

# Energia Ambiente Innovazione

## Complessità Sviluppo

---

2003

**L**e considerazioni che come ogni anno – e questo è ormai il settimo – fanno da premessa-introduzione a questa pubblicazione che riprende i principali contributi apparsi sul bimestrale dell'ENEA "Energia, Ambiente e Innovazione", potrebbero chiocciare quelle formulate per l'anno scorso.

*E tuttavia alcune novità sembrano emergere.*

*Ne vogliamo segnalare almeno due.*

*La prima riguarda una relazione tra la ripresa del dibattito generale sulla questione energetico-ambientale, sollecitato anche da eventi politici e climatologici eccezionali, e quanto emerge dal mondo della scienza e della tecnologia. Mentre si confermano le possibilità di un cambiamento tecnologico radicale del sistema energetico e in particolare il superamento delle fonti primarie tradizionali, queste prospettive restano proiettate nel lungo periodo. Si accentuano, quindi, le attenzioni sugli aspetti normativi e di uso razionale dell'energia come fattori residuali in attesa di quei cambiamenti, e lo sviluppo delle conoscenze e degli interventi in campo ambientale e della protezione della natura come questioni che in qualche misura segnalano vincoli che vanno anche oltre alla questione energetica.*

*La seconda questione che ci sembra meritevole di qualche attenzione e di approfondimenti che, tuttavia, esulano da questa presentazione, riguarda un elemento già in qualche modo segnalato e cioè il fatto che sul piano delle acquisizioni scientifiche e tecnologiche diventa sempre più improprio parlare di un singolo paradigma tecnologico quanto piuttosto occorre prendere atto di un continuo innescarsi di nuove conoscenze e di potenzialità scientifiche su un terreno preesistente già molto fertile. È proprio questa condizione di fertilità e di continuo arricchimento del terreno la chiave di lettura delle relazioni strutturali tra ricerca – innovazione tecnologica – sviluppo economico e sociale. Ed è la complessità di queste relazioni quello che ne giustifica la dizione di "sistema".*

*Per evidenti motivi istituzionali questa pubblicazione non può coprire se non in termini di presentazione di singoli studi, l'arco complete delle relazioni sopra ricordate. È positivo ed insieme un segno di una vitalità per certi versi sorprendente che, pur tuttavia, la complessità del "sistema" possa essere rintracciata anche in questa occasione.*

*Si era a suo tempo rinunciato alla veste editoriale e sostanziale tipica delle riviste scientifiche, così come si era abbandonata l'ipotesi della rivista di informazione della vita dell'Ente. La scelta fu quella – discussa e ovviamente discutibile – di coprire uno spazio di informazione e documentazione tecnicamente corretto, rivolto ad un pubblico di persone attente ma non specializzate, chiedendo agli autori, che come sempre sono i ricercatori dell'Enea, un impegno redazionale aggiuntivo rispetto a quelli tipici della professione. Una scelta e un impegno motivati dalla convinzione che le vicende di quel "sistema" giocassero un ruolo fondamentale nel mondo civile e certamente anche nel nostro paese.*

*Ci sembra di poter affermare che non si è trattato di una impostazione erronea. L'attenzione che sempre più si riscontra nella più diverse sedi verso parole come: qualità dello sviluppo, competitività tecnologica, società della conoscenza, ne è una dimostrazione.*

*Se è possibile anche a fine del 2003 uscire con questa pubblicazione il merito va, quindi, interamente a questi colleghi. Non sappiamo se e come tra i criteri di valutazione di una struttura di ricerca possano essere apprezzati anche questi contributi. Quello che possiamo dire, comunque, è che finché sarà data la possibilità di lavorare e fare ricerca, un ponte con la più ampia comunità civile dei non addetti è necessario e che anche per questo fine non verrà meno l'impegno dei ricercatori dell'Ente.*

Sergio Ferrari

complessità & sviluppo

# sommario contents

# contents **Sommario**

# sommario contents

# contents Sommarario



# L'approccio ecosistemico: una proposta innovativa per la gestione della biodiversità e del territorio

Una strategia per la gestione integrata della terra, dell'acqua e delle risorse viventi che promuove la conservazione e l'uso sostenibile in modo giusto ed equo. Tale concetto, approvato a livello internazionale, consta di 12 principi generali e di 5 operativi illustrati nell'articolo

**LAURA PADOVANI\***  
**PAOLA CARRABBA\***  
**FRANCESCO MAURO\*\***

ENEA  
\*UTS Biotechnologie,  
Protezione della Salute e degli Ecosistemi  
\*\*Senior Board



Nel corso della 5<sup>a</sup> Conferenza delle Parti (COP 5) della Convenzione sulla Diversità Biologica, che si è tenuta a Nairobi (Kenya) nel maggio del 2000, è stata approvata la definizione su base scientifica di un concetto che influirà largamente sul modo di impostare la gestione delle risorse viventi, dell'ambiente e del territorio: "l'approccio ecosistemico".

Il concetto e i principi dell'approccio ecosistemico sono stati discussi fin dalle prime riunioni dell'Organo Tecnico della Convenzione sulla Diversità Biologica (SBSTTA 1995 e 1996). Nella terza riunione della Conferenza delle Parti alla Convenzione (COP3 – Buenos Aires, 1996), le Parti hanno convenuto sull'importanza di un approccio regionale ed ecosistemico per lo sviluppo di linee guida e indicatori per la conservazione e l'uso sostenibile della diversità biologica.

Nel 1998 a Lilongwe (Malawi), sotto gli auspici del Segretariato della Convenzione sulla Diversità Biologica, si è tenuto un workshop volto a identificare i principi in grado di rendere il più possibile operativo l'approccio ecosistemico. La quarta Conferenza delle Parti (Bratislava, 1998) ha riconosciuto la necessità di un'ulteriore elaborazione del concetto, che ha portato all'organizzazione, nel 1999 a Trondheim (Norvegia), di una Conferenza sull'approccio ecosistemico per l'uso sostenibile della diversità biologica.

La Conferenza di Trondheim ha considerato l'approccio ecosistemico come un meccanismo per garantire un utilizzo sostenibile delle risorse biologiche nel rispetto degli obiettivi della Convenzione sulla Diversità Biologica, fornendo un contributo alla comprensione e all'applicabilità dei principi individuati a Lilongwe.

L'approccio ecosistemico, così come definito dal documento di lavoro della COP 5 (UNEP/CBD/COP/5/23, 103-109), è "una strategia per la gestione integrata della terra, dell'acqua e delle risorse viventi che promuove la conservazione e l'uso sostenibile in modo giusto ed equo". Questa definizione contiene un riferimento esplicito non solo alla conservazione ma anche all'uti-

lizzo delle risorse (non solo viventi), con un accenno alla giustizia e alla equità sociale. Questo riferimento non è un mero esercizio di stile, in quanto una delle caratteristiche principali dell'approccio ecosistemico è il coinvolgimento diretto e sostanziale dei portatori d'interesse locali (*stakeholders*) nella gestione del territorio, che è vista come un processo integrato non solo dal punto di vista ambientale (terra, acqua, atmosfera, risorse viventi) ma anche da quello sociale.

Una confusione molto comune tra le persone che sentono parlare dell'approccio ecosistemico è che questo sia un approccio agli ecosistemi, ovvero un modo di gestire vari tipi di ecosistema come, ad esempio, foreste, savane e zone umide.

L'approccio ecosistemico rappresenta, invece, un modo di pensare ed agire in maniera ecologica, su base scientifica, integrando le informazioni biologiche, sociali ed economiche per raggiungere un equilibrio socialmente e scientificamente accettabile tra le priorità della conservazione della natura, l'uso delle risorse e la suddivisione dei benefici. In particolare questo approccio tenta di rimuovere le barriere tra l'economia umana, le aspirazioni sociali e l'ambiente naturale, ponendo fermamente l'uomo all'interno dei modelli ecosistemici.

L'approccio ecosistemico si basa sull'applicazione di appropriate metodologie scientifiche focalizzate sui livelli di organizzazione biologica che comprendono le strutture essenziali, i processi, le funzioni e le interazioni tra gli organismi e il loro ambiente. Esse riconoscono che le popolazioni umane, con le loro diversità culturali, sono parte integrante di molti ecosistemi.

Quest'ultimo concetto, estrapolato a livello italiano, fornisce una spiegazione delle differenze esistenti tra i paesaggi costruiti dall'uomo, rendendo conto, ad esempio, della diversità dei paesaggi agrari e forestali italiani del nord, sud ed isole. Queste diversità sono tanto più evidenti quanto maggiore è la differenza tra usi e costumi delle popolazioni locali. Il concetto di diversità non sottende alcun tipo di giudizio sul livello di cul-

tura raggiunto, ma si lega agli aspetti più qualitativi della cultura.

## I principi dell'approccio ecosistemico

L'approccio ecosistemico consta di 12 principi, sotto riportati, che devono essere considerati complementari e interrelati tra loro. I principi dell'approccio ecosistemico, così come enunciati e descritti, possono avere un senso relativo e di non immediata comprensione. Di seguito si tenta di proporre casi esplicativi che aiutino a comprenderne le potenziali applicazioni.

1. "Gli obiettivi della gestione del territorio, dell'acqua e delle risorse viventi sono materia di scelta da parte della società". *Differenti settori della società si rapportano agli ecosistemi a seconda delle rispettive necessità economiche, culturali e sociali. I popoli indigeni e le comunità locali che vivono sul territorio sono importanti portatori di interessi (stakeholders) e i loro diritti e interessi devono essere riconosciuti. Sia la diversità culturale che quella biologica sono componenti centrali dell'approccio ecosistemico, e la gestione deve tenerne conto. Le scelte da parte della società devono essere espresse il più chiaramente possibile. Gli ecosistemi dovrebbero essere gestiti in modo giusto ed equo per il loro valore intrinseco e per i benefici tangibili o intangibili che procurano all'uomo.*

APPLICAZIONE: la conservazione della natura in Italia ha subito una svolta con l'entrata in vigore della legge 6 dicembre 1991, n. 394 (legge quadro sulle aree protette), che ha segnato l'inizio dell'affermazione del principio che la gestione delle aree protette non può prescindere dal coinvolgimento delle realtà politiche, produttive e sociali locali. Tali forme di partecipazione prendono corpo mediante l'istituzione di una Comunità del parco, che rappresenta l'organo consultivo e propositivo dell'Ente parco, e che promuove iniziative di sviluppo economico e sociale ecocompatibili,

per le collettività residenti all'interno del parco e nei territori adiacenti.

2. "La gestione dovrebbe essere decentralizzata al livello appropriato più basso". *I sistemi decentralizzati possono condurre a maggiore efficienza, efficacia ed equità. La gestione dovrebbe coinvolgere tutti i portatori di interesse e bilanciare gli interessi locali con i più ampi interessi pubblici. Maggiore vicinanza vi è tra il livello di gestione e l'ecosistema, maggiore risulterà la responsabilità, la proprietà e l'utilizzazione delle conoscenze locali.*

APPLICAZIONE: un buon esempio relativo al secondo principio dell'approccio ecosistemico è dato dal Communal Areas Management Program for Indigenous Resources (CAMPFIRE) in Zimbabwe, che promuove il coinvolgimento delle comunità rurali in azioni di conservazione della diversità biologica per lo sviluppo locale, fornendo loro un'alternativa all'uso distruttivo del territorio mediante la rivalutazione in termini economici della fauna selvatica locale. La comunità rurale, tramite il Programma CAMPFIRE, ha chiesto al Government's Wildlife Department l'autorità legale per gestire direttamente le risorse animali e vegetali naturali della zona, dietro dimostrazione della capacità di saperle gestire in maniera conservativa. L'utilizzo che le popolazioni locali fanno di queste risorse varia dalla vendita delle concessioni fotografiche o di safari ai *tour operator* (nel rispetto delle leggi e delle quote stabilite di comune accordo con il Wildlife Department), alla caccia e all'allevamento diretto delle popolazioni animali; mentre altri usi sono allo studio per quanto riguarda altre risorse naturali, quali, ad esempio, i prodotti forestali. I proventi di queste attività ricadono, generalmente, direttamente sulle popolazioni locali, che in alcuni casi hanno deciso di reinvestirli in altri progetti di sviluppo locale.

3. "Coloro che gestiscono l'ecosistema dovrebbero considerare gli effetti (attuali o potenziali) delle loro attività su ecosiste-

mi adiacenti e su altri ecosistemi”.

*Interventi di gestione negli ecosistemi spesso hanno effetti sconosciuti o imprevedibili su altri ecosistemi; perciò, possibili impatti necessitano di attenta considerazione e analisi. Questo può richiedere nuovi piani o forme di organizzazione per le istituzioni coinvolte nelle decisioni, al fine di giungere, se necessario, agli appropriati compromessi.*

APPLICAZIONE: un esempio negativo legato agli effetti generati sugli ecosistemi da interventi modificativi dell'ambiente è dato dal ben noto caso della costruzione della diga di Assuan (Egitto), che ha modificato profondamente il clima di una vasta area ed ha alterato negativamente le condizioni ambientali favorevoli all'agricoltura, intrappolando una buona metà del limo all'interno del bacino, riducendo la fertilità delle terre a valle della diga e delle acque del delta, alterando le naturali condizioni dell'ecosistema fluviale e lo stile di vita di una grande quantità di persone. Un effetto secondario della costruzione della diga di Assuan è stato favorire l'ingresso nel Mediterraneo, attraverso il Canale di Suez, di specie marine tropicali provenienti dal Mar Rosso. Prima della costruzione della diga, infatti, il Nilo immetteva in mare grandi quantità di acqua dolce, che impedivano l'ingresso nel Mediterraneo alle specie marine del Mar Rosso, abituate ad acque a salinità maggiore.

4. “Riconoscendo i potenziali benefici derivanti dalla gestione, esiste in generale la necessità di comprendere e gestire l'ecosistema in un contesto economico. Ogni programma di gestione degli ecosistemi dovrebbe quindi:
  - a) ridurre quelle distorsioni di mercato che hanno effetti negativi sulla diversità biologica;
  - b) stabilire piani di incentivi per promuovere la conservazione e l'uso sostenibile della diversità biologica;
  - c) internalizzare il più possibile i costi e i benefici dell'ecosistema”.

