elettronico, detto inverter, che provvede alla conversione da CC a CA. Nei sistemi collegati alla rete l'inverter è sempre presente mentre, al contrario degli impianti *stand-alon*e, non è previsto il sistema di accumulo in quanto l'energia prodotta durante le ore di insolazione viene immessa nella rete; viceversa, nelle ore notturne il carico locale viene alimentato dalla rete: un meter provvede a scalare la differenza dal contatore.

Un sistema di questo tipo è, sotto il punto di vista della continuità di servizio, più affidabile di un sistema isolato. Quest'ultimo può tuttavia essere integrato con una fonte tradizionale, come, ad esempio, il diesel (sistema ibrido diesel-FV), o innovativa come le celle a combustibile (ciclo dell'idrogeno da elettrolisi).

I sistemi FV offrono grandi vantaggi ambientali, in quanto non producono emissioni chimiche, termiche o acustiche. Essi, inoltre, non hanno parti in movimento e sono, quindi, affidabili e a bassa manutenzione.

Un piccolo sistema isolato FV ha il vantaggio di produrre energia elettrica esattamente dove serve e nella quantità vicina alla effettiva domanda. Gli impianti isolati vengono utilizzati per diverse applicazioni sia nel settore residenziale che in quello industriale o agricolo-turistico. Un impianto FV inferiore a 1 kW può, ad esempio, far funzionare gli apparecchi elettrici (lampade, televisore, frigorifero) di una normale abitazione lontana dalla rete.

In Italia esistono oltre 9.000 impianti FV[20] per l'elettrificazione (illuminazione, alimentazione elettrodomestici, pompaggio dell'acqua) di case rurali isolate e rifugi di montagna. Un generatore FV, con una gamma di potenze molto variabile, è in grado di alimentare un sistema di pompaggio: il vantaggio dell'utilizzo di una pompa solare sta nel fatto che in genere la massima richiesta d'acqua coincide con il periodo dell'anno di maggiore insolazione; inoltre è semplice creare riserve idriche, in appositi bacini, che possono così evitare costosi sistemi di accumulo elettrico (sistema ibrido fotovoltaico-idroelettrico).

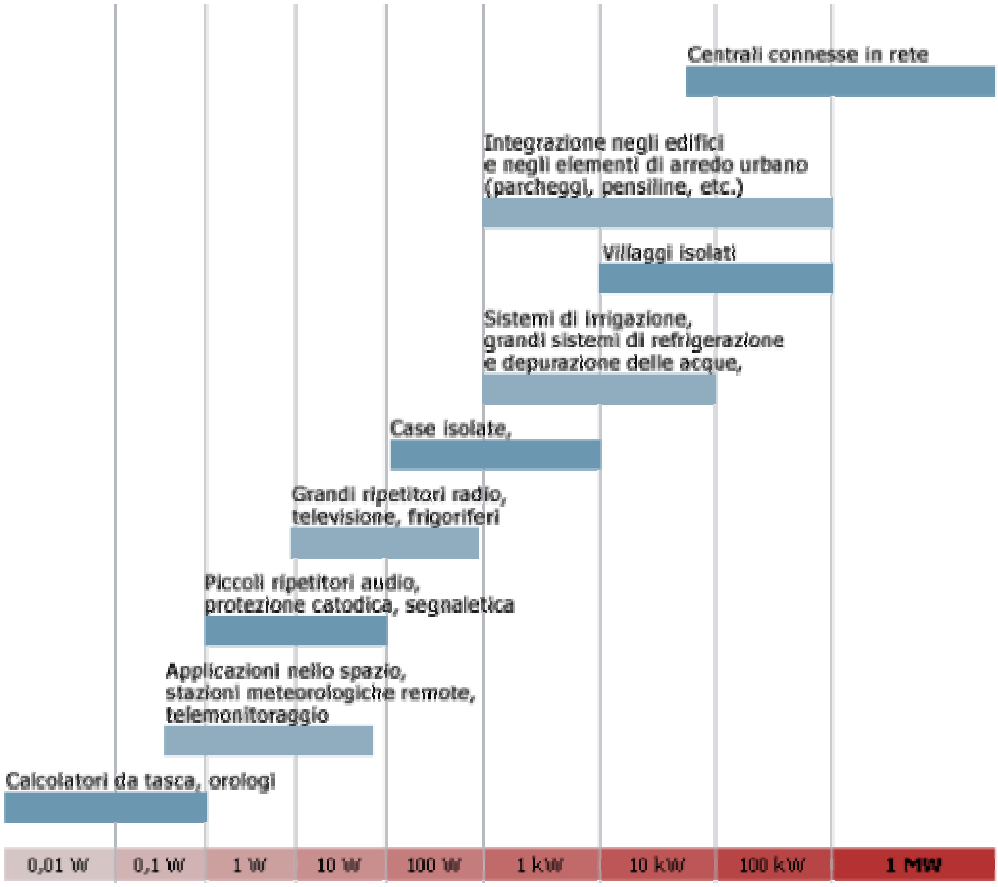


Figura 6: Principali applicazioni dei dispositivi fotovoltaici classificate secondo la potenza elettrica. (da: sito del Ministero dell'Ambiente.)

[20] Ilsoleatrecentosessantagradi, ISES Italia, anno VIII, n°1 ,gen. 2001.

L'illuminazione stradale di aree non collegate alla rete elettrica è un'altra applicazione che può risultare economicamente vantaggiosa. Una semplice applicazione è la ricarica delle batterie di servizio per auto, caravan e imbarcazioni in aree di campeggio o porti turistici.

Tra le applicazione definite industriali, si può annoverare, come una delle applicazioni di maggior successo e affidabilità del FV, l'alimentazione di stazioni per le telecomunicazioni (ponti radio per telefonia e ripetitori TV). Il FV si è confermato un'ottima soluzione anche per sistemi di segnalazione del traffico ferroviario, aereo e marittimo e per le stazioni di monitoraggio ambientale, quasi sempre situate in località isolate. Altri utilizzi del FV sono: sistemi di refrigerazione, soprattutto per vaccini, in centri medici rurali, impianti di protezione catodica (per tubazioni collocate in terreni aggressivi) e impianti di dissalazione.

Il fotovoltaico appare, almeno nel lungo periodo, tra le più promettenti tecnologie rinnovabili in grado di produrre energia elettrica su grande scala, soprattutto in Italia dove i livelli di insolazione (e la dipendenza dall'estero per gli approvvigionamenti di combustibili) sono elevati.

Gli esperti concordano sul fatto che la sorte "finale" del fotovoltaico (e in generale delle rinnovabili) si giocherà su tempi medio-lunghi in tutto il mondo (ma particolarmente nei paesi sviluppati che sono i più energivori) su uno scacchiere che dovrà necessariamente considerare la necessità di salvaguardia dell'ambiente insieme al progressivo impoverimento delle risorse di combustibili fossili. Dal punto di vista della tecnologia, è opinione diffusa che nei prossimi anni, a livello di produzione industriale, continuerà a regnare la tecnologia del silicio cristallino. Pertanto gli sforzi di ricerca e sviluppo su di essa continuano al fine di facilitare la sempre maggiore diffusione del FV consentendo allo stesso tempo la redditività delle industrie. Un contributo essenziale al raggiungimento della economicità dell'energia da FV deve essere dato dalle azioni sui componenti non FV del sistema (il cosiddetto BOS – Balance of System).

Con la denominazione di "moduli fotovoltaici" si indicano quelle superfici, composte da più "celle fotovoltaiche", destinate a raccogliere la radiazione solare ed a trasformarne parte dell'energia in energia elettrica; con "pannello fotovoltaico" si usava indicare l'insieme di un numero variabile di moduli fotovoltaici: sebbene siano usati comunemente come sinonimi, è bene riservare la denominazione "pannello solare" agli elementi atti a riscaldare fluidi con energia solare.

Per le applicazioni residenziali del solare fotovoltaico valgono le stesse considerazioni viste nel precedente paragrafo per il solare termico: ci limitiamo a trattare dei sistemi a pannelli fissi per il miglior rapporto rendimento-costi rispetto a quelli ad inseguimento; quelli a concentrazione sono rari, costosi ed antiestetici soprattutto nel fotovoltaico.

La "foto di gruppo" dei sistemi fotovoltaici che mi accingo a scattare in questo paragrafo "ingiallisce" molto più velocemente di quella dei sistemi per il solare termico, che hanno una tradizione di ricerca più ampia e meno soggetta alle accelerazioni di un campo di frontiera come la fisica dei semiconduttori (e, quindi, il fotovoltaico): il rischio comunque non può essere di sopravvalutare le possibilità di future applicazioni del fotovoltaico ma semmai di sottovalutarle.

L'effetto fotovoltaico è noto fin dal 1839, dalle esperienze del fisico francese Bacquerel[21], ma solo più di cent'anni dopo il settore ha smesso di essere una semplice curiosità scientifica, grazie alle esigenze dell'industria aerospaziale, che a metà anni cinquanta aveva il problema di dare una fonte di energia illimitata ai satelliti artificiali di prima generazione.

Il fenomeno si osserva con l'interazione di un fotone con un elettrone legato *(di valenz*a) di un materiale solido: se il fotone ha energia sufficiente a portare l'elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione, si crea una coppia

[21] J.Perlin, op. cit.

elettrone-lacuna che, in assenza di particolari caratteristiche del solido, si ricombina cedendo calore.

L'energia minima richiesta per il passaggio di banda è detta energia di gap: se il fotone ha meno energia, questa si disperde nel solido come calore, se ne ha in più è la differenza che viene dissipata termicamente.

Lo sfruttamento dell'effetto fotovoltaico è diventato possibile da quando si è scoperto che, oltre ai materiali conduttori ed isolanti, esistono dei materiali "semiconduttori", che presentano caratteristiche intermedie, e che possono acquisire una naturale tendenza ad attrarre o fornire elettroni tramite "drogaggio" ad alta temperatura con vapori di vari elementi (solitamente del III o del V gruppo).

Il materiale più comunemente impiegato per le celle fotovoltaiche, per abbondanza (è il più abbondante della crosta terrestre) ed economicità (è utilizzato lo scarto dell'industria elettronica) è il silicio (Si), elemento del IV gruppo della tavola periodica.

La lamina di silicio cristallino non è in grado di conservare di per sé una differenza di potenziale fra le sue facce: come accennato, il semiconduttore intrinseco (qual è il silicio cristallino puro) viene "drogato" e diventa semiconduttore estrinseco: è detto di tipo n (negativo) se drogato con donatori di elettroni (elementi del V gruppo, solitamente fosforo), di tipo p (positivo) se viene invece addizionato di accettori di elettroni (elementi del III gruppo, solitamente boro).

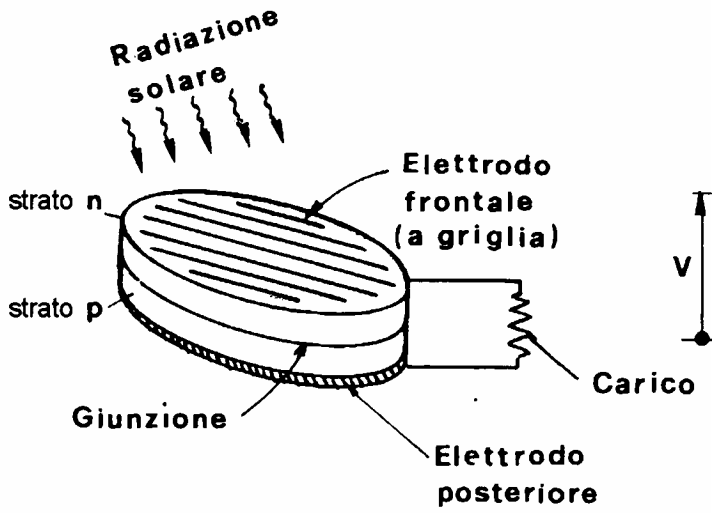


Figura 7: Schema di una cella fotovoltaica (spessori non in scala)

Costruendo una continuità cristallina tra semiconduttori p ed n si realizza una giunzione n-p: operativamente, si accosta una faccia del p (drogata però con una bassa concentrazione di donatori e non di accettori) ad una faccia di n che viene drogata con una bassa concentrazione di accettori. Il fosforo di n ha cinque elettroni liberi, il boro di p ne ha tre: ne consegue che gli elettroni in eccesso di n vanno ad occupare le vacanze di p, generando una barriera di potenziale lungo la giunzione: in questa situazione, la radiazione incidente libera elettroni di n e di p, i quali però possono attraversare la giunzione solo in direzione di n, creando così una differenza di potenziale fra le facce della cella. L'elettrodo superiore è una griglia metallica (generalmente argento), per minimizzare l'ombreggiatura dei semiconduttori.

Lo spessore di questi "wafer" n-p è contenuto dall'esigenza di far arrivare radiazione anche alla faccia inferiore (che a volte è quindi un po' più spessa del semiconduttore superiore) e dalla lunghezza di diffusione, che è il percorso medio di un elettrone durante la sua vita media (tempo fra il salto di banda e la ricombinazione con una lacuna).

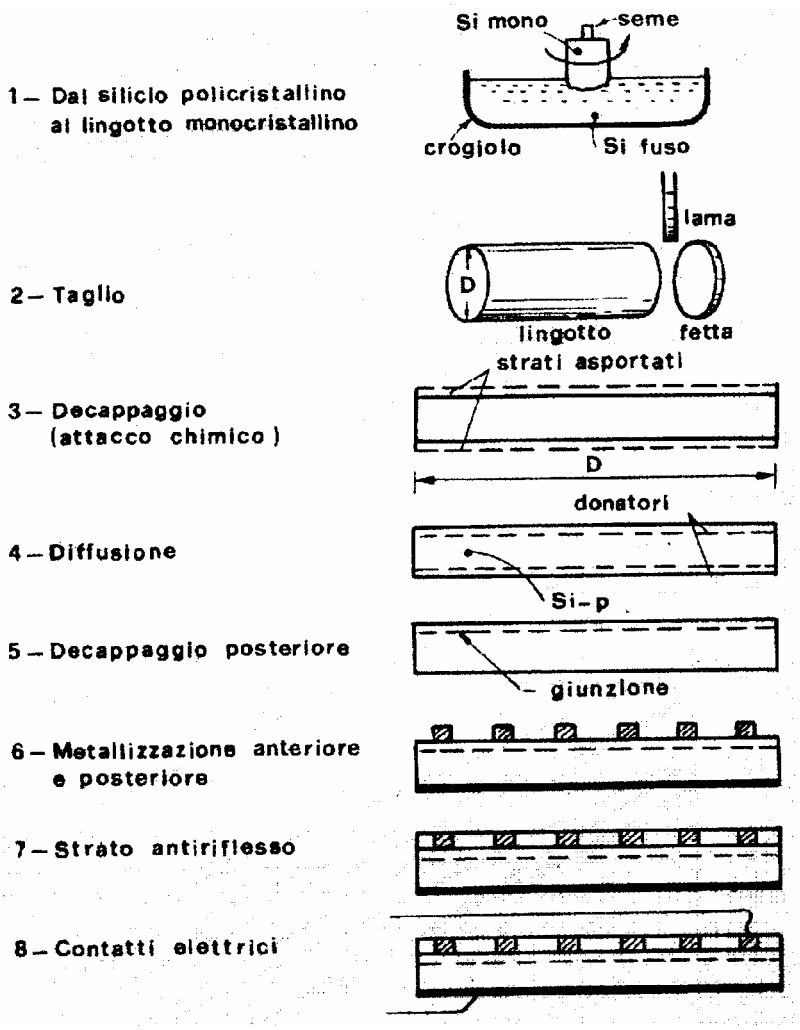


Figura 8: Procedura di fabbricazione di una cella al silicio monocristallino

L'efficienza delle celle fotovoltaiche ad oggi è intorno al 18-20% per le celle al silicio monocristallino, al 17% per il policristallino ed intorno al 10-12% per il silicio amorfo[22], che fa parte della tecnologia delle *thin film cells* o celle a film sottile[23].

[22] L'ENEA di Portici ha realizzato il record europeo con il 9,4 di efficienza.

[23] Lo svantaggio delle celle al silicio amorfo è solo apparente, in quanto occorre molta meno energia per produrle (sono quindi più economiche) e sono più versatili di quelle al silicio cristallino; inoltre sono meno fragili, meno sensibili al surriscaldamento e l'efficienza degrada meno e meno velocemente. I dati sono tratti da B.J. Huang, T.H. Lin, W.C. Hung,F.S. Sun, Performance Evaluation of Solar Photovoltaic System, Solar Enegy, vol 70,n°5, 2001, pp. 443-448.

E’ però importante comprendere quali siano i fattori che intaccano l'efficienza della cella nel trasformare la radiazione incidente in corrente elettrica. Essi sono: i fotoni poco energetici, la dissipazione dell'eccesso di energia dei fotoni sufficientemente energetici, la ricombinazione della coppia elettrone - lacuna prima dell'attraversamento della giunzione (a causa di resistenze più o meno grandi dovute alle impurità del silicio), perdite alla giunzione, altre perdite sono dovute al surriscaldamento o alla riflessione.

Da queste poche considerazioni emergono i componenti cruciali per il rendimento delle celle fotovoltaiche:

- il materiale coprente deve essere il più trasparente possibile, ed allo stesso tempo non riflettente. Sembra comunque che i migliori materiali antiriflettenti non riescano a ridurre tale dispersione a valori inferiori al 5%.
- la giunzione tra il semiconduttore e il circuito esterno deve essere la più perfetta possibile per raccogliere la maggior parte di energia disponibile. Infatti la resistenza del semiconduttore, attraverso il quale migrano le cariche elettriche generate dall’effetto fotovoltaico per raggiungere i contatti di giunzione, pregiudica ulteriormente la resa del dispositivo.
- poiché non esistono ottimi conduttori trasparenti, il contatto superiore è realizzato con dei criteri di compromesso tra l’esigenza di far passare la luce e quella di minimizzare la resistenza elettrica al passaggio delle cariche. Per questo la cella è attraversata in superficie da sottilissimi fili (finghers) che però occupano circa il 7-10% della superficie riducendo così di pari ammontare il rendimento totale. Una recente innovazione, l’immersione dei contatti nel silicio, ha permesso che le celle garantiscano un 20-30% in più di output, senza incidere sul costo dei processi di produzione.[24]

[24] A. Bruton. A Study of the Manfacture of crystalline silicon PV Modules. Conference record, 14th EuropeanPV Solar Energy Conference, Barcelona, 1997.

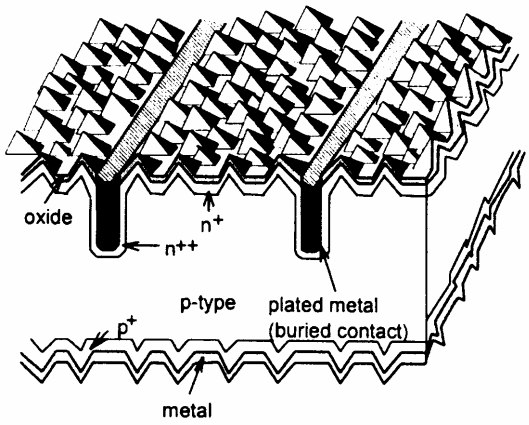


Figura 9: Cella FV con contatti immersi nel silicio (buried conctact).

- il silicio impiegato deve essere il più puro possibile, con una distribuzione il più possibile ideale di impurità da drogaggio, e preferibilmente con gli atomi orientati tutti nella stessa direzione, per evitare che gli elettroni liberati cadano nelle "trappole" delle imperfezioni "cristallografiche"[25], non riuscendo quindi a raggiungere il circuito esterno.

Le procedure industriali per la produzione di celle fotovoltaiche sono ben collaudate per le celle al silicio monocristallino e policristallino, in costante evoluzione per il silicio amorfo e le celle a film sottile in genere. I punti di forza delle due tecnologie sono rispettivamente l'elevato rendimento e l'economia. Tutto però lascia pensare che le celle a film sottile (ed in particolare al α-Si) colmeranno presto gran parte dello svantaggio in termini di Wp/m^2 diventando nel contempo più economiche. Anche il mercato del fotovoltaico risponde bene allo sforzo tecnologico degli Stati Uniti e soprattutto del Giappone che, come l'Italia, è un Paese fortemente dipendente dall'energia che altri gli vendono: per l'International Solar Energy Society la produzione di celle e moduli è passata dai 69,44 MW del 1994 ai 390,5 MW del 2001.

[25] Queste si comportano come vere e proprie trappole di ricombinazione per le lacune e gli elettroni e come percorsi altamente conduttivi che agiscono come dei cortocuiti interni.

Paese	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
USA	25.64	34.75	38.85	51	53.7	60.8	74.97	100.3
Giappone	16.50	16.40	21.20	35.0	49.0	80.0	128.6	171.22
Europa	21.70	20.10	18.8	30.4	33.5	40.0	60.66	86.38
Resto del mondo	5.6	6.35	9.75	9.4	18.7	20.5	23.42	32.6
TOTALE	69.44	77.6	88.6	125.8	154.9	201.3	287.65	390.5

Tabella 2: Evoluzione della produzione mondiale di celle/moduli fotovoltaici Valori espressi in MW. (da: Fotovoltaici, n° 3, 2002.)

Tecnologia	USA	GIAPPONE	EUROPA	RESTO DEL MONDO	TOTALE	%
Silicio monocristallino	63.30	24.88	34.38	14.22	136.78	35.02
Policristallino	18.53	116.12	35.80	14.40	184.85	47.33
Mono e poli TOTALE					321.63	82.35
Silicio amorfo	10.66	11.02	8.0	4.0	33.68	8.62
Nastro di silicio	5.4	-	8.2	-	13.6	3.48
Telluriuro di cadmio	0.33	1.2	-	-	1.53	0.39
Diseleniuro di indio e rame	0.7	-	-	-	0.7	0.18
Silicio amorfo su Cz	-	18	-	-	18	4.6
Altri	1.4	-	-	-	1.4	0.36
TOTALE	100.32	171.22	86.38	32.62	390.54	100

Tabella 3: Produzione mondiale di celle/moduli nel 2001 per tecnologia. Valori espressi in MW. (da: Fotovoltaici, n° 3, 2002.)

La maggior parte delle celle fotovoltaiche sono oggi realizzate in silicio (82,35% della produzione mondiale), che viene ricavato fondendo in un forno elettrico (ad una temperatura superiore ai 1000°C) la silice, sostanza a base di sabbia, molto abbondante in natura. Si ottiene così un silicio di purezza del 98% definito di grado metallurgico.

Ulteriori lavorazioni, al momento molto costose, sono però necessarie per ottenere livelli elevati di conversione elettrica poiché è necessaria una purezza molto elevata (un atomo estraneo su 100 milioni di atomi di silicio).
Dal silicio di grado metallurgico, mediante trattamento con acido cloridrico e distillazione frazionata, si ottiene un composto gassoso purissimo, il triclorosilano ($SiHCl_3$) che, a sua volta, può esser decomposto termicamente in un forno elettrico, ottenendo il materiale di grado elettronico.
Una volta raggiunto il grado di purezza voluto nel silicio, questo deve essere ridotto in forma cristallina, idonea alla realizzazione dell'effetto fotovoltaico.
Attualmente l'industria fotovoltaica utilizza gli scarti dell'industria elettronica di silicio monocristallino, il quale viene ottenuto attraverso un processo che si basa sull'immersione di un seme cristallino in un crogiolo contenente silicio fuso puro, ove viene fatto ruotare. Si ottengono in tal modo lingotti di diametro fino a 10 cm e del peso di vari kg: gli atomi di silicio si solidificano secondo un modello cubico e seguono la struttura del seme cristallino immerso.
Questo processo di cristallizzazione è tuttavia lento (i lingotti vengono tirati a velocità di circa 10 cm/h) ed è molto dispendioso in termini energetici.
E' interessante il confronto fra la produzione e il funzionamento delle celle al silicio cristallino ed amorfo. Le celle al silicio cristallino hanno una produzione consolidata ma non per questo economica, sia in termini di materiale che di tempo e di energia: l'accrescimento dei cristalli si svolge ben oltre i 1000 °C, e il drogaggio avviene per diffusione di gas metallici a varie centinaia di gradi, la cella finale viene spesso sfaccettata per ottenere pannelli con pochi vuoti fra una cella e l'altra (e migliorare il rapporto Wp/m^2): gli sprechi sono evidenti.
Le celle al silicio amorfo sono meno efficienti (sotto i 50 °C), ma necessitano di meno energia per essere prodotte, non hanno bisogno della griglia-elettrodo superiore, sono più sottili e meno fragili delle prime (non hanno bisogno di vetro); la nuova tecnica della *triple-junction* permette di raccogliere con la

massima efficienza la radiazione di tre gamme d'onda diverse. Tutte queste caratteristiche, unite all'insensibilità alla temperatura ed all'ombreggiatura minima, ne fanno le candidate ideali per la conversione fotovoltaica nel prossimo secolo.

