

# Ricerca & Sviluppo e le tecnologie per l'ambiente

- ANGELO BONOMI
- CONSULENTE AMBIENTALE
- @ angelo.bonomi2@tin.it

#### Introduzione

Nell'applicazione della Direttiva Europea detta IPPC è ben conosciuto il problema della definizione e selezione delle migliori tecnologie disponibili, meglio conosciute con l'acronimo BAT (Best Available Technologies), nel quadro del processo della concessione dell'Autorizzazione Integrata Ambientale. La scelta di una BAT è relativamente semplice nel caso di tecnologie ben conosciute e con applicazioni industriali esistenti, caso già trattato in alcuni articoli precedenti (1, 2), ma diventa molto più complesso se si prende in considerazione una tecnologia che non è mai stata industrializzata finora. La definizione di BAT, come ad esempio è riportata nel volume BREF (Best Reference Document) edito dall'Unione Europea sui problemi di valutazione e selezione delle BAT (3) risulta abbastanza vaga a questo proposito poiché descrive una BAT come una tecnologia che è stata sviluppata ad una scala tale da permettere una sua utilizzazione in condizioni di viabilità economica e tecnica. Resta evidente che un'applicazione restrittiva di questa definizione porta alla definizione di BAT solo per tecnologie ben conosciute e utilizzate industrialmente, ma questo avrebbe come conseguenza l'impossibilità di definire come BAT una tecnologia che per la prima volta viene industrializzata. La conseguenza, in questo caso, sarebbe l'arresto o almeno un forte rallentamento dell'innovazione tecnologica. Questa situazione non si presenta generalmente nel campo delle tecnologie industriali e non è certo utile che si presenti anche nel campo delle tecnologie per l'ambiente.

Se si accetta quindi il principio che una nuova tecnologia, mai usata prima industrialmente, possa essere provata e considerata alla stregua di una BAT, appare il problema di come questa può essere valutata in rapporto alle altre tecnologie già industrializzate. Questo tipo di valutazione non è direttamente sviluppato nel BREF dell'Unione Europea (3) ed, anche se naturalmente questa valutazione si presenta meno frequentemente, essa ha la sua importanza essenziale. Il nodo centrale del problema di una valutazione di una nuova tecnologia che può essere industrializzata risiede nell'incertezza del suo comportamento allo stadio industriale riguardo gli aspetti economici, tecnici ed ambientali. Per quanto si siano condotti studi preliminari, fatta esperienza su impianti pilota o con prove industriali, non è quasi mai possibile prevedere con certezza il suo comportamento su scala industriale. Se è difficile quindi valutare il rischio di un'operazione di prima industrializzazione di una tecnologia, è tuttavia possibile gestire l'incertezza dell'operazione prendendo in esami i vari aspetti importanti del processo tecnologico di innovazione in maniera da minimizzare il rischio. Una cattiva gestione dell'operazione e decisioni sbagliate sulla possibilità e i tempi in cui un'innovazione può essere industrializzata, portano a tassi di insuccesso elevati con importanti conseguenze negative sul piano economico e spesso

anche ambientale. Per discutere dei vari aspetti di questa particolare valutazione è utile prendere in considerazione un opportuno modello concettuale dettagliato su cosa è la tecnologia e l'innovazione tecnologica per trarne opportune osservazioni e regole utili per il lavoro di gestione del processo di industrializzazione. Questo approccio permette di precisare il concetto di BAT anche per una nuova tecnologia e, come vedremo, può a sua volta portare ad importanti considerazioni anche su temi di grande attualità come il ruolo dell'innovazione tecnologica nel campo energetico nel contesto delle emissioni di gas serra, il suo impatto in campo economico e quindi sul ruolo che il Protocollo di Kyoto può avere su questi problemi.

#### Tecnologia ed innovazione tecnologica

Tecnologia ed innovazione tecnologica sono due termini molto usati senza però che ne venga sovente data in maniera precisa una loro definizione utile per interpretare i complessi fenomeni che originano. Un modo di affrontare la loro definizione è quella di adottare il punto di vista della moderna scienza della complessità, come quella ad esempio del Santa Fe Institute, che tende a sviluppare concetti, rappresentazioni e modelli che possono avere un'applicazione generale nell'interpretazione di sistemi complessi. Per quanto riguarda la tecnologia la scienza della complessità offre due tipi di approccio. Il primo considera la tecnologia come un artefatto costituito da un insieme di componenti (4), ad esempio per un'automobile le parti componenti come motore, freni, sospensioni, ecc. e ne studia le relazioni per l'ottimizzazione delle loro caratteristiche in vista dell'uso del prodotto tecnologico. Il secondo approccio considera la tecnologia come un processo costituito da un insieme di operazioni tecnologiche come riscaldare, spostare, pressurizzare, reagire chimicamente, ecc. ciascuna caratterizzata da un insieme di istruzioni, come temperatura, tempo, distanza, pressione, composizione, concentrazione, ecc. che ne definiscono il funzionamento (5). Questo secondo approccio è sicuramente il più utile quando si vuole discutere di tecnologie per l'ambiente in cui trattamenti di tipo fisico o chimico hanno un ruolo importante. Le varie operazioni che descrivono una tecnologia possono avvenire secondo una precisa sequenza temporale o in parallelo e una possibilità di rappresentarle è quella di utilizzare un grafo i cui archi corrispondono alle varie operazioni (6). Ne risulta uno schema rappresentativo molto simile a quello usato dal metodo PERT nel campo della gestione dei progetti in cui gli archi del grafo rappresentano i vari compiti da fare per l'esecuzione del progetto. Un altro aspetto importante nella definizione del modello di tecnologia adottata riguarda il dettaglio in cui sono descritte le varie operazioni. Consideriamo ad esempio una tecnologia come l'incenerimento dei rifiuti urbani. Questa può essere descritta semplicemente come una sequenza di operazioni costituite da: combustione su