*Il più grande pericolo per la diversità biologica consiste nel venire eliminata a seguito dell'introduzione di sistemi alternativi di uso del suolo. Questo spesso accade attraverso le distorsioni del mercato che sottovalutano i sistemi naturali e le popolazioni e forniscono incentivi iniqui e sussidi in favore della conversione del territorio in sistemi meno diversi. Spesso coloro che traggono benefici dalla conservazione non pagano i costi associati alla conservazione e, similmente, coloro che generano costi ambientali (ad es. inquinamento) rifuggono dalla loro responsabilità. La messa a disposizione di incentivi permette a coloro che controllano la risorsa di beneficiarne e assicura che coloro che generano i costi ambientali paghino.*

APPLICAZIONE: il Sesto programma di azione per l'ambiente dell'Unione Europea fissa gli obiettivi e le priorità ambientali che faranno parte integrante della strategia della Comunità Europea per lo sviluppo sostenibile e la politica ambientale. In questo contesto un approccio innovativo e il cercare nuovi modi di collaborare con un ampio spaccato della società è considerato un approccio strategico per conseguire gli obiettivi ambientali. È inoltre considerata importante l'integrazione delle tematiche ambientali nelle altre politiche, al fine di rendere le iniziative di conservazione ed uso sostenibile il più possibile efficaci. La collaborazione con il mercato attraverso le imprese e gli interessi dei consumatori contribuirà a creare modelli di produzione e consumo più sostenibili, penalizzando le imprese inadempienti e introducendo regimi che permettano di premiare i migliori; di informare i consumatori perché possano scegliere i prodotti più ecologici orientando così il mercato in una certa direzione; di sopprimere i sussidi pubblici a favore di pratiche nocive per l'ambiente; di incoraggiare le imprese ad innovare, magari cogliendo le opportunità offerte dall'uso, dallo sviluppo e dalla diffusione di tecnologie pulite.

5. "La conservazione della struttura e del funzionamento dell'ecosistema, al fine di mantenere inalterati i servizi ambientali forniti, dovrebbe essere un obiettivo prioritario dell'approccio ecosistemico". *Il funzionamento e la resilienza dell'ecosistema dipendono dalla relazione dinamica all'interno delle specie, tra le specie, e tra le specie e il loro ambiente abiotico, così come dalle interazioni fisiche e chimiche all'interno dell'ambiente. La conservazione e, ove appropriato, il ripristino di queste interazioni e processi, è di significato maggiore per il mantenimento a lungo termine della diversità biologica che la semplice protezione delle specie.*

APPLICAZIONE: un buon esempio di questo principio è fornito dalle Everglades, in Florida (USA). Il particolare paesaggio americano, formato da un vasto sistema estuario a praterie costiere e mangrovie, si basa sul delicato equilibrio tra il flusso d'acqua dolce portato dal fiume Kissimmee e l'acqua salata del Golfo del Messico. Le Everglades fungono da *nursery* per una serie di specie di crostacei e pesci che sostengono l'industria della pesca locale. Il sistema è attualmente in pericolo per l'eccessivo prelievo d'acqua a scopi potabili, irrigui e industriali, per l'inquinamento di provenienza agricola, per la presenza di specie non autoctone che competono con le specie autoctone, per la crescita dell'urbanizzazione. La gestione della risorsa acqua è un fattore critico per la sopravvivenza delle Everglades, perché queste possano continuare a svolgere la loro importante funzione ecologica, lo US Army Corp of Engineers dirige lo Everglades Protection and Expansion Act del 1989, che prevede la modifica delle attuali modalità di gestione dell'acqua dolce per ripristinare in parte il naturale ciclo stagionale dell'area.

6. "Gli ecosistemi devono essere gestiti nei limiti del loro funzionamento". *Considerando la probabilità o la facilità di raggiungimento degli obiettivi di gestione,*

*attenzione deve essere posta alle condizioni ambientali che limitano la produttività naturale, la struttura, il funzionamento e la diversità dell'ecosistema. I limiti al funzionamento degli ecosistemi possono essere influenzati in grado differente da condizioni temporanee, non prevedibili o mantenute artificialmente e, in accordo con ciò, la gestione dovrebbe essere appropriatamente cautelativa.*

APPLICAZIONE: le tecniche tradizionali di coltivazione contemplano la pratica del *set aside* e della rotazione (turnazione) delle colture. Queste pratiche consentono di mantenere un certo livello di produzione senza compromettere in modo drastico le risorse del terreno, ed hanno permesso, in paesi come il nostro, di conservare la fertilità del terreno per millenni. A latitudini e in condizioni socio-economiche diverse, la tecnica dello *slash and burning* (taglia e brucia), attuata sia per acquisire nuovi terreni all'agricoltura che per questioni energetiche, ha provocato danni irreversibili ad ecosistemi con bassa resilienza, in cui le componenti chimico-fisiche e biologiche degli ecosistemi richiedono tempi di recupero particolarmente lunghi, ed a volte l'alterazione degli ecosistemi di partenza si è dimostrato irreversibile. Una gestione del territorio di questo tipo è alla base dei fenomeni di desertificazione di un consistente numero di aree con problemi di sottosviluppo.

7. "L'approccio ecosistemico dovrebbe essere intrapreso su scala spaziale e temporale appropriata". *L'approccio dovrebbe essere limitato alle scale spaziali e temporali appropriate agli obiettivi. I limiti per la gestione saranno definiti in modo operativo dai fruitori, dai gestori, dai ricercatori e dalle comunità indigene e locali. La connettività tra aree dovrebbe essere promossa lì dove necessario. L'approccio ecosistemico è basato sulla natura gerarchica della diversità biologica caratterizzata dall'interazione e integrazione di geni, specie ed ecosistemi.*

APPLICAZIONE: la diversità biologica nelle sue diverse componenti può essere conservata ed utilizzata in modo sostenibile solo se considerata come parte integrante degli ecosistemi, e se si tengono in considerazione le sue interazioni con l'uomo. Alle nostre latitudini, dove la frammentazione dell'ambiente risulta essere una delle caratteristiche salienti del territorio, il livello più idoneo di applicazione dei principi dell'approccio ecosistemico è il paesaggio. Il paesaggio, inteso anche nella sua componente culturale, rappresenta il più alto livello di organizzazione della diversità biologica, con proprietà sintetiche e descrittive in grado di evidenziare le condizioni di salute/degrado e le interazioni reciproche degli elementi che ne fanno parte.

8. "Riconoscendo il variare delle scale temporali e gli effetti ritardati che caratterizzano i processi ecosistemici, gli obiettivi per la gestione degli ecosistemi dovrebbero essere messi a punto su scala temporale di lungo termine".

*I processi ecosistemici sono caratterizzati dalla variazione lungo una scala temporale e dall'effetto di trascinamento. Ciò entra inerentemente in conflitto con la tendenza umana a favore di guadagni a breve termine e benefici immediati piuttosto che futuri.*

APPLICAZIONE: il problema della scala temporale di applicazione dell'approccio ecosistemico è particolarmente critico. Politici, produttori, comunità, donatori, autorità nazionali e locali operano spesso su scale temporali completamente differenti. Nei *workshop* organizzati nell'ambito del progetto An Ecosystem Approach under the CBD, from concept to action (2000), i casi studio presentati hanno dimostrato che i progetti cercano di andare incontro alle necessità e alle aspettative di differenti *stakeholders* coniugando obiettivi a medio-lungo termine con azioni concrete a breve termine. Sebbene i partecipanti ai *workshop* convenissero sul fatto che l'approccio ecosistemico necessiti di

obiettivi a lungo termine, le comunità locali coinvolte nei progetti sono molto sensibili ai benefici immediati. Le necessità della vita quotidiana sono infatti immediate; un futuro sostenibile può essere irrilevante per chi rischia di non avere un futuro. La necessità di mettere a punto obiettivi a breve termine risponde non solo alle necessità degli utilizzatori dell'ambiente, ma può anche venire incontro ai problemi legati alla conservazione di specie o ecosistemi in condizioni critiche. Un modo per stemperare la scarsa efficacia di progetti a breve termine a favore di azioni a medio-lungo termine più significative ai fini dell'approccio ecosistemico, potrebbe essere: a) far cominciare le parti del progetto autosostenentesi dal punto di vista economico a medio-lungo termine dopo una parte iniziale finanziata *ad hoc*; b) l'integrazione di progetti pilota di breve-medio termine in programmi di tipo permanente; c) l'accettazione e la diffusione delle idee tra i partecipanti locali; d) una realistica strategia di fine progetto che preveda la continuazione delle attività cominciate con il progetto.

9. "La gestione deve riconoscere che il cambiamento è inevitabile".

*Gli ecosistemi cambiano, inclusa la composizione in specie e l'abbondanza delle popolazioni. Dunque, la gestione dovrebbe adattarsi al cambiamento. A parte la loro dinamica inerente al cambiamento, gli ecosistemi sono assediati da un complesso di incertezze e potenziali "sorprese" provenienti dall'ambito umano, biologico ed ambientale. I regimi tradizionali di disturbo possono essere importanti per la struttura e il funzionamento dell'ecosistema, e può essere necessario mantenerli o ripristinarli. L'approccio ecosistemico deve utilizzare una gestione adattativa al fine di anticipare e provvedere a quei cambiamenti ed eventi, e dovrebbe porre attenzione nel prendere qualsiasi decisione che possa precludere delle opzioni ma, allo stesso tempo, dovrebbe considerare*

*le azioni di mitigazione per far fronte ai cambiamenti a lungo termine come, ad esempio, i cambiamenti climatici.*

APPLICAZIONE: l'attività principale che è alla base del mantenimento di una parte dei paesaggi di montagna nel nostro Paese è l'agricoltura. La sua funzione produttiva tradizionale è la garanzia della qualità dell'ambiente ed è l'elemento chiave per la manutenzione e lo sviluppo di molte altre attività in aree montane. Le politiche nazionali ed europee, sempre più volte alla liberalizzazione dei mercati, hanno avuto come conseguenza la riduzione dei prezzi e l'ampliamento delle aziende agricole, tendenze queste che penalizzano un'economia come quella montana, gravata dall'esistenza di svantaggi naturali permanenti (orografici, climatici, di isolamento) che sono all'origine dei maggiori costi di produzione, da una produttività del lavoro più bassa, da una limitazione della dimensione delle aziende agricole. Le difficoltà economiche generate da queste tendenze sono particolarmente gravi da un punto di vista ambientale, a causa dell'importante ruolo giocato dall'agricoltura per gli equilibri ecologici. La fuga delle forze lavoro verso le città e il conseguente abbandono delle attività tradizionali, che rappresentavano un valido strumento di gestione territoriale, causa squilibri ambientali difficilmente recuperabili in tempi brevi, come l'omogeneizzazione dell'ambiente, la modifica del paesaggio, le difficoltà organizzative per la popolazione che rimane (isolamento, mancanza di servizi ed infrastrutture, perdita di cultura ecc.). Per invertire questa tendenza, che rischia di compromettere la qualità ambientale di vaste aree montane, sarebbe necessario mettere a punto nuove strategie (come quelle in discussione nel quadro dell'Anno Internazionale della Montagna) che coniughino la conservazione dell'ambiente con nuove prospettive di reddito legate all'uso sostenibile delle componenti della diversità biologica nelle aree

montane. Un esempio potrebbe essere quello di promuovere forme di "remunerazione" a fronte di "produzione ecocompatibile" o "conservazione" di tipologie ambientali. Queste remunerazioni potrebbero essere legate alla conservazione di "funzioni di protezione" o di "fruizione" dell'ambiente montano, visto come generatore di beni ambientali (acqua ed aria di buona qualità, protezione dal dissesto idrogeologico) o come fornitore di beni ambientali (turismo montano).

10. "L'approccio ecosistemico deve ricercare il giusto equilibrio e l'integrazione con la conservazione e l'uso della diversità biologica".

*La diversità biologica è critica sia per il suo valore intrinseco che per il ruolo chiave giocato nel procurare gli ecosistemi e gli altri servizi dai quali in ultima analisi tutti noi dipendiamo. C'è stata nel passato la tendenza a gestire le componenti della diversità biologica come protetti o non-protetti. Si è manifestata la necessità di indirizzarsi verso situazioni più flessibili dove conservazione ed uso sono visti in modo contestuale e l'intera gamma di misure viene applicata in un continuum da ecosistemi strettamente protetti ad altri costruiti dall'uomo.*

APPLICAZIONE: l'approccio alla conservazione della natura è stato storicamente inteso come conservazione di singole specie o aree di particolare interesse. Questo approccio non teneva conto delle relazioni imprescindibili esistenti tra le componenti di un ecosistema, e del fatto, quindi, che la conservazione di un singolo elemento (ad esempio, una specie) è destinato a fallire con l'alterarsi delle situazioni di contorno che ne permettono la sopravvivenza. Il Servizio Conservazione della Natura del Ministero dell'Ambiente, nell'elaborazione della Programmazione dei fondi strutturali 2000-2006 (delibera CIPE 22 dicembre 1998), ha steso un rapporto interinale che rappresenta il documento di base

per l'adozione della "Rete Ecologica Nazionale", uno specifico programma nazionale di interventi di tutela attiva e di sviluppo ecocompatibile delle risorse naturali italiane. Il rapporto recita: "...La rete ecologica si configura come una infrastruttura naturale e ambientale che persegue il fine di interrelazionare e di connettere ambiti territoriali dotati di una maggiore presenza di naturalità, ove migliore ... è il grado di integrazione delle comunità locali con i processi naturali, recuperando e ricucendo tutti quegli ambienti relitti e dispersi nel territorio che hanno mantenuto viva una seppure residua struttura originaria, ambiti la cui permanenza è condizione necessaria per il sostegno complessivo di una diffusa e diversificata qualità naturale nel nostro paese. Particolarmente, in queste aree, si pone l'esigenza di coniugare gli obiettivi della tutela e della conservazione con quelli dello sviluppo, compatibile e duraturo, integrando le tematiche economiche e sociali dei territori interessati dalle aree protette con la politica complessiva di conservazione e valorizzazione delle risorse ambientali". Questo approccio è sicuramente innovativo e corrisponde all'enunciato del presente principio.

11. "L'approccio ecosistemico dovrebbe considerare tutte le forme di informazione rilevanti, incluse le conoscenze scientifiche, le innovazioni e le pratiche indigene e locali".

*L'informazione da tutte le fonti è critica per pervenire ad effettive strategie di gestione di un ecosistema. È desiderabile una migliore conoscenza del funzionamento degli ecosistemi e dell'impatto dell'utilizzo umano. Tutte le informazioni rilevanti da ogni area considerata dovrebbero essere condivise con tutti i portatori di interesse e gli attori, tenendo conto, tra le altre cose, di ogni decisione presa sotto gli auspici dell'art. 8(j) della Convenzione sulla Diversità Biologica. Le ipotesi che sono alla base di specifiche proposte di*

*gestione dovrebbero essere avanzate in maniera esplicita e verificate alla luce delle conoscenze disponibili e del punto di vista dei portatori di interessi.*

APPLICAZIONE: la convivenza spesso millenaria dell'uomo con ambienti difficili o dalle caratteristiche molto marcate ha fatto in modo che si sviluppassero tecniche tradizionali di gestione del territorio particolarmente adatte alla conservazione delle caratteristiche peculiari dell'ambiente e allo sfruttamento razionale e non distruttivo delle risorse messe a disposizione dell'ecosistema. Il recupero e la conservazione di queste tecniche può rappresentare un'ottima opportunità di sviluppo di aree oggi svantaggiate da un punto di vista economico. Un buon esempio è dato dal recupero a scopi turistici dell'area delle gravine in Basilicata e Puglia, dove la riscoperta e il riutilizzo delle tecniche tradizionali di raccolta e distribuzione dell'acqua permette la razionalizzazione di una risorsa indispensabile per promuovere il turismo.