Tuttavia un inconveniente comune a tutti i processi basati sui lingotti è rappresentato dalle perdite di materiale dovute al taglio dei lingotti in wafers. Si stanno studiando dei metodi di produzione di silicio cristallino a nastro continuo, ma sono ancora nella fase di sviluppo.
Il silicio di grado elettronico, dal quale si parte per la cristallizzazione con i metodi sopra elencati, possiede gradi di purezza molto superiore alla reali necessità delle applicazioni FV. Si stanno quindi studiando processi produttivi per arrivare alla produzione di silicio di grado solare, con una significativa minore purezza, che tuttavia non pregiudica significativamente la resa dei moduli , abbassando al contempo di molto il costo di produzione della materia prima ed il suo contenuto energetico.
Un ulteriore vantaggio è dato dal fatto che il silicio di grado solare si presenta come la naturale evoluzione della tecnologia attuale e non richiede quindi radicali trasformazioni dei processi e delle linee di produzione oggi in uso. In questo senso si muovono gli sforzi per superare le limitazioni dovute alla disponibilità di materiale di scarto dell'industria elettronica, considerata insufficiente ai futuri sviluppi della industria fotovoltaica.
Vi sono inoltre dei processi di cristallizzazione di materiale policristallino che oltre ad essere sensibilmente meno costosi, permettono la produzione di lingotti a forma di parallelepipedo da cui è facile ottenere fette quadrate, preferite perché consentono una migliore utilizzazione della superficie del modulo FV.

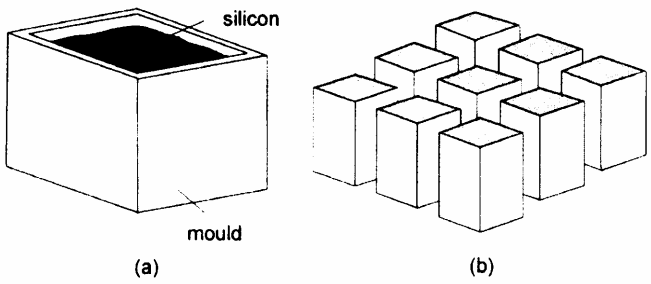


Figura 10: Solidificazione direzionale di silicio policristallino (a) e successivo taglio in lingotti correttamente dimensionati (b).

I lingotti ottenuti dal processo di fusione e purificazione vengono successivamente tagliati, con fili diamantati, in wafers.

Questo stadio della produzione è delicato: avvengono infatti grosse perdite di materiale e una notevole lievitazione dei costi; è però anche uno dei punti chiave su cui la ricerca tecnologica sta ottenendo notevoli risultati[26] .

Una decina di anni or sono si usavano wafers di 400-500 μm di spessore, tagliati con seghe a nastro di circa 300 μm; il risultato era l'utilizzo di 700-800 μm di lingotto di silicio per singolo wafer prodotto. Recenti studi hanno permesso di ottenere wafers di 350 μm di spessore, tagliati con fili (wire) di 150 μm, dando così 1,5 – 2 volte di più di numero di wafers per lingotto.

Esiste però un trade-off : wafers più sottili porteranno alla riduzione dei costi solo se il rendimento rimarrà lo stesso. Sono stati prodotti wafers di spessore intorno ai 100 μm e sono sorte difficoltà nel "maneggiarli" (sono estremamente fragili) e nel fatto che simili spessori non assorbono completamente la radiazione solare, perdendo dunque di efficienza. Lo spessore ottimo è considerato oggi essere quello di circa di circa 200 μm.

[26] M.A. Green, Photovoltaics: Technology Overview, Energy Policy, vol. 28, issue 14.

Molte sono le direzioni intraprese dagli studi sui materiali e sulle tecniche di produzione con il fine di portare ad una necessaria riduzione dei costi, ne presento alcune:

- Sostituzione del silicio di grado elettronico con silicio di grado solare: le applicazioni solari tollerano un livello di impurità anche 10 volte superiore a quelle del silicio elettronico, con perdite di resa dell'ordine del 5-10%, ma con riduzioni di costo notevoli.
- Il silicio policristallino: l'uso di silicio policristallino con grani macroscopici e molto allungati in direzione perpendicolare al piano del wafer, benché porti ad una diminuzione nell'efficienza delle celle può essere giustificata da una notevole diminuzione dei costi. A partire dagli anni 80 del secolo scorso, si è avuta una progressiva sostituzione del silicio monocristallino con quello policristallino, attualmente usato dalla maggioranza dei produttori mondiali.
- Produzione continua di celle di silicio in nastro, invece che in lingotti: per evitare la costosa fase di segatura del lingotto, è stata sviluppata una tecnica per produrre direttamente un nastro di silicio policristallino dello spessore di 150 μm circa. Le celle solari cosi ottenute hanno un rendimento del 11% circa[27].
- Produzione di celle a concentrazione : una ulteriore strategia per la riduzione dei costi dei sistemi FV, è la tecnica della concentrazione con celle a rendimento alto (silicio) o altissimo (arseniuro di gallio e celle tandem). I concentratori sono apparecchi riflettori o rifrattori (lenti di Fresnel) che inseguono il sole su uno o due assi e che permettono di incrementare la quota parte di radiazione diretta incidente sulla cella di un fattore che può variare da qualche unità a diverse migliaia di unità. Benché questa possa essere una soluzione valida per celle costose, fa nascere una serie di altri problemi relativi al surriscaldamento. In linea

[27] M.A. Green, Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice, Prentice Hall, New Jersey, 1995.

teorica si potrebbero raffreddare le celle con un fluido vettore che nel contempo azioni un meccanismo di cogenerazione da vapore. Gli inconvenienti sono però dovuti al fatto che tali sistemi utilizzano solo la componente diretta della radiazione solare, e non sono quindi adatte a zone temperate con climi variabili. Inoltre insorge la necessità di mantenere i pannelli orientati verso il sole con un sistema di puntamento ad inseguimento del disco solare, che fa aumentare molto i costi delle infrastrutture e di manutenzione (causa la presenza di meccanismi meccanici). Sembra dunque che al momento l'unico pregio dei sistemi a concentrazione sia quello di limitare, a parità di energia erogata, il numero delle celle, e quindi di ridurre significativamente ciò che viene chiamato l"energy payback time".

- Altri materiali, diversi dal silicio mono e poli cristallino, permettono di produrre celle a film sottile. Tale tecnologia comporta infatti un consumo di materiale molto limitato visto che le celle prodotte hanno uno spessore ridottissimo (100-1000 volte meno spesse di un wafer di silicio: meno di un micron[28]). Un altro aspetto positivo è che l'unità di produzione, invece di essere un – relativamente piccolo – wafer di silicio, diventa molto ampia, ad esempio larga quanto una lastra di vetro maneggevole. Entrambi i fattori portano a riduzione dei prezzi. La contropartita è però un basso livello di rendimento di conversione. Alcuni esempi di materiali usati nella produzione di celle a film sottili:
- Il silicio amorfo (α-Si): è probabile che la vera svolta si avrà con l'introduzione del silicio amorfo. Il vantaggio è che tale materiale assorbe, a parità di spessore, molto più efficientemente la radiazione incidente, diminuendo quindi anche la quantità di materiale necessario per la fabbricazione delle celle. Inoltre il silicio amorfo può essere depositato su una grande quantità di substrati differenti ed in qualsiasi

[28]M.A. Green, Photovoltaics: Technology Overview, Energy Policy, vol. 28, issue 14.

forma. La produzione di celle di α-Si avviene depositando su un supporto un gas, silano (SiH_4), a bassa temperatura. Così facendo l'idrogeno viene incorporato nella cella in grande quantità (circa 10%) e questo permette di avere una migliore qualità del materiale. Vi sono però ancora molti problemi da risolvere, quali ad esempio la perdita di efficienza della cella quando è esposta a una forte luce solare – può sembrare un controsenso, ma la perdita di efficacia è causata dal comportamento dell'idrogeno esposto a forte luce diretta – e la sua bassa stabilità nel tempo, qualità queste che ne limitano ancora molto l'uso. Al momento tale produzione viene usata prevalentemente nella componentistica di piccoli prodotti: calcolatrici, orologi e altre applicazioni elettroniche.

- Uso di semiconduttori composti policristalini: l'Arseniuro di Gallio ha rendimenti teorici molto superiori al 30% e può esser utilizzato in celle a multigiunzione. Si sono ottenute rese del 24% da solo e del 37% in celle tandem. Tale materiale infatti si presta bene ad applicazioni in celle a concentrazione grazie alla sua alta resistenza alle radiazioni ed alla sua notevole stabilità di efficienza al variare della temperatura Tuttavia gli altissimi costi di produzione lo rendono utilizzabile solo nelle applicazioni spaziali. Altri materiali sono il diseleniuro di indio e rame , il telluriuro di cadmio (CdTe) e il solfuro di cadmio. Il processo produttivo si basa sulla disposizione dei vari strati sotto vuoto e su successivi trattamenti termici. Il materiale ottenuto può essere utilizzato sia per la produzione di celle a giunzione singola sia , con un altro materiale opportuno come il silicio amorfo, per celle a giunzione multipla. I vantaggi di questi materiali sono gli stessi del silicio amorfo, ma non vi sono i problemi di stabilità caratteristici di quest'ultimo. Uno dei principali problemi legati a questa tecnologia è la tossicità del materiale usato (il cadmio è un noto cancerogeno), anche se si tratta di quantità minime. Ciò significa, in un ottica di Life Cycle Analysis,

rilevanti costi di smaltimento. Lo sviluppo di queste tecnologie è essenzialmente limitato ad attività di laboratorio.

- Un approccio decisamente differente, ma sempre fondato sul principio delle celle a film sottile, è basato sull'uso di coloranti organici a base di rutenio. Le molecole del colorante sono rivestite di particelle di biossido di titanio e immerse in un elettrolita. Mediante un processo che ricorda la fotosintesi, la luce assorbita dal colore eccita un elettrone, nel biossido di titanio, che chiude il circuito attraverso la carica esterna e l'elettrolita. E' interessante notare che il colore assorbe solo una banda di energia fotonica, piuttosto che tutti i fotoni caratterizzati da energia superiore alla banda energetica di gap, come succede per le celle normali. Ciò consente di ipotizzare la possibilità di apparecchiature come finestre trasparenti che convertono i raggi infrarossi pur lasciando passare la luce.

Un'ultima nota sui materiali: il limite teorico termodinamico della conversione della luce del sole in elettricità è pari a circa 93%. Sarà possibile per le celle solari giungere più vicini a questo limite? La risposta sembra essere positiva, sebbene nuove idee siano necessarie per rendere ciò una realtà.

Le celle prodotte, aggregate per formare i moduli fotovoltaici, possono essere collegate in serie o in parallelo per ottenere il voltaggio desiderato; all'uscita delle serie di celle o dei moduli vengono posti dei diodi di *by-pass* per evitare che le serie di celle ombreggiate (o l'intero sistema nelle ore notturne) diventino dei carichi per le altre o per gli accumulatori. Per celle identiche connesse in serie i voltaggi sono additivi, per celle connesse in parallelo sono additive le correnti: nella figura 11 sono confrontate le curve caratteristiche di un modulo (A), di due moduli connessi in serie (B), in parallelo (C) e di due coppie di moduli connessi in serie-parallelo.

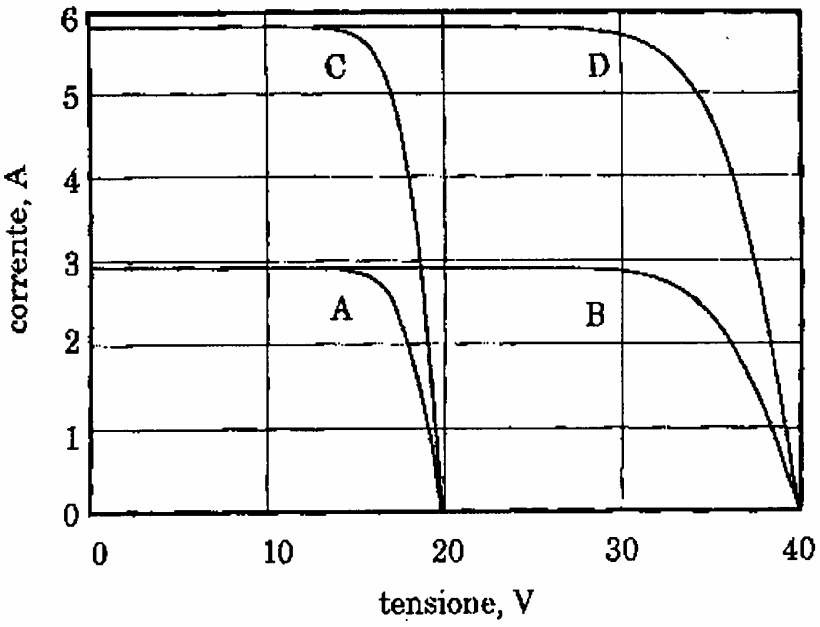


Figura 11: Curve caratteristiche per moduli variamente connessi.

Anche nei moduli che vengono connessi esistono fattori che influenzano la resa energetica dei pannelli fotovoltaici, oltre alla radiazione incidente, sono: l'errore nella serie dei moduli, la resistenza dei cavi, la messa a terra dei moduli, i diodi delle serie, la temperatura del modulo, l'ombreggiatura parziale; questi ultimi due fattori sono più importanti per i moduli al silicio cristallino. A volte il problema del surriscaldamento (e relativo calo dell'efficienza) viene risolto brillantemente asportando l'aria calda da un intercapedine retrostante i moduli con ventole o per circolazione naturale, ed inviandola ad ambienti da riscaldare o ad uno scambiatore: si realizza così un sistema misto termico-fotovoltaico dai rendimenti decisamente interessanti.

I pannelli FV concorrono oggi alla determinazione del prezzo del sistema nella misura di circa il 50%. La restante parte è costituita dal BOS: infrastrutture, allacciamenti alla rete, sistema di condizionamento dell'energia prodotta e sistema di accumulo.

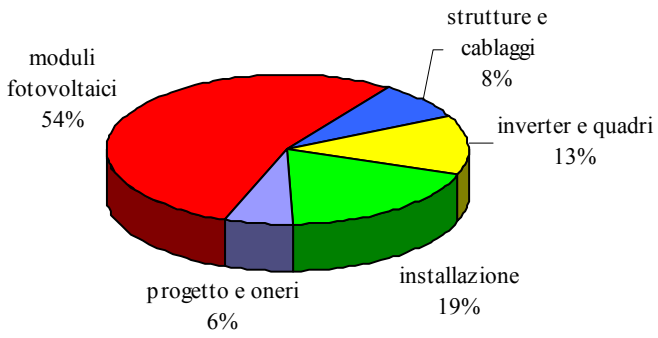


Figura 12: Costi in percentuale dei componenti di un sistema FV.

Tra i componenti non fotovoltaici di un impianto sono particolarmente rilevanti quelli per il condizionamento di potenza; in particolare si opera sulla potenza in CC in uscita dal campo fotovoltaico con un convertitore CC/CC che insegue la massima potenza al variare della corrente (che segue il soleggiamento), e sulla potenza che viene fornita all'utenza con un convertitore CC/CA (inverter), che modula la corrente continua proveniente dall'accumulatore. Al fine, poi, di assicurare un adattamento ottimale del generatore fotovoltaico alla rete (impianti grid-connected), è necessario corredare l'inverter di opportuni dispositivi che adattino la tensione di uscita dell'inverter a quella della rete (trasformatori) e controllino la qualità della potenza immessa, in modo che essa sia compatibile con gli standard richiesti dalla stessa.

Tutti e tre hanno rendimenti dipendenti dalla taglia dell'impianto e dalla percentuale della potenza massima che viene loro fornita istante per istante. Soprattutto per gli inverter, è più efficiente una serie di apparecchiature che intervengano in successione via via che aumenta la potenza fornita.

Il costo del supporto dei moduli varia di molto a seconda che si scelga un sistema di puntamento ad inseguimento del disco solare, tipico degli impianti che operano a concentrazione, o fisso. Per i moduli tradizionali, non a concentrazione, si è dimostrato che la perdita di resa, data dalla fissità dei supporti e causata da un non sempre ottimale angolo di incidenza dei raggi solari, non giustifica gli aggravi di costi che un sistema di puntamento, seppur semplice, comporta.

Una parte dei costi del BOS è funzione dell'area dei moduli, mentre l'altra è collegata alla potenza nominale dell'impianto. Del primo tipo sono il costo dell'area, della preparazione del sito e dell'installazione dei moduli. Del secondo tipo sono invece i costi degli apparecchi di condizionamento energetico, della cablatura, della eventuale connessione in rete ecc.

La distinzione di cui sopra è importante poiché evidenzia la parte dei costi del BOS che è direttamente dipendente dall'efficienza dei moduli (e quindi dall'area occupata per unità di potenza installata), e quella che invece dipende dalla ricerca ottimizzante sugli elementi elettronici e sulla progettazione in genere del sistema.

Al diminuire del costo dei moduli, il peso relativo del BOS aumenta, rendendo ancora più pressante l'esigenza di abbatterne i costi ed aumentarne l'efficienza- ottimizzazione.

Un ulteriore costo è rappresentato dalle perdite elettriche del BOS , associate alla conversione, raccolta e trasmissione dell'energia prodotta dai moduli. Si parla, in termini tecnici, di efficienza del BOS. Un valore del 85% è generalmente considerato accettabile.

Altro componente critico del BOS è, nei sistemi FV isolati (stand-alone), il sistema di accumulo, necessario per la conservazione dell'energia prodotta nei momenti di basso carico ed il successivo utilizzo nei momenti in cui, a causa dell'intermittenza della fonte, la produzione di elettricità non soddisfa la richiesta.

Gli impianti non allacciati in rete dispongono tradizionalmente di sistemi di accumulo elettrochimico mediante batterie, di solito al piombo–acido.

I problemi tecnici connessi all'uso di batterie tradizionali sono relativi alla capacità degli accumulatori di mantenere un'alta efficienza anche con cicli di scarica frequenti, pur non necessitando di costose tecnologie di produzione.

Non esiste un accumulatore ideale per un impianto FV, ma - in linea di massima - si possono evidenziare le caratteristiche di base che dovrebbe avere: dovrebbe costare poco, avere una autoscarica bassa, aver bisogno di poca o nulla manutenzione, poter sopportare almeno 2000-2500 cicli di scarica profondi fino all'80% dell'energia contenuta e necessitare di una corrente di carica bassa (tipicamente quella fornita da un impianto FV) , senza che ciò determini un deterioramento delle prestazioni.

E' intuitivo che le apparecchiature di interfaccia con la rete sono più economiche degli accumulatori elettrochimici e relativi regolatori di tensione (le apparecchiature, spesso, sono fornite dallo stesso ente gestore[29]).

Tralasciando le alternative riservate a poche situazioni particolari (tipo energia idroelettrica ricavata da un bacino in cui pompare acqua con pompe azionate da energia fotovoltaica), l'unico modo pratico di evitare gli accumulatori (costosi all'acquisto ed alla manutenzione) è la tecnologia delle celle a combustibile, tramite le quali l'autoproduttore può stabilire un ciclo dell'idrogeno, affidando all'accumulo di idrogeno la conservazione dell'energia rubata alle belle giornate[30].

Con il dovuto dazio dei rendimenti di processo (attualmente piuttosto bassi), l'idrogeno restituisce l'energia che viene fornita per separarlo dall'ossigeno dell'acqua (che può essere comunque utilizzato per altre applicazioni) attraverso le celle a combustibile, che costituiscono una valida e più efficiente

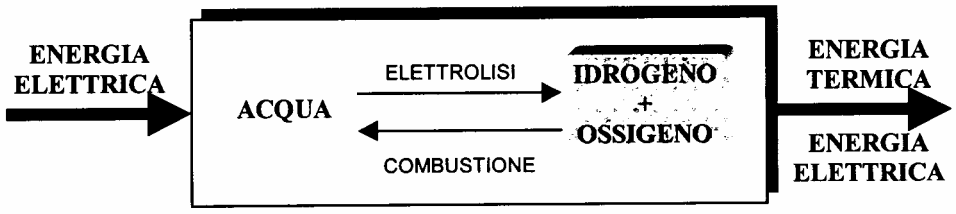
[29] Si veda ad esempio il Provvedimento CIP n° 6/92 e le deliberazioni CIP 29/4/92 e successive.

[30] Per rendere stazionari i parametri dell'impianto, è comunque consigliabile l'adozione di un accumulatore anche di piccola capacità che faccia da "volano" del sistema, in modo da far "vedere" un carico costante al campo fotovoltaico e alle celle a combustibile (o altro impianto integrativo), e rendere disponibile in ogni istante la potenza massima stabilita dall'utenza.

alternativa alla coppia bruciatore-turbina, e le cui "emissioni" sono vapore acqueo e acqua calda.

Il ciclo dell'idrogeno, concettualmente semplice, ha un'applicazione impiantistica (dall'avvento delle celle a combustibile) dal contenuto tecnologico insospettabile, in continua evoluzione e quindi promettente dal punto di vista del rendimento, comunque già superiore al passato, quando idrogeno e ossigeno venivano riuniti nel classico e poco efficiente impianto bruciatore-turbina.

Il passaggio completo *energia solare incidente su celle FV - elettrolisi - stoccaggio –combustione in celle a combustibile - energia elettrica disponibile* ha un rendimento, nelle applicazioni correnti, di circa 1,5-3%, che può però essere accresciuto dall'utilizzo dell'acqua calda derivante dal raffreddamento delle celle (che raggiungono una temperatura di 80 °C o anche molto più).



Il principio di funzionamento di una cella a combustibile è abbastanza semplice: una miscela di gas ricca in idrogeno è inviata all'anodo, dove le molecole dell'idrogeno si dissociano in ioni ed elettroni; gli ioni idrogeno attraversano l'elettrolita migrando verso il catodo, dove reagiscono con l'ossigeno contenuto nell'aria e con gli elettroni che fluiscono nel circuito elettrico esterno (carico elettrico), producendo acqua.

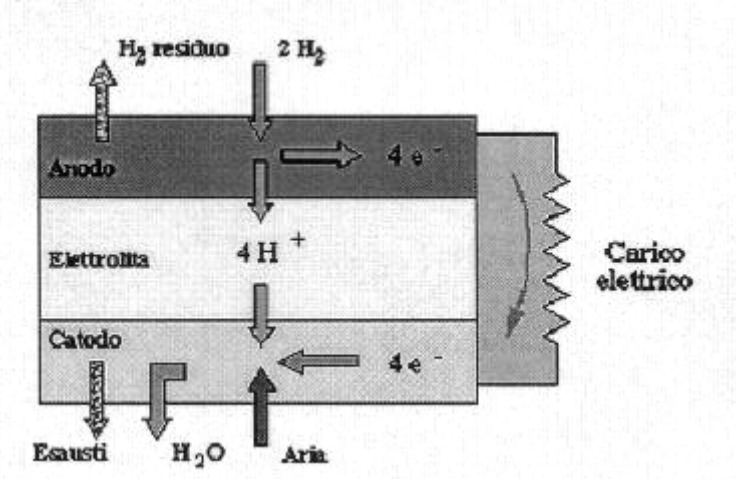


Figura 13: Cella a combustibile elementare.