griglia, scarica delle scorie, riscaldamento caldaia, trattamento fumi con elettrofiltri, con calce e carbone attivo, separazione polveri con filtri a maniche ecc. ovvero si può entrare più nel dettaglio suddividendo le operazioni principali citate in più operazioni secondarie che le compongono e così via. Teoricamente si potrebbe suddividere la tecnologia in tutte le sue operazioni fisiche o chimiche con un dettaglio tale da poterle descriverle tutte utilizzando le leggi conosciute della fisica o della chimica e ottimizzare il funzionamento solo attraverso dei calcoli. Noi sappiamo che questa suddivisione non è possibile, che l'ottimizzazione del funzionamento non può avvenire solo con calcoli ma è necessaria l'esperienza sull'impianto. Se anche potessimo conoscere tutte le operazioni più dettagliate di una tecnologia, è probabile che il loro enorme numero non permetta calcoli in tempi accettabili o più semplicemente ci si trova di fronte all'impossibilità di condurre calcoli perchè ci risulta impossibile conoscere tutti i parametri necessari. Questi limiti che praticamente si hanno in tutte le tecnologie ne costituiscono la loro complessità ed il modello di una tecnologia potrà essere più o meno dettagliato a seconda del numero di operazioni e dal campo di scelte o valori delle istruzioni che sono prese in considerazione

Se ora consideriamo una qualsiasi tecnologia caratterizzata da un insieme di operazioni, ciascuna caratterizzata da un insieme di possibili istruzioni, possiamo definire una configurazione costituita dall'insieme delle varie operazioni caratterizzate da un specifico valore per la sua istruzione. Questa configurazione rappresenta quindi un certo specifico modo di operare la tecnologia ed è anche chiamata ricetta tecnologica. Per ogni tecnologia è possibile avere un gran numero di ricette tecnologiche date dalla combinazione di tutte le possibili istruzioni per le varie operazioni del modello adottato. Da un punto di vista matematico è possibile caratterizzare l'insieme di tutte le ricette di una tecnologia e stabilire una specie di distanza tra queste che è conosciuta nel campo della matematica discreta come distanza di Hamming. Ad esempio due ricette che si differenziano per un solo valore di istruzione saranno considerate vicine, mentre se si differenziano in più valori di istruzioni saranno considerate lontane e tanto più sono differenti tanto più saranno lontane. Sulla base quindi di questo concetto di distanza è possibile immaginare uno spazio in cui si posizionano tutte le possibili ricette di una tecnologia, questo spazio è chiamato spazio tecnologico (6). Anche le differenti tecnologie, che ad esempio servono per una certa applicazione, possono essere interpretate in termini di distanza osservando le differenze dei grafi che le rappresentano e stabilendo anche in questo caso una distanza. In altre parole quanto più due tecnologie hanno operazioni simili tanto più saranno vicine e viceversa. Lo spazio in cui è possibile rappresentare l'insieme di tutte le tecnologie dedicate a una particolare applicazione è chiamato spazio delle tecnologie (6). Prendiamo ad esempio le varie tecnologie usate per la scrittura, abbiamo in questo caso la macchina da scrivere meccanica, nata già nell'800, che si è evoluta perfezionandosi negli anni. Nel dopoguerra è nata la macchina da scrivere elettrica e quindi negli anni 70 un'altra tecnica di scrittura costituita da un computer e stampante. Le varie versioni della macchina da scrivere meccanica ed anche la macchina da scrivere elettrica possono essere considerate tecnologie vicine dove non ci sono grandi differenze nella struttura delle operazioni e le innovazioni introdotte in questo caso sono chiamate innovazioni incrementali. Al contrario il sistema computer e stampante è molto differente e la sola cosa che rimane simile alle macchine da scrivere è la tastiera e quindi si tratta di tecnologia molto distante e l'innovazione che l'ha intro-



dotta viene chiamata *innovazione radicale*. Le innovazioni radicali sono molto più rare di quelle incrementali ma possono giocare, se hanno successo, un ruolo molto più importante nell'evoluzione tecnologica ed in particolare nel campo ambientale. Se ora ad esempio consideriamo tre tecnologie utilizzabili per il trattamento dei rifiuti urbani come la termovalorizzazione diretta, la termovalorizzazione dopo trasformazione dei rifiuti in un combustibile o una tecnologia di pirolisi e gasificazione come Thermoselect, potremmo affermare che la tecnologia di trasformazione in combustibile è più vicina, nello spazio delle tecnologie, a quella della termovalorizzazione diretta che non a Thermoselect. Quest'ultima tecnologia può essere considerata come un'innovazione radicale rispetto alle prime due poiché utilizza operazioni tecnologiche molto differenti per l'applicazione considerata.