12. "L'approccio ecosistemico dovrebbe coinvolgere tutti i settori rilevanti della società e delle discipline scientifiche".

*Molti problemi inerenti la gestione della diversità biologica sono complessi, con molte interazioni, effetti collaterali ed implicazioni, e quindi dovrebbero coinvolgere le necessarie competenze e i portatori di interessi a livello locale, nazionale, regionale e internazionale, secondo quanto appropriato.*

APPLICAZIONE: tornando al sistema delle Everglades in Florida, il tentativo di ripristino delle condizioni ambientali dell'ecosistema è passato anche attraverso la costituzione di una South Florida Ecosystem Restoration Task Force. La Task Force, formata da ingegneri, scienziati, antropologi e manager di tredici diverse agenzie federali, sei agenzie di Stato e due governi tribali, coordina le proprie attività con il pubblico e con la Commissione Unica stabilita dal Gover-

natore della Florida, al fine di coniugare le necessità del ripristino ambientale con un'economia sostenibile e una buona qualità della vita. Esperienze analoghe potrebbero essere sviluppate nei territori del Bacino del Mediterraneo ove sono presenti comunità locali che hanno preservato forti tradizioni.

### Principi operativi per l'applicazione dell'approccio ecosistemico

Oltre ai dodici principi dell'approccio ecosistemico, il documento di lavoro della COP 5 propone cinque principi operativi da utilizzare nell'applicazione a livello locale dei principi generali sopra enunciati.

1. "Concentrare l'attenzione sulle relazioni funzionali e sui processi interni agli ecosistemi".  
*La diversità biologica funzionale fornisce beni e servizi di importanza economica e sociale e controlla le riserve e i flussi di energia, i cicli dell'acqua e dei nutrienti all'interno degli ecosistemi. È quindi richiesta una sempre maggiore conoscenza dei ruoli delle componenti della diversità biologica, per:*
  - a) *comprendere la resilienza ecosistemica e gli effetti della perdita di diversità biologica e della frammentazione degli habitat;*
  - b) *individuare le cause di perdita della diversità biologica;*
  - c) *individuare i fattori determinanti della diversità biologica locale nelle decisioni di gestione.*
2. "Accrescere la condivisione dei benefici".  
*I benefici che derivano dalla diversità biologica a livello di ecosistema forniscono le basi della sostenibilità. L'approccio ecosistemico cerca di far sì che i benefici derivati da queste funzioni siano mantenuti o ripristinati. In particolare, di queste funzioni dovrebbero beneficiare i detentori di interessi responsabili della loro produzione e*

*gestione. Ciò richiede che le comunità locali accrescano la capacità di gestire la diversità biologica negli ecosistemi; una appropriata valutazione dei beni e dei servizi degli ecosistemi; la rimozione di incentivi perversi che svalutino i beni e i servizi offerti dagli ecosistemi; e la loro sostituzione con incentivi locali rivolti alla messa in opera di buone pratiche di gestione.*

3. "Utilizzare pratiche di gestione adattativa".  
*Il livello di indeterminazione dei processi e delle funzioni degli ecosistemi è aumentato dalle interazioni con la struttura sociale. È necessario quindi adattare le metodologie e le pratiche di gestione tenendo conto di queste interazioni. I programmi di gestione dovrebbero adattarsi agli imprevisti, piuttosto che basarsi soltanto su ciò che è già noto. La gestione degli ecosistemi ha bisogno di riconoscere la diversità dei fattori sociali e culturali che interessano l'uso delle risorse naturali. Similmente, vi è la necessità di flessibilità nelle decisioni politiche e nei processi di implementazione. La gestione degli ecosistemi dovrebbe essere considerata come un esperimento a lungo termine che basa i propri progressi sui propri risultati.*
4. "Portare avanti azioni di gestione alla scala appropriata, decentralizzando al livello appropriato più basso".  
*Spesso l'approccio implica la decentralizzazione a livello delle comunità locali. Il passaggio di competenze richiede che i detentori di interesse abbiano l'opportunità di assumersi le responsabilità e la capacità di portare avanti azioni appropriate. È inoltre necessario che siano supportati da una politica e da quadri legislativi appropriati. Dove necessario, istituzioni appropriate dovrebbero essere coinvolte nelle decisioni per la risoluzione dei conflitti.*
5. "Assicurare la cooperazione intersettoriale".  
*L'approccio ecosistemico dovrebbe essere tenuto in considerazione nello sviluppare e*



riconsiderare le strategie nazionali e i piani d'azione per la diversità biologica. L'approccio ecosistemico dovrebbe inoltre essere integrato nell'agricoltura, nella pesca, in campo forestale e in altri sistemi produttivi che hanno un effetto sulla diversità biologica. La gestione delle risorse naturali richiede infatti un aumento della comunicazione e cooperazione intersettoriale.

## Conclusioni

Da quanto detto, si evince come l'approccio ecosistemico richieda che la gestione si accordi con la natura complessa e dinamica degli ecosistemi, nonché con la mancanza di conoscenze complete e di una completa comprensione del loro funzionamento. I processi ecosistemici sono spesso non-lineari e i loro risultati si manifestano spesso dopo un intervallo di tempo. La gestione deve quindi essere di tipo adattativo per poter rispondere agli elementi di incertezza, e contenere elementi di "imparare facendo" o di analisi a *feedback*. Ciò è necessario in quanto nella gestione pratica di un territorio si può rendere necessario prendere delle misure senza che le relazioni causa-effetto siano pienamente riconosciute a livello scientifico. L'approccio ecosistemico non preclude altri tipi di approccio gestionale o di conservazione, come ad esempio leggi nazionali e leggi-quadro già in vigore, vincoli e programmi di conservazione di singole specie, ma integra tutti questi approcci per adattarsi a situazioni complesse, ed anzi introduce elementi di conservazione e gestione sostenibile soprattutto lì dove il territorio è già sottoposto ad un utilizzo con maggior o minore impatto (agricolo, industriale, insediativo). Non esiste un solo modo di applicare l'approccio ecosistemico, che rappresenta più una filosofia di intervento e gestione che un insieme di regole da seguire secondo uno schema preciso. Questo perché a tutti i livelli, ma soprattutto a quello locale, la gestione

del territorio è influenzata da una miriade di deleghe legislative e di interessi pubblici e privati che non possono essere ignorati.

L'applicazione dei principi dell'approccio ecosistemico deve quindi essere valutato e tarato di volta in volta a seconda delle condizioni locali e a contorno, cercando il più possibile di conservare lo spirito generale dell'approccio.

L'individuazione di una metodologia di azione a livello locale che si basi su indicazioni generali individuate a livello internazionale, così come è stato per l'approccio ecosistemico, risponde ad uno dei principali assunti dello sviluppo sostenibile: "Pensare globalmente, agire localmente".

## Bibliografia

- NICOLAI C., PADOVANI L. & CARRABBA P., 1998. *Territorio e Biodiversità: l'Approccio Ecosistemico*. Pangea 11:13-16.
- BATJARGAL Z., BRIDGEWATER P., DI CASTRI F., HAMMER M.B., HENNE G., KABWAZA M.P., MALTBY E., MARTIN R.B., MAURO F., PRINS H.H.T., RUGGIERO M., SCHEI P.J., SEYANI J.H., VOGEL J., VOKHIWA Z.M., 1998. *Report of the Workshop on the Ecosystem Approach, Lilongwe*. Convention on Biological Diversity (UNEP/CBD/COP/4/Inf.9).
- MALTBY E., HOLDGATE M., ACREMAN M., WEIR A., 1998. *Ecosystem Management: Questions for science and policy*. RHIIR. London.
- AA.VV., 1999. *Report of the Scientific Workshop on 'The Ecosystem Approach - What does it mean for European Ecosystems'*. German Federal Agency for Nature Conservation. Bonn, Germany.
- SCHEI P.J., SANDLUND O.T. & STRAND R. (eds.), 1999. *Norway/UN Conference on Norway/UN Conference on the Ecosystem Approach For Sustainable Use of Biological Diversity*. Norwegian Directorate for Nature Management (DN) and Norwegian Institute for Nature Research. Trondheim, 6-10 September 1999.
- UNEP, 2000. *Decision adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at its fifth Meeting*. Nairobi, 2000. UNEP/CBD/COP/5/23, pp. 103-109.
- SMITH R.D. & MALTBY E. (eds), 2001. *Using the Ecosystem Approach to implement the CBD*. Royal Holloway, University of London. London.
- CAMPFIRE - *Communal Areas Management Programme for Indigenous Resources*. Zimbabwe. <http://campfire-zimbabwe.org/index.html>.
- Convenzione sulla Diversità Biologica (UNEP-CBD). <http://www.biodiv.org/>.
- Everglades National Park - <http://www.nps.gov/ever/welcome2.htm>.



# Veicoli a **idrogeno**: stato attuale e prospettive di sviluppo

Le tecnologie disponibili, i principali risultati ottenuti e le iniziative previste nell'ambito dei programmi pubblici e privati internazionali e nazionali. I vantaggi ambientali e le barriere che ostacolano la loro introduzione nel mercato. L'importanza di una presenza italiana significativa

**M. CONTE, F. DI MARIO,  
A. IACOBAZZI, R. INFUSINO  
A. MATTUCCI, M. RONCHETTI  
R. VELLONE**

ENEA  
Grande Progetto Idrogeno  
e Celle a Combustibile

Lo sviluppo della società attuale è legato strettamente al settore dei trasporti ed in particolare al modo stradale. Accanto a questa indiscutibile valenza positiva si verificano però effetti di carattere marcatamente opposto, che impongono con urgenza l'adozione di nuove soluzioni e modelli di riferimento per garantire che la crescita tumultuosa del settore non arrechi danni irreversibili e inaccettabili al mondo moderno. Si parla evidentemente degli effetti dovuti all'inquinamento atmosferico; ai disturbi causati dall'inquinamento acustico; alla congestione; agli incidenti e così via fino alle possibili mutazioni climatiche legate all'effetto serra e al progressivo depauperamento delle risorse energetiche non rinnovabili. Tali esternalità negative provocano un innegabile peggioramento della qualità della vita dei cittadini e dello stato dell'ambiente ed impongono alla collettività alti costi di ripristino. Spesso tali costi vengono sottovalutati in quanto sono suddivisi tra molteplici soggetti, per cui i cittadini non riescono ad acquisire una piena coscienza dell'impatto complessivo, come sarebbe se il costo venisse a gravare su un unico individuo. Un ulteriore problema è originato dai differenti contesti territoriali sui quali i trasporti vanno ad incidere, che richiedono un alto grado di sinergia tra i diversi soggetti preposti alle azioni di contenimento e recupero.

Nella tabella 1 sono riportate le esternalità più evidenti prodotte dai trasporti stradali, in relazione alla scala territoriale in cui i relativi effetti hanno maggiore incidenza<sup>1</sup>.

Per farsi un'idea dell'incidenza energetica dei trasporti, si possono considerare le statistiche fornite dall'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA)<sup>2</sup>, da cui si è ricavata la tabella 2, relativa ai consumi finali di ener-

gia per l'anno 1999. Come si può vedere, l'incidenza dei trasporti è pari a circa il 26% ed il 34% del totale dei consumi energetici, rispettivamente per l'intero pianeta ed i paesi OCSE. Tale percentuale aumenta al 58% e 62% quando si vanno ad esaminare i consumi dei prodotti petroliferi, che rappresentano la percentuale più consistente delle fonti utilizzate. In questo quadro gioca un ruolo predominante il trasporto stradale, dove viene consumata una porzione maggiore del 90% dell'energia utilizzata dall'intero settore e che, a sua volta, impiega prevalentemente i derivati del petrolio. L'ampia dipendenza dal petrolio rende necessaria una breve riflessione sulla disponibilità delle scorte della fonte primaria. La consistenza dei giacimenti di petrolio, già scoperti ovvero in corso di esplorazione, dà una stima di 1800 miliardi di barili, di cui 784 già estratti e consumati (dati 1996); sulla base dei consumi attuali, pari a circa 25 miliardi di barili nell'anno 2000, e dei tassi di crescita appare chiaro che entro qualche decina di anni le risorse estraibili a costi accettabili saranno esaurite, anche considerando la scoperta di nuovi giacimenti.

Accanto a questo problema si deve aggiungere che l'emissione di CO<sub>2</sub> può produrre effetti sempre più critici, con la fondata prospettiva di modificare il clima mondiale, come conseguenza del mag-

**Tabella 1**  
Impatti delle esternalità dei trasporti ai vari livelli territoriali<sup>1</sup>

Impatti	Scala	Inquinamento atmosferico	Incidenti	Rumore
Salute, qualità della vita	Locale	X	X	X
Piogge acide	Regionale	X		
Smog fotochimico	Regionale	X		
Effetto serra indiretto	Globale	X		
Effetto serra diretto	Globale	X		
Riduzione ozono stratosferico	Globale	X		

		Carbone	Greggio	Prodotti petroliferi	Gas	Combustibili rinnovabili	Altri	Totale
<b>Consumo mondiale</b>	Totale	552,45	16,4	2869,6	1077,9	956,8	1279,8	6752,95
	Trasporti	6,25	-	1663,4	58,4	8,8	18,7	1755,55
<b>Consumo paesi OCSE</b>	Totale	128	2,2	1897,1	688,5	103,73	733,1	3552,63
	Trasporti	0,1	-	1168,8	23,4	1,9	9,2	1203,4

**Tabella 2**  
Consumi finali di energia anno 1999 (Mtep)

Modalità di trasporto	1990				1995				2000			
	Traffico Mpass-km (Mt-km)	Energia finale (Mtep)	Energia primaria (Mtep)	Emiss. di CO <sub>2</sub> (Mt)	Traffico Mpass-km (Mt-km)	Energia finale (Mtep)	Energia primaria (Mtep)	Emiss. di CO <sub>2</sub> (Mt)	Traffico Mpass-km (Mt-km)	Energia finale (Mtep)	Energia primaria (Mtep)	Emiss. di CO <sub>2</sub> (Mt)
<b>Passeggeri</b>												
Impianti fissi	51.698	0,329	0,772	1,948	51.871	0,364	0,873	2,194	52.080	0,369	0,907	2,269
Su strada	637.237	21,756	25,140	72,824	740.725	24,227	28,001	81,083	810.450	26,088	30,155	87,303
Vie d'acqua	2.887	0,060	0,068	0,205	2.667	0,067	0,076	0,229	4.648	0,097	0,110	0,330
Navigazione aerea	6.416	0,551	0,641	1,835	7.108	0,596	0,693	1,985	11.585	0,971	1,129	3,235
<b>Totale passeggeri</b>	<b>698.238</b>	<b>22,696</b>	<b>26,621</b>	<b>76,812</b>	<b>802.371</b>	<b>25,255</b>	<b>29,644</b>	<b>85,491</b>	<b>878.763</b>	<b>27,524</b>	<b>32,301</b>	<b>93,137</b>
<b>Merci</b>												
Impianti fissi	21.941	0,176	0,410	1,035	24.352	0,204	0,473	1,194	25.600	0,204	0,473	1,196
Su strada	177.945	7,930	9,012	27,070	195.327	9,314	10,585	31,795	210.108	12,212	13,877	41,686
Vie d'acqua	35.783	0,331	0,376	1,130	35.442	0,383	0,435	1,307	46.203	0,427	0,486	1,459
Navigazione aerea	33	0,014	0,017	0,047	29	0,012	0,014	0,040	40	0,017	0,020	0,057
<b>Totale merci</b>	<b>235.702</b>	<b>8,452</b>	<b>9,814</b>	<b>29,282</b>	<b>255.121</b>	<b>9,913</b>	<b>11,506</b>	<b>34,336</b>	<b>281.951</b>	<b>12,860</b>	<b>14,856</b>	<b>44,398</b>
<b>Totale trasporto</b>	<b>-</b>	<b>31,147</b>	<b>36,435</b>	<b>106,094</b>	<b>-</b>	<b>35,168</b>	<b>41,150</b>	<b>119,827</b>	<b>-</b>	<b>40,385</b>	<b>47,157</b>	<b>137,535</b>