Il ciclo può essere ripetuto all'infinito, il serbatoio dell'idrogeno non soffre le scariche profonde (che impongono la sostituzione di un accumulatore elettrochimico), le celle non hanno bisogno di manutenzione se non quella degli scambiatori (l'acqua dura vi deposita sali di calcio). Ciononostante, il valore del kWh fotovoltaico stoccato in ciclo dell'idrogeno è fra le quattro e le due volte superiore al costo dell'olio combustibile[31], rapporto che si può ridurre della metà ponendo attenzione al dimensionamento del serbatoio dell'idrogeno (aumentando il rapporto annuo m^3 transitati/capacità) e riconoscendo i costi socio-ambientali nascosti dei combustibile fossili. Considerando i costi socio-ambientali, valutati da alcune agenzie scientifiche internazionali[32], l'idrogeno fotovoltaico è già competitivo su quasi tutti i combustibili fossili: solo il gas naturale è ancora in vantaggio. Per settore d'impiego, si è notato come il residenziale sia il settore che utilizza peggio i combustibili fossili e che quindi può trarre maggior vantaggio da impianti che sfruttano il ciclo dell'idrogeno.

[31] D. Coiante, Combustibili alternativi da fonte rinnovabile: l'idrogeno, HTE n°95, maggio-giugno 1995

[32] Si veda ad esempio l'analisi in tal senso condotta da D. Coiante, La produzione fotovoltaica dell'idrogeno, ENEA, Energia ed innovazione, novembre-dicembre 1990.

Non mancano le applicazioni su medio-grande scala: l'AEM di Milano e l'ACoSer di Bologna gestiscono due centrali a celle a combustibile rispettivamente da 1 MW_e e da 200kW_e/148kW_t (teleriscaldamento), che utilizzano metano al posto dell'idrogeno. La centrale di Bologna, che fornisce teleriscaldamento agli edifici universitari, riesce a trasformare in energia l'83% del contenuto energetico del metano, contro il 40% della centrale elettrica di Milano ed il 34% delle centrali convenzionali[33]. Un ulteriore esempio di sistema realizzato del ciclo dell'idrogeno fotovoltaico è stato oggetto di uno studio ENEA del 1993[34] per l'alimentazione delle utenze domestiche dell'isola di Vulcano (Eolie), nel mar Tirreno. Il diagramma del carico è "atipico", nel senso che ha un picco estivo invece che invernale, dovuto all'aumento della popolazione (turismo) in estate, quando le presenze aumentano da circa 500 a più di 4000 persone. In questo studio, uno dei due motogeneratori diesel da 2 MW_e è sostituito da un impianto che utilizza il ciclo dell'idrogeno, alimentato da un generatore fotovoltaico da 3,44 MW che, tenuto conto dell'efficienza dei vari componenti[35], produce annualmente 6123 MWh, di cui 1758 sono utilizzati in tempo reale ed i rimanenti 4365 MWh sono trasformati in idrogeno e riutilizzati in tempo differito per garantire la continuità della fornitura di potenza. Il bilancio dell'idrogeno permette di dimensionare il serbatoio in una sfera di 22 m di diametro alla pressione di 30 bar. E' un'ennesima dimostrazione della validità dell'idrogeno fotovoltaico come mezzo per superare l'intermittenza della fonte alternativa, anche per centrali di media potenza; nella doppia ipotesi di un prossimo aumento dei prezzi dei combustibili fossili e di un mercato dell'energia in regime di prezzi reali, comprensivi cioè dei costi socio-ambientali, sarebbe già probabilmente competitivo con gli altri combustibili.

[33] Scienza & Vita, nn. 10/96, 5/95, 4/95, Rusconi Editore.
[34] L.Barra, D. Coiante, Una centrale elettrica fotovoltaica autosufficiente con accumulo stagionale di idrogeno, HTE n°82, marzo-aprile 1993.
[35] rendimento di conversione fotovoltaica: 15%; del convertitore dc/dc: 97%; dc/ac: 97%; elettrolizzatore, purificatore, compressore: 90%, 95%, 90%; cella a combustibile: 70%; inverter finale: 97%.

Si analizzeranno ora gli effetti energetici, economici ed ambientali nella ipotesi di installazione di un sistema fotovoltaico "grid-connected" e retrofit, utilizzando il programma di finanziamento ministeriale "Tetti fotovoltaici "[36].
Si consideri un'utenza normale, cioè una famiglia di 4 persone abitante nel nord-Italia, che ha un consumo medio annuo di 4300 kWh/anno.

Da kWh/anno	Fino a kWh/anno	Prezzo dell'energia Lit./kWh	Maggiorazioni Lit./kWh	Imposte Lit./kWh	IVA Lit./kWh	Prezzo totale Lit./kWh
0	900	120,2	7,2	0	10%	140
901	1800	157,2	7,2	0	10%	181
1801	2640	262,4	7,2	45,1	10%	346
2641	3540	461,6	7,2	90,2	10%	615
3541	4440	424,6	7,2	90,2	10%	574
Oltre	4440	262,4	7,2	45,1	10%	346

Nella tabella si sono riportate, come esempio, alcune tariffe per uso domestico (AEEG Autorità per l'Energia Elettrica e Gas) applicate a clientela con potenza impegnata di 3 kW in abitazioni residenziali[37].
Considerando i 4300 kWh/anno di consumo si avrà un costo totale annuo di energia elettrica di:

900 kWh · 140 Lit. = 126.000 lire
899 kWh · 181 Lit. = 162.719 lire
839 kWh · 346 Lit. = 290.294 lire
899 kWh · 615 Lit. = 552.885 lire
759 kWh · 574 Lit. = 435.666 lire

Il totale della spesa annuale per l'energia elettrica della famiglia-tipo in oggetto sommerà dunque a 1.567.564 lire, spesa che comprende il solo costo

[36] Grazie al programma ministeriale "Tetti FV ", ormai partito (anche se con dotazioni finanziarie non eccezionali), anche l'Italia ora può disporre di finanziamenti a fondo perduto per l'installazione su abitazioni private di sistemi fotovoltaici "grid-connected".
[37] E' da sottolineare che l'AEEG aggiorna continuamente le tariffe in questione ogni bimestre e le pubblica sul sito www.autorita.energia.it

dell'energia, esclusi quindi oneri e accessori. Si fa ora l'ipotesi che questo valore sia rimasto costante per gli ultimi tre anni e che quindi anche la media dei consumi negli ultimi tre anni sia stata di 4300 kWh/anno. A questo punto, visto il dato relativo all'irradiazione globale/anno solare, si può stabilire che la potenza di picco del sistema fotovoltaico da proporre dovrà essere intorno ai 3 kWp. Per contenere i prezzi, per comodità di progetto e per non avere plus energetici annuali (non convenienti in quanto non si possono "vendere"[38]), si definisce in 2,7 kWp la potenza totale del sistema.

Secondo il bando ministeriale il costo ammissibile finanziabile per un sistema di 2,7 kWp è di 41,8 milioni di lire. In quest'ipotesi dunque i costi che la famiglia-tipo dovrà sostenere per l'installazione del sistema fotovoltaico vengono così definiti: la parte non finanziata (il 25% di 41,8 milioni) corrispondente a 10,45 milioni, ai quali si deve aggiungere l'IVA al 10% sul totale del costo, ossia 4,18 milioni, per un totale di spesa gravante sulla famiglia di 14,63 milioni di lire.

Utilizzando software di calcolo ad hoc tarati sui parametri del sito di installazione, si definisce che il sistema da 2,7 kWp potrà produrre 3288 kWh/anno. Considerando i 4300 kWh/anno di consumo della famiglia–tipo qui presa in esame, si avrà un costo totale annuo di energia elettrica pari a 4300 – 3288 = 1012 kWh. Tale dato corrisponde alla parte energetica che l'Enel (o chi per esso) dovrà fornire. Questi 1012 kWh/anno possono essere conteggiati prendendo in considerazione la tabella come esempio.

Il bilancio economico che si può supporre è quindi il seguente:

900 · 140 = 98.000 lire/anno

112 · 181 = 20.272 lire/anno

1.567.564 – (98.000 + 20.272) = 1.409.564 lire/anno risparmiate

Noleggio 2° contatore = 60.000 lire/anno da pagare all'Enel

[38] L'allacciamento in rete prevede solo la possibilità di scalare dai propri consumi l'energia elettrica autoprodotta. Nel caso di una autoproduzione superiore ai consumi, il gestore della rete provvede ad assegnare un credito sui consumi futuri dell'utenza.

Risparmio annuo calcolato in circa 1.350.000 lire/anno

Tempo di recupero dell'investimento: 14.630.000 / 1.350.000 = 10,8 anni

Questi 10,8 anni potrebbero diminuire sensibilmente applicando la detrazione del 36% sull'IRPEF per la parte non finanziata, oppure se l'intervento non è di tipo retrofit, ma si basa su progetto.

Dai dati esposti si può quindi notare che, anche se non immediatamente, il costo dell'impianto può essere ammortizzato in un tempo relativamente breve; nella consapevolezza, comunque, di operare in netto risparmio sulle emissioni nocive nell'ambiente.

I benefici ambientali ottenibili dall'adozione del sistema fotovoltaico, sono proporzionali alla quantità di energia prodotta, supponendo che questa vada a sostituire energia altrimenti fornita da fonti convenzionali.

Come già detto, per produrre un chilowattora elettrico vengono bruciati mediamente l'equivalente di 2,56 kWh sotto forma di combustibili fossili e di conseguenza emessi nell'aria circa 0,58 kg di anidride carbonica (fattore di emissione del mix elettrico italiano[39]). Dunque ogni kWh prodotto dal sistema FV evita l'emissione di 0,58 kg di CO_2. Per quantificare il beneficio che tale sostituzione ha sull'ambiente si calcolano le emissioni di CO_2 evitate nell'arco di vita utile dell'impianto (in media considerato di 25-30 anni).

Quindi:

3288 kWh/anno · 0,58 CO_2/kWh = 1907 kg CO_2 · 30 anni = 57.210 kg/ CO_2

[39] ENEA, Rapporto energia e ambiente2000, ENEA, Roma, 2001

La realizzazione di numerosi impianti FV dimostrativi di piccola e grande scala, collegati in rete, ha dimostrato la fattibilità dell'utilizzo del sole come fonte energetica primaria e l'assenza di inconvenienti pratici.

Molte sono dunque le caratteristiche positive della conversione diretta dell'energia solare. Prima fra tutte la fonte solare è ubiquitaria è inesauribile e, soprattutto, è gratuita. La manutenzione è elementare e dai costi di esercizio bassissimi (si valutano in circa 0.8 euro/m^2/anno[40]).

I moduli sono di semplice uso e ciò li rende utilizzabili ovunque ed in qualsiasi contesto socio culturale (una volta raggiunta la competitività economica il FV potrà diffondersi velocemente anche in paesi a basso livello tecnologico).

Esiste sì un problema di spazio occupato dai pannelli, che peraltro può essere scelto in posizioni di scarso valore agricolo o residenziale. Recenti calcoli hanno poi mostrato che l'occupazione di spazio è confrontabile con quella delle altre fonti convenzionali, quando si considerino gli impegni per l'intero ciclo dei combustibili.

Tra le fonti rinnovabili disponibili, la fonte fotovoltaica dovrà essere privilegiata grazie alla caratteristica intrinseca di fornire il valore più alto di densità superficiale di energia, rispetto al valore corrispondente del petrolio.

Attualmente nel territorio italiano, con un 10% di efficienza globale del sistema fotovoltaico completo, tali valori sono: fotovoltaico = 68-76 kWh/m^2; eolico = 13-18 kWh/m^2; idroelettrico = 0,002-0,006 kWh/m^2.

Si pensa che a medio termine, portando al 18% l'efficienza dei moduli fotovoltaici (15% impianto completo), tale valore di densità di energia per m^2 potrà essere di 100-114 kWh/m^2 con una Energia Chimica Equivalente di Petrolio di 921-1050 MJ/m^2 (1 kWhe = 2200 kcal = 9,21 MJ). Il sistema fotovoltaico non sfrutta inoltre fonti esauribili e non rappresenta un pericolo

[40] F.P. Vivoli, Energia elettrica dal sole, ENEA-ISES, Roma,1999.

per le generazioni future, contrariamente ad altre fonti energetiche attualmente utilizzate.

Dal punto di vista ecologico esso non produce infatti alcun inquinamento durante il suo esercizio e lo smaltimento dei suoi componenti, alla fine del suo ciclo di vita, non pone alcun problema ambientale.

Inoltre in natura esiste una grande abbondanza del silicio. Tale fatto esclude problemi di approvvigionamento della materia prima anche in caso di sviluppo di massa.

Il sistema fotovoltaico ha natura intrinsecamente modulare, cioè senza sensibili economie di scala a livello di impianti di generazione. Ne deriva che tale tecnologia si presta ad una utilizzazione decentrata sul territorio .

I tempi di realizzazione degli impianti fotovoltaici sono brevi (nell'ordine di mesi anziché degli anni necessari ad impianti termoelettrici o dei decenni di quelli nucleari). Questo fatto, unitamente alla modularità, comporta in prospettiva il vantaggio di poter costruire un'offerta elettrica che cresca con gradualità nel tempo seguendo la domanda.

Il problema nodale è invece la non competitività del costo dell'energia elettrica fotovoltaica rispetto a quella prodotta da fonti fossili convenzionali. Fermarsi di fronte a una simile affermazione è però riduttivo. Da un lato infatti si può asserire che l'approccio al fotovoltaico da parte di un utente medio – in assenza di ogni forma di sovvenzione – è senz'altro negativo; infatti se il normale utente deve impiegare più di quarant'anni (si veda il caso precedentemente analizzato) per rientrare di un investimento oneroso, difficilmente, anche se dotato di forte sensibilità ecologica, potrà permettersi di affrontare un costo così pesante. Da un altro lato invece pare che diverso dovrebbe essere l'approccio di un ideale policy maker energetico il quale, almeno teoricamente, dovrebbe farsi carico del benessere di tutta la popolazione e, dunque, investire sul lungo termine senza ritorno economico immediato, ma sicuramente futuro, ritorno inoltre accompagnato da notevoli

vantaggi ambientali che ovviamente si traducono in maggior benessere per tutta la popolazione. Molti sono i punti e gli spunti che possono suffragare questa affermazione.

Innanzitutto, se si guarda alle prospettive future di diffusione e sviluppo della tecnologia FV, è opportuno basare le proprie proiezioni anche sullo strumento delle "curve di esperienza".

La curva di esperienza descrive quanto il costo unitario di un prodotto decresca con una produzione cumulativa. Una caratteristica specifica della curva di esperienza è che i costi si riducono in percentuale costante ad ogni sviluppo del numero totale di unità prodotte. Attraverso il concetto di rapporto di progresso (Progress Ratio – PR) si esprime l'evoluzione della riduzione di costo per differenti tecnologie. Un PR dell' 80%, per esempio, significa che i costi per unità di prodotto si riducono del 20% ogni volta che la produzione cumulativa raddoppia.

Le riduzioni di costo, alle quali si riferisce la curva di esperienza (c.d.e.), sono relative a tutti i capitoli di costo del prodotto: lavoro, capitale, costi amministrativi, R & S, etc.. Le cause delle riduzioni sono una combinazione di cambiamenti produttivi (innovazioni di processo, apprendimento, economie di scala), di cambiamenti del prodotto (innovazioni, standardizzazione, riprogettazioni) e di cambiamenti nel mix e nei prezzi delle materie prime. Il processo di esperienza è quindi un processo di evoluzione a lungo termine che coinvolge numerosi ed eterogenei parametri.

Le c.d.e. possono mostrare quindi come le riduzioni di costo dipendano dalla diffusione e dallo sviluppo di nuove tecnologie e viceversa: i costi scendono quando aumenta la produzione, e la domanda di mercato cresce quando cadono i prezzi[41].

[41] E' anche possibile che i costi possano crescere all'aumentare della produzione (PR>100%); è dunque importante notare che l'esperienza in sé non è fonte certa di riduzione di prezzi, ma è – spesso – fonte di opportunità per la riduzione di costi (cfr. B.C.G., Prospectives on Experience, Boston, 1972).

La curva di esperienza dei moduli fotovoltaici con tecnologia al silicio mono/policristallino ha fatto registrare nel passato PR medi compresi fra il 78% e l'82% [42].

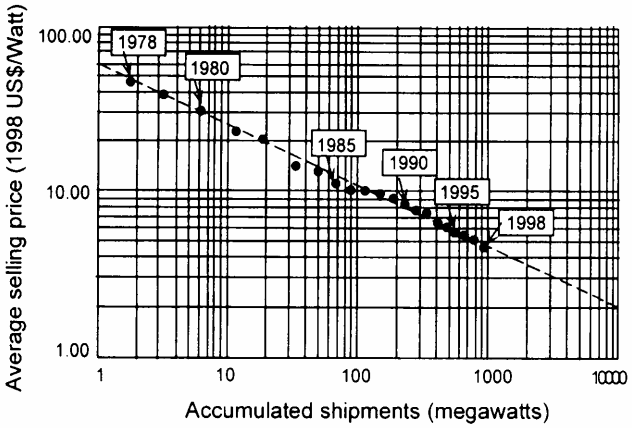


Figura 13: Costi medi in rapporto a produzione cumulata di sistemi FV

Il fatto che i maggiori esperti mondiali asseriscano che sia in corso una transizione a una seconda generazione di materiali (tecnologie a film sottile), potenzialmente meno costosi, e che la produzione mondiale sia in aumento, accompagnata dall'esistenza di nuove soluzioni innovative nel concepimento e nella produzione dei componenti dei BOS, potrebbe prospettare una riduzione dei costi più veloce di quella indicata fino ad ora dalla curva di esperienza, propria della tecnologia attuale.

Certo è che il prevalere dell'energia FV potrà verificarsi solo quando il suo costo sarà inferiore a quello dell'energia da fonti fossili, dubitandosi fortemente che i prezzi di questa ultima vengano corretti inserendovi i costi di esternalità. La diminuzione del costo dell'energia FV sino a giungere a un livello inferiore a quello del costo dell'energia da fonti fossili potrà avvenire

[42] H. Tsuchiya, PV cost analysis based on the learning curve, RI ST, Tokyo, 1992; R. Williams – G. Terzian, A benefit/cost analysis of development of PV tecnology, Princeton University, Princeton, 1993.

solo quando sarà installata una capacità di generazione FV approssimativamente di 190 GW, considerando un PR dell'80%[43].

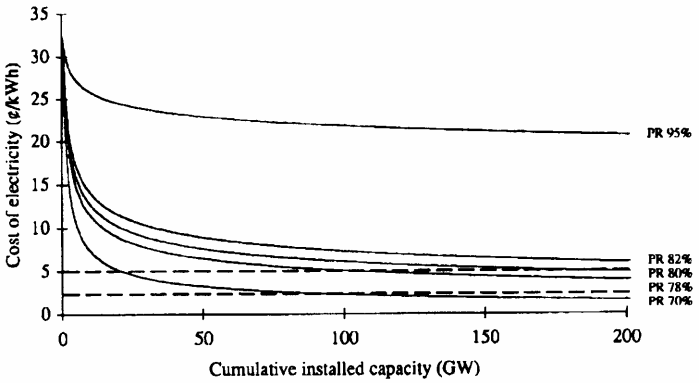


Figura 14: Scenari di riduzione dei costi del FV, su ipotesi di differenti PR

Una siffatta ipotesi comporta la necessità di considerevoli investimenti in tecnologia; alcune stime indicano la cifra di 100 miliardi di dollari[44] come necessaria al raggiungimento della competitività. La sfida è quindi estremamente ardua anche perché spesso gli investimenti dei policy makers prendono tutt'altra direzione: ad esempio la Banca Europea per gli Investimenti (EIB), braccio finanziario della UE e che prevede fra i suoi obiettivi principali la salvaguardia dell'ambiente, ha recentemente stanziato – per i prossimi cinque anni – 17 milioni di euro per lo sviluppo dell'energia eolica di fronte a ben 700 milioni di euro stanziati per l'estrazione di petrolio – dunque un petrolio carissimo - in Basilicata[45].

Un secondo, importante, elemento per un approccio non miope al FV è l'inserimento, nelle proprie valutazioni, di ciò che viene chiamato "energy pay-back time", ovvero il rapporto tra energia necessaria a produrre il sistema

[43] L. Neij, Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology, Energy Policy, vol. 23, n.13, London, 1997.
[44] Ibidem.
[45] Cfr. il sito dell' EIB, www.eib.org/loansbycategory. I paesi OCSE, secondo dati dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (1997), investono percentuali intorno allo 0,7 – 1% dei budget nazionali stanziati per la ricerca energetica per le FER.

FV, nel suo ciclo di vita, e l'energia prodotta dall'impianto stesso nel corso del suo esercizio.

Alla fine degli anni settanta del Novecento, Georgescu-Roegen, studioso sicuramente dotato di grande sensibilità ambientale, bocciava i sistemi solari in quanto le analisi energetiche indicavano che essi erano dei "serbatoi di energia" – si consumava più energia per produrli di quanta essi fossero capaci di generare – e quindi non offrivano benefici ambientali[46]. Oggi, fortunatamente, sono cambiati i valori del pay-back energetico; infatti, assumendo un irraggiamento medio-alto (1700 kWh/m^2), il rapporto energia necessaria per la produzione dei moduli e energia prodotta dai moduli si pareggia nel giro di 2,5 – 3 anni nel caso di installazioni di tipo rooftop, mentre nel caso di centrali multimegawatt occorrono circa 4 anni per il pareggio[47].

E' chiaro che qualsiasi aumento di efficienza delle celle fotovoltaiche porta questi valori ad abbassarsi ulteriormente. Alcuni studi prevedono che i tempi di pay-back possano ridursi a 1,5 anni per le applicazioni diffuse e a 2 anni per le centrali multimegawatt[48].

Una simile prospettiva di analisi permette inoltre di avere un buon indicatore del potenziale di mitigazione di CO_2 dei moduli FV. Per ottenere una corretta indicazione delle emissioni di gas serra nella produzione di sistemi fotovoltaici è però necessaria una dettagliata analisi del ciclo di vita sia delle celle che del BOS.

Si è visto che le emissioni di GHG (Green House Gases – gas serra) collegate al FV provengono quasi totalmente dalle fasi di produzione e non dalla fase di

---

[46] N. Georgescu – Roegen, Energy Analysis and economic valuation, SEJ, 1979.

[47] Recentemente (1998) uno studio sul pay-back energetico ha comparato il BOS della nostra centrale da 3,3 MW_p di Serre con l'equivalente di una potenza diffusa in sistemi integrati negli edifici; il BOS di Serre ha richiesto circa 1800 MJ/m^2 contro i 700/m^2 della soluzione diffusa (Cfr. P: Frankl, Simplified life-cycle analysis of PV system in buildings. Present situation and future trends, Progress in PV, vol. 6, n. 2, 1998.

[48] E. A. Alselma – E. Nieuwlaar, Energy Viability of PV system, Energy Policy, vol. 28, n. 14, 2000; K. Knapp – T. Jester, Empirical investigation of the energy pay-back time for PV modules, Solar Energy, vol. 71, n. 3, 2001.

operatività del sistema. Questo significa che le emissioni collegate al FV sono generate dallo specifico mix energetico che fornisce elettricità al processo di produzione delle celle. E' probabile che un giorno l'energia necessaria per la costruzione delle celle venga fornita dalle celle stesse, facendo così del FV un potente strumento per una energia pulita.