Nell'uso di una tecnologia si tende naturalmente a scegliere valori per le istruzioni delle operazioni che assicurano un funzionamento ottimale. In molti casi, per esempio durante l'avvio di un nuovo impianto o per cambiamenti intervenuti nelle condizioni di funzionamento (materie prime, prezzi, qualità, ecc.), è necessario ricercare nuovi valori operativi ottimali. Questa ricerca può essere vista come un'esplorazione dello spazio tecnologico alla ricerca della ricetta tecnologica ottimale. Questo lavoro di ricerca è chiamato in inglese learning by doing. Quando si sviluppa un'innovazione tecnologica un semplice lavoro di learning by doing può non essere sufficiente ma occorre condurre anche della ricerca & sviluppo. Questa attività interviene, non solo modificando le istruzioni, ma anche la natura e la struttura delle operazioni tecnologiche da farsi alla ricerca dell'innovazione ottimale. La ricerca & sviluppo può così essere vista come un'esplorazione che avviene sia nello spazio delle tecnologie che nello spazio tecnologico delle tecnologie considerate per la ricerca. In conclusione l'innovazione tecnologica in generale può essere vista come un processo che inizia con un'attività di ricerca & sviluppo in cui prevale la ricerca delle operazioni ottimali, seguita da un processo di learning by doing in cui prevale la ricerca di valori o scelte ottimali per le istruzioni. La ricerca scientifica gioca un ruolo importante nella ricerca delle operazioni e dei valori di istruzione ottimali fornendo una specie di mappa dello spazio tecnologico o delle tecnologie che orienta favorevolmente l'esplorazione (7). Nella Figura 1 abbiamo schematizzato l'innovazione tecnologica come un processo continuo che inizia con attività di ricerca & sviluppo, spesso in laboratorio, in cui prevale la ricerca della struttura ottimale delle operazioni e termina a livello industriale con un'attività di learning by doing per l'ottimizzazione del funziona-



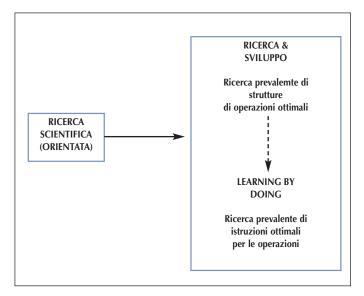


Figura 1 - Il processo di innovazione tecnologica nel quadro evolutivo di una tecnologia

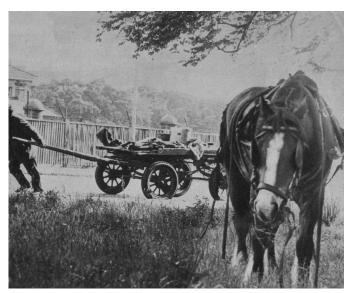
mento. La ricerca scientifica gioca in questo modello un ruolo continuo di aiuto nell'orientare l'esplorazione nello spazio tecnologico e delle tecnologie alla ricerca di condizioni ottimali. Questo modo di vedere l'innovazione tecnologica si distingue dal comune schema, sviluppato dall'OCSE, che vede il processo di innovazione iniziare con la ricerca scientifica di base orientata, per passare alla fase di ricerca applicata e quindi allo sviluppo industriale, poiché generalizza l'intervento della scienza ed estende il lavoro innovativo anche sull'impianto industriale. In questo modo il modello proposto è in grado di seguire tutto il processo dei cambiamenti innovativi che avvengono in una tecnologia dai suoi inizi nel campo della ricerca applicata, fino allo stadio industriale maturo in cui la tecnologia è destinata a diventare obsoleta.

## Paesaggio tecnologico ed Ecosistema tecnologico

Una caratteristica importante di una tecnologia è sicuramente la sua efficienza. Esistono differenti modi di definire l'efficienza di una tecnologia ed uno dei più importanti riguarda l'efficienza economica. Questa può essere misurata come l'inverso del costo unitario di produzione o di abbattimento di inquinanti nel caso di una tecnologia per l'ambiente. Esistono anche altri tipi di efficienza come ad esempio l'efficienza energetica misurata sul consumo o produzione di energia, l'efficienza ambientale misurata ad esempio sulla base della quantità abbattuta di inquinanti e così via. L'efficienza di una tecnologia non dipende dal tipo di tecnologia ma piuttosto dalla ricetta tecnologica adottata infatti, se lavoriamo con una ricetta ottimale avremo un'efficienza alta, al contrario l'efficienza sarà bassa con una ricetta le cui istruzioni non sono ottimali. Questa dipendenza sarà funzione delle caratteristiche che stiamo ottimalizzando: costi, energia, impatti ambientali, ecc. Ogni ricetta tecnologica può possedere quindi varie efficienze specifiche e, considerando ora lo spazio tecnologico in cui si posizionano le ricette, potremo associare ad ognuna anche il valore corrispondente dell'efficienza scelta. Lo spazio così ottenuto viene chiamato paesaggio tecnologico. Il nome di paesaggio viene dal fatto che se noi immaginiamo uno spazio tecnologico che si sviluppa in un piano con le efficienze riportate come un'altezza

ortogonale al piano, lo spazio si presenta con dei picchi corrispondenti alle ricette con un'alta efficienza o delle valli o pianure in corrispondenza di ricette con una bassa efficienza ricordando così la figura di un paesaggio. Il lavoro di sviluppo di un'innovazione può quindi essere visto come un'esplorazione del paesaggio tecnologico alla ricerca di una ricetta che corrisponde o si avvicina a un picco di efficienza.