**Tabella 3**

Trasporto passeggeri e merci in Italia: traffico, consumi ed emissioni totali di CO<sub>2</sub> per modalità. Anni 1990-1995-2000

Fonte: Elaborazione ENEA di dati di fonti diverse

giore assorbimento di energia da parte dell'atmosfera. Per ovviare a tutto questo si sta tentando di attivare politiche di contenimento come il Protocollo di Kyoto, che impone di ridurre le emissioni per i Paesi firmatari, con un obiettivo di riduzione complessiva per il 2010 che, per l'Unione Europea, è pari all'8% e per l'Italia al 6,5%, rispetto all'anno 1990. Tuttavia, se la tendenza aggregata per l'Unione Europea è positiva con una riduzione del 4% nell'anno 1999, per l'Italia si è invece registrato un aumento del 4,4% nello stesso anno<sup>3</sup>. Ciò vuol dire che, nel nostro Paese, nuove misure dovranno essere adottate ed un maggior impegno in quelle già avviate per centrare gli obiettivi di riduzione. In particolare, le indicazioni date dal Governo, per quanto attiene al settore trasporti, includono lo sviluppo di sistemi di trasporto a ridotto impatto energetico ed ambientale. Per quanto riguarda le emissioni di sostanze nocive, in ambito comunitario sono state prese misure di carattere normativo, sia stabilendo limiti per le concentrazioni nell'aria di composti pericolosi e per le emissioni complessive dei singoli paesi membri, sia imponendo vincoli stringenti sui veicoli ed i carburanti utilizzati per il trasporto stradale in modo da ridurre o elimi-

nare gli effetti indesiderati. Altre azioni della Commissione Europea hanno promosso la stipula Accordi volontari con i principali costruttori di autoveicoli sia europei che extraeuropei (raggruppamenti ACEA, JAMA e KAMA) al fine di abbattere le emissioni specifiche della CO<sub>2</sub> da parte dei veicoli. In essi si è concordato che, entro il 2008, la media delle emissioni di CO<sub>2</sub> dei nuovi veicoli venduti dovrà essere non superiore a 140 g/km, anche se la CE ha l'obiettivo di ridurre ulteriormente il limite a 120 g/km, il cui relativo conseguimento potrebbe essere raggiunto entro l'anno 2012.

L'importanza dei trasporti in ambito nazionale<sup>4</sup> può essere rilevata attraverso la tabella 3, che ne riassume i dati principali e che conferma ancora una volta il ruolo prevalente del trasporto stradale.

Un ulteriore approfondimento può essere fatto evidenziando i contributi delle varie tipologie di veicoli facenti parte del trasporto stradale sulla base della metodologia COPERT<sup>5</sup> che viene usata per le stime nazionali.

In tabella 4<sup>5</sup> sono riportati i dati di impatto del trasporto stradale aggregati sul territorio nazionale, ottenuti a partire dai singoli domini urbano, extraurbano e autostradale su cui vengono calcolati i vari indicatori. I

consumi sono espressi in tonnellate equivalenti di petrolio (tep) per rendere confrontabili i diversi combustibili, che sono caratterizzati da poteri calorifici abbastanza diversi.

Confrontando la tabella con le emissioni totali nazionali complessive si può evincere che l'impatto del trasporto stradale è del tutto predominante per alcuni inquinanti, come  $\text{NO}_x$  e COV, sui quali devono pertanto essere attivate azioni specifiche per la riduzione delle emissioni. Per essere efficaci, gli interventi dovranno essere ad ampio spettro ed interessare quindi sia la gestione della domanda e del sistema nel suo insieme, sia lo sviluppo di combustibili alternativi e di nuove tecnologie veicolari.

Nel breve e medio termine il miglioramento dei veicoli convenzionali (minori emis-

sioni e maggiore efficienza) si potrà ottenere con l'adozione di tecnologie ormai in fase di avanzata sperimentazione ed introduzione preliminare del mercato: nuove configurazioni e dimensioni (per migliorare l'aerodinamica e minimizzare le necessità energetiche), motori termici a più alto rendimento (a iniezione diretta sia a benzina sia diesel con cicli più efficienti), nuovi materiali (per ridurre la massa del veicolo e migliorare le prestazioni energetiche dei motori con materiali ceramici) e combustibili alternativi (gas naturale, biocombustibili, idrogeno per ridurre la quantità di carbonio nel combustibile di partenza), elettrificazione spinta dei servizi (per aumen-

tare il rendimento complessivo del veicolo nonostante la crescita della richiesta di potenza complessiva), ed ibridazione minima (per favorire il recupero in frenata). Oltre al miglioramento dei veicoli convenzionali, sono possibili soluzioni diverse, basate essenzialmente sull'utilizzazione della trazione elettrica in combinazione con una serie di tecnologie veicolari e combustibili alternativi.

I veicoli a trazione elettrica hanno in comune un motore elettrico che provvede, parzialmente o completamente, alla sua propulsione mantenendo un elevato rendimento energetico in ogni condizione di lavoro, anche perché consentono, quale requisito esclusivo, di recuperare energia durante le fasi di rallentamento del veicolo.

Tra le diverse soluzioni, quella più promet-

Indicatore	Autovetture	Furgoni	Camion	Bus	Motorini	Moto	Totale
Consumo (Mtep)	23,57	3,28	7,95	1,07	0,51	0,66	37,04
$\text{CO}_2$ (t * $10^6$ )	71,05	9,68	23,29	3,14	1,55	2,03	110,74
CO (t * $10^6$ )	3,11	0,12	0,08	0,01	0,29	0,52	4,13
$\text{NO}_x$ (t * $10^3$ )	419,30	55,7	236,6	37,8	0,6	3,81	753,81
COV non metanici (t * $10^3$ )	469,20	14,9	37,6	4,4	174,3	42,6	743,00
$\text{CH}_4$ (t * $10^3$ )	29	0,6	2	0,4	2,9	4,4	39,30
PM (t * $10^3$ )	15,2	9,7	16	1,8			42,70
$\text{N}_2\text{O}$ (t * $10^3$ )	7,7	0,6	1,1	0,1			9,50
$\text{NH}_3$ (t * $10^3$ )	13,7	0,2	0,1				14,00
$\text{SO}_2$ (t * $10^3$ )	16,6	3,2	7,4	1	0,9	1,2	30,30
Pb (t <sup>3</sup> )	654,6	82,8	3,1		165	215,9	1121,40

**Tabella 4**  
Impatto del trasporto stradale in Italia per l'anno 1999

tente per il medio-lungo termine è basata sull'impiego dell'idrogeno in veicoli che utilizzano la tecnologia delle celle a combustibile. All'approfondimento della tecnologia relativa all'uso dell'idrogeno è quindi dedicato il resto del documento.

**L'idrogeno come combustibile per la trazione**

## L'idrogeno come combustibile per la trazione

### Caratteristiche dell'idrogeno

L'idrogeno, l'elemento più abbondante dell'Universo, è assai raro sulla Terra allo stato elementare, anche se è molto diffuso sotto forma di composti (acqua, idrocarbu-

Proprietà	Unità di misura	Valore
Peso molecolare		2,016
Densità gas	kg/m <sup>3</sup>	0,0899
Potere calorifico superiore	kWh/kg kWh/Nm <sup>3</sup>	39,41 3,509
Potere calorifico inferiore	kWh/kg kWh/Nm <sup>3</sup>	33,33 2,995
Temperatura di ebollizione	K	20,3
Densità come liquido	kg/m <sup>3</sup>	70,8
Calore specifico	kJ/(kg K)	14,89

**Tabella 5**  
Proprietà dell'idrogeno

ri, organismi animali e vegetali) e può quindi essere prodotto a partire da diverse fonti. L'interesse per il suo impiego come combustibile, per la trazione ma anche per applicazioni stazionarie, deriva dal fatto che può essere utilizzato con impatto ambientale nullo o estremamente ridotto; infatti, se usato in processi di combustione, produce vapor d'acqua e tracce di ossidi di azoto, ovvero solo vapor d'acqua, se utilizzato con sistemi elettrochimici a celle a combustibile.

Le caratteristiche principali dell'idrogeno sono riportate nella tabella 5. Rispetto agli altri combustibili, l'idrogeno presenta un ridotto contenuto energetico su base volumetrica, mentre ha il più alto contenuto di energia per unità di massa (tabella 6)\*.

Un litro di gasolio, come contenuto energetico, equivale a:

- 3,12 m<sup>3</sup> di idrogeno gassoso (in condizioni normali);
- 4,13 litri di idrogeno liquido.

L'introduzione dell'idrogeno come vettore energetico richiede che siano messe a punto le tecnologie necessarie per rendere il suo impiego economico ed affidabile, nelle diverse fasi di produzione, trasporto, accumulo e utilizzo.

**Tabella 6**  
Proprietà energetiche di diversi combustibili

Proprietà	Unità di misura	Idrogeno	Metano	Metanolo	Benzina	Gasolio
Potere calorifero inferiore	MJ/kg	119,99	50,05	19,6	43,95	42,9
Densità di energia	MJ/l	1,080E-02	3,54E-02	15,6	32,96	36,04

### Produzione dell'idrogeno

L'idrogeno, come già accennato, può esse-

re prodotto a partire da diverse fonti primarie, sia fossili sia rinnovabili, e può contribuire quindi alla diversificazione ed all'integrazione tra le diverse fonti.

### Produzione da combustibili fossili

Dei circa 500 miliardi di Nm<sup>3</sup> di idrogeno prodotti annualmente a livello mondiale, circa 190 miliardi rappresentano un sottoprodotto dell'industria chimica (ad esempio impianti cloro-soda), mentre la maggior frazione deriva da combustibili fossili, gas naturale ed olio pesante, attraverso processi di *reforming* e di ossidazione parziale.

Il processo principalmente utilizzato (*steam reforming*) è tecnicamente molto ben sperimentato e viene realizzato industrialmente con unità di capacità dell'ordine di 100.000 Nm<sup>3</sup>/h. Unità molto più piccole, realizzate specificamente per l'uso sui veicoli o per impianti di generazione distribuita di piccola taglia, sono attualmente in via di sviluppo, soprattutto per l'utilizzo in sistemi con celle a combustibile.

Per arrivare ad un idrogeno "pulito" (cioè senza emissioni di CO<sub>2</sub>), partendo da combustibili fossili, è necessario provvedere alla separazione e al confinamento della anidride carbonica che inevitabilmente si forma durante il processo. Per entrambe queste tipologie di azioni sono in corso da anni programmi internazionali di vasta portata, che prevedono principalmente il confinamento della CO<sub>2</sub> in formazioni geologiche profonde e di caratteristiche adeguate. Nel nostro Paese, come d'altra parte in molte altre nazioni, le opzioni principali sono due:

- i giacimenti esauriti di gas e petrolio;
- i cosiddetti acquiferi salini, situati a grande profondità (oltre 1.000 m sotto il livello del mare), che sono considerati formazioni stabili non altrimenti utilizzabili.

Sono anche allo studio numerosi nuovi processi di produzione che potrebbero semplificare il problema della gestione della

\* I dati relativi ad idrogeno e metano si riferiscono allo stato gassoso in condizioni normali di temperatura e pressione.

CO<sub>2</sub> (come il processo "plasma-arc" della Kvaerner Engineering, i reattori a membrana, i processi in cui la CO<sub>2</sub> viene fissata durante la trasformazione) che sembrano offrire prospettive interessanti.

In ogni caso la produzione di idrogeno da combustibili fossili, potendosi basare su tecnologie che per buona parte sono già a livello di sviluppo industriale, rappresenta una sorta di "ponte tecnologico" verso la produzione da fonti rinnovabili, che sembra la produzione più promettente nel lungo termine. L'introduzione di tecnologie già pronte, oltre a presentare un potenziale di riduzione degli inquinanti nel breve-medio termine, permetterà uno sviluppo graduale delle infrastrutture ed un'introduzione progressiva di un vettore che, pur presentando enormi vantaggi ambientali, richiede complessi cambiamenti della struttura del settore energetico.

### Produzione da fonti rinnovabili

Parlando di produzione di idrogeno da fonti rinnovabili, i processi possono essere sommariamente distinti in:

- produzione da biomasse;
- produzione dall'acqua.

La produzione di idrogeno a partire da biomasse si presenta molto interessante, ma nessuno dei processi proposti ha ancora raggiunto la maturità industriale. Le diverse alternative (gassificazione; pirolisi e successivo *reforming* della frazione liquida prodotta; produzione di etanolo e *reforming* dello stesso; produzione biologica attraverso processi basati su fenomeni di fotosintesi o di fermentazione) richiedono tutte un impegno notevole di ricerca, sviluppo e dimostrazione, anche se a livelli diversi. Le premesse sono comunque buone, tenuto conto dei diversi materiali utilizzabili.

L'idrogeno può anche essere prodotto dall'acqua, scindendo la stessa nei suoi componenti (idrogeno e ossigeno), attraverso diversi processi, tra i quali quello più consolidato è l'elettrolisi.

L'elettrolisi dell'acqua consente di ottenere idrogeno praticamente puro, ad un costo che può diventare economicamente accettabile solo in una prospettiva ancora lontana, allorquando le innovazioni tecnologiche potrebbero consentire un costo estremamente basso dell'energia elettrica, prodotta da fonti rinnovabili (o da nucleare).

Tale scelta non appare, allo stato attuale delle conoscenze, economicamente (ed energeticamente) perseguibile, se non per applicazioni particolari (ad esempio aree remote).

La dissociazione dell'acqua può essere effettuata anche facendo uso di processi termochimici che utilizzano calore ad alta temperatura (800-1000 °C) ottenuto da fonti diverse (prima fra tutte l'energia solare); sono in corso, anche in Italia, attività di ricerca e sviluppo tese a dimostrare la fattibilità industriale di tali processi, ed il potenziale nel lungo termine sembra essere molto interessante.