Questi e molti altri argomenti, dunque, sono a favore di una valutazione che tenga conto della complessità del problema: aspetti tecnici, economici, ambientali, sociali ed istituzionali giocano, tutti, un ruolo determinante.

Si tratta quindi di instaurare un circolo virtuoso che porti alla competitività l'energia solare. Si è concordi nell'affermare che la chiave per ridurre i costi sia aumentare la quantità prodotta e venduta per stimolare sia l'efficienza nella produzione (economie di scala, di apprendimento etc) sia gli investimenti per lo sviluppo e la commercializzazione di nuove generazioni di celle solari. Il meccanismo di traino del mercato, meccanismo che sembra poter provvedere ad una crescita sostenuta della domanda dei sistemi solari , sono le sovvenzioni statali ai sistemi montati su tetti nelle aree urbanizzate del mondo sviluppato[49].

Molti sono i progetti di sovvenzioni già partiti: in Giappone, alla fine del 1999, erano stati installati oltre 20.000 tetti FV, con l'obiettivo di installarne 1,5 milioni entro il 2010; negli Stati Uniti l'amministrazione Clinton, nel 1997, ha promosso un programma per un milione di tetti entro il 2010; l'Unione Europea si è posta un obiettivo analogo, con l'installazione di metà dei sistemi nella UE e metà nei PVS; la Germania ha promosso nel 1998 un progetto per 100.000 tetti FV entro 5 anni; in Italia è finalmente partito – seppur con dotazioni finanziarie non eccezionali – il programma 10.000 tetti FV; l'India sta promuovendo un ambizioso programma con il fine di installare 1,5 milioni di sistemi entro il 2005[50].

[49] M.A. Green, Power to the…, cit.
[50] T. Jackson - M.Oliver, op.cit.

Tutti i programmi prevedono più fasi: nelle prime viene finanziato a fondo perduto il 50-70% del costo, mentre successivamente il contributo finanziario scende in modo progressivo.

Diversi sono i motivi che hanno spinto a sovvenzionare questo tipo di installazioni. Si ritengono fondamentali i tre seguenti motivi.

In primo luogo, i sistemi integrati negli edifici (Building – integrated PV) evitano i costi collegati all'acquisto dei terreni, alle infrastrutture di accesso e di difesa del sito e alle importanti strutture di supporto dei moduli; inoltre gli edifici sono vicini alla rete elettrica e si possono quindi evitare anche i costosi impianti di cablaggio, necessari invece per centrali FV posizionate in siti verdi.

In secondo luogo, i BiPV producono energia nel luogo dove questa viene consumata ed evitano i costi associati alle perdite e alla distribuzione; questo argomento è particolarmente interessante per i BiPV situati negli edifici adibiti ad attività terziarie, dove la domanda di elettricità (ore 9-17) coincide con l'offerta dei sistemi FV.

In terzo luogo, nel caso in cui i sistemi BiPV facciano parte dei progetti di costruzione degli edifici, i sistemi stessi possono essere sostitutivi dei rivestimenti necessari all'edificio (ad esempio tegole, vetrate, coperture, velette, etc.) evitandone così il costo monetario e, in un'ottica di LCA, evitando anche i costi ambientali della produzione degli elementi architettonici sostituiti dai pannelli[51].

[51] Greenpeace, Unlocking the Power of Our Cities, Greenpeace, London, 1995; M. Oliver – T. Jackson, op. cit.

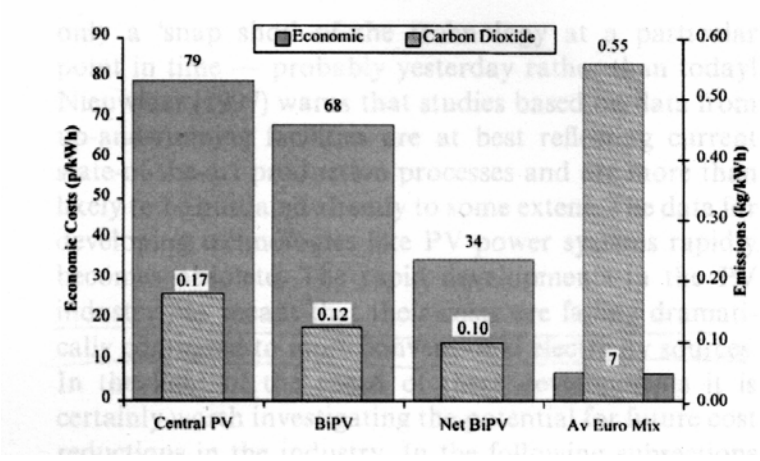


Figura 15: Una comparazione dei costi e delle emissioni di CO2 nella produzione di elettricità di diverse tipologie di sistemi FV e da una fonti convenzionali.

In conclusione si può affermare che le potenzialità del FV sono enormi. E inoltre si possono indicare prospettive ancora più ampie se si pensa alla produzione di idrogeno da fonte solare, come forma di accumulo capace di liberare l'energia FV dal rischio di rimanere rinchiusa in un "ghetto elettrico"[52].

[52] Il confinare le nuovi fonti rinnovabili dentro al settore della produzione di elettricità deve essere considerato come un ostacolo aggiuntivo, che può limitare fortemente il contributo ambientale derivante da queste fonti. Questa considerazione è più nota come "effetto del ghetto elettrico" (D. S. Scott, Interpreting the Architecture of the Energy System, in Proceedings of WEC 16th Congress, WEC Commettees, 1995, Tokyo)ed è esplicativa del fatto che numerosi importanti servizi energetici (come il riscaldamento, la cottura dei cibi, i trasporti, ecc.) vengono meglio soddisfatti con altri vettori energetici, diversi dall'elettricità, prevalentemente dai combustibili fossili.
Se l'energia rinnovabile vuole divenire una soluzione realmente significativa della crisi ambientale, deve acquisire la capacità di fuggire dal ghetto dell'elettricità e spingere la sua espansione, oltre che nel mercato dell'energia elettrica, anche in quello dei combustibili fossili.
Approfittando dell'analogia con la produzione di biocombustibili dalle biomasse, si consideri che i combustibili ecologici possono anche essere prodotti dal fotovoltaico e dall'eolico mediante la trasformazione dell'energia elettrica generata in altre forme di energia. Ad esempio, l'energia elettrica può essere convertita e accumulata sotto forma di energia chimica di un combustibile di sintesi (per esempio idrogeno dall'ellettrolisi dell'acqua o metanolo derivato dall'idrogeno o altri idrocarburi sintetici). Tutti questi prodotti, chiamati ecocombustibili o combustibili solari, sarebbero capaci di sostituire adeguatamente i combustibili fossili in tutte le loro applicazioni energetiche.
L'adozione di questo processo di conversione permetterebbe di realizzare un percorso addizionale, diverso da quello dell'elettricità, per la penetrazione dell'energia rinnovabile nel mercato dell'energia, cosa che permetterebbe di rilanciare fortemente l'espansione delle fonti rinnovabili in tale mercato. E i costi addizionali della produzione dei combustibili ecologici potrebbero essere recuperati mediante il riconoscimento economico delle esternalità evitate (D. Coiante – L. Barra, A Practical Method to Evaluate the Real Cost of Electrical Energy, I.E.R., 1995)

I principali policy-makers sono però esitanti di fronte al FV[53] e preferiscono lasciare la sua evoluzione sostanzialmente al mercato. Almeno due sono i pericoli di questo approccio. In primo luogo, lasciare esclusivamente al mercato la decisione sul percorso da intraprendere per il raggiungimento della competitività del FV, potrebbe portare all'uso di tecnologie più efficienti, ma che presentano problemi ambientali importanti (materie prime tossiche, quali cadmio e arsenico, o scarse) nel lungo periodo. Una politica ideale dovrebbe avere una visione economico-ambientale di fattibilità nel lungo/lunghissimo periodo.

In secondo luogo, se – come spero – dovesse realizzarsi una "rivoluzione energetica" con l'abbandono delle fonti fossili, ci troveremmo di fronte a uno scenario radicalmente diverso, conseguente alla "innovazione architettonica" introdotta nelle infrastrutture di offerta di energia da una tecnologia – il FV – distribuita, capital intensive e che conta su una fonte di energia geograficamente diseguale e aleatoria.

Quali saranno i nuovi assetti di potere geo-politico? I ritardatari nella corsa allo sviluppo delle FER si troveranno di fronte forti penalizzazioni nel lungo termine[54], poiché saranno "ricchi" quei paesi con tanto sole (vento, etc.), e che avranno saputo sfruttarlo, o quelli che avranno creato un forte mercato tecnologico indirizzato all'utilizzo delle FER. La storia dell'Italia è costellata di "occasioni mancate" per l'industria italiana[55]. Non ultimo, piace ricordarlo, il "Programma 101", portato avanti, alla fine degli anni cinquanta del

---

Con questa soluzione l'energia rinnovabile potrebbe fuggire dal ghetto dell'elettricità e penetrare direttamente nel mercato dei combustibili fossili, in modo che si potrebbe essere finalmente capaci di sostituire grandi quantità di energia inquinante con altrettante quantità di combustibili ecologici. A questo punto, i benefici ambientali conseguibili sarebbero realmente autoconsistenti con le grandi attese che vengono poste sulle fonti rinnovabili e con la loro capacità di contribuire significativamente al risanamento dell'ambiente globale.

[53]La serie dei disincentivi delle fonti fossili e degli incentivi delle FER hanno possibilità limitate solo dalla fantasia dei funzionari pubblici e dal potere della lobby petrolifera ("manca la volontà politica" è la frase che ne denuncia l'attività)

[54] La compagnia petrolifera anglo-olandese Shell prevede che il mercato per il FV nel 2025 sarà di circa venticinquemila miliardi di dollari (cfr. C. Herkstrofer, Contributing to a Sustainable Future. The Royal Dutch/Shell Group in the Global Economy, Shell International, London, 1997).

[55] F. Amadori, L'impresa industriale dal dopoguerra ad oggi, EGEA, Milano, 1997.

Novecento, da Adriano Olivetti e Pier Giorgio Perotto, che permise di inventare il primo mini-computer del mondo, creato per essere usato da tutti e non solo dagli esperti di informatica. Il Programma 101[56] fu presentato nel 1965 e il New York Times commentò entusiasta: "Potremo vedere un computer in ogni ufficio prima che ci siano due automobili in garage"[57]. Alla morte di Adriano, innovatore dalle caratteristiche schumpeteriane, la Olivetti cedette il progetto alla americana General Electric e il "sogno elettronico" svanì. L'Italia è piena di sole, …

[56] P. G. Perotto, L'invenzione del personal computer: una storia appassionante mai raccontata, Einaudi, Torino, 1991.
[57] Diario, a. VII, n. 5, febbraio 2002, p. 97.

APPENDICE 1

I PRINCIPALI INQUINANTI: SORGENTI, CARATTERISTICHE, EFFETTI

Per inquinamento atmosferico si intende *ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati* (DPR n. 203/1988) [58].

Le sostanze responsabili dell'inquinamento atmosferico sono numerose e diversificate, in termini di caratteristiche chimico-fisiche e di effetti sulla salute e sull'ambiente; esse normalmente si distinguono in:

- inquinanti primari, che vengono direttamente immessi in atmosfera a causa di attività antropiche o fenomeni naturali (biossido di zolfo (SO_2), acido solfidrico (H_2S), monossido di azoto (NO), ammoniaca (NH_3), monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO_2), acido cloridrico (HCl);
- inquinanti secondari, che si formano per reazioni chimiche o fisiche dagli inquinanti primari, (anidride solforica (SO_3), acido solforico (H_2SO_4), biossido di azoto (NO_2), acido nitrico (HNO_3), chetoni, aldeidi, acidi vari, ozono).

Le fonti di emissioni

In termini generali le principali fonti di emissione si possono considerare:

[58] Tutti i dati contenuti in questa appendice sono una mia elaborazione a partire dalle seguenti fonti: R. Marchetti, Ecologia applicata, Città Studi, Milano, 1999; AA.VV. Piano regionale per la qualità dell'aria. Regione Lombardia, FLA, Milano, 2000; P. Crosignani, Stima degli effetti sulla salute dell'inquinamento urbano a Milano, Istituto Nazionale Tumori, Milano, 2001; AA.VV. Rapporto sullo stato dell'ambiente in Lombardia, Direzione Generale Tutela Ambientale, Milano, 1999.

- gli **impianti di combustione** per il riscaldamento degli ambienti, responsabili delle emissioni di NO_X, idrocarburi, polveri, SO_2;
- il **traffico autoveicolare**, direttamente responsabile delle emissioni di CO, NO_X, polveri, idrocarburi incombusti, SO_2 (come emissioni allo scarico) e di idrocarburi non metanici (come emissioni evaporative) ed altresì responsabile del risollevamento del particolato fine dovuto al passaggio dei veicoli;
- i **processi produttivi industriali**, in particolare nei settori chimico, metallurgico e meccanico, responsabili delle emissioni di NO_X, polveri, idrocarburi, SO_2 e composti organici volatili;
- **l'agricoltura**, responsabile delle emissioni di NH_3.

La metodologia più diffusa per la stima delle emissioni derivanti dalle diverse fonti è quella elaborata nell'ambito del progetto CORINAIR (COoRdination INformation AIR), promosso dall'Unione Europea con il fine di raccogliere ed organizzare un'informazione consistente sulle emissioni di inquinanti atmosferici. Più in generale, il progetto CORINAIR si inserisce nell'ambito del programma CORINE (CO-oRdinated INformation on the Environment in the European Community), programma sperimentale intrapreso dalla Commissione Europea, attraverso il quale si tende ad armonizzare la raccolta e l'organizzazione delle informazioni sullo stato dell'ambiente e delle risorse naturali nella Comunità e a sviluppare un sistema informativo geografico come supporto alla formulazione e allo sviluppo della politica comunitaria in materia ambientale. Le potenziali sorgenti di emissioni sono classificate in una serie di attività antropiche e naturali, raggruppate a loro volta in entità chiamate macrosettori:

- Produzione di energia elettrica, impianti di cogenerazione e riscaldamento
- Combustioni commerciali, istituzionali e residenziali
- Combustioni industriali e processi con combustioni

- Processi diversi dalla combustione
- Estrazione e distribuzioni combustibili
- Uso dei solventi
- Trasporti stradali
- Altre modalità di trasporto
- Trattamento rifiuti e acque reflue
- Agricoltura
- Natura

Proprietà, sorgenti, meccanismi di interazione e principali effetti degli inquinanti

OSSIDI DI AZOTO - NO_X

Data la presenza congiunta in atmosfera sia del **monossido di azoto (NO)**, sia del **biossido di azoto (NO_2)**, il parametro che viene normalmente rilevato, e per il quale sono anche stabiliti gli standard normativi è la somma pesata dei due, denominata **ossidi di azoto** (**NO_X**).

Il biossido di azoto è un gas tossico, altamente corrosivo; è un inquinante secondario che si produce per ossidazione del monossido di azoto. Quest'ultimo si forma nei processi di combustione in presenza d'aria e ad elevata temperatura. La tossicità del monossido di azoto è limitata, al contrario di quella del biossido di azoto che risulta invece notevole.

La pericolosità degli ossidi di azoto e in particolare del biossido, è legata anche al ruolo che essi svolgono nella formazione dello smog fotochimico. In condizioni meteorologiche di stabilità e di forte insolazione, le radiazioni ultraviolette possono determinare la dissociazione del biossido di azoto e la formazione di ozono, che può ricombinarsi con il monossido di azoto e ristabilire una situazione di equilibrio. In presenza di altri inquinanti, quali per esempio gli idrocarburi, l'ozono e altri radicali liberi prodotti per reazioni di

fotodissociazione, possono innescare un complesso di reazioni chimiche che portano alla formazione dello smog fotochimico. I costituenti principali di tale smog, oltre all'ozono, sono le aldeidi e i perossiacilnitrati (PAN), composti altamente tossici, che risultano essere intermedi di reazione o prodotti secondari. La produzione di smog fotochimico dipende quindi dalle concentrazioni in atmosfera degli ossidi di azoto e degli idrocarburi ed è strettamente legata alle emissioni dovute al traffico veicolare.

Gli ossidi di azoto possono infine reagire con l'acqua originando acido nitrico, responsabile insieme all'acido solforico, del fenomeno delle piogge acide.

Il biossido di azoto è un gas **irritante** per le mucose e può contribuire all'insorgere di **patologie dell'apparato respiratorio**, come alterazione delle funzioni polmonari, bronchiti croniche, enfisema polmonare e asma.

BIOSSIDO DI ZOLFO - SO_2

E' un gas incolore, irritante, non infiammabile, molto solubile in acqua. Deriva dalla ossidazione dello zolfo che si origina nei processi di combustione delle sostanze contenenti questo elemento (principalmente combustibili fossili) sia come **impurezza**, che come costituente della **struttura molecolare** (per esempio negli oli). In atmosfera può ossidarsi a anidride solforica e dare origine per idrolisi ad acido solforico, responsabile del fenomeno delle piogge acide.

Biossido di zolfo, polveri sospese e ossidi di azoto sono i composti storicamente ritenuti maggiormente responsabili dell'inquinamento atmosferico e sono prodotti primariamente da processi di combustione.

Le fonti principali di questi inquinanti sono quindi: **l'attività industriale**, la produzione di energia mediante **centrali termoelettriche**, il **traffico veicolare** (in particolare quello dovuto ai mezzi pesanti), l'uso civile di combustibili (in particolare per il **riscaldamento**) e **l'incenerimento di rifiuti**. A fronte di una diffusa diminuzione, in diversi centri urbani, del contributo all'inquinamento atmosferico dovuto all'attività industriale - in seguito all'adozione di nuove

tecnologie - e agli impianti di combustione per uso civile – in seguito alla diffusione della metanizzazione e di combustibili a minore tenore di zolfo - si è registrato un incremento del contributo legato al traffico veicolare.
Gli effetti del biossido di zolfo sulla salute dell'uomo sono principalmente legati a **patologie dell'apparato respiratorio** come bronchiti, asma e tracheiti e ad **irritazioni** della pelle, degli occhi e delle mucose.

COMPOSTI ORGANICI VOLATILI - COV

Composti organici volatili (COV) sono, a rigore, tutte le sostanze organiche che, quando vengono esposte all'aria, abbandonano lo stato fisico liquido o solido in cui si trovano, passando allo stato aeriforme. Nella pratica, vengono incluse tra i COV anche tutte le sostanze organiche che si presentano allo stato aeriforme a temperatura ambiente.
Questa classe di inquinanti raggruppa molecole contenenti principalmente atomi di carbonio e di idrogeno, ma anche di ossigeno, cloro, fluoro, fosforo e zolfo, di metalli e altri metalloidi. Esempi di COV sono l'acetone, gli **idrocarburi** (tra cui il **benzene**) e i clorofluorocarburi.
L'attenzione nei loro confronti è essenzialmente legata al loro ruolo nelle reazioni che conducono alla produzione degli inquinanti fotochimici**.**

IDROCARBURI (HC)

Gli idrocarburi atmosferici sono composti formati da idrogeno e carbonio; la loro importanza consiste nel fatto che essi sono i precursori di inquinanti secondari, quali l'ozono ed altri ossidanti.
Il **traffico** costituisce la fonte principale di HC; contribuiscono vari **processi industriali** e gli impianti di combustione fissi.
La presenza di idrocarburi altera l'equilibrio che esiste di norma nell'atmosfera fra ossidi di azoto ed ozono: interagendo sia con l'NO sia con l'ossigeno atomico provocano la formazione di composti ossidati e radicali

liberi, che a loro volta, reagendo con l'NO, danno luogo ad un notevole aumento dell'ozono.

Benzene

Fa parte della famiglia degli idrocarburi aromatici, è una sostanza presente già nel greggio e, dopo la sua lavorazione, nelle benzine. Il benzene non è quindi un additivo aggiunto alla benzina in sostituzione del piombo.

Il benzene possiede caratteristiche di elevata tossicità per l'uomo. Tale sostanza è stata classificata come mutagena e cancerogena dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro. Il problema del benzene si è acuito in seguito alla sostituzione del piombo nelle benzine: nella prima fase della diffusione di tali carburanti si è reso necessaria la produzione di benzine che presentavano livelli più elevati di benzene. Negli anni successivi sono stati ridotti i livelli di benzene di idrocarburi aromatici nelle benzine "verdi" fino al valore dell'1% previsto dalla normativa vigente. Se da una parte quindi la diffusione di tali benzine ha favorito la riduzione delle concentrazioni atmosferiche di piombo, dall'altra ha determinato in una prima fase un incremento dei livelli di benzene nei centri urbani. Attualmente si ritiene che circa l'80% delle emissioni di benzene nelle zone urbane italiane derivino dal traffico, in seguito alla diretta evaporazione di tale sostanza dai carburanti o in seguito alla degradazione di altri idrocarburi aromatici presenti nelle benzine.

MONOSSIDO DI CARBONIO - CO

E' un gas incolore, inodore, infiammabile e molto tossico, prodotto nelle combustioni operate in difetto d'aria, come quelle che avvengono nei motori a scoppio dei veicoli. E' un inquinante legato quasi esclusivamente al **traffico veicolare**: insieme all'ozono concorre in maniera determinante al fenomeno dell'inquinamento atmosferico delle aree urbane.

La sua elevata pericolosità e tossicità è dovuta all'affinità (220 volte maggiore di quella dell'ossigeno) che esso dimostra nei confronti dell'**emoglobina del**

sangue. La combinazione con l'emoglobina porta alla formazione della **carbossiemoglobina**, composto fisiologicamente inattivo e molto stabile, che, formandosi, impedisce il trasporto dell'ossigeno da parte dell'emoglobina stessa. Tra gli effetti di questa interazione si registrano interferenze nel comportamento e nell'attività lavorativa, giramenti di testa, emicranie, debolezza diffusa, ecc. Esistono inoltre gruppi della popolazione che sono particolarmente sensibili anche a piccoli incrementi di carbossiemoglobina, come per esempio pazienti con malattie cardiovascolari.

OZONO – O_3

L'ozono (O_3) può originarsi naturalmente da più molecole d'ossigeno per azione della radiazione ultravioletta e dei fulmini, in grado di fornire l'elevata energia richiesta per la reazione.

Nella stratosfera esso svolge un ruolo fondamentale, assorbendo le radiazioni ultraviolette dannose per la salute umana. Lo scudo di protezione formato dall'ozono ha subito una parziale distruzione in quest'ultimo decennio a seguito dell'azione di sostanze quali ossidi di azoto e clorofluorocarburi.

Negli strati più bassi dell'atmosfera (troposfera) l'ozono, in virtù dell'elevata energia richiesta per la sua produzione, è presente naturalmente in basse quantità. Un incremento della concentrazione del biossido di azoto può determinare, in particolari condizioni meteorologiche, un aumento delle reazioni di dissociazione di questo composto ad opera della radiazione ultravioletta, e conseguentemente un aumento della produzione di ozono.

L'ozono, ha nei confronti dell'uomo, un elevata tossicità che si può manifestare attraverso **irritazioni degli occhi** (per esempio congiuntivite), **infiammazioni delle vie respiratorie**, modifiche delle **funzioni polmonari**, aumento della frequenza degli attacchi d'asma, mal di testa, difficoltà respiratorie, ecc.

PARTICOLATO

Con il termine Polveri Totali Sospese (**PTS**) si comprende un'ampia gamma di sostanze solide, caratterizzate da diverse dimensioni, disperse in atmosfera quali: sabbia, sostanze silicee di varia natura, sostanze vegetali, composti metallici, fuliggine, ecc.

Ai fini ambientali e sanitari la dimensione delle particelle solide gioca un ruolo estremamente importante. Partendo da simili considerazioni il decreto del 25 novembre 1994 ha introdotto la necessità di rilevare la frazione respirabile delle particelle sospese, caratterizzata da un diametro inferiore a 10 micron (**PM10**).