Un altro aspetto molto importante delle tecnologie è la loro interazione con altre tecnologie. In effetti le varie tecnologie competono tra di loro sviluppandosi od estinguendosi, creando od interrompendo dipendenze in un sistema che ricorda gli esseri viventi in un ecosistema biologico. Per questa ragione l'ambiente in cui interagiscono le tecnologie viene chiamato ecosistema tecnologico. Prendiamo ad esempio la tecnologia del trasporto umano. Nel passato era assicurata essenzialmente dal cavallo. L'avvento dell'automobile ha creato una competizione vinta da quest'ultima. La competizione non ha però avuto conseguenze solo tra cavallo e automobile, in realtà la sparizione del cavallo nel trasporto umano ha fatto scomparire anche mestieri come il maniscalco o la stazione di posta, al contrario, lo sviluppo dell'uso dell'automobile, che è sicuramente un'innovazione radicale rispetto al cavallo, ha fatto sviluppare molti altri tipi di industrie come quelle della produzione di benzina o di pneumatici, ha incrementato particolari produzioni di lamiera di acciaio per le carrozzerie e stabilito nuovi servizi come le stazioni di rifornimento di benzina. A loro volta queste tecnologie hanno influenzato in una maniera o in un'altra altre tecnologie associate in una complessa cascata di interazioni. Come si vede le tecnologie nascono, vivono e muoiono in un ecosistema tecnologico reso molto complesso dalle relazioni che esistono tra di loro. Consideriamo ora come efficienza di una tecnologia nell'ecosistema tecnologico la sua capacità di competere con successo con altre tecnologie concorrenti. Questo tipo di efficienza, che è molto importante poiché determina le condizioni in cui avviene l'evoluzione tecnologica, è molto complesso e si presta difficilmente a una misura quantitativa. Esso dipende da molti fattori come costi di produzione o trattamento, efficienze energetiche od ambientali, ecc. ma è anche influenzato da fattori sociali, politici, di mercato ed altri ancora che sono molto difficili da quantificare. In realtà questo tipo di efficienza ha un carattere biologico nel senso che ricorda l'efficienza della competizione di un particolare



essere vivente nel suo ecosistema, questa analogia non è casuale. In effetti le ricette tecnologiche possono essere considerate simili ai vari genotipi di una specie vivente che, a seconda della loro configurazione, possono essere più o meno efficienti nella competizione determinando così l'evoluzione biologica della specie. Sono state proprio queste considerazioni sui genotipi che hanno portato un genetista (8) negli anni 30 a sviluppare il concetto di paesaggio di fitness, ripreso e generalizzato poi nel quadro della scienza della complessità, ed utilizzato in altri campi tra cui quello della tecnologia con il nome paesaggio tecnologico. L'ecosistema tecnologico, analogamente a quanto fa l'ecosistema biologico sui genotipi, può influenzare l'efficienza competitiva di una tecnologia e quindi il suo paesaggio tecnologico. Infatti, fattori economici, sociali, politici, ecc. possono influenzare in maniera variabile e velocemente la posizione ottimale di una ricetta. Una tecnologia si trova quindi di fronte ad un paesaggio tecnologico che è in realtà in continua modificazione e che obbliga a esplorare continuamente nuove condizioni ottimali per sopravvivere e che, in caso di insuccesso, la condannano all'estinzione.

# Il problema della valutazione delle nuove tecnologie

Abbiamo cercato di illustrare nei paragrafi precedenti un modello rappresentativo delle tecnologie e dell'innovazione tecnologica e vediamo ora come lo si può utilizzare per affrontare il problema della valutazione delle nuove tecnologie. Nel documento BREF dell'Unione Europea dedicato ai metodi di valutazione (3), vengono illustrati vari sistemi di confronto delle possibili BAT da adottare che comprendono, la valutazione sia degli aspetti ambientali che economici e quindi i possibili metodi di valutazione globale che integrano i risultati delle prime due valutazioni in vista di esprimere un giudizio finale. Il problema della valutazione di nuove tecnologie non interviene tanto nei metodi di valutazione globale ma piuttosto sulle valutazioni ambientali ed economiche. Una regola molto importante che bisogna usare quando si fanno valutazioni di tecnologie è quella di comparare validamente le tecnologie nella stessa scala di produzione e riferendosi allo stesso grado di sviluppo. Poiché una nuova tecnologia non è mai stata provata industrialmente ne tanto meno si possiede l'esperienza di un suo diffuso uso industriale, è necessario per il paragone prevedere il meglio possibile come si comporterà la tecnologia una volta industrializzata o addirittura dopo una lunga esperienza di uso industriale per raggiungere lo stesso grado di sviluppo delle altre tecnologie con cui si deve confrontare. Per far questo è necessario procedere ad una valutazione tecnologica che permette, nella misura possibile, di prevedere il comportamento della nuova tecnologia a livello industriale. Questo tipo di valutazione tecnica è piuttosto difficile ed è spesso legata solamente all'intuizione delle persone che si occupano dello sviluppo della nuova tecnologia. In effetti non è possibile prevedere in maniera sicura come la tecnologia si comporterà di fronte ad un aumento sensibile della scala di produzione o trattamento, rispetto ad esempio all'impianto pilota, ne tener conto di tutti i cambiamenti che possono avvenire a livello industriale nelle condizioni di utilizzo della tecnologia. Tuttavia il modello di tecnologia descritto precedentemente ci può venire in aiuto prendendo in considerazione il tipo e struttura delle operazioni che caratterizzano la tecnologia. In effetti il tipo di operazione non è specifico di una certa tecnologia ma se ne possiede spesso un'esperienza storica in altre tecnologie industrializzate. Questa esperienza può essere utile per fare previsioni sul comportamento dell'operazione e quindi della tecnologia