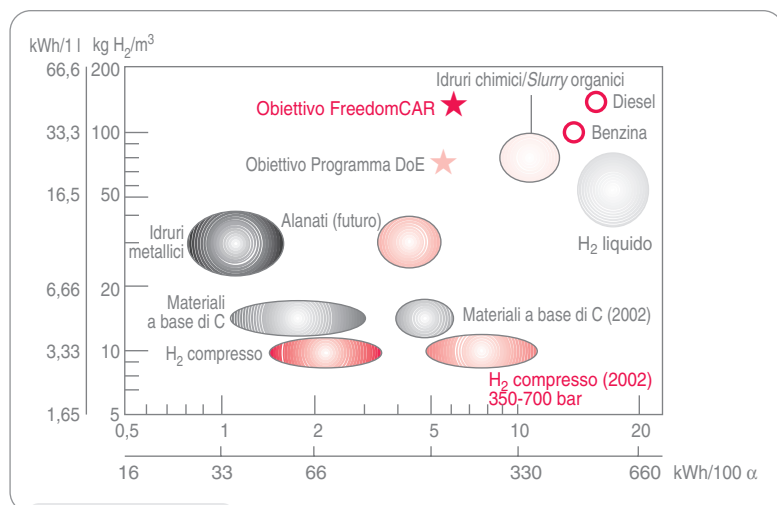
Altri processi, ancora allo stato di laboratorio, sono la fotoconversione, che scinde l'acqua usando organismi biologici o materiali sintetici, e i processi fotoelettrochimici, che usano per lo stesso scopo una corrente elettrica generata da semiconduttori.

### Tecnologie di stoccaggio

Esistono diverse tecnologie di accumulo dell'idrogeno le cui caratteristiche sono sintetizzate nella figura 1. Di seguito vengono descritte brevemente le tecnologie più promettenti.

### Idrogeno compresso

Il modo più semplice ed economico per accumulare idrogeno a bordo di un veicolo è di utilizzarlo sotto forma di gas compresso a pressione di 200-250 bar (ed oltre). La tecnologia risulta tuttavia non facilmente proponibile per l'uso a bordo di auto tradizionali, a causa del peso ed ingombro dei serbatoi attualmente utilizzati, che rappresentano un limite all'autonomia e capacità di carico del veicolo.



**Figura 1**  
Caratteristiche dei sistemi di accumulo idrogeno

Fonte: DoE

Di recente, notevoli progressi sono stati fatti con l'introduzione di serbatoi con *liner* metallico o termoplastico rinforzati con fibre di carbonio, di vetro ed aramidiche, che presentano un peso 3-4 volte inferiore a quello dei comuni serbatoi e che consentono di superare in parte gli inconvenienti dell'uso delle bombole tradizionali. Questi serbatoi sono in grado di operare a pressioni fino a 350 bar (potenzialmente fino a 700 bar) e consentono quindi di ottenere densità di accumulo di idrogeno adeguate all'uso a bordo di veicoli. Le caratteristiche di sicurezza sono solitamente molto elevate, grazie alla robustezza dei serbatoi ed all'introduzione di fusibili antiscoppio, in caso di incendio, e di valvole di interruzione del circuito in caso di urto.

Per quanto riguarda normative di sicurezza e licenze per usi a bordo di veicoli, le bombole di idrogeno sono soggette a restrizioni analoghe a quelle adottate nel caso del gas naturale.

### Idrogeno liquido

L'idrogeno può essere immagazzinato a bordo di un veicolo in forma liquida ad una temperatura di -253 °C. Per mantenere queste temperature sono stati messi a punto serbatoi a doppia parete, con un'intercapedine, dove viene fatto il vuoto (serbatoi tipo "dewar"). Questa tecnologia è

ormai consolidata in Germania, dove la BMW la utilizza da oltre 15 anni su auto ad idrogeno alimentate con motori a combustione interna.

L'accumulo in forma liquida è forse la tecnologia che oggi meglio soddisfa, da un punto di vista teorico, le esigenze dell'autotrazione; tuttavia anch'essa presenta dei limiti.

A sfavore dell'idrogeno liquido giocano la maggiore complessità del sistema, non solo a bordo del veicolo ma anche a terra, per la distribuzione ed il rifornimento, ed i maggiori costi ad esso associati. Anche il costo energetico della liquefazione è considerevole, corrispondendo a circa il 30% del contenuto energetico del combustibile, contro un valore compreso tra il 4% ed il 7% per l'idrogeno compresso.

### Idruri metallici

L'idrogeno può legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche, formando idruri. Questi composti sono in grado di intrappolare idrogeno, a pressioni relativamente basse. L'idrogeno penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo, andando ad occupare i siti interstiziali. Con tale tecnologia si raggiungono, a basse pressioni, densità energetiche maggiori di quelle dell'idrogeno compresso e paragonabili a quelle dell'idrogeno liquido (secondo alcune referenze, anche maggiori). Il volume di stoccaggio si riduce di 3-4 volte, rendendo possibile l'uso di questi sistemi nelle autovetture, mentre l'energia specifica dipende anche dal peso specifico del metallo di base.

Le percentuali, in peso, di idrogeno sul peso totale che si raggiungono vanno dall'1% al 12,7% (LiH); per confronto si ricorda che, per le comuni bombole, tale percentuale è di poco superiore all'1%, e quindi tali sistemi di stoccaggio sono potenzialmente molto promettenti. Un punto debole della tecnologia è rappresentato dal peso dei sistemi di accumulo che, a parità di peso del veicolo, riducono l'autono-



mia ad una percorrenza tre volte inferiore a quella ottenibile con idrogeno liquido o idrogeno compresso con serbatoi di tipo avanzato. Sono invece indubbi i vantaggi in termini di convenienza, compattezza, stabilità dello stoccaggio, sicurezza intrinseca.

### Nanostrutture di carbonio

Le nanostrutture di carbonio (nanotubi e nanofibre di carbonio), scoperte all'inizio degli anni 90, stanno dimostrando ottime capacità di adsorbimento dell'idrogeno, con risultati in alcuni casi sorprendenti e particolarmente favorevoli.

Su questi materiali sono in corso ricerche da parte di numerosi gruppi di lavoro, ma i risultati ottenuti, spesso in contrasto tra di loro, sono il più delle volte non confrontabili in quanto le esperienze sono state effettuate su campioni di materiali di diverso tipo, provati in condizioni di pressione e temperatura molto diverse tra loro. Il campo di variazione della pressione va da pochi bar ad alcune centinaia di bar, la temperatura da 80 K a 800 K, le percentuali di adsorbimento in peso variano da valori inferiori all'1% ad un incredibile 60%.

### Infrastrutture

Il problema principale che frena l'utilizzo dell'idrogeno come combustibile per auto-veicoli è quello della realizzazione delle infrastrutture necessarie per la sua produzione e distribuzione, che rappresenta una sfida tecnico-economica e tale da richiedere uno sforzo congiunto di amministrazioni pubbliche e imprese industriali per essere risolto positivamente.

### Distribuzione dell'idrogeno

A seconda delle quantità interessate, l'idrogeno può essere trasportato per mezzo di autocisterne o con idrogenodotti. Fra le due opzioni, entrambe praticabili con le tecnologie attuali, esistono grosse differenze di costo e quindi solo specifiche analisi tecnico-economiche per le singole appli-

cazioni possono determinare quale sia di volta in volta la soluzione migliore.

L'uso di tubazioni di grosse dimensioni è stato praticato per più di 50 anni. Tubazioni realizzate in acciaio standard (e quindi senza requisiti specifici) hanno trasportato idrogeno in Germania, nel distretto della Ruhr, dai produttori ai consumatori sin dal 1938, senza particolari problemi di sicurezza (le tubazioni erano provviste di sensori per possibili fughe ed erano previste periodiche ispezioni di sicurezza).

D'altra parte è utile ricordare come anche in Italia, per più di 70 anni, si è distribuito nelle città senza problemi particolari il cosiddetto "gas d'acqua", costituito da miscele di idrogeno (50%) e CO (50%), dove l'elemento di maggiore pericolosità era il CO, in quanto altamente tossico.

Attualmente anche città a densità di popolazione estremamente elevate, come Pechino, sono servite da reti di distribuzione di questo tipo di gas. L'esperienza accumulata nel settore della distribuzione gas può quindi essere utilizzata in maniera molto diretta per la realizzazione e l'esercizio di reti di distribuzione dell'idrogeno.

Idrogenodotti di dimensioni significative sono presenti in diverse nazioni: esiste una rete di circa 170 km nella Francia del Nord, per un totale nell'intera Europa di più di 1.500 km. Il Nord America possiede più di 700 km di condutture per il trasporto dell'idrogeno.

Le tubazioni utilizzate attualmente per il trasporto di idrogeno sono approssimativamente confrontabili con le piccole reti locali di distribuzione del gas naturale, con diametri di 25-30 cm e pressioni di 10-20 bar, anche se pressioni fino a 100 bar sono state sperimentate senza problemi particolari.

Una rete di distribuzione idrogeno di grandi dimensioni potrebbe essere quindi simile alle attuali reti per il gas naturale; le maggiori differenze potrebbero risiedere nei materiali utilizzati (alcuni acciai hanno migliore compatibilità con l'idrogeno) e nei criteri di progetto delle stazioni di pom-

paggio. In particolare, sebbene abbia una densità energetica volumetrica minore di quella del gas naturale, l'idrogeno è meno viscoso, per cui, con un'adatta progettazione, l'energia necessaria per il suo pompaggio diventa paragonabile a quella richiesta per la stessa quantità di energia trasportata con il gas naturale.

Ad elevate pressioni e temperature l'idrogeno può diffondere attraverso l'acciaio, provocando una alterazione della sua composizione (la cosiddetta "decarbizzazione") e delle proprietà tecnologiche. L'uso di acciai legati ad alto contenuto di cromo e molibdeno è pratica industrialmente corrente per la prevenzione di tali fenomeni.

Reti di distribuzione per idrogeno liquido, risultando particolarmente costose e di difficile gestione, sono state realizzate solo per applicazioni particolarmente specializzate, come il rifornimento di veicoli spaziali.

### Stazioni di rifornimento

Anche utilizzando tecnologie già disponibili industrialmente, sono possibili diverse opzioni per realizzare una stazione di rifornimento di veicoli ad idrogeno:

**Figura 2**  
Esempio d'incendio di autovettura



Fonte: M.R. Swain, Miami University, FL (US)

- produzione locale per via elettrolitica e stoccaggio in diverse forme (idruri, idrogeno gassoso);
- stoccaggio locale in forma gassosa e rifornimento tramite camion (analogamente ai combustibili tradizionali);
- stoccaggio locale in forma liquida e rifornimento tramite camion (analogamente ai combustibili tradizionali);
- produzione locale a partire da gas metano, purificazione del gas e stoccaggio in diverse forme (idruri, idrogeno gassoso);
- alimentazione tramite tubazioni e stazione di compressione locale (come il gas naturale per trazione).

Tranne l'ultima opzione, che necessita di una rete idrogeno di cui ancora non esistono esempi applicati alla trazione, le tecnologie da utilizzare sono già mature industrialmente ed i problemi maggiori risiedono più nelle condizioni normative e nella standardizzazione dei componenti. Infatti non esiste, né a livello nazionale né internazionale, una normativa specificamente accettata per la realizzazione di stazioni di rifornimento dell'idrogeno, mentre la poca familiarità con questo vettore porta normalmente ad applicare condizioni particolarmente restrittive per l'uso dello stesso. Anche per quanto riguarda la standardizzazione dei componenti (esempio connettori dei serbatoi dei veicoli) non esistono orientamenti consolidati, per cui le esperienze fanno caso a sé, dipendendo in larga misura dagli standard di produzione delle singole industrie coinvolte.

### Caratteristiche di sicurezza

Esistono ancora molte perplessità per agli aspetti di sicurezza collegati all'uso dell'idrogeno, in particolar modo a bordo di un veicolo, ma, al di là della "percezione di rischio", un'analisi attenta ridimensiona il concetto di pericolosità nell'uso dell'idrogeno. L'idrogeno è meno infiammabile della benzina. Infatti la sua temperatura di autoaccensione è di circa 550 °C, contro i 230-500 °C (a seconda dei tipi) della benzina.

L'idrogeno è il più leggero degli elementi (quindici volte meno dell'aria), e perciò si diluisce molto rapidamente in spazi aperti, e può passare in spazi estremamente ridotti. È praticamente impossibile far detonare l'idrogeno, se non in spazi confinati. Per individuare concentrazioni potenzialmente pericolose (>4% in aria) si utilizzano sensori che possono facilmente comandare adeguati sistemi di sicurezza. I veicoli prototipo della BMW, ad esempio, hanno vetri e tettuccio che, in caso di presenza di idrogeno, si aprono automaticamente.

Quando brucia, l'idrogeno si consuma molto rapidamente e sempre con fiamme dirette verso l'alto e caratterizzate da una radiazione termica a lunghezza d'onda molto bassa, quindi facilmente assorbibile dall'atmosfera. Per contro materiali come la benzina, il gasolio, il GPL od il gas naturale sono più pesanti dell'aria e, non disperdendosi, rimangono una fonte di pericolo per tempi molto più lunghi. È stato calcolato, facendo uso di dati sperimentali, che l'incendio di un veicolo a benzina si protrae per 20-30 minuti, mentre per un veicolo ad idrogeno non dura più di 1-2 minuti (figura 2). La bassa radiazione termica, propria delle fiamme da idrogeno, fa sì che esistano poche possibilità (al di là dell'esposizione diretta alla fiamma) che materiali vicini possano essere a loro volta incendiati, riducendo così, oltre alla durata dell'incendio,

anche il pericolo di emissioni tossiche. L'idrogeno non è tossico, né corrosivo. Per confronto, tutti i combustibili fossili sono asfissianti e tossici per l'essere umano. Eventuali perdite dai serbatoi, inoltre, non coinvolgono problemi di inquinamento del terreno o di falde idriche sotterranee.

Un confronto fra le esplosioni dell'idrogeno e di altri combustibili usati correntemente (vapori di benzina, gas naturale ecc.) è difficile da fare, se non considerando i casi specifici, ma in generale gli effetti dell'esplosione sono minori nel caso dell'idrogeno (a parità di energia in gioco) a causa della diversa propagazione delle onde di pressione.

## Le tecnologie per l'impiego dell'idrogeno nella trazione

### Le celle a combustibile

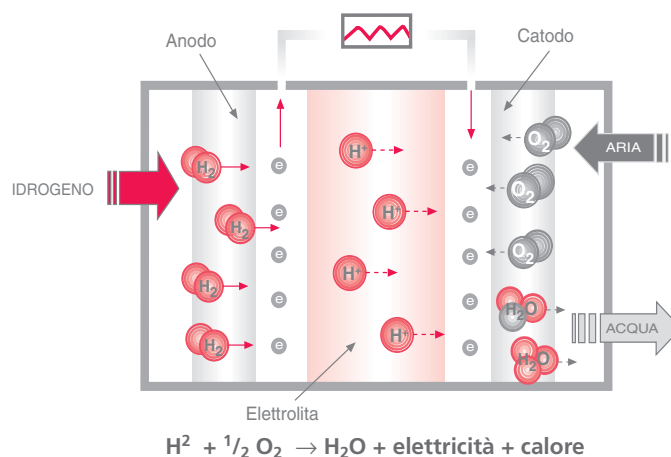
L'uso delle celle a combustibile (figura 3) per la trazione presenta numerosi vantaggi, ma comporta un grosso cambiamento rispetto alla filosofia attuale dei veicoli.