Così come il biossido di zolfo, anche le polveri possono produrre patologie indesiderate per l'apparato respiratorio umano. L'effetto prodotto dipende, oltre che dalle dimensioni delle particelle, dalla tossicità delle stesse.

Anche la visibilità può essere negativamente influenzata dalla presenza di queste sostanze.

PIOMBO - Pb

È presente naturalmente nelle rocce ignee e metamorfiche ed anche in quelle sedimentarie. Si trova in tracce nell'atmosfera non contaminata.

La maggior parte del Pb atmosferico di origine antropica deriva dalla produzione e dal consumo di **additivi delle benzine** sotto forma di **piombo tetraetile e tetrametile**, con lo scopo di conferire proprietà antidetonanti, permettendo così il regolare funzionamento del motore. Emissioni dirette dei composti organici provengono dalle raffinerie di petrolio e dalle industrie di additivi, mentre dai veicoli e dalle fonderie viene emesso soprattutto Pb inorganico.

In base a studi dell'International Programme on Chemical Safety (IPCS), la principale **fonte** di inquinamento atmosferico da piombo è costituita dall'attività di estrazione e di lavorazione del metallo; tuttavia la sorgente

inquinante più diffusa e difficilmente intercettabile è quella legata all'uso di composti del piombo come additivi nei carburanti.
L'utilizzo delle marmitte catalitiche e i problemi connessi all'aumento della concentrazione del piombo nell'atmosfera, hanno reso necessaria la produzione di benzine prive di questo metallo, che tuttavia presentavano in una prima fase, livelli più elevati di benzene.
I composti del piombo sono tossici per la **salute** (interferiscono con i meccanismi di formazione dell'emoglobina nel sangue) e per **l'ambiente**; le caratteristiche di stabilità chimica e di persistenza favoriscono la contaminazione di tutti i comparti ambientali (acque, suolo, vegetali, etc.) e l'accumulazione nella catena alimentare.

SMOG FOTOCHIMICO

Lo smog fotochimico si manifesta tipicamente in ambiente urbano e suburbano. Si distingue dallo smog di tipo convenzionale (presente nelle aree urbane caratterizzato da biossido di zolfo (SO_2), incombusti e particolato) in quanto i processi che si svolgono sono determinati dalla luce solare che fornisce l'energia di attivazione di molte reazioni chimiche.
A seguito di tali reazioni si ha la formazione di alcuni dei cosiddetti inquinanti secondari quali ozono (O_3) ed altri composti altamente ossidanti (perossiacetilnitrato (PAN) ecc.) nella fascia della troposfera.
Da alcuni studi compiuti sulle serie storiche di dati di O_3 misurati al suolo, si è potuto concludere che i livelli di concentrazione di tale gas sono aumentati in questo secolo di circa un fattore 2-3 passando da 10 a 30 ppb (valori medi).
Meccanismo di formazione
L'unico processo in grado di portare alla formazione dell'O_3 troposferico è la rottura della molecola di biossido di azoto (NO_2) da parte della radiazione solare con lunghezza d'onda inferiore ai 400 nm:
$NO_2 + hv = NO + O$

$O + O_2 = O_3$

L'O_3 così formatosi può però ricombinarsi velocemente con il monossido di azoto (NO), per ricostituire la molecola originaria di NO_2. Pertanto in assenza di altre specie gassose, si raggiunge un equilibrio dinamico senza aumento della concentrazione di O_3.

$NO + O_3 = NO_2 + O_2$

Il passaggio fondamentale affinché l'atmosfera si possa arricchire di O_3 e di altre specie fotossidanti è costituito dalla formazione di NO_2 attraverso vie alternative. L'identificazione di tali reazioni costituisce quindi la chiave di volta per la comprensione dei processi fotochimici ossidativi.

La principale via alternativa per la formazione di NO_2 è costituita dall'ossidazione di NO ad opera dei radicali perossido (RO_2, dove R indica un generico radicale organico). Questi radicali liberi si formano dalla degradazione di molecole di composti organici volatili (indicati qui come RH) e dalla loro successiva reazione con l'ossigeno atmosferico. L'attacco agli idrocarburi volatili è dovuto alla presenza in atmosfera di altri radicali liberi, i radicali ossidrile (OH), la cui formazione si rivela cruciale per l'avvio dell'inquinamento fotochimico.

La produzione di radicali OH è anch'essa fondamentalmente di tipo fotochimico, ed i principali precursori sono l'acido nitroso, la formaldeide e lo stesso ozono. Quest'ultimo, dunque, non è solo il prodotto quantitativamente più importante dei processi di inquinamento fotochimico, ma è anche uno dei precursori che attiva il processo. Lo stesso vale, in misura diversa, per l'acido nitroso e la formaldeide. Queste osservazioni permettono di comprendere per quale motivo gli episodi acuti di smog fotochimico spesso persistano, con intensità crescente, per più giorni consecutivi.

$RH + OH + O_2 = RO_2 + H_2O$

$RO_2 + NO = NO_2 + RO$

Questa è una delle reazioni possibili. Altre complesse reazioni fotochimiche portano alla formazione di PAN o altri ossidanti.

Lo smog fotochimico non si presenta solo in ambito urbano ma anche in zone suburbane e montane. L'andamento dell'O_3 nelle zone urbane mostra una ciclicità (dì/notte) più spiccata che nelle zone montane, ove il ciclo è meno accentuato, ma il livello medio di fondo è ben più elevato, e questo vale sia per il periodo estivo (massima dinamica dell'O_3) sia per quello invernale (valori più contenuti). Le distribuzioni temporali e spaziali dell'O_3, possono essere comprese alla luce delle condizioni favorevoli alla sua formazione:

- intensa radiazione solare ed alte temperature
- scarsità di vento e precipitazioni
- presenza di precursori
- fenomeni di trasporto e meteorologia locale

La periodicità giornaliera del livello di O_3 rispecchia quasi fedelmente l'andamento della radiazione solare, con un fattore di ritardo di un'ora circa, in quanto quest'ultima è responsabile delle reazioni di fotodissociazione. Analogamente, la differenza tra l'andamento estivo ed invernale è causata anch'essa dalla diversa intensità dell'irraggiamento che raggiunge la troposfera nelle due stagioni estreme. La maggior perpendicolarità dei raggi estivi influenza maggiormente la produzione dell'O_3 rispetto a quelli più inclinati dell'inverno.

La presenza di precursori spiega, in parte, la differenza tra l'andamento urbano ed extraurbano dell'ozono. Infatti in atmosfera urbana gli NO_X, consumano quantità consistenti di O_3 presente. Questo fenomeno è più visibile nelle ore serali e notturne, quando la mancanza di radiazione solare annulla la produzione fotodissociativa dell'O_3.

I fenomeni di trasporto sono gli ultimi responsabili della differenza tra il livello montano ed urbano, in quanto sono al contempo la causa del maggior livello medio dell'O_3 nei siti in quota che della minore ampiezza della periodicità giornaliera. A causa dei venti l'O_3 prodotto nelle aree urbane durante il giorno, viene trasportato nelle zone montane, ove però non si può

"beneficiare" del consumo notturno dell'ozono ad opera degli inquinanti di natura antropica e ciò comporta un livello di fondo più consistente.

Effetti

Vegetazione

Le piante rivelano danni visibili a concentrazioni di ozono normalmente inferiori a quelle considerate tossiche per l'uomo e quindi rivestono un grande interesse come organismi spia. L'azione nociva dell'ozono si esplica quando i livelli in atmosfera superano una certa soglia espressa in termini di livello critico a breve e a lungo termine. Il primo si riferisce al valore oltre il quale si manifestano danni fogliari visibili, mentre il secondo al valore sopra il quale si verificano cali di resa nelle colture più sensibili.

L'O_3 entra nella pianta attraverso gli stomi posti sulla superficie fogliare, alterando le cellule e determinando l'insorgenza di necrosi. I danni sono caratterizzati da macchie puntiformi situate sulla pagina superiore della foglia. Queste caratteristiche rendono il danno da ozono facilmente discriminabile da quello determinato da altri fattori (funghi, virus, altri inquinanti ecc.).

Osservazioni sul campo e studi in laboratorio hanno evidenziato che la risposta della pianta all'ozono è correlata a diversi fattori, tra cui le condizioni climatiche esistenti. Di queste, l'umidità è particolarmente importante in quanto le piante rispondono all'aumento di umidità aprendo maggiormente gli stomi e favorendo così l'entrata dell'ozono all'interno dell'organismo.

Oltre all'insorgenza di danni visibili, l'assorbimento di ozono comporta modifiche a livello fisiologico quali una riduzione della fotosintesi e una perdita prematura delle foglie. Questo stato di salute della pianta può indurre un calo di produttività registrabile al termine del periodo di crescita. La riduzione della biomassa può verificarsi anche senza l'insorgenza di danni visibili.

Salute dell'uomo

L'ozono è una specie ossidante e fortemente reattiva. Nell'uomo è responsabile di effetti irritanti quali bruciore agli occhi e irritazione alla gola.

Alcuni studi indicano che esposizioni a concentrazioni comprese tra 160-360 $\mu g/m^3$, per un periodo di 1-8 ore, possono comportare effetti acuti sui polmoni, le cavità nasali e la gola (ma i soggetti sensibili, ad esempio gli asmatici, ne risentono anche a concentrazioni più basse).

Clima

Tra gli effetti dell'ozono troposferico sull'ecosistema, bisogna anche considerare il suo contributo all'effetto serra, dovuto alla capacità di questa molecola di assorbire nell'infrarosso (l'effetto di una molecola di ozono è pari a circa duemila volte quello di una molecola di CO_2).

Manufatti

L'ozono provoca inoltre danni ai materiali (soprattutto plastiche e gomme) ed ai monumenti, causando un depauperamento del patrimonio culturale ed artistico.

ACIDIFICAZIONE

L'acidificazione delle deposizioni atmosferiche ha iniziato a manifestarsi nei primi decenni del secolo scorso.

I principali gas responsabili di questo processo derivano in maniera ridotta da cause naturali e in massima parte dalle emissioni provocate dall'uomo principalmente di tre inquinanti: biossido di zolfo (SO_2), ossidi di azoto (NO_X) e ammoniaca (NH_3). Le sorgenti sono rappresentate dalla combustione di carbone e olio combustibile residuo (soprattutto nelle centrali elettriche), dal riscaldamento degli edifici nei settori residenziale, commerciale e terziario, dall'industria e dai veicoli diesel o a benzina.

Meccanismo di azione: formazione, trasporto e deposizione di composti acidi.

Il biossido di zolfo e gli ossidi di azoto, in presenza di sostanze ossidanti quali ozono, radicali perossidrile, ecc., possono trasformarsi, per ossidazione, in acido solforico e acido nitrico. Il processo di ossidazione dell'NH_3 è pressoché assente in atmosfera dove anzi questo composto basico contribuisce a

neutralizzare l'acidità derivante dagli NO_x e SO_2, mentre avviene per via batterica nel suolo e nelle acque, producendo acidità in tali comparti.

Gli acidi solforico e nitrico così formati sono trasportati, rimossi dall'atmosfera e riversati al suolo attraverso processi di deposizione umida e secca.

La deposizione umida che apporta direttamente acidi solforico e nitrico al suolo, comprende processi di incorporazione delle sostanze nei nuclei di condensazione delle nubi e di dilavamento di gas e aerosol. La maggior parte dei solfati, nitrati e ioni idrogeno nell'acqua di pioggia ha origine nei processi in nube. Gli inquinanti vengono poi trasferiti al suolo con le precipitazioni (neve, piogge ecc.) o vengono intercettati da vegetazione e manufatti attraverso nebbia, rugiada e brina (deposizioni occulte).

La deposizione secca comprende tutti quei processi attraverso i quali i gas ed il particolato raggiungono direttamente il terreno. Essa può avvenire secondo meccanismi differenti dettati principalmente dalle dimensioni delle particelle (per impatto e gravità), dallo stato d'aria contiguo alla superficie ricevente e dalla struttura chimica e fisica della superficie stessa. I depositi secchi di SO_2, NO_x e NH_3 conducono rapidamente alla formazione dei relativi acidi al suolo. I gas ed il particolato, inoltre, possono essere captati dalle chiome degli alberi. Il successivo dilavamento di queste, compiuto dall'acqua piovana, provoca la solubilizzazione delle sostanze e la conseguente formazione di acidi.

Le caratteristiche chimiche delle deposizioni oltre che da fattori naturali (caratteristiche geochimiche del suolo, distanza dal mare, ecc.) sono quindi in massima parte determinate da fattori antropici.

Il fenomeno è particolarmente complesso e rilevante anche in considerazione del ruolo giocato dalla meteorologia. Essa determina il trasporto di queste sostanze in atmosfera e la vita media dei gas e delle particelle acidificanti.

In genere, la maggior parte dei composti di zolfo si deposita entro due - quattro giorni dall'emissione. Le maggiori deposizioni di zolfo si verificano nelle regioni che presentano le emissioni più copiose e sono dovute in

prevalenza ai depositi secchi di SO_2. Alti tassi di deposizioni di zolfo hanno luogo anche nelle regioni con elevate precipitazioni, come le aree costiere e montuose.

Gli NO_x tendono a restare più a lungo nell'atmosfera pertanto, rispetto allo zolfo, quantità relativamente inferiori si depositano vicino alla fonte di emissione.

La distribuzione dei depositi di composti azotati ridotti (quelle che hanno origine dalle emissioni di ammoniaca) è caratterizzata, in misura maggiore rispetto allo zolfo, da elevati tassi di depositi vicino alle fonti. Per i composti di ammonio vi è quindi un trasporto su distanze inferiori rispetto agli ossidi di zolfo e di azoto.

Effetti

La comparsa in diversi Paesi europei e del Nord America di fenomeni di sofferenza su vasta scala di ecosistemi naturali (laghi e foreste) e la supposizione che le deposizioni acide vi avessero svolto un ruolo decisivo hanno stimolato numerose ed intense ricerche in tutto il mondo fin dalla metà degli anni 70.

Foreste e suoli

La maggior parte degli studiosi concordano nell'attribuire il fenomeno del deperimento delle foreste all'inquinamento atmosferico, anche se in diversi casi non è stato possibile definire una precisa relazione causale tra presenza di inquinanti e sviluppo di alterazioni fisiologiche. L'ipotesi che l'inquinamento atmosferico, ed in particolare le piogge acide, siano il fattore determinante nello sviluppo dei danni è rinforzata dalla constatazione che il deperimento dei sistemi forestali si è manifestato in modo sincrono in specie e regioni diverse, in località prossime o remote da fonti di inquinamento e su suoli a diverso grado di acidità. L'andamento dei sintomi varia da specie a specie ma il fattore comune è risultato il progressivo diradamento delle chiome, con perdita di vitalità che può giungere fino al disseccamento della pianta.

Questo fenomeno può trovare una spiegazione ammettendo l'esistenza di fattori predisponenti che hanno agito per tempi lunghi inducendo progressivi stati di stress nella pianta e di un unico fattore scatenante che ha agito in tempi brevi portando alla rapida comparsa di differenti sintomi. Tra i fattori scatenanti è verosimile l'origine climatica caratterizzata da eventi estremi (siccità primaverili - estive e gelate). Tra i fattori predisponenti, è molto probabile che sia stata l'acidificazione dei suoli a dare il maggiore contributo. Altri fattori predisponenti vanno ricercati nell'eccessivo apporto di azoto sotto forma di nitrati e di sali di ammonio (saturazione di azoto). L'ampia disponibilità di azoto ha, infatti, un effetto fertilizzante, che stimola la crescita degli alberi, ma contemporaneamente li rende più sensibili a stress di origine climatica e biotica. Inoltre, va menzionato anche l'effetto congiunto dell'ozono e delle nubi acidi che possono determinare danni alle strutture fogliari degli alberi.

Per quanto riguarda gli effetti delle piogge acide sulla chimica e la biologia del suolo non è possibile una trattazione univoca data l'estrema variabilità dei suoli. Infatti, le deposizioni acide possono avere addirittura un'influenza positiva nei confronti dei terreni calcarei, in quanto gli acidi solforico e nitrico da esse veicolati apportano elementi nutritivi e, contemporaneamente, abbassano il contenuto di calcare che se presente in quantità eccessive può danneggiare le colture.

Nei terreni non calcarei le piogge acide possono avere, invece, un impatto notevole più nei suoli naturali a prateria e a bosco che nei terreni agrari. In quest'ultimo caso, infatti, i danni possono essere limitati attraverso gli interventi che normalmente vengono attuati per smorzare la tendenza all'acidificazione che caratterizza tutti i suoli privi di calcare.

La deposizione di acidi provoca nel suolo lo scambio di ioni H^+ con altri cationi, soprattutto calcio e magnesio, che possono così essere solubilizzati e trasportati via con le acque di percolazione. Questo fenomeno, detto

lisciviazione, è un processo naturale, ma le deposizioni acide ne aumentano l'intensità e ne modificano le caratteristiche.

L'acidificazione del suolo agisce in modo negativo sulle colture non tanto per una sua azione diretta, quanto piuttosto per gli effetti collaterali che esso determina. Infatti, il dilavamento di calcio e magnesio si traduce in una carenza di elementi nutritivi per la pianta. Inoltre l'acidificazione facilita la solubilizzazione di sostanze fitotossiche, quali ad esempio l'alluminio, il manganese ed i metalli pesanti in genere e inibisce parzialmente o totalmente l'attività della microflora dei terreni. Infine, essa altera l'entità e la velocità dei processi di alterazione dei minerali primari e quindi i processi di formazione del suolo.

Acque

Molte migliaia di laghi in Europa, soprattutto nelle zone settentrionali, sono state colpite gravemente dalle deposizioni acide. Le conseguenze sugli organismi acquatici possono essere dirette, ossia dovute alla tossicità, oppure indirette, ossia legate alla scomparsa di prede o vegetali sensibili all'acidificazione o dovute ai complessi cambiamenti nella chimica delle acque causati dall'aumento dell'acidità.

La maggior parte delle deposizioni atmosferiche che interessano un corpo idrico non vi giunge direttamente, ma attraverso il bacino imbrifero, interagendo con il suolo e con la vegetazione. La quantità di sostanze acide che vi giunge dipende quindi dall'intensità delle precipitazioni, dalle caratteristiche del suolo ecc.

L'aumento dell'acidità delle acque superficiali produce direttamente modificazioni nelle comunità biologiche e induce una serie di fenomeni che contribuiscono ad alterarle.

Quando i valori di pH si avvicinano a cinque, scompaiono le specie ittiche più sensibili, si sviluppano alghe filamentose e cessa la riproduzione della maggior parte dei pesci. Nelle acque acide si possono trovare in soluzione composti tossici che in acque neutre sono insolubili, come ad esempio i

composti dell'alluminio che mostrano forme di tossicità specifica. Quando i valori di pH variano tra sei e cinque si possono verificare alterazioni delle interazioni biotiche, più difficilmente riproducibili in laboratorio.

L'acidificazione delle acque superficiali avviene dove deposizioni atmosferiche con un elevato carico acidificante interessano suoli che non sono in grado di tamponarle (come ad es. Stati Uniti, Canada ed Europa Settentrionale, Scandinavia soprattutto).

In Italia, i laghi maggiori e i corsi d'acqua principali non sono generalmente sensibili ai fenomeni di acidificazione, salvo in alcuni casi come i laghi d'Orta e Mergozzo, dove il bacino imbrifero poco esteso e costituito da rocce silicee non è in grado di fornire una riserva alcalina sufficiente. Al contrario, laghi di minore dimensione e in posizione prossima alle sorgenti, quali sono quelli alpini, sono in gran parte sensibili ai fenomeni di acidificazione e una parte significativa di essi presenta valori di pH inferiori a sei.

Manufatti

I composti acidificanti esplicano un'azione di tipo corrosivo su numerosi beni del patrimonio culturale, quali edifici e monumenti di calcare e marmo e vetrate a mosaici. I danni sono quasi interamente dovuti al biossido di zolfo in zone che presentano alte concentrazioni di questa sostanza.

APPENDICE 2

IL SOLARE TERMICO CON CONCENTRAZIONE DI CALORE

Quantunque la luce solare non concentrata dei raggi solari sia di utilità per produrre acqua calda o per riscaldare le case, essa non è abbastanza intensa per una trasformazione efficiente dell'energia. Applicazioni più avanzate basate sul solare termico – e cioè tecnologie capaci di sostituire con il solare le specifiche proprietà della fiamma da combustibile fossile – hanno quindi necessità di concentrare grandi quantità di luce solare su un'area di piccole dimensioni al fine di permettere produzione di calore ad alta temperatura che, a sua volta può, ad esempio, essere convertito in elettricità da un generatore termoelettrico convenzionale.

Evidentemente tali dispositivi, che dipendono dai raggi solari diretti, sono destinati a regioni con una grande insolazione diretta (il fotovoltaico funziona invece anche con luce diffusa, ad esempio, dalle nubi).

La quantità annuale di radiazione solare diretta che giunge al suolo dipende da tre fattori principali, legati tra di loro: il clima a grande scala, la latitudine e la quota. Lungo le fasce tropicali del pianeta, a pari latitudine, coesistono regioni con forti insolazioni medie annue (climi desertici) e regioni con cielo sereno limitato da intense variazioni stagionali (climi tropicali).

Stato attuale delle tecnologie per l'utilizzazione del solare termoelettrico

Esistono oggi tre tecnologie distinte, ben sviluppate a livello internazionale, su cui impostare il programma nazionale.

Specchi parabolici lineari - Denominati con il termine SEGS, essi sono usati per focalizzare su un singolo asse i raggi solari su un lungo tubo ricevente posizionato lungo la linea focale dei concentratori. Un mezzo portatore di

calore, ad esempio olio, pompato attraverso i tubi ricettori, alimenta una stazione di potenza localizzata centralmente. Il calore solare è trasformato in vapore allo scopo di far funzionare un turbogeneratore elettrico. La temperatura tipica di operazione è di 390 °C. Tali impianti oggi hanno potenze tipiche dell'ordine di 30-80 MW elettrici e bruciano anche una certa quantità di combustibile fossile (gas naturale) per produrre energia quando l'energia solare è deficitaria.

Torri solari - Un sistema di specchi che inseguono il moto del sole su doppio asse, chiamati eliostati, riflettono l'energia solare su di un recettore montato in cima ad una torre localizzata al centro. Il calore solare è raccolto da un fluido, ad esempio un nitrato fuso, che ha anche la funzione di accumulo di energia. Con il calore accumulato nei sali fusi si produce del vapore (565 °C), allo scopo di fare girare un turbogeneratore elettrico. Le torri solari sono particolarmente adatte alla produzione centralizzata di energia nell'intervallo di potenza solare da 100 a 200 MW elettrici.

Concentratori parabolici indipendenti - Consistono in uno specchio parabolico mobile per seguire il moto del sole e riflettente i raggi solari nel punto focale, dove sono assorbiti dal ricevitore. Il calore assorbito è trasferito (a 750 °C) da un sistema fluido-vapore (ad esempio sodio) al motore-generatore, ad esempio un motore lineare tipo Stirling, quantunque altri metodi (Brayton) siano anche utilizzati. Le dimensioni dei singoli moduli possono variare nell'intervallo da 5 a 50 kW elettrici; con una serie di tali concentratori si possono realizzare impianti di qualsiasi taglia e potenza. Mentre impianti con un numero limitato di specchi hanno generalmente il generatore individualmente montato su ciascun punto focale, su più grande scala il calore può essere raccolto attraverso guide di calore (heat-pipes) presso una stazione di potenza localizzata centralmente, dove può essere aggiunto anche l'accumulo dell'energia termica, come nel caso delle torri solari.