considerata. Bisogna però tener conto che le efficienze delle operazioni, che determinano alla fine l'efficienza della tecnologia, non sono in generale indipendenti e che le condizioni ottimali per un'operazione possono in realtà influenzare negativamente l'efficienza di altre operazioni. Queste interazioni devono essere prese in considerazione nella misura possibile in vista di un'ottimizzazione globale della tecnologia e non delle singole operazioni. Un semplice esempio di questo tipo di valutazione è stato riportato in un articolo precedente (9) sulla tecnologia Thermoselect. Questa

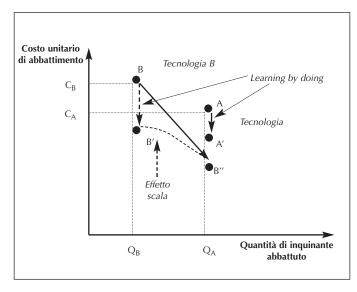


Figura 2 - Evoluzione delle tecnologie A e B nel piano di produzione.

tecnologia può essere considerata come un insieme di operazioni di cui esiste una storica in altre tecnologie in campo chimico e metallurgico. Le operazioni principali di questa tecnologia derivano da tecnologie ben conosciute come la gasificazione del carbone e purificazione del gas povero, e da tecnologie metallurgiche che riguardano la lancia metano/ossigeno usata al forno elettrico o la granulazione delle scorie di altoforno, usata da Thermoselect per granulare le scorie fuse del reattore. L'analisi delle varie operazioni evidenzia come il refrattario di raccolta delle scorie fuse sia il punto più critico poiché deve affrontare una scoria acida a temperature molto elevate mentre industrialmente si hanno buone soluzioni solo con scorie basiche. Una volta stabilite le previsioni di funzionamento di una nuova tecnologia nelle condizioni stabilite per il paragone, è possibile usare i dati stimati nelle valutazioni ambientali ed economiche usando i vari metodi disponibili esposti nel documento BREF (3). Se sul piano ambientale questa procedura non presenta particolari difficoltà, sul piano economico, e quindi dei costi, le cose sono molto più complesse poiché l'economia della tecnologia risulta funzione della scala dimensionale degli impianti, del grado di sviluppo conseguente al learning by doing sull'impianto ed è inoltre influenzata dall'ecosistema tecnologico in cui la tecnologia opera.

Vediamo prima di tutto come il learning by doing può influenzare il costo di una tecnologia. Per far questo possiamo ricorrere ad una rappresentazione che in microeconomia è chiamata *piano di produzione* e che collega le quantità di un prodotto con il suo costo unitario di produzione. Nel caso di tecnologie per l'ambiente la quantità di prodotto può essere sostituita ad esempio dalla quantità di inquinante abbattuto e il costo unitario di pro-

duzione dal costo unitario di abbattimento come rappresentato nella Figura 2. Consideriamo ad esempio una tecnologia A diffusa industrialmente in grado di abbattere la quantità QA con un costo unitario CA e rappresentata nel piano di produzione dal punto A. Consideriamo ora una nuova tecnologia B che per semplicità abbia la stessa efficienza ambientale di A e cioè lo stesso grado di abbattimento degli inquinanti. Come sovente succede, la nuova tecnologia B è provata su un impianto più piccolo e tratta una quantità di inquinante minore QB a un costo unitario eventualmente più elevato C<sub>B</sub>. Apparentemente la tecnologia B si presenta quindi meno attrattiva di A poiché a parità di efficienza ambientale risulta più costosa. Tuttavia, se si considerano le cose nel tempo la situazione può evolvere in maniera favorevole a B. Infatti, l'attività di learning by doing su B può portare ad un abbassamento del costo unitario che si avvicina o anche risultare inferiore ad A come indicato dal punto B' del diagramma. Anche A nello stesso tempo ha un'attività di learning by doing che tende ad abbassare i costi unitari, tuttavia se A è una tecnologia matura, il guadagno nel costo sarà nettamente inferiore a quello che è possibile per la nuova tecnologia B e si posizionerà ad esempio in A', nel diagramma. Questo fenomeno di guadagni in costo decrescenti è ben conosciuto nelle tecnologie e venne osservato per la prima volta negli anni 30 studiando i costi di produzione di parti aeronautiche (10). Studi statistici effettuati su molte tecnologie hanno dimostrato che facilmente si possono osservare riduzioni tra il 20% e il 40% sui costi iniziali di nuove tecnologie per effetto del learning by doing. Nel valutare comparativamente le tecnologie A e B dobbiamo però tener conto anche di un altro importante fattore che influenza il costo che è l'effetto scala cioè, il fatto che gli investimenti necessari per un impianto aumentano in maniera meno che proporzionale rispetto all'aumento della produzione dell'impianto riducendo così i costi finanziari unitari e quindi il costo unitario di produzione ovvero, nel caso di tecnologie per l'ambiente, il costo unitario di abbattimento di un inquinante con l'aumento della quantità da abbattere. Questo effetto può essere espresso da un'equazione del tipo:

$$I_1/I_2 = (P_1/P_2)^k$$

Dove I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub> rappresentano i due investimenti corrispondenti ad impianti con le capacità di produzione (o di abbattimento inquinanti) P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>. L'esponente k è in generale inferiore a 1 e dipende dal tipo di impianto. Nel caso di impianti chimici, quindi anche spesso per le tecnologie per l'ambiente, questo esponente è in generale compreso tra 0,6 e 0,7. Se si tiene conto anche dell'effetto scala nel comparare la tecnologia B con la tecnologia A avremo un ulteriore diminuzione del costo unitario di B che si può spostare in corrispondenza del punto B" a parità di quantità di inquinante abbattuto di A. Come si vede, contrariamente ai risultati disponibili inizialmente, la tecnologia B si mostra in questo caso più efficiente di A ma per evidenziare questo fatto è stato necessario comparare le due tecnologie allo stesso grado di sviluppo (livello di attività di learning by doing) ed alla stessa scala di quantità di inquinante abbattuta come indicato precedentemente nella regola di base per le valutazioni di tecnologie. Nel caso specifico presentato abbiamo considerato per semplicità che l'efficienza ambientale sia sempre la stessa per le tecnologie A e B a confronto. Nella realtà l'attività di learning by doing e, in una certa misura anche il cambiamento di scala del processo, può influenzare i risultati ambientali e rendere differenti le efficienze ambientali. Questo fatto è molto importante poiché nella valuta-

zione globale di una BAT non contano solo i costi unitari di abbattimento ma anche ad esempio le concentrazioni residue di inquinanti che determinano l'impatto ambientale inoltre, i processi ambientali di trattamento di inquinanti possono influenzare non solo uno ma vari inquinanti e in varia misura, quindi in definitiva le variazioni di efficienza economica rappresentate dalle traiettorie di A e B nella Fig. 2 sono in generale accompagnate anche da variazioni dell'efficienza ambientale che devono essere prese in considerazione per un valido confronto delle BAT. Le valutazioni potrebbero essere più semplici se si potesse tradurre l'emissione dei vari inquinanti in termini di costi ambientali (o esterni) che permetterebbero una selezione delle BAT solo in termini di costi. Le valutazioni di costo ambientale sono molto complesse e sono comunque oggetto di studi nel quadro del progetto dell'Unione Europea Clean Air for Europe (CAFE), i cui primi risultati sono apparsi recentemente e sono stati oggetto di qualche primo utilizzo (11). Un'ultima considerazione riguarda infine la dinamica che comunque può avere la competitività di una tecnologia. Le posizioni A e B della Fig. 2 per le due rispettive tecnologie sono il risultato di condizioni di funzionamento che nei rispettivi paesaggi tecnologici sono vicine a dei valori ottimali di efficienza. L'attività di learning by doing di ricerca di condizioni di lavoro sempre più efficienti nel paesaggio tecnologico e l'effetto scala influenzano come abbiamo visto la posizione di questi due punti ma non sono i soli. Altri fattori di natura economica, sociale, politica ecc. tipici dell'ecosistema tecnologico possono influenzare la posizione dei punti in vario modo. Basti pensare ai cambiamenti dei costi delle materie prime, variazioni nelle normative ambientali, scelte tecnologiche a lungo termine di natura politica ecc., rendono quanto mai complessa ed incerta l'evoluzione della posizione nel tempo e la sua possibile previsione nel medio e lungo termine.

#### Nuove tecnologie per l'ambiente ed il Protocollo di Kyoto

Abbiamo visto nel precedente paragrafo alcuni aspetti che determinano la competitività di una tecnologia per l'ambiente e come questa sia regolata da un complesso sistema di fattori. La situazione è ancora più complessa se si considera la diffusione nell'ecosistema tecnologico di innovazioni tecnologiche radicali che sostituiscono vecchie tecnologie. Possiamo avere un'idea di questo considerando un esempio, un poco semplificato, come quello dei pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica. Sappiamo che il costo di produzione dell'energia dipende molto in questo caso dal costo del pannello che è costituito dal costo dei materiali usati e dal suo assemblaggio. Immaginiamo ora una situazione in cui l'uso e quindi la produzione di pannelli solari sia fortemente aumentata, in questo caso è probabile che i costi di assemblaggio si riducano sensibilmente ma non solo infatti, la domanda ad esempio di silicio solare per i pannelli sarà anch'essa aumentata con una conseguente riduzione di questo costo per effetto scala e probabilmente anche per l'accresciuto learning by doing della produzione o addirittura per una nuova tecnologia di produzione ancora più efficiente, la cui industrializzazione è stimolata dalla forte domanda. A sua volta l'aumento di produzione di silicio solare stimola cambiamenti in tutte le tecnologie associate a questa produzione e così via. Come si vede l'introduzione di un'innovazione tecnologica radicale nell'ecosistema tecnologico provoca un complesso effetto a cascata, difficilmente ricostruibile nel dettaglio, con effetti positivi nel caso di maggiori produzioni



e learning by doing o per uso di nuove tecnologie associate più efficienti, ma anche effetti negativi ad esempio se si usano materiali scarsi o con capacità di produzione limitata il cui prezzo aumenta con l'aumentare della domanda.