Un veicolo a celle a combustibile ha i vantaggi di un veicolo elettrico (elevata coppia motrice alle basse velocità, semplicità meccanica, silenziosità), assicurando, al contempo, un'autonomia paragonabile a quella dei veicoli convenzionali.

Il rendimento del veicolo (figura 4), inoltre, è più che doppio di quello con un motore a

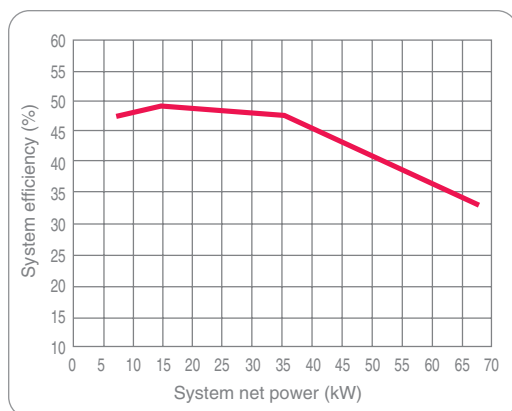
**Figura 3**  
Principio di funzionamento di una cella a combustibile

Una cella a combustibile funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico; a differenza di quest'ultima, tuttavia, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile ed ossidante. La cella è composta da due elettrodi in materiale poroso, separati da un elettrolita. Gli elettrodi fungono da siti catalitici per le reazioni di cella che consumano fondamentalmente idrogeno ed ossigeno, con produzione di acqua e passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno. L'elettrolita ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiudendo il circuito elettrico all'interno della cella. La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore, che è necessario estrarre per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella.



**Figura 4**

Prestazioni di un sistema celle a combustibile per vetture da 70 kW



Fonte: Ballard

combustione interna, in quanto, l'efficienza di una cella a combustibile, già di per sé più elevata, è caratterizzata da una ridotta escursione ai carichi parziali, mentre il motore convenzionale risulta essere molto penalizzato nel funzionamento a potenza ridotta. In media, un veicolo a celle ha una efficienza nell'uso che può superare il 40%, mentre l'equivalente motore tradizionale non supera il 20%.

L'impatto ambientale di un veicolo a celle a combustibile alimentato a idrogeno è praticamente nullo, con i gas di scarico che contengono solamente aria e vapor d'acqua. Le caratteristiche delle celle (modularità, rendimenti elevati anche per taglie medio-piccole e per carichi parziali) permettono inoltre la realizzazione di veicoli con taglie anche molto diverse (dalla bici alla vettura, all'autobus, alle motrici ferroviarie) con la stessa tecnologia e con caratteristiche di prestazioni, consumi ed impatto ambientale equivalenti.

Esistono molte tecnologie di celle a combustibile, con differenti caratteristiche di funzionamento (temperatura, densità di potenza, materiali, combustibili utilizzabili), che le rendono adatte per diverse applicazioni, e diverso grado di maturità.

Nel campo della trazione, dopo i primi prototipi realizzati con tecnologie diverse, il tipo di cella su cui si sono concentrati tutti i costruttori di veicoli è quello ad elettrolita polimerico (PEFC – Polymer Electrolyte Fuel Cell), che meglio soddisfa i requisiti specifici dell'uso sui veicoli stradali. Tale

tecnologia è infatti caratterizzata da bassa temperatura di funzionamento ( $\sim 70^\circ\text{C}$ ), ridotti tempi di avviamento, alta densità di potenza ( $>1,7\text{ kW/l}$ ,  $>1,1\text{ kW/kg}$ ). Anche il grado di maturità tecnologica sta crescendo, avendo le maggiori case automobilistiche già realizzato i primi prototipi marcianti, sia di autovetture che di autobus.

Naturalmente restano da sviluppare diversi aspetti della tecnologia, che si può considerare matura per la realizzazione di prototipi, ma non ancora per quanto riguarda la produzione "di serie".

Il fattore chiave su occorre soffermarsi per l'introduzione della tecnologia è rappresentato dalla riduzione dei costi. I requisiti di costo per un sistema con celle a combustibile fissati dai costruttori di veicoli sono dello stesso ordine di grandezza di quelli degli odierni motori (50-100 US\$/kW), ma tali cifre sono di due ordini di grandezza inferiori a quelli degli attuali prototipi di sistemi con celle a combustibile (5.000-10.000 US\$/kW). Data la semplicità costruttiva di una cella è facile ipotizzare che, in presenza di produzioni di massa, tali costi potranno essere drasticamente ridotti per quanto riguarda la manodopera e le lavorazioni meccaniche, ma attualmente il costo dei materiali (particolarmente catalizzatore, elettrodi e membrana) è ancora troppo alto per raggiungere gli obiettivi di costo prefissati. Nella tabella 7 è riportata l'incidenza del costo dei materiali e della manodopera, alla luce di due diverse ipotesi:

- previsioni con la tecnologia attuale, per una produzione annua di almeno 1.000 unità da 1 kW, non ottimizzate per la trazione (Roen Est – Italia);
  - previsione per una produzione di massa per grandi volumi, caratteristici della produzione di veicoli (Arthur D Little – USA).
- È da notare come i dati relativi alla Roen Est, partner ENEA nello sviluppo di prototipi di celle, si basano su offerte realmente ricevute dai fornitori di subcomponenti, mentre i dati americani sono delle vere e proprie proiezioni.

Materiale	Costo (%) (Roen Est)	Costo (%) (Arthur D Little)
Catalizzatore platino/carbonio 20% (autoprodotta)	34,1	52,9
Elettrodi	21,1	
Membrana (Dupont Nafion) e polimero liquido	15,4	31,1
Piatti bipolari	7,1	12,0
Guarnizioni, componentistica accessori	5,2	3,0
Manodopera	17,0	1,0
<b>Totale</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Volume di produzione annuo di riferimento</b>	<b>1.000 x 1 kW</b>	<b>500.000 x 50 kW</b>
<b>Costo totale (€/kW)</b>	<b>674</b>	<b>208</b>

**Tabella 7**

Incidenza dei materiali e della manodopera sul costo di uno stack

Le principali problematiche oggetto di attività di ricerca e sviluppo sono: lo sviluppo di catalizzatori, lo sviluppo di membrane, la riduzione della pressione di funzionamento.

### Sviluppo di catalizzatori

Il catalizzatore universalmente adottato è il platino, utilizzato in miscele con carbonio e con diverse tecniche di deposizione. La quantità di platino presente in una cella varia con la tecnologia adottata ed è compresa fra 2-8 g/kW. Oltre al costo industriale di tale elemento (attualmente dell'ordine di 17-18 US\$/g), nel caso di diffusione della tecnologia non sono da escludere problemi di approvvigionamento, quindi sono molte le attività di ricerca volte, da un lato, a sviluppare catalizzatori che contengano, a parità di prestazioni, minori quantità di platino, e dall'altro ad esplorare la possibilità di utilizzare altri materiali a costo più basso. Per la riduzione delle quantità di catalizzatore impiegate è interessante la prospettiva dell'utilizzo di nanostrutture di carbonio per la preparazione degli elettrodi.

### Sviluppo di membrane

Il materiale attualmente impiegato per la realizzazione dell'elettrolita è un polimero (generalmente il Nafion della Dupont) che ha la necessità di essere mantenuto costantemente umido per garantirne le caratteristiche di conducibilità. Ciò comporta la necessità di umidificare i gas di alimentazione, con conseguenti complicazioni derivanti dalla gestione dell'acqua nelle diverse condizioni di funzionamento. Attual-

mente sono in corso di svolgimento molti programmi di ricerca per lo sviluppo di polimeri che non richiedono la presenza di acqua, ma non sono ancora disponibili membrane per l'uso in cella.

### Riduzione della pressione di funzionamento

L'obiettivo è quello di realizzare sistemi quanto più possibile semplici e, in quest'ottica, uno degli aspetti più importanti è quello di limitare la pressione di funzionamento della cella, così da non richiedere compressori per l'aria di alimentazione che, oltre a rappresentare una possibile fonte di rumore, rendono il circuito più complicato.

### I motori a combustione interna

L'idrogeno, come gli altri combustibili gassosi, può essere utilizzato nei motori a combustione interna "tradizionali", seppure con alcune limitazioni, ed è considerato un combustibile molto buono per tali motori, permettendo un'efficienza in media del 20% maggiore degli equivalenti motori alimentati a benzina.

Il rendimento termico di un motore a combustione interna dipende dal suo rapporto di compressione e dalle caratteristiche fisiche del combustibile (rapporto dei calori specifici) e cresce al crescere di questi valori; nel caso di un motore alimentato ad idrogeno entrambe le grandezze sono maggiori rispetto alla benzina, grazie alla maggiore temperatura di autoaccensione, che permette rapporti di compressione più

**Tabella 8**  
Confronto tra iniezione diretta e indiretta

	Pro	Contro
Iniezione indiretta	Semplice Economica	Perdita di potenza Problemi di combustione
Iniezione diretta	Potenza specifica Basso consumo	Alta pressione (>100 bar) Sistema complesso per i requisiti del sistema di iniezione

elevati, ed alla capacità di bruciare in miscele molto magre. Tuttavia, pur se con un rendimento elevato, l'uso dell'idrogeno nei motori a combustione interna comporta una perdita di potenza del motore, se paragonato ad uno alimentato a benzina, a causa della minore energia della miscela contenuta nel volume del cilindro. Inoltre, la bassa densità volumetrica della miscela stechiometrica aria/idrogeno, rapportata a quella della miscela aria/benzina, non facilita un riempimento ottimale del cilindro. Il risultato di questi due aspetti porta, nel caso dell'idrogeno, a un contenuto energetico della miscela effettivamente introdotta nel cilindro che è circa 85% di quello che si avrebbe usando la benzina. Ne consegue che lo stesso motore, funzionando ad idrogeno, eroga circa il 15% in meno della potenza. Sono allo studio soluzioni tecniche che permettono di ridurre questa differenza, come sistemi avanzati di iniezione ad alta pressione o l'uso di idrogeno liquido che, premiscelato con aria, permette di aumentare di circa 1/3 la quantità di gas introdotto in camera di combustione.

L'idrogeno ha un ampio campo di infiammabilità in aria (5-75% vol.) e perciò possono essere più facilmente utilizzati eccessi d'aria notevoli, tali da minimizzare anche le emissioni di NO<sub>x</sub>. Le emissioni di NO<sub>x</sub> possono essere ulteriormente ridotte riducendo la temperatura di combustione, utilizzando tecniche come la miscelazione di

acqua, il ricircolo dei gas di scarico, o l'uso di idrogeno liquido. Tipicamente le emissioni di NO<sub>x</sub> di un motore ad idrogeno sono un ordine di grandezza minori di quelle degli equivalenti motori a benzina.

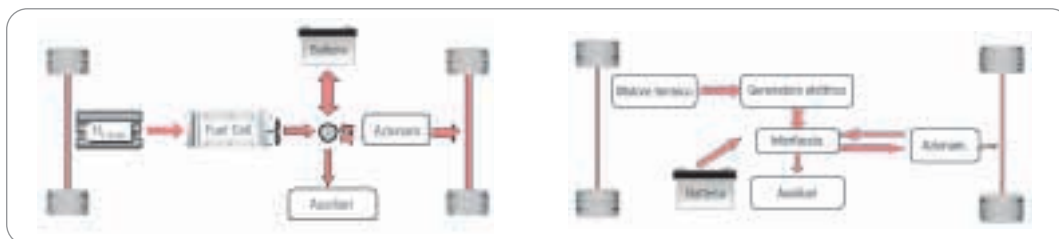
In ogni caso i maggiori costruttori di veicoli ritengono che la realizzazione di motori ad idrogeno con prestazioni simili (ed anche migliori) degli attuali motori a benzina sia tecnicamente fattibile con le tecnologie attuali, una volta che le condizioni al contorno (essenzialmente la presenza delle infrastrutture e l'emissione di normative ad hoc) siano tali da generare un sufficiente volume del mercato per questo tipo di veicoli. Il confronto fra le caratteristiche dell'idrogeno e gli altri combustibili mostra come i più ampi limiti di infiammabilità, la minore energia di ignizione e la quasi doppia velocità di fiamma debbano senza dubbio influenzare la concezione del motore e del suo controllo, fondamentalmente per evitare fenomeni di preaccensione e ritorni di fiamma.

È possibile adottare sia una iniezione di idrogeno direttamente all'interno della camera di combustione, che all'esterno, con vantaggi e svantaggi nei due casi, come indicato in tabella 8.

## I veicoli ad idrogeno

Il veicolo ad idrogeno, che presenta indubbi vantaggi dal punto di vista ambientale in tutte le sue configurazioni, può essere rea-

**Figura 5**  
Schemi di veicoli ibridi a celle a combustibile e con motore termico



lizzato sia mantenendo la configurazione "full power" sia utilizzando soluzioni di tipo "ibrido".

Da un punto di vista energetico, si possono infatti avere sistemi in cui la potenza è fornita esclusivamente dal motore (a combustione interna o a celle a combustibile) e sistemi ibridi (figura 5), in cui il motore copre essenzialmente il carico medio mentre i picchi di potenza necessari in caso di forti accelerazioni sono forniti da un pacco batterie, che consentono anche il recupero di energia di frenata. In questo caso la trazione è affidata ad un motore elettrico (tranne che in caso di ibridi particolari con motori a combustione interna dove la ripartizione della potenza è meccanica), che funge anche da generatore durante le frenate.

In un sistema ibrido il dimensionamento relativo tra il generatore primario ed il sistema di accumulo può variare entro limiti abbastanza ampi e dipende dal tipo di applicazione per cui si vuole ottimizzare il veicolo. Ai due estremi possibili ci sono il veicolo a batteria ed il veicolo "full power" (senza sistemi di accumulo).

L'ibridizzazione, tra l'altro usata anche nei motori a benzina e diesel, seppur complicando il sistema, offre vantaggi dal punto di vista dell'utilizzo ottimale del motore (particolarmente nel caso del motore a combustione interna che è caratterizzato da una notevole perdita di efficienza ai carichi parziali). Inoltre la presenza di un motore elettrico e di un sistema di accumulo consente il "recupero in frenata", opzione che, soprattutto in cicli caratterizzati da molte accelerazioni e frenate, come quelli urbani, può portare a notevoli risparmi di combustibile.