L'energia prodotta da tali impianti non può essere limitata alle sole ore di insolazione e dalle fluttuazioni dei passaggi nuvolosi. A tale scopo, due

tecniche sono state già largamente collaudate. Esse offrono anche un migliore fattore di utilizzo dell'installazione e quindi un costo minore per la produzione di energia elettrica:

- accumulo dell'energia termica: il calore prodotto viene usato per riscaldare un mezzo dal quale, al momento opportuno, si estrae il calore per produrre l'energia elettrica. Questi dispositivi sono di basso costo, alta efficienza e permettono di mantenere l'impianto operativo durante i picchi della domanda e durante le ore notturne. Essi hanno anche il vantaggio di eliminare le fluttuazioni dovute ai transienti (nubi).
- operazione congiunta solare-fossile: durante i periodi prolungati di assenza di calore solare, l'energia mancante è prodotta con combustibili fossili, con riduzione dei costi. Questi sistemi ibridi sono economicamente convenienti anche per potenze solari più modeste.

Costi e benefici

L'elettricità da solare termoelettrico è la più economica tecnica di produzione di energia solare oggi disponibile per applicazioni connesse alla rete. Ampie opportunità sussistono per ulteriori riduzioni sostanziali dei costi:

- il costo unitario dell'elettricità prodotta delle più recenti installazioni da 80 MW elettrici di Specchi parabolici lineari (SEGS) è dell'ordine di 240 Lit/kWh. Esso è da 1/2 a 1/3 del prezzo dell'elettricità prodotta oggi da impianti fotovoltaici.
- le Torri solari con accumulo di energia promettono efficienza di conversione superiore e investimenti iniziali inferiori. Una serie di studi internazionali ha indicato costi, con proiezione a breve termine, da 160 Lit/kWh a 240 Lit/kWh. Essi prevedono che, a medio termine (2010), l'elettricità prodotta avrà costi dell'ordine di 100 Lit/kWh.

- i concentratori parabolici indipendenti sono oggi competitivi per la produzione di energia in una nicchia ad alto costo per installazioni non connesse alla rete. Si prevede che essi potranno raggiungere gradualmente costi confrontabili con quelli delle torri solari su larga scala.

Miglioramenti nel progetto, basati sull'esperienza acquisita, potranno ridurre i costi di operazione e di manutenzione (O&M) dal 30 al 50% per tutte le tecnologie.

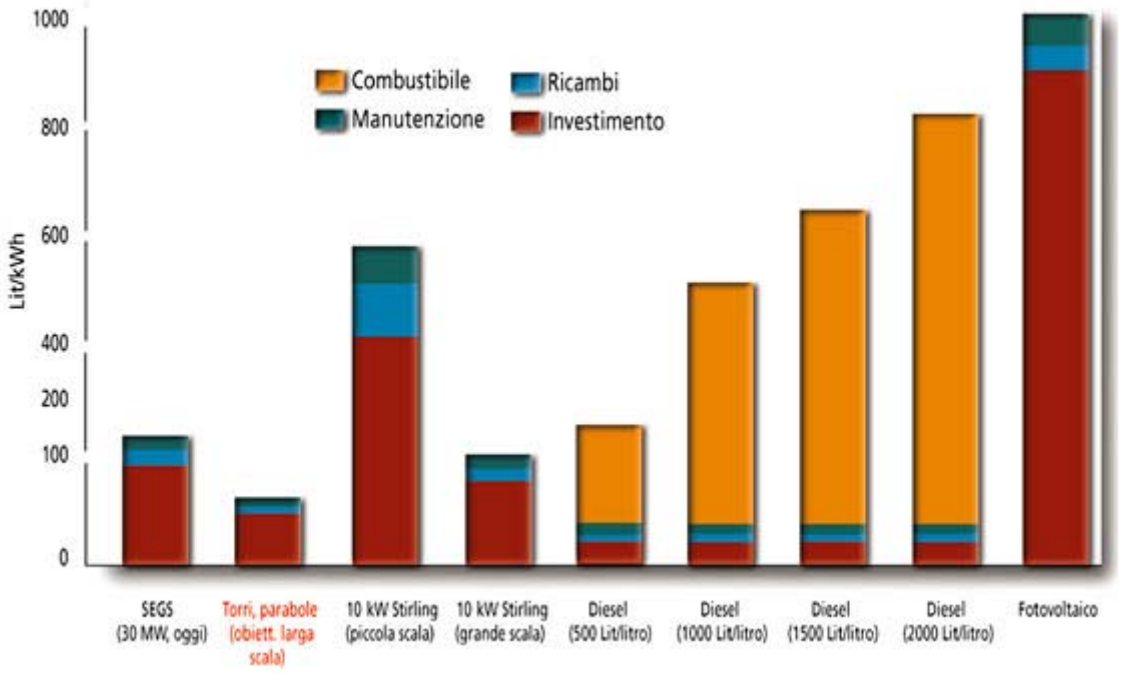


Figura 1: Costo unitario dell'energia elettrica prodotta da varie fonti.

Il fattore più rilevante nel costo dei sistemi solari termici è dato dalla fabbricazione dei componenti solari, come ad esempio i concentratori, che rappresentano più del 50% del costo di un impianto solare termoelettrico. Tali elevati costi sono dovuti soprattutto al piccolo volume di produzione attuale e rappresentano la principale barriera all'introduzione nel mercato di tale tecnologia. A tale riguardo:

- una domanda forte e sostenuta di sistemi solari permetterà sostanziali economie di scala che dovrebbero ridurne i costi di un fattore almeno quattro rispetto a quelli attuali.
- nuove tecniche di fabbricazione dovrebbero ridurre i costi attuali almeno del 40% senza richiedere grossi capitali di investimento.

I sistemi di produzione termoelettrica solare sono oggi una tecnologia largamente provata, con applicazioni commerciali dall'inizio degli anni 80. Specchi parabolici lineari sono oggi operativi con una potenza elettrica complessiva installata di 354 MW. Essi hanno generato ben 6 miliardi di kWh e hanno dimostrato anche la longevità di impianti, specchi etc.

I costi effettivi e proiettati dalla fase iniziale fino alla realizzazione finale di sistemi maturi, basati su un insieme di semplici stime di costi e volumi di produzione futuri, sono stati prodotti da diverse Agenzie, come ad esempio il DOE (Department of Energy) Americano (1997) e dalla World Bank (1999).

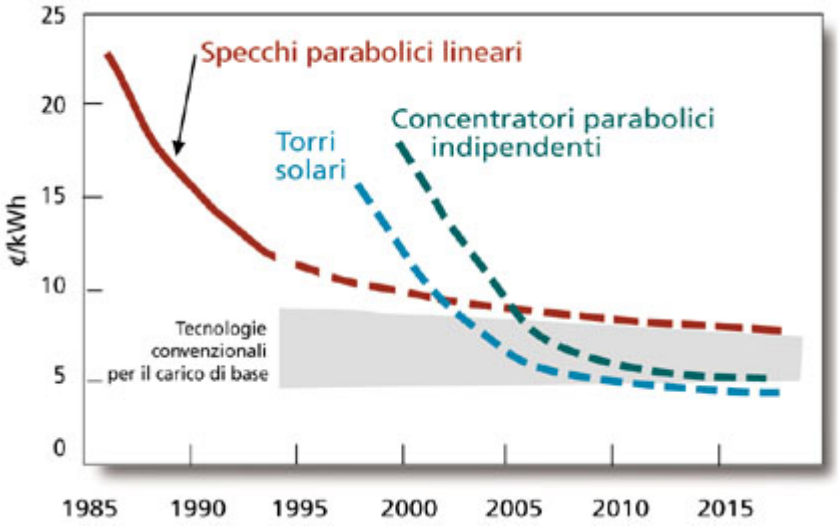


Figura 2: Proiezioni del costo dell'energia elettrica prodotta da solare termoelettrico

Questi sono i costi reali, ma ancora elevati se confrontati con i bassi costi tradizionali dei combustibili fossili. Si noti che, grazie a diversi programmi promozionali, si prevede che intorno al 2010 il costo del solare termoelettrico avrà raggiunto il costo dei combustibili fossili 1998.

Un fattore incentivante alla penetrazione a breve termine del solare termoelettrico in Italia è il cosiddetto decreto Bersani. A decorrere dal 2002, tutti i produttori e gli importatori di elettricità devono immettere in rete un quantitativo di energia elettrica da Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) pari al due per cento dell'energia prodotta (o importata) nell'anno precedente da fonti convenzionali, anche acquistando l'energia necessaria alla copertura della quota da altri produttori o dal Gestore della rete di trasmissione nazionale (GRTN).

Il decreto assicurerà ai produttori che dovranno realizzare gli impianti alimentati da FER un'adeguata remunerazione degli investimenti, posto che tali fonti non siano ancora competitive rispetto alle tradizionali tecnologie di produzione. Il meccanismo di remunerazione si concretizza nel libero commercio di appositi certificati verdi, emessi a favore dei produttori di FER che ne hanno fatto richiesta. Tali produttori potranno quindi vendere i

certificati verdi, ad un prezzo determinato da regole di mercato, ai soggetti in capo ai quali grava l'obbligo di acquisto.

Una recente proposta di direttiva europea per l'uso di fonti rinnovabili nella produzione di energia elettrica fissa un traguardo specifico per ogni paese al 2010: per l'Italia, tale obiettivo è proposto nella misura del 15%, escludendo l'idroelettrico di grossa taglia; il che equivale a un aumento di circa il 250% rispetto all'attuale contributo delle rinnovabili "non tradizionali", ovvero, in termini assoluti, ad un incremento di circa 25000 GWh di produzione annua in dieci anni, quindi una media annua di 2500 GWh incrementali. Un impianto termoelettrico pilota di 200 MW produce annualmente l'equivalente di circa 500 GWh.

Il solare termoelettrico può rientrare anche nel meccanismo di incentivazione previsto dai fondi strutturali comunitari, in quanto specifico alle Regioni del Mezzogiorno, che godono delle condizioni ambientali di insolazione più favorevoli.

CAPITOLO 3

L’ENERGIA SOLARE IN LOMBARDIA

LO STATO DELL'ARTE

Esaurita l'analisi della parte teorica relativa al rapporto energia e ambiente, pare opportuno esaminare una situazione concreta, ovvero come si presenti lo stato di diffusione delle energie rinnovabili in una regione italiana e con quale livello di sviluppo tecnologico. Avendo, nel corso del mio anno di servizio civile, collaborato all'installazione di un sistema solare termico nel comune di Basiano in Lombardia, mi sono domandato quale fosse lo stato attuale della diffusione del solare nella nostra regione. Al di là comunque della mia esperienza e motivazione personale, mi pare una ricognizione assai indicativa perché, nel quadro nazionale, la Lombardia si presenta come una delle regioni più ricche e a più alto consumo energetico.

E' ovvio, sulla base di quanto detto nella parte teorica, che l'applicazione di energie rinnovabili in questa regione potrebbe portare ad una notevole diminuzione dell'uso di fonti fossili, particolarmente impattanti sull'ambiente, con un netto miglioramento e del bilancio energetico e dell'inquinamento ambientale. Bilancio economico che inoltre avrebbe una ricaduta positiva sulle spese sanitarie, accompagnata da una minor perdita di giornate di lavoro. Si può portare a esempio uno studio sugli effetti a lungo termine dell'inquinamento ambientale nell'area milanese. Studio che considera come indicatore dell'inquinamento il livello di PM10.

Questo approccio è giustificato dalla forte relazione empirica tra la suddetta misura dell'inquinamento e vari effetti sulla salute. Si tratta inoltre di un approccio che, invece di considerare gli effetti come somma di tutti gli inquinanti nel loro insieme, ne considera uno solo, che ha, però, la caratteristica di essere veicolo di trasporto di altri inquinanti. Fatto questo che lo rende adatto a essere un buon indicatore, anche se è comunque probabile che, considerando il solo PM10, si giunga a una sottostima degli effetti reali di tutto l'inquinamento.

Per la città di Milano è stata ponderata una media annuale di PM10 di 59 $\mu g/m^3$. Lo studio evidenzia i decessi e le conseguenze sulla salute che si sarebbero evitati con una media annua di PM10 rispettivamente di 10 $\mu g/m^3$ e 30 $\mu g/m^3$ (valore guida negli U.S.A.). I dati[1] sono rilevanti: 1.142.135 giornate lavorative perse, 24.370 episodi di asma e bronchite acuta, quasi 2.000 ricoveri/anno per malattie cardio-respiratorie, oltre 300 morti.

	Rispetto a 10 μg/m3	Rispetto a 30 μg/m3
Mortalità per cause naturali Per una permanenza di 10-20 anni	1.920	1.228
Mortalità per cause naturali Effetti immediati	306	181
Ricoveri/anno per cause respiratorie	744	440
Ricoveri/anno per cause cardiache	1.199	710
Nuovi casi/anno di bronchite cronica	262	155
Episodi di bronchite acuta nei bambini	10.307	6.100
Attacchi di asma nei bambini	9.357	5.537
Attacchi di asma negli adulti	4706	2.785
Giorni di attività lavorativa persi	1.142.135	67.5957

Tabella 1: Riepilogo dei principali effetti dell'inquinamento a Milano. (da P. Crosignani, op. cit.)

Di fronte a questa situazione milanese, che ovviamente si ripercuote su gran parte della Lombardia, si potrebbe pensare che l'attività della regione a salvaguardia e tutela dell'ambiente e della salute attraverso l'incentivazione dell'uso di fonti energetiche rinnovabili sia estremamente vivace. Deduzione che sorge inoltre immediata visto il nuovo ruolo di Regioni ed Enti locali nel campo dell'energia, ruolo conseguente al processo di decentramento amministrativo in atto nel nostro paese. Nel settore energetico il

[1] P. Crosignani, Stima degli effetti sulla salute dell'inquinamento urbano a Milano, Istituto Nazionale Tumori, Milano, 2001.

decentramento si accompagna al processo di liberalizzazione, nella direzione dell'abbattimento del monopolio sia verticale che orizzontale. Inoltre tale decentramento si evolve a cascata: lo Stato attribuisce alle Regioni determinate competenze le quali in parte rimangono alle Regioni stesse, in parte vengono redistribuite a Provincie, Comuni ed Enti locali con apposite leggi regionali.

Il Piano Energetico Regionale (PER) è il principale strumento attraverso il quale le Regioni possono programmare e indirizzare gli interventi (anche strutturali) in campo energetico nei propri territori e regolare le funzioni degli Enti locali (autorizzazione per impianti di produzione, controlli di vario genere, etc.), armonizzando le decisioni rilevanti che vengono assunte a livello regionale e locale (si pensi, ad esempio, ai piani per lo smaltimento dei rifiuti, o ai piani di bacino per la gestione delle risorse idriche).

Il processo di decentramento in campo energetico inizia con la legge 308/82 e trova il suo compimento con la legge 59/98 e il decreto legislativo 112/98 (la cosiddetta riforma Bassanini), che prevedono, fra l'altro, il trasferimento a Regioni ed Enti locali delle risorse necessarie a condurre e gestire la politica energetica. La legge regionale lombarda 1/2000 ha recepito il decreto legislativo "Bassanini".

Si hanno dunque le motivazioni, e forti, per intervenire; si hanno le competenze, gli strumenti amministrativi e le risorse per intervenire; e, se si va a leggere tra i principi ispiratori e gli obiettivi principali della politica energetica lombarda contenuti nel PER, si hanno anche grandi dichiarazioni di intenti: "… impegno verso la riduzione di CO_2, rispetto al 1990, di almeno il 6,5% entro il 2012"; "…obiettivo a medio termine è il raddoppio delle installazioni che utilizzano energia solare termica"[2].

Tuttavia, nonostante approfondite indagini, quello che non sono riuscito a riscontrare è una concreta e fattiva politica a favore dell'energia solare. O,

[2] Dal sito della Regione Lombardia: www.ambiente.regione.lombardia.it/EnergiaParchi/per/per.htm.

meglio, sarebbe più corretto affermare che non esiste in Lombardia una politica energetica regionale per il solare[3]. E lo si può riscontrare da diverse situazioni di fatto, che si metteranno in luce.

Infatti uno dei requisiti fondamentali, necessario per procedere all'analisi della situazione energetica territoriale, regionale e locale, e di conseguenza impostare una strategia di politica energetica, è quello della disponibilità di dati energetici certi, rilevati regolarmente con criteri e metodi uniformi, confrontabili negli anni e dotati della massima disaggregazione possibile in termini di fonti impiegate e di settori di impiego. Questi dati relativi all'energia solare, termica e fotovoltaica, NON esistono – almeno a livello ufficiale – per la Lombardia.

I soli dati reperiti, o, meglio, reperibili, sono contenuti in uno studio, pubblicato nel marzo 1989 e relativo alla situazione esistente nell'anno 1988, effettuato dall'Istituto di Fisica applicata dell'Università degli Studi di Milano[4]. Lo studio è un'indagine conoscitiva sullo stato degli impianti solari termici installati in Lombardia a seguito del programma di incentivi stabiliti dalla legge 308/82 e cofinanziati dalla Regione Lombardia. Come si può vedere, sono dati oggi decisamente obsoleti.

Per gli anni successivi al 1988 esistono solo dati a carattere territoriale aggregato. In quest'ultimo caso, una prima fonte, la quale però, come si è detto, non fornisce dati specifici sulla regione Lombardia, considera solo dati aggregati a livello macroregionale: è il censimento delle fonti rinnovabili di energia per l'anno 1994 redatto dall'ENEA. Secondo tale censimento, nel Nord Italia al 1994 erano stati installati collettori solari termici per 90.000 m^2 e

---

[3] Intervista fatta a Sergio Zabot, responsabile del Dipartimento Generale Tutela Ambientale – Regione Lombardia, il 19 febbraio 2002.

[4] Regione Lombardia – Università degli Studi di Milano-Istituto di Fisica Generale Applicata, Verifica sperimentale del funzionamento del complesso degli impianti solari per la produzione di acqua calda sanitaria installati in Regione Lombardia con contribuzioni ai sensi della Legge 308/82. Indagine sullo stato degli impianti solari per produzione di acqua calda in Lombardia, Regione Lombardia, Milano, marzo 1989.

per una produzione di 39.000 MWh[5]. Tuttavia anche questa statistica non presenta alcun dato disaggregato, neanche a livello macroregionale, per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici.

Una seconda, e ultima, fonte alla quale ci si può riferire è il Rapporto energia e ambiente 2000, sempre redatto dall'ENEA, rapporto nel quale i dati che vengono forniti sono presentati solo aggregati a livello nazionale: nel 1998 esisteva in Italia un parco di potenza fotovoltaica installata di 17.680 KW_p, con una produzione di 15.670 MWh, ed erano stati installati 240.000 m^2 di collettori termici, con una produzione di 397 TJ di energia termica [$TJ=10^{12}\cdot J$][6].

Tutti i dati reperibili sono dunque decisamente insufficienti per farsi una pur vaga idea della diffusione, distribuzione e tipologia degli impianti installati nella nostra regione. Fatto che, a mio parere, si mostra quale sintomo di un forte disinteresse delle istituzioni relativamente a una fonte energetica rinnovabile che, anche a latitudini maggiori e quindi con minore insolazione, ha dato prova di essere una valida alternativa.

Ugualmente, e conseguentemente, l'atteggiamento tenuto dalla Regione Lombardia nel proporre autonome iniziative di stimolo per la diffusione dell'energia solare appare come passivo, per non dire inesistente. Infatti la sola attività svolta in tal senso è di diretta derivazione dalle iniziative promosse dal Ministero dell'ambiente attraverso i programmi "Tetti fotovoltaici" e "Solare termico", programmi ai quali la Regione Lombardia ha dovuto partecipare cofinanziando i locali progetti di nuove installazioni di energia solare.

In relazione a questi programmi sono reperibili i dati riguardanti la ripartizione fra Stato e Regioni degli oneri finanziari per il progetto "Tetti fotovoltaici". Come si può vedere dalla tabella seguente (i dati sono espressi in milioni di

[5] ENEA, Censimento per il territorio italiano dei dati relativi alle fonti rinnovabili di energia ed al loro contributo al bilancio energetico per l'anno 1994, ENEA, Napoli, 1994, pag. 19.

[6] ENEA, Rapporto energia e ambiente 2000, ENEA, Roma, 2000, vol. II, I dati, pag. 294-295. Si deve comunque notare che questi dati sono anche estremamente imprecisi: sono infatti fondati su stime dello stesso ENEA.

lire), la Lombardia è la regione che maggiormente è stata impegnata finanziariamente:

Regioni e Province autonome	Contributo del Ministero	Contributo delle Regioni o Province autonome	Totale	% Regioni/Province autonome
Abruzzo	880	377	1.257	2,2.
Basilicata	430	184	614	1,08
Calabria	1.458	625	2.083	3,65
Campania	3.967	1.700	5.667	9,92
Emilia Romagna	2.754	1.500	4.254	6,89
Friuli Venezia Giulia	844	362	1.206	2,11
Lazio	3.621	1.552	5.173	7,72
Liguria	1.181	506	1.687	2,95
Lombardia	6.239	2.674	8.913	15,60
Marche	1.007	432	1.439	2,52
Molise	233	100	333	0,58
Piemonte	3.031	1.300	4.331	7,58
Puglia	2.840	1.000	3.840	7,10
Sardegna	1.161	498	1.659	2,90
Sicilia	3.499	1.500	4.999	8,75
Toscana	2.487	1.800	4.287	6,22
Umbria	572	245	817	1,43
Valle d'Aosta	82	40	122	0,20
Veneto	3.086	1.323	4.409	9,05
Prov. Aut. Bolzano	310	133	443	0,78
Prov. Aut. Trento	317	136	453	0,79
TOTALE	40.000	18.000	58.000	100

Tabella 2: Ripartizione Stato – Regioni degli oneri finanziari per il progetto 10.000 Tetti Fotovoltaici. (da: Ministero dell'Ambiente – ENEA, Rapporto sullo stato di avanzamento del programma 10.000 Tetti Fotovoltaici, ENEA, Roma, 2001)

Questo impegno finanziario, rilevante rispetto a quello delle altre regioni italiane, pare potrebbe contraddire, se preso unicamente in sé stesso, le

affermazioni qui precedentemente fatte. E' necessario invece specificare che il programma ministeriale prevede, attraverso un bando, sia che le erogazioni statali vengano ripartite fra le regioni in base al loro prodotto interno lordo, sia che le regioni debbano sovvenzionare, oltre il contributo statale, i progetti per un ammontare pari al 30% dei loro costi complessivi, dedotto naturalmente il 25% a carico dell'utente. E il caso lombardo appare anomalo per quanto la ripartizione dei contributi statali, che, si è visto, doveva essere fatta in base alla percentuale di PIL prodotto da ogni regione: la Lombardia, con una percentuale di PIL del 22% riceve solo il 15,6% dei contributi statali. Che significato può avere questo fatto? Potrebbe essere che la Regione Lombardia non si sia sufficientemente attivata per ottenere quanto le spettava, diminuendo contemporaneamente il proprio onere di cofinanziamento?

Anche per i contributi finanziari, derivanti dal decreto direttoriale n. 100/SIAR/2000, relativi all'installazione di impianti solari termici la Regione Lombardia si è mostrata assai prudente, per non dire restia: il contributo totale previsto è infatti solo di un miliardo di lire[7].