Queste considerazioni si applicano ad esempio al problema cruciale legato all'effetto serra, in cui ci si domanda quanto costerebbe l'introduzione di innovazioni tecnologiche radicali di produzione di energia senza emissioni di gas serra e se questo sia sopportabile dall'economia, dato per scontato che questi nuovi processi siano più costosi. L'affermazione che i costi delle nuove tecnologie saranno necessariamente più elevati è, alla luce delle considerazioni precedenti, priva di consistenza poiché nessuno è veramente in grado di ricostruire i costi reali di un ecosistema tecnologico caratterizzato da un complesso insieme di nuove tecnologie derivate da innovazioni radicali. Se mai ci si può chiedere perché nuove tecnologie che consumano meno energia e materie prime dovrebbero essere più costose (12). In realtà il problema più difficile non è tanto progettare nuove tecnologie ma, come assicurare la transizione tra le vecchie e le nuove tecnologie. Il problema della previsione dei costi economici di nuove tecnologie nel quadro della produzione dell'energia, è stato affrontato in uno studio dell'OCSE (13) i cui autori hanno esaminato una ventina di modelli usati per previsioni in questo campo. La maggior parte degli economisti che si sono dedicati a questo problema considerano l'evoluzione tecnologica come un processo autonomo che non dipende da particolari politiche o da variabili economiche e, gli autori mostrano invece che l'evoluzione tecnologica è un processo che dipende dal percorso dei cambiamenti tecnologici ed economici avvenuti precedentemente ed è influenzato dalle politiche pubbliche e industriali nel campo dell'innovazione tecnologica e quindi dalla ricerca & sviluppo fatta. Questa dipendenza dal percorso rende estremamente difficile l'elaborazione di modelli e previsioni a medio e lungo termine in questo campo. La ricerca & sviluppo assume quindi un ruolo centrale nella soluzione delle problematiche energetiche legate all'effetto serra ed il protocollo di Kyoto, che non la prende direttamente in considerazione, e fa una grossa scommessa ritenendo che i meccanismi legati agli impegni di emissione presi, l'uso di eventuali tasse sulla CO<sub>2</sub> e lo scambio di diritti di emissione stimolino l'evoluzione tecnologica nella buona direzione. Queste critiche e dubbi sull'efficacità del protocollo di Kyoto sono state oggetto anche di un recente articolo (14).

Il protocollo di Kyoto è criticato dai suoi detrattori da due punti di vista collegati tra di loro: da una parte si critica l'elevato costo economico del cambio delle tecnologie e d'altra parte si sollevano dubbi sulle previsioni di aumento della temperatura del globo per effetto dell'aumento della concentrazione di CO2 nell'atmosfera elaborato dai modelli. Abbiamo visto nei paragrafi precedenti come l'enorme complessità dell'ecosistema tecnologico impedisca qualsiasi previsione di tipo economico su una sua nuova struttura tecnologica del sistema, d'altra parte da un punto di vista rigorosamente scientifico i modelli usati per le previsioni di temperatura sono semplificati rispetto alla reale complessità del sistema terra e, non è neanche possibile verificare se il numero di dati disponibili e la loro precisione è sufficiente anche se una dimostrazione di una loro inattendibilità non può essere certo fornita. Una dimostrazione rigorosa della loro validità può essere ottenuta solo a posteriori il che non ci interessa per le decisioni da prendere ora. Siamo quindi di fronte in realtà a un problema di gestione dell'incertezza che tra l'altro è tipico nella gestione della ricerca & sviluppo in cui si devono decidere programmi e finanziamenti nell'incertezza dei risultati. Vediamo allora come la scienza della complessità ci può aiutare nelle decisioni per un sistema così complesso. Non si tratta di fare previsioni ma semplicemente di vedere quali sono gli scenari possibili in cui può evolvere un sistema complesso sottoposto alla modifica di un fattore e trarne le conseguenze. Si può considerare senza dubbi accertato che la concentrazione di CO2 nell'atmosfera è aumentata nell'ultimo secolo e che le temperature, almeno di molte parti del globo, sono anch'esse aumentate negli ultimi decenni. E' inoltre riconosciuto che la CO<sub>2</sub> è un gas serra che può far aumentare la temperatura del globo. In un sistema complesso di fronte ad una variazione di un fattore si hanno tre tipici comportamenti. Il primo scenario, il meno probabile, è una dipendenza lineare e cioè una temperatura che aumenta proporzionalmente con la concentrazione di CO<sub>2</sub>, in effetti un sistema complesso è riconosciuto tipicamente per non avere dipendenze lineari con i fattori che lo influenzano.