Un veicolo a idrogeno con motore a combustione interna ha una configurazione che si avvicina moltissimo al corrispondente veicolo con combustibili tradizionali, mentre un veicolo a celle a combustibile ha tutte le caratteristiche di un veicolo elettrico, in quanto il sistema di generazione produce corrente continua.

Le modifiche più cospicue ad un veicolo con motore endotermico riguardano solitamente il sistema di stoccaggio a bordo dell'idrogeno, per cui si adottano differenti soluzioni, mentre le motorizzazioni, con le opportune modifiche ed ottimizzazioni, rimangono essenzialmente le stesse. Sui veicoli con celle a combustibile, invece, si troveranno anche sistemi di regolazione e conversione della corrente (DC/DC converter o/e inverter), motori elettrici e tutti i sistemi di regolazione e controllo della trazione propri dei veicoli a batteria.

I veicoli attualmente realizzati utilizzando entrambe le tecnologie hanno prestazioni paragonabili a quelle dei veicoli tradizionali, ed un'autonomia che dipende ancora una volta dalla tecnologia utilizzata per lo stoccaggio dell'idrogeno. La maggior efficienza delle celle a combustibile (circa il doppio su cicli urbani) semplifica un poco questo problema, ma attualmente autonomie maggiori di 250 km si ottengono solo con serbatoi di idrogeno liquido, poco proponibili per una diffusione di massa. La guidabilità è quella dei veicoli elettrici, che ben si presta soprattutto a cicli urbani caratterizzati da accelerazioni a bassa velocità.

## I programmi di ricerca e sviluppo

### I programmi internazionali

#### **Veicoli con celle a combustibile**

##### *Programmi a finanziamento pubblico*

Negli Stati Uniti, il Department of Energy (DoE) ha finanziato per diversi anni lo sviluppo di sistemi di propulsione con celle a combustibile all'interno del Fuel Cells for Transportation Program. Le attività inizialmente erano dirette allo sviluppo di stack, di sistemi di trattamento del combustibile, nonché di ausiliari del sistema (compressori, sistema di alimentazione, controlli ecc.). Di recente, come conseguenza della crescita d'interesse per l'idrogeno e in risposta alle raccomandazioni del nuovo Piano energetico nazionale, è stato varato

## Obiettivi Programma FreedomCAR

**Sviluppo di sistemi di propulsione con celle a combustibile**, con l'obiettivo di ottenere:

- A. Sistemi di propulsione in grado di assicurare almeno 55 kW per 18 secondi e 30 kW in continuo, durata almeno 15 anni; costo del sistema 12 \$/kW.
- B. Sistemi con celle a combustibile (incluso sistema di stoccaggio idrogeno) con efficienza del 60%, potenza specifica di 325 W/kg e densità di potenza di 220 W/L; costo 45 \$/kW al 2010 e 30 \$/kW al 2015.

**Sviluppo di veicoli ad alta efficienza**, che operano con carburanti idrocarburici "puliti" alimentati con motori a combustione interna o con celle a combustibile, con l'obiettivo di ottenere:

- C. Sistemi con motori a combustione interna con efficienze del 45%, in grado di rispettare i limiti standard fissati per le emissioni.
- D. Sistemi con celle a combustibile (incluso unità di reforming) con efficienze del 45% in grado di rispettare i limiti standard fissati per le emissioni; costo 45 \$/kW al 2010 e 30 \$/kW nel 2015.

**Sviluppo di veicoli elettrici ibridi**, con l'obiettivo di ottenere:

- E. Sistemi di accumulo, durata 15 anni a 300 Wh con potenza di scarica di 25 kW per 18 secondi; costo 20 \$/kW.

un nuovo programma, l'Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructures Technologies Program<sup>6</sup>, in cui le attività sulle celle a combustibile e sull'idrogeno risultano fortemente integrate. Nel 2002, all'interno del programma, che vede la partecipazione delle maggiori industrie, organismi di ricerca ed università statunitensi, sono stati assegnati finanziamenti per un totale di 41,9 milioni di dollari.

Ricordiamo che a gennaio 2002, DoE e United States Council for Automotive Research, che rappresenta le tre maggiori case automobilistiche statunitensi (Daimler-Chrysler, Ford e General Motors) avevano lanciato il programma FreedomCAR (Cooperative Automotive Research)<sup>7</sup>, una collaborazione tra pubblico e privato per promuovere lo sviluppo di celle a combustibile ed idrogeno per autoveicoli (vedi riquadro "Obiettivi Programma FreedomCAR"). Il programma va a sostituire il PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicle), che aveva come obiettivo la realizzazione di veicoli a basso consumo (circa 125 km con poco meno di 4 litri di carburante), entro il 2004.

Per il FreedomCAR sono stati stanziati per il 2003 circa 150 milioni di dollari, la metà dei quali andranno ad attività di R&S su celle a combustibile e idrogeno; la parte

restante è assegnata ad attività di sviluppo di tecnologie a basso impatto ambientale ed in grado di ridurre i consumi di energia (motori a combustione interna di tipo avanzato o motori ibridi gas/elettrico). Per le diverse tecnologie sono stati fissati gli obiettivi da raggiungere al 2010.

Lo sviluppo di veicoli con celle a combustibile e la loro introduzione nel mercato richiede una stretta collaborazione tra industrie ed enti pubblici; in questa direzione si muove la California Fuel Cells Partnership (CaFCP)<sup>8</sup>. Fondata nel 1999 da California Air Resources Board, California Energy Commission, South Coast Air Quality Management District, DaimlerChrysler, Ford, Ballard Power Systems, ARCO, Texaco e Shell, ne fanno parte oggi 29 membri tra costruttori automobilistici, produttori di celle a combustibile, compagnie petrolifere e di trasporto, fornitori di idrogeno ed enti governativi.

Obiettivo del gruppo è quello di provare la tecnologia delle celle a combustibile in "condizioni reali": saranno quindi realizzati e posti su strada oltre 60 veicoli (tra autovetture ed autobus) entro il 2003, al fine di dimostrare la fattibilità di un'integrazione di combustibili, come idrogeno o metanolo, nelle attuali infrastrutture di distribuzione, di definire i passi necessari ad avviare la



commercializzazione e di creare condizioni per conquistare consenso da parte dell'opinione pubblica.

In Giappone, il METI (Ministry of Economy, Trade and Industry), attraverso il NEDO (New Energy and Industrial Development Organization), ha avviato nel 1993 il WE-NET (World Energy Network)<sup>9</sup>, un programma trentennale da 2 miliardi di dollari, per la promozione di un sistema energetico basato sull'idrogeno, prodotto principalmente da fonti rinnovabili. Tra i progetti attuati all'interno del WE-NET, vi sono quelli relativi allo sviluppo di veicoli con celle a combustibile e di tecnologie correlate alla produzione e distribuzione dell'idrogeno che dovrà alimentarli.

Lo sviluppo di veicoli a idrogeno riceve pieno appoggio da parte del governo giapponese. Diretto dal METI, è operativo il Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project all'interno del quale cinque case automobilistiche (DaimlerChrysler, General Motors, Toyota, Honda e Nissan) effettueranno test su strada dei loro prototipi per acquisire informazioni utili a migliorare la tecnologia ed a promuoverne la penetrazione nel mercato<sup>10</sup>. Il governo giapponese prevede la creazione di un mercato pari a 50.000 unità entro il 2010 e spera si arrivi a 5 milioni entro il 2020<sup>11</sup>.

In Europa, agli inizi degli anni 90, sono stati avviati diversi progetti dimostrativi che hanno riguardato l'utilizzo dell'idrogeno nel settore della trazione. A parte l'Italia, la cui posizione sarà illustrata nel seguito, iniziative di un certo rilievo sono in corso in Germania<sup>12</sup> ed Islanda<sup>13</sup> ed ultimamente è stato annunciato un forte interesse anche da parte della Francia.

Il settore dei trasporti è riconosciuto dall'Unione Europea come uno dei settori chiave sui quali agire per realizzare uno sviluppo sostenibile. Occorre ricordare che il libro verde della Commissione Europea, "Verso una strategia europea di sicurezza dell'approvvigionamento energetico",<sup>14</sup> stabilisce come obiettivo la sostituzi-

zione del 20% del petrolio con combustibili alternativi nel settore dei trasporti stradali entro il 2020, nel duplice intento di migliorare la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e ridurre le emissioni di gas serra.

Nelle sue strategie d'intervento la Commissione Europea assegna notevole priorità a vettori e tecnologie pulite come idrogeno e celle a combustibile. Nell'ottobre 2002 è stato costituito un gruppo di esperti composto da rappresentanti di grandi industrie europee del settore automobilistico ed energetico, dei servizi pubblici, di istituti di ricerca, con il compito di definire le strategie e le priorità a livello europeo per promuovere la diffusione e l'utilizzo dell'idrogeno e delle celle a combustibile.

Entro la primavera il gruppo dovrebbe presentare un documento che esporrà una serie di idee in merito alle azioni necessarie ad avviare un'economia energetica sostenibile basata sull'idrogeno e ad assicurare competitività alle industrie europee che operano nel campo delle celle a combustibile. Alla relazione dovrebbe seguire un piano d'azione dettagliato e quindi un programma per la ricerca strategica nel settore.

Il Quinto Programma Quadro di ricerca (1999-2002) ha speso 120 milioni di euro per la ricerca sull'idrogeno e le celle a combustibile. Nel Sesto Programma Quadro (2003-2006), la ricerca nel settore dell'energia e dei trasporti farà parte della priorità tematica "Sviluppo sostenibile, cambiamento globale ed ecosistemi", per la quale è stato stanziato un budget complessivo di 2.120 milioni di euro<sup>15</sup>. È previsto che gli stanziamenti per la ricerca sulle celle a combustibile, e in particolare sulle loro applicazioni, e sulle tecnologie dell'idrogeno, aumentino notevolmente rispetto al programma precedente.

I progetti finanziati finora all'interno dei programmi comunitari hanno riguardato sia lo sviluppo della tecnologia di cella, sia la sua integrazione a bordo del veicolo;

Organizzazione	Veicolo	Anno	Combustibile
DaimlerChrysler	NECAR 4A	2000	Idrogeno compresso
	NECAR 5 e 5.2	2000	
		2001	Metanolo
	Jeep Commander 2*	2000	Metanolo
	Sprinter (van)	2001	Idrogeno compresso
	Natrium F-Cell	2001 2002	Idrogeno/Sodio boroidruro Idrogeno compresso
Ford Motor Co.	Focus FC5	2000	Metanolo
	Th!nk FC5	2000	Idrogeno compresso
	FCHV*	2002	Idrogeno compresso
General Motors Opel	HydroGen1	2000	Idrogeno liquido
	HydroGen3	2001	Idrogeno liquido
	Pick up Chevrolet	2001	Benzina
	HydroGen3	2002	Idrogeno compresso
	Hy-wire (concept car)	2002	Idrogeno compresso
Honda Motor Co.	FC-V3 *	2000	Idrogeno compresso
	FC-V4	2001	Idrogeno compresso
	FCX	2002	Idrogeno compresso
Madza Motor Co.	Premacy FC-EV *	2000	Metanolo
Nissan Motor Corp.	X-terra *	2000	Idrogeno compresso
	X-TRAIL FCV	2002	Idrogeno compresso
Toyota	FCHV-3 *	2001	Idrogeno in idruri
	FCHV-4 *	2001	Idrogeno compresso
	FCHV-5 *	2001	Idrogeno
	FCHV	2002	Idrogeno compresso
Hyundai	Santa Fe FCEV	2000	Idrogeno compresso
Daihatsu	Move FCV-K_II	2001	Idrogeno compresso
Volkswagen	Bora HyMotion	2000	Idrogeno liquido
	Bora HyPower	2002	Idrogeno
PSA/Peugeot	Fuel Cell Cab	2001	Idrogeno compresso
	HYDRO-GEN	2001	Idrogeno compresso
	H <sub>2</sub> O Firefighter (concept car)	2002	Idrogeno/Sodio boroidruro
FIAT	600 Elettra	2000	Idrogeno compresso

**Tabella 9**

Veicoli a celle a combustibile realizzati nel periodo 2000-2002

sono stati realizzate concept-car e prototipi di autobus. Con finanziamenti europei sono in corso programmi che prevedono l'esercizio sperimentale di alcuni autobus a idrogeno in diverse città europee (Progetto "Fuel Cell Bus for Berlin, Copenhagen and Lisbon"<sup>16</sup>; Progetto CUTE, "Clean Urban Transport for Europe"<sup>17</sup>).

#### *Programmi dei costruttori automobilistici*

Tutte le maggiori case automobilistiche sono impegnate nello sviluppo di prototipi di veicoli con celle a combustibile (tabella 9), stimolate dal fatto che questa tecnologia in futuro sarà certamente favorita dalle sempre più stringenti normative emesse in favore dell'ambiente<sup>18</sup>. Le diverse aziende stanno impegnando notevoli risorse nella

realizzazione di prototipi dimostrativi, basti pensare che la sola DaimlerChrysler ha investito negli ultimi anni oltre un miliardo di dollari. Data l'entità degli investimenti ed i tempi lunghi necessari per un ritorno degli stessi, la strategia dei grandi costruttori è comunque quella di coalizzarsi per ripartire i costi di ricerca e sviluppo. Nel corso del 2002 sono stati fatti notevoli progressi nel settore, particolarmente significativi sono i risultati conseguiti dalla General Motors<sup>19</sup>, con il progetto AUTONOMY e il prototipo Hy-wire (Hydrogen by-wire), presentato al Salone dell'Automobile di Parigi nel settembre 2002. General Motors, anziché adattare il sistema a celle a combustibile alla struttura di un'autovettura tradizionale, ha deciso di mettere a punto un veicolo dal design completamente innovativo.

Come possiamo notare dalla figura 6, le celle a combustibile, le bombole di idrogeno e i sistemi di controllo dell'auto sono compressi all'interno di un sottile pianale (meno di 28 cm di spessore) simile ad uno skate-board, che lascia completa libertà nella configurazione del veicolo.

La cella installata sull'auto ha una densità di potenza di circa 1,60 kW/l (0,94 kW/kg) e produce 94 kW continui, con picchi fino a 129 kW. L'idrogeno che alimenta le celle è contenuto in serbatoi montati al centro del pianale. I tre serbatoi cilindrici per l'idrogeno compresso, costruiti con un composto di poliuretano ad alta densità e di fibra di carbonio, hanno un peso totale di 75 kg e contengono complessivamente 2,0 kg di idrogeno gassoso a 350 bar. Passo successivo nello sviluppo sarà aumentare la pressione dagli attuali 350 bar a 700 bar. La General Motors e la QUANTUM Fuel Systems Technologies Worldwide hanno già ricevuto l'omologazione da parte del TÜV, l'ente di controllo tecnico tedesco, per serbatoi a 700 bar. L'omologazione e certificazione del sistema è avvenuta sulla base dei requisiti EIHP (European Integrated Hydrogen Project) e soddisfa anche lo

standard americano "NGV2" e le direttive nazionali tedesche per i serbatoi in pressione.