Un'ulteriore conferma del disinteresse di fondo della Regione Lombardia per la diffusione dell'energia solare è data dalla situazione inerente allo stato di attuazione dei programmi promossi dal Ministero dell'ambiente, dei quali si è già precedentemente parlato. Infatti, per quanto riguarda il programma "Tetti fotovoltaici", la Regione Lombardia si trova ancora nella fase di analisi delle domande pervenute: aveva annunciato la pubblicazione della graduatoria – l'entità dei finanziamenti messi a disposizione da Stato e Regione non sono sufficienti a coprire tutte le richieste di contributi giunte alla Regione – per il 13 maggio 2002, ma, a giugno iniziato, non sono ancora state fornite notizie. Per quanto riguarda il programma "Solare termico", per il quale il termine di

[7] Sito del Ministero dell'ambiente, Servizio inquinamento atmosferico e rischi industriali: www.extraweb.it/vision/txt_d003.html.

presentazione delle domande per i contributi finanziari è scaduto il 31 ottobre 2001, non è dato, a tutt'oggi, sapere una qualsivoglia notizia.
Si deve infine ricordare che il decreto "Bassanini" stabilisce che le Regioni possano disporre dell'1% delle accise sui carburanti per investimenti, a loro assoluta discrezione, nel campo energetico. Non risulta che la Regione Lombardia si sia mai preoccupata di utilizzare tale possibilità e disponibilità per una incentivazione allo sviluppo dell'energia solare. Utilizzo in questo senso che invece, ad esempio, è già stato fatto dalla Regione Abruzzo.
Importa in ultimo rilevare il fatto che, in un collegato ordinamentale alla legge finanziaria approvato in Consiglio regionale il 27 febbraio 2002, si stabilisce che l'ARPA viene in sostanza trasformata da ente autonomo in ente subordinato alla Giunta regionale, in quanto il potere gestionale all'interno dell'ente viene attribuito al direttore generale, che riceve indicazioni sul come operare dalla Giunta. Di conseguenza l'ente che dovrebbe controllare lo stato dell'ambiente e criticare e stimolare l'azione della Regione, diventa dipendente direttamente dal potere politico esecutivo della Regione.
A questo punto non sembrano necessarie ulteriori possibili esemplificazioni.

Come esercizio puramente teorico, data la situazione sopra illustrata, si può fare un calcolo approssimativo del possibile risparmio nella bilancia energetica e ambientale lombarda che deriverebbe da una più decisa incentivazione e diffusione dell'energia solare. Può essere indicativo un unico esempio – e non certamente quello che potrebbe portare ai maggiori risultati, ma sicuramente il più fattibile – relativo al risparmio che si può effettuare, attraverso l'adozione del solare termico, nella sola produzione di acqua calda sanitaria per il settore residenziale.
Prendendo alcuni semplici dati dalle tabelle del citato rapporto Energia e ambiente dell'ENEA, si vede che i consumi energetici nel settore residenziale, per funzioni d'uso, sono così ripartiti: 67,5% per riscaldamento; 12,4% per

acqua calda; 6,1% per usi cucina; 14% per usi elettrici[8]. L'acqua calda, che a livello nazionale comporta un consumo energetico pari a 3.414 Ktep[9], viene prodotta da fonti diversificate così ripartite:

	Ktep	%
GPL	107	3,1
GAS	2.048	60
GASOLIO	271	7,9
OLIO COMBUSTIBILE	7	0,2
CARBONE	6	0,2
ENERGIA ELETTRICA	975	28,6
Totali	3.414	100

Tabella 3: Fonti energetiche utilizzate per la produzione di acqua calda sanitaria a livello nazionale. (da: ENEA, Rapporto energia e…, cit. , pag. 361))

Applicando queste ripartizioni percentuali nazionali ai consumi residenziali della Lombardia, si può rilevare che i consumi finali di energia nel residenziale sono pari a 6.261.232 tep[10]. La Lombardia si presenta infatti, sul territorio nazionale, con il più alto valore di energia utilizzata nel settore residenziale, valore maggiore di oltre due volte a quello della seconda regione per consumi di energia nel settore residenziale, il Piemonte, che mostra un consumo equivalente a 2.764.898 tep[11]. In Lombardia, dunque, per la produzione di acqua calda vengono utilizzati il 12,4% di 6.261.232 tep equivalente a 776.393 tep. Il 28,6% di queste ultime sono prodotte con l'utilizzo di energia elettrica, mentre il 71,4% con l'uso di combustibili fossili.
Prendendo ora come punto di partenza i dati utilizzati nel secondo capitolo in relazione all'analisi economico – ambientale dell'energia solare termica, si

[8] ENEA, Rapporto energia e …, cit., vol. II, cit., pag. 275.
[9] Idem, pag. 280. Il Ktep è uguale a 10^3 tep (tonnellate equivalenti di petrolio)
[10] Idem, pag. 361.
[11] Ibidem.

può dedurre che, se si installassero collettori solari a integrazione della produzione dell'energia necessaria alla fornitura dell'acqua calda richiesta – senza dunque modificare i sistemi di produzione dei singoli utenti - si potrebbero risparmiare:

776.393 · 40% = 310.557 tep

il risparmio del 40% è stato calcolato in base ai dati precedentemente esposti e che si riassumono qui nella seguente breve tabella:

Da	A	% di risparmio
Caldaia a gas	Solare + caldaia a gas	39,9
Scaldabagno elettrico	Solare + caldaia a gas	82
Scaldabagno elettrico	Scaldabagno elettrico + solare	40

Si evita, di conseguenza, di immettere nell'atmosfera:

2,795 · 310.557 = 868.000 tonnellate di CO_2 equivalente

Il citato fattore 2,795 corrisponde alle tonnellate di CO_2 equivalenti emesse dal consumo di una tep per la produzione di energia in Lombardia, considerando che nella regione la produzione di energia è caratterizzata dal consumo predominante dell'olio combustibile. Si deve inoltre sottolineare che il 61% dell'energia elettrica prodotta in Lombardia è generata da fonti petrolifere, mentre la media italiana è del 50%[12].

Risulta quindi evidente il notevole risparmio che si potrebbe avere nella bilancia energetica e ambientale della Lombardia anche solo attraverso l'applicazione dell'energia solare termica alla sola produzione di acqua calda. Si tenga anche conto del beneficio a cascata sulla situazione sanitaria della popolazione con anche la conseguente riduzione del numero delle giornate lavorative perse per malattia.

[12] Rapporto sullo stato dell'ambiente in Lombardia. 1999, Direzione Generale Tutela Ambientale, Milano, Regione Lombardia, 2000, pag. 64.

IL CASO DI CASCINA CASTELLAZZO NEL COMUNE DI BASIANO IN PROVINCIA DI MILANO.

Fotografia 1: Cascina Castellazzo prima dell'installazione del sistema solare termico

L'edificio – situato in località Castellazzo nel Comune di Basiano, a nord est di Milano – è un vecchio cascinale seicentesco, recentemente ristrutturato per uso civile e di abitazione, suddiviso in circa dieci moduli abitativi famigliari e in alcuni grandi locali ad uso comune. Si sviluppa su una superficie di 2.811 m^2 e ha una volumetria di 8.567 m^3.

Cascina Castellazzo è attualmente abitata da otto famiglie, unite in una associazione, Associazione Comunità e Famiglia (ACF) [13]. Associazione che dal punto di vista economico, che è il punto di vista che qui interessa, può

[13] A chi volesse saperne di più, consiglio di leggere il bel libro di Bruno ed Enrica Volpi, libro a cui devo molto, compreso il titolo della presente tesi di laurea (E. Volpi – B. Volpi, Un'alternativa possibile, Editrice Monti, Varese, 1998).

essere definita, se si volesse cercare un riferimento teorico nella letteratura economica, come una modalità di allocazione del rischio individuale; modalità che i testi di scienza delle finanze denominano "contratto di risk pooling"[14]. E' un meccanismo tramite il quale un certo numero di soggetti, avversi al rischio, decide di ripartire collettivamente il rischio sopportato a livello individuale mettendo in comune i propri redditi.

Questo è esattamente quanto accade nell'Associazione Comunità e Famiglia, nella quale i redditi effettivamente ottenuti da ogni famiglia vengono versati in una cassa comune; redditi che, per mano del presidente[15], vengono redistribuiti a ciascun nucleo familiare. La sola differenza tra la teoria del contratto risk pooling e la realtà qui in corso di analisi consiste nel fatto che nel primo caso a ciascun individuo viene attribuita una somma pari alla media aritmetica del reddito aggregato, mentre nel secondo caso a ciascun nucleo familiare viene invece consegnato un assegno in bianco, accompagnato dalla comunicazione dell'ammontare totale del budget mensile dell'associazione.

Lo scopo di questa adesione alla cassa comune – sempre in un'ottica economica – è la stabilizzazione del reddito individuale.

Da più di vent'anni ACF accoglie, nelle famiglie della comunità, minori e persone in difficoltà. Questo porta ad avere nuclei famigliari allargati, composti in media da 6-8 persone. In media la cascina ospita tra le 40 e le 55 persone, con punte di 70-75 quando vengono ospitati gruppi esterni.

Tutti i fabbisogni termici della cascina, riscaldamento ed acqua calda sanitaria, vengono totalmente soddisfatti da una caldaia a biomasse (cippato di legno). L'impianto di riscaldamento a cippato si compone delle seguenti parti essenziali: frantumatore di materiali legnosi[16]; sito di stoccaggio; estrattore a

[14] Si veda, ad esempio, R. Artoni, Lezioni di scienza delle finanze, Il Mulino, Bologna, 2000, pag. 334.
[15] E' eletto ogni 2 anni. Attualmente è il geologo dott. Carlo Leoni.
[16] Il frantumatore attualmente non è più utilizzato, dal momento che non è più necessario macinare, perché l'associazione riesce a provvedersi di materiale di scarto sul mercato già frantumato.

rastrello; sistema di alimentazione a coclee; caldaia; depuratore di fumi con separatore di ceneri a multiciclone; un serbatoio da 500 litri, con scambiatore primario collegato alla caldaia, per l'accumulo dell'acqua calda sanitaria.

La caldaia ha una potenza al focolare di 390 kW e potenza resa di 340 kW, a fronte di un fabbisogno di punta di circa 300 kW; l'esubero di potenza è stato deciso in previsione del prossimo futuro rifornimento di energia a un fabbricato adiacente di successiva acquisizione e da ristrutturare.

Questa caldaia ha un rendimento pari a 0,85 e funziona regolarmente anche con carichi ridotti fino al 60%. Il regolare funzionamento, con una più che buona resa, a carico ridotto è reso possibile dalla speciale configurazione della camera di combustione e dalla regolazione automatica e computerizzata dell'aria primaria e secondaria.

La camera di combustione è infatti suddivisa in tre parti: una prima camera di gasificazione e precombustione dal basso con apporto di aria primaria preriscaldata; una seconda zona di miscelazione ad alta turbolenza in tunnel orizzontale con iniezione di aria preriscaldata; una terminale camera di post-combustione con rallentamento della velocità dei fumi e caduta delle ceneri. In tal modo viene raggiunta, e mantenuta per circa 5 secondi, una temperatura dei fumi di 1.100 – 1.200 °C, ottenendo l'abbattimento quasi totale delle emissioni nocive.

L'alimentazione col combustibile cippato è regolata automaticamente con dei sensori di livello a raggi infrarossi. La regolazione del tiraggio, in base al valore della depressione nella camera di combustione, viene anch'essa effettuata in modo automatico per mezzo di un inverter adattato alla regolazione continua del numero di giri del ventilatore della caldaia.

L'ottimizzazione della combustione, specie per le alte temperature raggiunte, può avere come conseguenza l'emissione di elementi inquinanti. Precisamente con lo scopo di ridurre le possibili emissioni conseguenti alla presenza di eventuali contaminanti dei residui legnosi (vernici, plastiche o simili) e all'elevata temperatura dei fumi al termine della camera di combustione,

prima di giungere allo scambiatore ad alto rendimento "a superficie di scambio", viene attuato un accurato e separato controllo della proporzione di aria primaria e secondaria che permette di mantenere gli No_x su concentrazioni tra i 50 e i 150 mg/m^3, concentrazioni nettamente inferiori a quelle previste dai limiti di legge. Questa relativamente bassa concentrazione degli No_x (inquinanti, come noto, legati alla permanenza di temperature elevate) la si riesce ad ottenere pur privilegiando l'obiettivo del raggiungimento di un altissimo livello di temperatura e lasciando in secondo piano il problema del contenimento degli No_x.

La caldaia presenta pertanto le caratteristiche tipiche di un buon forno di incenerimento. Inoltre la caldaia è dotata a valle di un depuratore finale dei fumi a multiciclone ad alta efficienza per l'abbattimento del particolato; si ottiene in tal modo un valore finale molto contenuto di polveri e ceneri nei fumi.

Si deve inoltre rilevare che la CO_2, emessa quale risultato della combustione dei residui legnosi, verrebbe, in alternativa, ugualmente a formarsi nel processo naturale di decomposizione della materia organica; si può quindi affermare che l'apporto di questo impianto di riscaldamento all'effetto serra deve considerarsi nullo nel periodo di operatività.

A titolo di paragone, si è ipotizzato l'utilizzo di una caldaia a metano centralizzata. Esso comporterebbe una spesa media annua di circa 50 milioni di lire; valore calcolato ipotizzando una spesa annua di £ 5.800 per metro cubo.[17]

Si è inoltre visto che per produrre il fabbisogno termico – stimato in circa 1.455 GJ (di cui 1.241 GJ per il riscaldamento e 214 GJ per H_2O sanitaria) – si emetterebbero: 0,25 · 5.238.000 = 1.309.500 kg/CO_2 anno[18].

[17] Stime ENEA.

[18] I calcoli di emissione di CO_2 sono basati su alcune semplici equivalenze: 1 MWh = 3,6 GJ; 1.455 GJ = 5.238 MWh. Come analizzato nel Cap. 2, ogni kWh prodotto da combustione di metano genera 0,25 kg di CO_2 equivalente.

Nel giugno del 2001 l'ACF della Cascina Castellazzo ha provveduto all'installazione di pannelli solari per integrare il precedente sistema a cippato. Il nuovo impianto solare termico nel periodo estivo funziona in esclusiva ed è sufficiente a soddisfare l'intero fabbisogno di acqua calda delle famiglie residenti, mentre l'impianto a cippato è spento. In inverno i due impianti sono messi in funzione contemporaneamente; l'impianto solare termico – nelle giornate sufficientemente assolate – ha la funzione di preriscaldare le acque sia del circuito sanitario che di quello di riscaldamento.

L'installazione dell'impianto solare è stata decisa, innanzitutto, per limitare i costi/ore di manutenzione durante il periodo estivo, quando la caldaia a cippato, funzionando a meno di un quarto del proprio regime, ha, di conseguenza, una resa bassa, perché la temperatura nella camera di combustione non raggiunge i gradi sufficienti per una combustione ottimale; ne deriva quindi un incremento delle quantità di ceneri e polveri incombuste all'interno dell'impianto che necessita, dunque, di più frequenti interventi di pulizia. Altra conseguenza di un funzionamento a regime ridotto della caldaia a cippato è il peggioramento della qualità dei fumi di scarico. E proprio quest'ultimo fatto ha costituito un'altra delle motivazioni che hanno spinto l'ACF a decidere l'installazione dell'impianto solare termico; infine ulteriore e non irrilevante motivazione della decisione è stata data dalla possibilità di riduzione dei costi del combustibile.

Per l'installazione dell'impianto è stato richiesto un contributo regionale all'interno del già citato programma "Solare termico", programma che prevede un contributo di 600 lire al kWh, producibile e calcolato su base annua, per le installazioni ad uso abitativo, quale è quella della cascina Castellazzo.

L'impianto solare termico della cascina Castellazzo è formato dai seguenti componenti essenziali: 48 m^2 di collettori solari termici di tipo piano (sei pezzi da 8 m^2 ciascuno) a superficie captante selettiva dall'efficienza istantanea[19]

[19] Per la definizione si veda il Cap. 2, par. 2.

pari a 794 W/m^2; autoclavi di spinta dell'acqua e del fluido vettore (in questo caso una miscela di acqua e glicole in proporzione 65 a 35); uno scambiatore ad alta efficienza regolato da un dispositivo elettronico e da un flussometro che provvedono a una gestione ottimale del sistema (la pompa di circolazione entra in servizio quando la temperatura del collettore supera di 8°C la temperatura dell'acqua contenuta nella parte bassa del bollitore); un vaso d'espansione per il circuito del fluido vettore; un serbatoio inerziale (ossia che permette la stratificazione dell'acqua) da 3.000 litri e un ulteriore accumulo per acqua sanitaria da 1.000 litri.

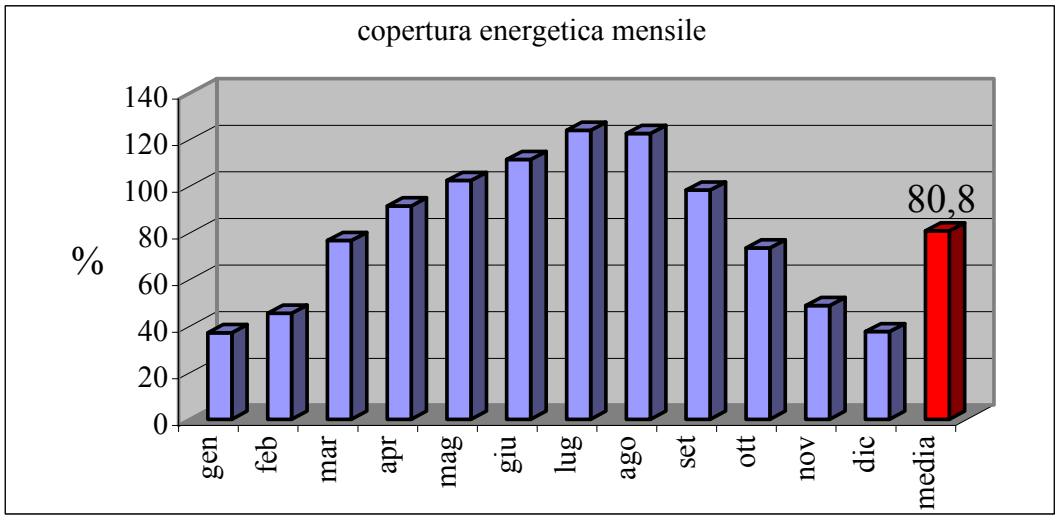
I pannelli sono stati installati sul tetto dell'edificio, inclinato di 30 gradi rispetto al pavimento ed esposto a sud.

Fotografia 2: Cascina Castellazzo durante l'installazione del sistema solare termico.

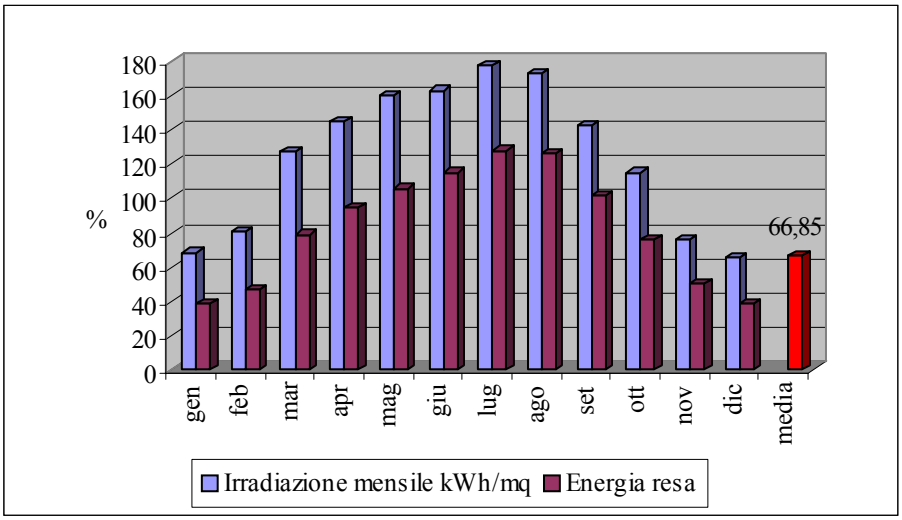
Il dimensionamento dell'impianto è stato scelto in modo tale da poter provvedere all'integrazione di almeno il 50% dell'energia annua utilizzata per la produzione di acqua calda sanitaria e, in particolare, si è calcolato di rendere tale produzione indipendente dalla caldaia nei mesi estivi (l'inclinazione del tetto è ottimale a questo fine). Si è previsto inoltre di mantenere comunque una

integrazione minima media di circa il 30% del fabbisogno di acqua calda nel periodo invernale.

Il fabbisogno energetico annuo per la produzione di acqua calda sanitaria è stato calcolato in 59.412 kWh/annui e i collettori riescono a produrre 48.011 kWh/annui con una copertura energetica prossima all'80,8%.



L'elevato valore di copertura energetica è conseguenza del fatto che i collettori in questione riescono a restituire quasi il 67% della radiazione solare che li colpisce.



A conclusione dell'analisi si vuole fare una valutazione economica dei benefici che l'installazione dell'impianto solare termico ha portato.

Una premessa è essenziale: essendosi conclusa l'installazione dell'impianto alla fine di giugno dell'anno 2001, non esistono ancora serie storiche complete di dati su cui verificare l'effettiva resa economica del sistema. Questa, per avere una validità statistica, dovrà essere studiata su una media di più anni, almeno 5.

Infatti, data l'aleatorietà della fonte energetica solare (ad esempio autunni o primavere particolarmente coperte), potrebbero verificarsi annate particolarmente favorevoli/negative tali da invalidare la portata dell'analisi[20].

Si inizia l'analisi fornendo un termine di paragone: se cascina Castellazzo dovesse utilizzare l'energia elettrica per scaldare la stessa portata d'acqua sanitaria fornita dall'impianto solare, si avrebbe una spesa annua pari a [21]

[20] Così come, per comparare i consumi energetici per il riscaldamento della caldaia a cippato di anni diversi e per confrontare la resa energetica di anni diversi dell'impianto solare per l'acqua sanitaria prodotta, sarebbe necessario depurare i dati statistici dalla componenti variabili stocasticamente da un anno all'altro, quali, essenzialmente, gli scostamenti delle temperature ambientali dalle medie storiche. La disponibilità di una lunga serie storica di dati di temperatura consente infatti di ottenere un valore di gradi-giorno medio di riferimento, e di valutare per ogni anno lo scostamento tra le condizioni climatiche effettive e quelle medie di periodo.

48.011 kWh · 300 £/kWh = 14.403.300 £

con una produzione di:

0,58 · 48.011 kWh = 27.846 kg di CO_2 equivalenti.[22]

Si veda ora il risparmio economico ottenuto dall'integrazione dei due impianti. Due sono gli elementi principali di valutazione: il costo del materiale legnoso acquistato e i costi di manutenzione ordinaria, ovvero la periodica pulizia dalle polveri e dalle ceneri, e straordinaria, legata soprattutto alla difficoltà di movimentare il combustibile. Durante l'anno precedente alla installazione dell'impianto solare sono stati consumati 970 quintali di cippato, con un costo medio al quintale di £ 13.000[23], per un totale di spesa di £ 12.610.000.

L'anno dell'installazione dei collettori, che è stata effettuata nel mese di giugno, ha portato ad un consumo nullo di combustibile durante i mesi estivi, e ad una riduzione di circa il 20% nei mesi di novembre e dicembre, portando il consumo annuo a 800 quintali di cippato, per una spesa di £ 10.400.000.

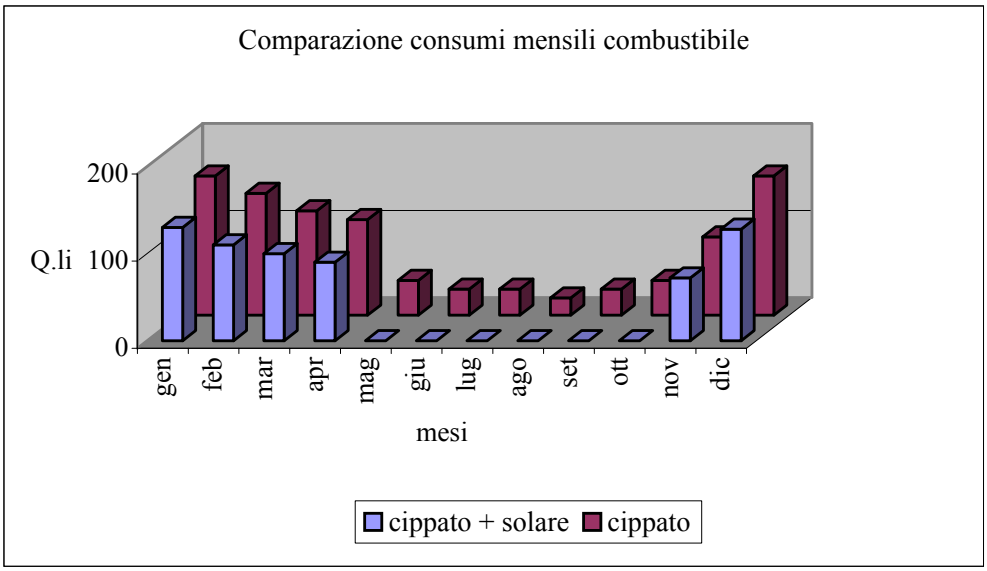
	2000	2001	2002
Gennaio	160	160	130
Febbraio	140	140	110
Marzo	120	120	100
Aprile	110	110	90
Maggio	40	40	0
Giugno	30	30	0
Luglio	30	0	0
Agosto	20	0	0
Settembre	30	0	0
Ottobre	40	0	0
Novembre	90	72	72 prev.
Dicembre	160	128	128 prev.
TOTALE QLI.	970	800	630
Costo effettivo m/£	12.610	10.400	8.190 prev.
Costo evitato		2.210 (-17%)	4.420 (-19%) prev.