Un secondo scenario prende in considerazione che l'aumento di concentrazione di CO<sub>2</sub> abbia provocato un cosiddetto effetto farfalla conosciuto in campo meteorologico, cioè che il relativamente limitato aumento della CO2 scateni una serie di eventi che si manifesteranno prossimamente, senza che sia praticamente possibile alcun intervento per cambiarli e che porteranno a uno stato del globo molto differente da quello attuale. Infine un terzo scenario riguarda un sistema complesso che risponde omeostaticamente alla variazione del fattore, e cioè in questo caso all'aumento della CO<sub>2</sub> la temperatura globale si modifica poco. L'aumento degli episodi atmosferici violenti, che scaricano in questo modo l'energia termica accumulata con la temperatura, potrebbero essere un'indicazione di questa situazione. Il problema è che nessun sistema complesso reagisce omeostaticamente a qualsiasi valore di variazione del fattore. Superati certi limiti il sistema non riesce più a conservare una certa stabilità e si modifica evolvendo verso un altro stato come a seguito di un effetto farfalla. Il problema è che noi non sappiamo con certezza se abbiamo già raggiunto con il tenore di CO<sub>2</sub> questi limiti, se li raggiungeremo presto oppure molto più avanti. Occorre infine notare che i nuovi stati di equilibrio di un sistema complesso citati prima, non necessariamente saranno caratterizzati dall'effetto del fattore scatenante, ciò significa che lo stato finale dell'evoluzione potrebbe essere nel nostro caso un mondo più caldo ma anche eventualmente più freddo. Riflettendo su queste considerazioni ci si può chiedere se, con la nostra inerzia di fronte al problema dell'effetto serra, non stiamo letteralmente giocando con il fuoco. Come abbiamo discusso precedentemente l'attività di ricerca & sviluppo e le innovazioni radicali che può generare sono essenziali per un cambiamento tecnologico che ci può portare lontano da questa situazione pericolosa. Non bisogna lasciarsi fuorviare dall'attuale atmosfera di sviluppo tecnologico in gran parte dedicato al solo settore informatico e delle telecomunicazioni. In realtà se si considera l'insieme di tutti i settori tecnologici l'intensità con cui si conducono le attività di ricerca & sviluppo, quindi il numero di innovazioni radicali generate, si è andata scemando a partire dalla seconda guerra mondiale ed in particolare a partire dagli anni 70.

Durante la seconda guerra mondiale i laboratori di ricerca americani, per sostenere la domanda di innovazioni da parte dello sforzo bellico ,lavoravano 24 ore su 24 su tre turni (15).

Ci si può allora chiedere se sul problema dell'effetto serra non ci sia anche qui una specie di guerra da condurre e che bisogna quindi mettere a disposizione i mezzi adeguati se si vuole vincerla.

#### Conclusioni

Abbiamo cercato in questo articolo di illustrare la complessità in cui si muovono tecnologie ed innovazioni tecnologiche e come si possa affrontare, per quanto riguarda le nuove tecnologie per l'ambiente non ancora industrializzate, la loro valutazione come BAT. La complessità dell'ecosistema tecnologico impedisce di fare valutazioni di natura economica a medio e lungo termine su insiemi di nuove tecnologie per l'ambiente derivate da innovazioni radicali. Questo non significa che non sia utile ed economica la ricerca visto che queste tecnologie sono in genere caratterizzate da consumi minori di energia e materie prime e non vi è nessuna ragione che siano necessariamente più costose. Rimane soprattutto centrale il problema dello sforzo in ricerca & sviluppo da fare che non sembra attualmente adeguato ai grandi problemi da affrontare come il pericolo dell'effetto serra. In queste condizioni il ruolo della ricerca dovrebbe quindi essere preso direttamente in considerazione da un punto di vista politico ed economico in futuri accordi internazionali come quello che ha portato al protocollo di Kyoto.

#### Bibliografia

- [1] A. Bonomi A. La scelta di tecnologie di smaltimento dei rifiuti urbani, L'Ambiente, 2003, 4, pp. 10-14
- A. Bonomi "La Gestione delle Tecnologie Ambientali"
- L'Ambiente, 2004, 5, pp. 28–34
  [3] European Commission "Reference Document on Economics and Cross-Media Effects" May 2005, disponibile nel sito http://eippcb.jrc.es
- [4] K. Frenken, Understanding Product Innovation using Complex System Theory, Tesi Università di Amsterdam e Università Pierre Mendés France, Grenoble 2001
- [5] P. Auerswald, S. Kauffman, J. Lobo, K. Shell K. The production recipe approach to modelling technology innovation: an application to learning by doing, Santa Fe Institute Working Paper 98-11-100, 1998, pubblicato su Journal of Economics Dynamics and Control, 2000, 24, pp. 389-450
- [6] A. Bonomi, A. Riu, M. Marchisio, An Approach to Modeling Technologies, Documento di lavoro disponibile nel sito http://complexitec.tripod.com
- L. Fleming, O. Sorenson, Science as a map in technological search, Strategic Management Journal, 25, 2004, pp. 909-928
- S. Wright, Evolution in Mendelian Populations, Genetics, 16, 1931, pp. 97-159
- [9] A. Bonomi Selezione di Tecnologie Appropriate per lo Smaltimento dei Rifiuti Urbani, Atti dei Seminari di RICI-CLA 2001, Rimini 26-29 Settembre 2001, pp. 447-46
- [10] T.P. Wright, Factors affecting the cost of airplanes, Journal of Aeronautical Sciences, 2, 1936, pp. 122-128
- [11] A. Bonomi, Influenza dell'Uso delle Migliori Tecnologie Disponibili sui Costi Ambientali alla luce della Direttiva Europea IPPC. Caso Studio: Termovalorizzatore Silla 2, Atti dei Seminari di ECOMONDO 2005, Rimini, 26-29 Ottobre 2005, Vol. 1, pp. 322-332
- [12] P. Hawken, A. Lovins, H.L. Lovins, Capitalismo Naturale, Edizioni Ambiente, 2001
- Grubb, J. Koehler, Technical Change and Energy/Environmental Modelling, Technology Policy and Environment Workshop, Parigi 21/06/2001, OECD 2002.
- [14] B. Ruggeri, Energia, Kyoto e Sostenibilità, Verde Ambiente, XX1, 2, 2005, pp. 12-18
- [15] G. Boehm, A. Groner, Science in the Service of Mankind, Lexington Books, 1972 ■