[21] Il valore di 300/kWh per l'energia elettrica per uso civile è riportato dalle tabelle dei prezzi dei prodotti energetici (media annua) contenuta in ENEA, Rapporto Energia e…, cit., pag. 96.

[22] Come già accennato, in Italia, per produrre un kWh elettrico le centrali termoelettriche emettono nell'atmosfera in media 0,58 kg di CO_2.

[23] Diversi, come già detto, i materiali utilizzati: dagli scarti di lavorazione delle industrie alimentari (gusci di nocciole, pistacchi ecc.) a quelli di industrie produttrici di pacciamanti per l'agricoltura. Tali prodotti presentano ovviamente prezzi diversi, legati anche ad andamenti stagionali. Si è proceduto a calcolare una media ponderata.

Il risparmio è stato del 17% circa. I primi mesi del 2002 hanno visto anch'essi una riduzione di circa il 20% mensile di consumo di combustibile.
Già dal mese di maggio è stata spenta la caldaia, favoriti anche da un'ottima situazione meteorologica. Nell'ipotesi che i restanti mesi del 2002 permettano lo stesso comportamento dell'anno precedente, si è stimato che a fine anno saranno stati consumati 630 quintali di cippato, con una spesa di £ 8.190.000 ed un risparmio di circa il 35%, pari a £ 4.420.000 rispetto all'anno 2000.



Si rilevi che durante i mesi di fermo della caldaia vengono evitate circa 2 –3 ore/settimana di manutenzione ordinaria, pari a 48 – 72 ore nell'arco dei 5 – 6 mesi di inattività. Costo che non viene contabilizzato, dal momento che questa attività viene svolta dai membri della comunità. Una considerazione

particolare merita la manutenzione straordinaria: il sistema di trasporto del combustibile dal silo alla caldaia (un estrattore a rastrello e due coclee) comporta, talvolta, a causa della natura del materiale trasportato – ovvero materiale solido e dalla pezzatura spesso irregolare, quand'anche inquinato da corpi estranei – interruzioni dell'operatività, dovute a guasti e malfunzionamenti dell'apparecchiatura di trasporto. Ciò si verifica (per quanto riguarda in particolare gli interventi resisi necessari per guasti rilevanti) in media 2 –3 volte l'anno. Il 2001 è stato in questo senso un annus horribilis, in quanto la sostituzione delle coclee ha comportato una spesa di £ 7.371.000.

Le necessità di manutenzione delle parti meccaniche di tali apparecchiature ha comportato, negli ultimi 5 anni, spese per circa £ 3.000.000/anno, con una punta nel 2001 determinata dalla ragioni sopra indicate.

Il fermo della caldaia non potrà che portare ad una diminuzione di questi oneri. Ipotizzando che la frequenza degli inconvenienti avvenga in maniera proporzionale alla massa di cippato movimentato, si potrà giungere ad un risparmio pari al 18-20% all'anno, ovvero £ 570.000-600.000 annue.

Volendo, in conclusione, determinare i tempi di ammortamento dell'investimento, si sono calcolati costi annui evitati pari a:

Combustibile:	£ 4.420.000
Manutenzione straordinaria	£ 570.000
Per un totale annuo di:	£ 4.990.000

Il costo totale dei pannelli (installazione compresa, con IVA al 10%) è stato pari a £ 46.700.000.

Qualora fosse accolta la richiesta di finanziamento presentata alla Regione Lombardia[24] (la quale porterebbe un rimborso di £ 600 · 28.000 kWh producibili[25], per un totale di £ 16.800.000) si rientrerebbe dei costi sostenuti

[24] Ovviamente, anche il caso della cascina Castellazzo rientra nel panorama generale della mancata risposta della Regione Lombardia sugli esiti della graduatoria per l'assegnazione dei contributi a fondo perduto

[25] I kWh producibili calcolati nella domanda di contributo sono inferiori alla produzione annua effettiva stimata dal produttore dell'impianto. Questo avviene per l'obbligatorio uso di tabelle standard.

in 5, 9 anni. Qualora il contributo non fosse erogato, l'ammortamento sarebbe effettuato in 9,3 anni. Entrambi questi valori non sono da considerarsi eccessivi per due importanti ragioni, e precisamente:

- il combustibile cui ci riferiamo è a bassissimo costo
- non è stato contabilizzato né il costo lavoro relativo alle operazioni di manutenzione, né il risparmio di energia elettrica necessaria al funzionamento dell'impianto di riscaldamento (movimentazione cippato e sistema di depurazione fumi).

L'esempio della cascina Castellazzo evidenzia le fortissime potenzialità che l'utilizzo di energie rinnovabili ha non solo nella fondamentale ottica del miglioramento della qualità dell'ambiente, ma anche dal punto di vista strettamente utilitaristico di un rilevante ritorno economico nel breve/medio periodo.

Il caso della cascina Castellazzo potrebbe diventare un formidabile strumento di informazione e di formazione culturale per estendere la conoscenza e l'uso dell'energia solare, data l'inerzia complessiva del sistema, nell'azione di sviluppo delle energie alternative.

BIBLIOGRAFIA

A. Giddens, La terza via, Il saggiatore, Milano, 1999.

AA.VV, CNEA, Fonti Rinnovabili di Energia. Obiettivi e strategie nazionali. Stato dell'arte., ENEA , Roma , 2000.

AA.VV, CNEA, Gli strumenti di finanziamento per progetti energetico-ambientali., ENEA , Roma , 1998.

AA.VV, CNEA, Il consumatore come protagonista., ENEA , Roma , 1999.

AA.VV, CNEA, Il protocollo di attuazione del protocollo di Kyoto in Italia. Metodi, scenari e valutazione di politiche e misure., ENEA , Roma , 2000.

AA.VV, CNEA, L'energia nelle regioni italiane. Vol. 1. Struttura e dati dei consumi energetici nazionali e regionali., ENEA , Roma , 1999.

AA.VV, CNEA, L'energia nelle regioni italiane. Vol. 2. Bilanci e indicatori energetici regionali., ENEA , Roma , 1999.

AA.VV, CNEA, L'energia nelle regioni italiane. Vol. 3. Piani Energetici Regionali: l'analisi delle prime esperienze., ENEA , Roma , 1999.

AA.VV, CNEA, L'energia nelle regioni italiane. Vol. 4. Ricognizione sulle situazioni energetiche ambientali regionali., ENEA , Roma , 1999.

AA.VV, CNEA, Lo sviluppo Sostenibile- Per un libro verde su ambiente e sviluppo., ENEA , Roma , 2000.

AA.VV, Energia dal sole. Prospettive dell'energia fotovoltaica in Italia., Hypothesis editore , Roma , 1992.

AA.VV, Energia solare. Una proposta di politica industriale per i comparti fotovoltaico e termodinamico., F. Angeli , Milano , 1981.

AA.VV, Libro bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili. Versione preliminare. ENEA , Roma , 1998.

AA.VV, Miniguida al finanziamento di progetti energetici innovativi. Project plan. Stima dell'investimento. Gestione del rischio., ENEA, ISES, Roma, 1995.

AA.VV, UNDP, La qualità della vita nel mondo. Social Watch Report 2001, EMI, Milano, 2001.

Agenzia Internazionale per l'Energia (AIE), World Energy Outlook 2000, AIE, Parigi, 2001.

Aguado-Monsonet M.A. – Evaluation of the soccio-economic impacts of renewable energies: global survey to decision makers. – Ed. IPTS , Jan , 1998.

AIE, Oil Market Report, Aprile 2000.

Alselma E. A., Nieuwlaar E., Energy Viability of PV system, Energy Policy, vol. 28, n. 14, 2000.

Altreconomia, n°26, marzo 2002.

Amadori F., L'impresa industriale dal dopoguerra ad oggi, EGEA, Milano, 1997.

Arrow K. et al., Economic growth, carrying capacity and the environment, in Science, 28 aprile 1995.

Artoni R., Lezioni di scienza delle finanze, Il Mulino, Bologna, 2000.

B.C.G., Prospectives on Experience, Boston, 1972.

Barra L., Coiante D., Una centrale elettrica fotovoltaica autosufficiente con accumulo stagionale di idrogeno, HTE n°82, marzo-aprile 1993.

Bateson G., Mente e natura. Adelphi, Milano, 1984.

Bateson G., Verso un'ecologia della mente. Adelphi, Milano, 1976.

Bocchi , Ceruti – La sfida della complessità – Feltrinelli . Milano , 1985

Bocchi G., Ceruti M. (a cura di), La sfida della complessità, Feltrinelli, Milano, 1997.

Bonaiuti M., La teoria bioeconomica. La "nuova economia" di Nicolas Georgescu – Roegen., Carocci editore, Roma, 2001.

Brown L.R., State of the World 2001. Stato del pianeta e sostenibilità. Rapporto annuale, Edizioni Ambiente, Milano, 2001.

Bruton A., A Study of the Manfacture of crystalline silicon PV Modules. Conference record, 14th EuropeanPV Solar Energy Conference, Barcelona, 1997.

Calvino I, Palomar, Einaudi, Torino, 1983.

Carraro C., M.Galeotti, Ambiente, occupazione e progresso tecnico: un modello per l'Europa, Il Mulino, Bologna, 1995.

Cella P. – L'energia alternativa. Longanesi , Milano , 1979.

Cellerino R. – Oltre la tassazione ambientale. Nuovi strumenti per il controllo dell'inquinamento. – Il Mulino , Bologna , 1993.

Coase R.H., Impresa, mercato e diritto, Bologna, Il mulino, 1996.

Coase R.H., The problem of Social Cost, in Journal of Law and Economics, 1960.

Cogliani E., M. Mancini, S. Petrarca, F. Spinelli – La radiazione solare globale al suolo in Italia nel 1995. – ENEA , Roma , 1996

Cohen M.L., Crescita economica e crescita demografica, in Economia e Ambiente, n°1-2 , gennaio – aprile 2001.

Coiante D., Barra L., A Practical Method to Evaluate the Real Cost of Electrical Energy, I.E.R., 1995.

Coiante D., Combustibili alternativi da fonte rinnovabile: l'idrogeno, HTE n°95, maggio-giugno 1995.

Coiante D., La produzione fotovoltaica dell'idrogeno, ENEA, Energia ed innovazione, novembre-dicembre 1990.

Colle S., S. L. de Abreu, R. Rüther, Uncertainty in economical analysis of solar water heating and photovoltaic systems, Solar Energy vol 70 issue 2, 2001.

Commission on Sustainable Development "Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies" Background Paper no.3, 2001.

Cook E., The consumer as creator. A criticism of faith in limitless ingenuity, in "Energy exploration and explotation", I, n. 3,2000.

Costanza R., D'Arge R., R. de Grott, S. Farber, M.Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naaem, J. Paruelo, R.Raskin, P. Sutton, M. van den Belt, The value of the world's ecosystem services and natural capital, in "Nature", 15 May 1997, n° 387.

Currie G., Jackson K., Jacob S., Economics, McGraw-Hill, Sydney, 1992.

Daly H., Toward some optional principles of sustenaible developement, in Ecological Economics n° 2, 1990.

Daly H.E., Cobb J.B., Un'economia per il bene comune. Il nuovo paradigma economico orientato verso la comunità, l'ambiente e un futuro ecologicamente sostenibile. Red edizioni, Como, 1994.

De Paoli L., A. Lorenzoni (a cura di) – Economia e politica delle fonti rinnovabili e della cogenerazione. – F. Angeli , Milano , 1999.

Decker F., Ecologia e distribuzione: una analisi delle conseguenze sociali dell'ambientalismo, Ed. Dehooniane, Bologna, 1994.

Diario, a. VII, n. 5, febbraio 2002.

E. Tiezzi (a cura di) Ecological Phisical Chemistry, Amsterdam, 1991.

ENEA, Censimento per il territorio italiano dei dati relativi alle fonti rinnovabili di energia ed al loro contributo al bilancio energetico per l'anno 1994, ENEA, Napoli, 1994.

ENEA, Funzione Centrale Studi, L'energia e i suoi numeri. Italia 2000. ENEA, Roma, Maggio 2001.

ENEA, Le priorità sentite dai cittadini in materia di ambiente ed energia. Indagine n° 98504 ,condotta su incarico di ENEA da istituto CIRM, Enea , Roma , 1999.

ENEA, Rapporto energia e ambiente 2000, ENEA, Roma, 2001, vol. I, L'analisi.

ENEA, Rapporto energia e ambiente 2000, ENEA, Roma, 2001, vol. II, I dati.

ENEA, Rapporto energia e ambiente 2000. La borsa per l'energia elettrica., ENEA , Roma , 2000.

Energy for the future: renewable source of energy (community strategy and action plan). Campaign for take-off. – Commission service paper DG XVII , jen 1999.

Faber M., Manstetten R., Proops J., On the Conceptual Foundations of Ecological Economics: a Teleological Approach, Ecological Economics, n° 12, 1995.

FAO, The State of Food Insecurity in the World 2001, NYC, 2001.

Frankl P., Simplified life-cycle analysis of PV system in buildings. Present situation and future trends, Progress in PV, vol. 6, n. 2, 1998.

Funtowicz S.O., Ravetz J.R., Problemi ambientali globali e scienza post-normale, in Oikos, n° 3, 1991.

Galbraith J.K., L'economia e la qualità della vita., A. Mondadori, Milano,1986.

Galbraith J.K., La natura della povertà di massa., A. Mondadori, Milano, 1980.

Gelbspan R., The Climate Crisis. The Cover Up. The Prescription, New York,UBP, 2001.

Georgescu – Roegen N., Energy Analysis and economic valuation, SEJ, 1979.

Green M.A., Photovoltaics: Technology Overview, Energy Policy, vol. 28, issue 14, 2000.

Green M.A., Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice, Prentice Hall, New Jersey, 1995.

Greenpeace, Unlocking the Power of Our Cities, Greenpeace, London, 1995.

Gruppi di lavoro R&S FER – Fonti energetiche rinnovabili: elementi di discussione e di proposta per la definizione di alcune linee di R&S tecnologico. ENEA , Roma , 1999.

Gruppo di studio Hitesys R&S – Proposta di raggruppamento strategico delle tecnologie fotovoltaiche italiane. Roma , dicembre 1995.

Hall N. (a cura di), Caos. Una scienza per il mondo reale, Ed. Muzio, Padova, 1992.

Herkstrofer C., Contributing to a Sustainable Future. The Royal Dutch/Shell Group in the Global Economy, Shell International, London, 1997.

Holling S., Resilience and Stability of Ecological System, in Annual Review of Ecological System, n°4, 1973.

Holling S.,The resilience of Terrestrial Ecosystem: Local Surprise and Global Change, in W. Clark, Sustaunable development of the Biosfere, Cambridge Univ. Press, 1986.

Huang B.J., Lin T.H., Hung W.C., Sun F.S., Performance Evaluation of Solar Photovoltaic System, Solar Enegy, vol 70, issue n.5, 2001.

Huang B.J., T.H. Lin, W.C. Hung and F.S. Sun, Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems, Solar Energy vol. 70, issue n.5, 2001.

Il funzionamento dei progetti energetico-ambientali. – Atti del convegno, Roma , 26 giugno 1998.

Il protocollo di Milano – Milano 17/19 giugno 1996. Documento finale della conferenza sulle fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno europeo.

Ilsoleatrecentosessantagradi ed. ISES Italia, anno VIII , n° 1,6, 8, 11, a. 2001.

Katz M, H Rosen, Microeconomia, McGraw-Hill, Milano, 1996.

Knapp K., Jester T., Empirical investigation of the energy pay-back time for PV modules, Solar Energy, vol. 71, issue n. 3, 2001.

Krauter S. Schroer S., Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation, Solar Energy vol.67 , issue n.4-6, 1999.

Kuhn Th., La struttura delle rivoluzioni scientifiche., Einaudi , Torino , 1969.

L'energia solare termica: vantaggi economici ed ecologici nelle regioni montane., Atti del convegno , Cogne , 16 aprile 1994.

Le barriere alla diffusione delle fonti energetiche rinnovabili: come superarle., Atti del workshop ,4 luglio 1997., ISES , Roma , 1998.

Leftwich R. & R Eckert, The Price System and Resource Allocation, The Dryden Press, Sydney, 1995.

Legambiente , Ambiente Italia 2000., Ed Ambiente , Milano , 1999.

Legambiente, Ambiente Italia 2001. La salute ambientale delle città. 100 indicatori sullo stato del paese., Ed. Ambiente , Milano, 2001.

Lomborg Bjorn, The Skeptical Environmentalist. Misuring the Real State of the World", Hodder and Stoughton, Londra, 2001.

Machiavelli N., Il Principe, Sansoni, Firenze,1961.

Mazzonis M., Messina A. (a cura di), Sbilanciamoci. Rapporto 2002., Manifestolibri , Milano , 2001.

McTaggart D., C.Findlay, M.Parkin, Economics, Addison Wesley Publishers Ltd, Sydney, 1992.

Meadows D.H. et al., I limiti dello sviluppo, Mondadori, Milano, 1972.

Meir H.R., Thermal performance of combined solar system with different collector efficiencies, Solar Energy, vol. 72, issue n. 4, 2000.

Menna P., Manzo R., Censimento per il territorio italiano dei dati relativi alle fonti rinnovabili di energia ed al loro contributo al bilancio energetico per l'anno 1994., ENEA , Napoli , 1995.

Morin E., Per uscire dal ventesimo secolo, Lubrina, Bergamo, 1989.

Myrdal G., L'elemento politico nella formazione delle dottrine dell'economia pura, Sansoni, Firenze, 1981.

Myrdal Gunnar, L'obiettività nelle scienze sociali, Einaudi, Torino.

Neij L., Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology, Energy Policy, vol. 23, issue n.13, 1997.

Notizie Petrolifere, Anno XV- Aprile 2001, Ed. Unione petrolifera, Roma, 2001.

Nuovi strumenti di promozione del risparmio energetico e il ruolo delle regioni., Atti della giornata di studio . ENEA, WWF , dicembre 1995.

OCSE, The World in 2020: Towards a New Global Age, OCSE, 2000.

ONU-UNEP, Il futuro di noi tutti, Garzanti, Milano, 1987.

Perlin J., Dal Sole. L'energia solare dalla ricerca spaziale agli usi sulla Terra. Edizioni Ambiente, Milano, 2000.

Perotto P. G., L'invenzione del personal computer: una storia appassionante mai raccontata, Einaudi, Torino, 1991.

Pigou A.C., Economia del benessere, Torino, UTET, 1960.

Prigogine I., La fine delle certezze, Bollati Boringhieri, Torino, 1997.

Prigogine I., Stengers I., Tra il tempo e l'eternità, Bollati Boringhieri, Torino, 1989.

Rapporto sullo stato dell'ambiente in Lombardia. 1999, Direzione Generale Tutela Ambientale, Milano, Regione Lombardia, 2000.

Regione Lombardia – Università degli Studi di Milano - Istituto di Fisica Generale Applicata, Verifica sperimentale del funzionamento del complesso degli impianti solari per la produzione di acqua calda sanitaria installati in Regione Lombardia con contribuzioni ai sensi della Legge 308/82. Indagine sullo stato degli impianti solari per produzione di acqua calda in Lombardia, Regione Lombardia, Milano, marzo 1989.

Scheer H., Strategia solare. Energie rinnovabili per rinnovare la società., CUEN , Napoli , 1996.

Schmidt-Bleek F., The fossil Makers: Factor 10 and Beyond, Boston University Press, 1997.

Schumacher E.F., Piccolo è bello., Arnoldo Mondadori Editore, Milano 1977.

Schumpeter J.A., Storia dell'analisi economica, Bollati Boringhieri, Torino, 1990.

Scienza & Vita, nn. 10/96, 5/95, 4/95, Rusconi Editore.

Scott D. S., Interpreting the Architecture of the Energy System, in Proceedings of WEC 16th Congress, WEC Commettees, 1995, Tokyo.

Siniscalco D., Lo sviluppo sostenibile., Giappichelli , Torino , 1996.

Spiegel R. J., Kern E.C., Greenberg D.L., Demonstration of the environmental and demand-side management benefits of grid-connected photovoltaic power systems, Solar Energy vol. 62 issue n. 5, 1998.

Spiegel R.J., Greenberg D.L., Kern E.C. , House D.E., Emissions reduction data for grid-connected photovoltaic power systems, Solar Energy vol.68 issue 5, 2000.

Tacchi E.M., Ambiente ed opinione pubblica. Un'inchiesta nell'area metropolitana di Milano., F. Angeli , Milano , 1996.

Thom R., Parabole e catastrofi, Il saggiatore, Milano, 1980.

Tiezzi E., Il capitombolo di Ulisse. Nuova scienza, estetica della natura, sviluppo sostenibile. Feltrinelli , Milano , 1991.

Tiezzi E., Tempi storici. Tempi biologici, Garzanti , Milano , 1984

Tiezzi E., Fermare il tempo. Un'interpretazione estetico scientifica della natura, Raffaello Cortina Editore, Milano, 1996.

Tiezzi E., Marchettini C.(a cura di). Oltre l'illuminismo. CUEN, Napoli 1996.

Trieb F., Langniß O., Klaiß H., Solar electricity generation, a comparative view of technologies, costs and environmental impact, Solar Energy vol. 59 issue 1-3, 1997.

Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M., Yianoulis P., Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, Solar Energy vol. 72 issue 3, 2002.

Tsuchiya H., PV cost analysis based on the learning curve, RI ST, Tokyo, 1992.

Tsur Y., A. Zemel, Long term perspective on the development of solar energy, Solar Energy vol. 68 issue 5, 2000.

Turner R.K., Pearce D., Bateman I., Economia ambientale, un'introduzione elementare, Il Mulino, Bologna, 1996.

United Nations, Poulation Division, Department of Economics and Social Affairs, World Population Prospect 2000, United Nations, 2001.

United States Geological Survey, World Petroleum Assesment 2000, USGS, 2000.

Varian H. R., Microeconomia, Cafoscarina, Venezia, 1993.

Viaggi D., Zanni G., La valutazione di impatto ambientale in Italia, Franco Angeli editore, Milano, 1999.

Vivoli F.P., Energia elettrica dal sole, ENEA-ISES, Roma, 1999.

Volpi E., Volpi B., Un'alternativa possibile, Editrice Monti, Varese, 1998.

Williams R., Terzian G., A benefit/cost analysis of development of PV tecnology, Princeton University, Princeton, 1993.

Wills I., Schools Brief : Environmental Problems, Policy, vol. 11 num. 4, 1995.

World Resources Institute, UNEP, UNDP, World Bank, World Resources 2000-2001. People and Ecosystems: the Fraying Web of Life, WRI, 2000.

WWF – Italia 2000. Iniziative per un paese sostenibile – Ed. Ambiente , Milano , 1996.

WWF, UNEP-WCMC, Redefining Progress, Center for sustainability Studies, Living Planet Report 2000, WWF Ed., 2000.