*Hy-wire*, come suggerisce il nome, utilizza la tecnologia *drive-by-wire*, usa cioè comandi elettronici, vengono eliminati quindi tutti i sistemi meccanici presenti in una vettura convenzionale, inclusi il motore, la colonna dello sterzo, i pedali per freni, frizione ed acceleratore. La gestione dell'auto è affidata a una sorta di cloche, che permette di sterzare, accelerare, frenare e può essere spostata facilmente a sinistra o a destra. La General Motors dichiara che, grazie al numero estremamente ridotto di componenti, il nuovo veicolo a celle a combustibile alimentato a idrogeno risulterà alla fine più economico e affidabile di quelli dotati di motore a combustione interna.

L'auto è frutto di un progetto congiunto: la General Motors ha sviluppato negli USA telaio e carrozzeria, così come l'integrazione dei componenti meccanici ed elettrici; nel centro ricerche Opel di Magonza-Kastel, in Germania, è stato realizzato il sistema di propulsione a celle a combustibile; la carrozzeria è stata realizzata dalla Bertone di Torino, mentre la svedese Skf Group ha curato la tecnologia *by-wire* nei suoi laboratori in Olanda ed in Italia.

Altro evento importante, Toyota ed Honda<sup>20</sup> nel dicembre 2002, anticipatamente rispetto alle previsioni, hanno consegnato ai primi clienti (enti di governo ed istituzioni giapponesi) i loro modelli FCHV e FCX, auto a idrogeno con un'autonomia di 350 km e velocità fino a 150 km/ora. Le vetture sono offerte in leasing rispettivamente a 9.500 euro (Toyota) e 6.500 euro (Honda) al mese, con contratti della durata di 30 mesi. La Honda ha in programma di distribuire 30 auto fra California e Giappone nei prossimi due o tre anni. La Toyota si muove nella stessa direzione e conta di portare in circolazione 20 vetture ibride dotate di celle a combustibile entro la fine dell'anno. Queste saranno riservate ad istituti di ricerca, amministrazioni pubbliche e aziende energe-



Fonte: GM

**Figura 6**  
Il telaio di Autonomy ed il prototipo Hy-wire

tiche e non ancora al grande pubblico.

In Europa, DaimlerChrysler ha presentato, a otto anni dall'avvio del progetto NECAR, i primi veicoli a celle combustibile che verranno prodotti come vetture di serie, seppure in numero ridotto di esemplari, e che entro l'anno circoleranno in Europa, Stati Uniti, Giappone e Singapore.

L'iniziativa interesserà 60 Mercedes Classe A "F-Cell"<sup>21</sup> e 30 bus urbani Citaro (figura 7), che saranno affidati alle aziende di trasporto di dieci città europee (Amsterdam, Amburgo, Barcellona, Londra, Lussemburgo, Madrid, Porto, Stoccolma, Stoccarda e Reykjavik)<sup>17,22</sup>.

Esperti del settore sostengono che occorrerà almeno un decennio per la diffusione commerciale di veicoli a celle a combustibile; la disponibilità di piccole flotte di vetture prima del previsto costituisce in ogni caso un promettente avvio.

A parte General Motors e Toyota, che sviluppano in proprio celle a combustibile, le altre case automobilistiche hanno accordi di fornitura con i diversi produttori di stack; la tecnologia maggiormente utilizzata è quella della Ballard Power Systems (Vancouver, Canada), leader mondiale nella produzione di celle ad elettrolita polimerico.

Fonte: DaimlerChrysler

**Figura 7**  
Autobus Citaro



*Le prospettive di sviluppo*

Le prospettive di mercato per i veicoli a celle a combustibile sono tali da giustificare l'entità delle risorse impegnate nel settore (circa 1 milione di euro all'anno). Analisi condotte in questo campo fanno prevedere che, anche in presenza di una penetrazione molto graduale a partire dal 2005, potrebbero raggiungersi buoni livelli di produzione nell'arco di pochi anni, considerata l'ampiezza del mercato automobilistico.

Uno studio di mercato presentato nel 2000 dalla Texaco Energy Systems prevede che dopo il 2024, nel caso di risoluzione di tutti i problemi connessi alle celle a combustibile ed alle infrastrutture, la metà delle auto vendute potrebbe essere alimentata con celle a combustibile<sup>23</sup>.

Stime del Department of Energy, eseguite nello stesso periodo, indicano che i veicoli con celle a combustibile costituiranno l'1,3% del mercato nel 2010 e l'8,24% nel 2020; valore quest'ultimo in linea con le previsioni Texaco che per il 2020 riporta una cifra pari all'8,6%.

Un recente studio dell'ABI (Allied Business Intelligence) stima che dal 2012 potrebbero entrare in circolazione 800.000 veicoli con celle a combustibile<sup>24</sup>. La Opel ha annunciato che per il 2010 il 10% della sua produzione potrebbe essere costituito da auto a celle a combustibile, mentre Ford sostiene che entro la fine del decennio la sua produzione sarà di 50.000 unità all'anno.

Per arrivare alla commercializzazione è necessario risolvere ancora importanti questioni: occorre creare una rete in grado di produrre e distribuire capillarmente l'idrogeno e tecnologie idonee a stoccarlo in modo affidabile e sicuro a bordo del veicolo, e non ultimo arrivare ad ottenere costi compatibili con il mercato dei trasporti. Si ritiene, quindi, che l'idrogeno sia proponibile nel breve-medio termine principalmente per flotte di veicoli e che possa divenire il combustibile ideale per tutte le tipologie di veicoli solo nel lungo termine.

Per questo motivo per la fase di transizione

l'industria automobilistica sta valutando anche la possibilità di generare l'idrogeno direttamente a bordo del veicolo, a partire da metanolo o benzina.

In attesa di una massiccia penetrazione dell'idrogeno sulle auto private, la scelta di puntare inizialmente su mezzi di trasporto pubblici appare strategica, non solo perché mezzi di questo tipo hanno minori problemi per quanto riguarda lo stoccaggio a bordo, ma soprattutto perché le aziende pubbliche sarebbero in grado di dotarsi di proprie stazioni di produzione e rifornimento di idrogeno, superando così uno dei maggiori ostacoli all'introduzione del veicolo ad idrogeno. Risulterebbe inoltre più facile l'erogazione di finanziamenti ed incentivi da parte di governi nazionali o locali per acquisto di veicoli; questo concorrerebbe ad avviare la produzione di serie e quindi sfruttando le economie di scala si potrebbero più facilmente raggiungere costi accettabili per il mercato.

**Veicoli a idrogeno con motore a combustione interna**

L'uso dell'idrogeno in motori termici tradizionali è stato finora oggetto di ricerca soprattutto da parte di alcuni costruttori automobilistici e non risultavano programmi svolti a livello nazionale che supportassero questa tecnologia, anche se in Germania alcuni progetti ricevono finanziamenti da parte delle amministrazioni di alcuni Länder (Baviera, Amburgo, Berlino). Attività per lo sviluppo di motori a combustione interna a idrogeno di tipo avanzato risultano anche inserite nel Programma Freedom-CAR<sup>8</sup>. Attività di minor rilievo sono in corso presso vari istituti di ricerca, comunque l'impegno su questa tecnologia rimane contenuto e più frammentario rispetto a quello rivolto allo sviluppo di sistemi con celle a combustibile.

La tecnologia ha raggiunto un buon grado di sviluppo nei progetti della BMW<sup>25</sup> che, nel 2000, ha presentato la 750 hl, che può considerarsi la prima vettura a idrogeno

realizzata in serie, in quanto prodotta in qualche decina di unità. Il motore 12 cilindri da 5,4 litri, alimentato a idrogeno, sviluppa una potenza di 150 kW, può accelerare da 0 a 100 km/h in 9,6 secondi; la velocità massima è di 226 km/h. Il serbatoio da 140 litri garantisce un'autonomia di circa 350 km. Il tutto è integrato da un sistema a benzina convenzionale, mantenuto per compensare le scarse infrastrutture per la distribuzione dell'idrogeno.

Per dimostrare la validità della sua tecnologia e la sostenibilità di utilizzo dell'idrogeno, una flotta di 15 di queste auto nel corso del 2001 ha effettuato un tour dimostrativo, il "CleanEnergy World Tour", che ha toccato le città di Dubai, Bruxelles, Milano, Los Angeles, fino a Berlino. La flotta ha percorso oltre 170.000 chilometri. A Monaco di Baviera, la BMW utilizza ora queste auto per il servizio di navetta dall'aeroporto alla propria sede.

Dopo la 750 h, il Gruppo BMW ha presentato la nuova 745 h con motore otto cilindri benzina/idrogeno (figura 8) e un prototipo, la Mini Cooper H, studiato per funzionare esclusivamente a idrogeno.

BMW intende immettere queste auto sul mercato entro tre anni, con distributori per l'idrogeno presso i suoi concessionari; per avere una rete di distribuzione adeguata ritiene che occorreranno almeno 15 anni (per quella data stima una produzione di serie di auto alimentate a idrogeno pari al 5%).

Restando in Germania, occorre ricordare il progetto della tedesca MAN<sup>26,27</sup>, che dal 1997 ha in corso la realizzazione di alcuni autobus a idrogeno destinati all'aeroporto di Monaco ed il progetto WEIT (Wasserstoff-Energie Integration Transport). All'interno del progetto WEI, un gruppo di società private, con sede ad Amburgo, sta utilizzando per il servizio di consegna alcuni furgoni Sprinter Mercedes dotati di motore a combustione interna a idrogeno. Obiettivo è quello di ottenere consenso da parte dell'opinione pubblica, dimostrando che i mezzi ad idrogeno funzionano in



Fonte: BMW

Figura 8  
BMW 745 h

modo affidabile e sicuro in ambito urbano.

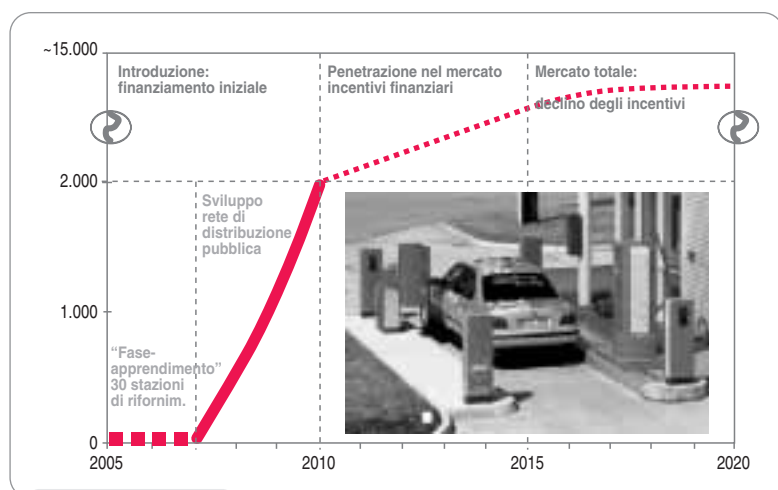
La Ford a metà del 1999 ha avviato ricerche su motori a combustione interna alimentati a idrogeno e due anni più tardi ha presentato la P2000 H<sub>2</sub>ICE, una concept-car che monta un motore Zetec da 2 litri modificato. L'idrogeno, immagazzinato in un serbatoio da 87 litri (a 248 bar), assicura un'autonomia di 100 km; è prevista una modifica del sistema di stoccaggio per raggiungere i 240 km di percorrenza.

In Giappone, il Musashi Institute of Technology<sup>28</sup> ha lavorato in passato allo sviluppo di veicoli alimentati ad idrogeno ed ha realizzato una serie di auto con motore a combustione interna alimentato a idrogeno liquido. Sempre in Giappone, la Mazda ha svolto ricerche in questo campo tra il 1986 e il 1997, anno in cui la società è passata all'alimentazione a celle a combustibile.

### Infrastrutture

Esistono già alcune stazioni in grado di rifornire idrogeno, aperte principalmente per motivi di ricerca; altre sono state o saranno costruite presso le aziende di trasporto impegnate nelle diverse attività dimostrative in corso.

Nel 1999 è stata aperta in Germania, presso l'aeroporto di Monaco di Baviera, nel quadro delle attività del Progetto H<sub>2</sub>MUC<sup>29</sup>, una stazione di servizio pubblica che distribuisce sia idrogeno liquido, che gassoso. L'impianto è frutto di una collaborazione



**Figura 9**  
Ipotesi TES per la creazione di stazioni di rifornimento ad idrogeno compresso

Fonte: BMW

tra BMW, Linde ed Aral ed è in grado di fornire idrogeno liquido in modo totalmente automatizzato.

Solo per citare altri esempi, la Honda nel 2000 ha aperto una stazione a Torrance, in California, dove viene prodotto idrogeno per elettrolisi dell'acqua usando energia elettrica da fonti rinnovabili (energia solare) e, nello stesso Stato, la Sunlite Transit ha reso operativa a Thousand Palms una stazione che offre idrogeno insieme con altri carburanti. In Giappone, nell'ambito del progetto WE-NET, nel febbraio 2002 sono state aperte due stazioni di rifornimento situate rispettivamente ad Osaka e presso l'istituto di ricerca Shikoku di Takamatsu; nell'area Tokyo/Yokohama saranno costruite, con fondi governativi, sei stazioni di servizio entro il 2003, che riforniranno i veicoli che Honda e Toyota stanno consegnando ai primi clienti.

In Europa, significativa è l'iniziativa promossa dal governo tedesco, che nel maggio 1998 ha lanciato il Progetto "Transport Energy Strategy (TES)", in collaborazione con Aral, BMW, DaimlerChrysler, MAN, RWE, Shell e Volkswagen<sup>30</sup>. La finalità del gruppo è quella di definire una strategia per una mobilità sostenibile da attuarsi ricorrendo a combustibili e sistemi di propulsione alternativi. I diversi partner si sono accordati sull'uso dell'idrogeno, sia in

forma liquida, sia gassosa. Il progetto dovrebbe portare alla creazione di una rete di distribuzione di idrogeno in Germania; è prevista la realizzazione di 30 stazioni di rifornimento entro il 2007 e si ipotizzano 2.000 stazioni entro il 2010 (figura 9).

A Berlino, nel 2003, diventerà operativa la Berlin Clean Energy Partnership<sup>31</sup>, all'interno della quale Daimler-Chrysler, BMW, Ford, Opel avranno la possibilità di sperimentare i loro veicoli nell'uso quotidiano. Il progetto, avviato in collaborazione con il governo federale tedesco, prevede la dimostrazione di una flotta di circa 30 veicoli (alimentati sia a celle a combustibile sia con motore a combustione interna) e la realizzazione da parte della società petrolifera Aral di un'area di servizio per la produzione, lo stoccaggio e la distribuzione dell'idrogeno che provvederà al loro rifornimento. Nella stessa città, nell'ottobre 2002, è stata aperta una stazione di rifornimento presso l'azienda di trasporti Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG), realizzata nell'ambito del Progetto "Fuel Cell Bus for Berlin, Copenhagen and Lisbon" cofinanziato dalla Unione Europea<sup>16</sup>. Alla stazione è possibile rifornire i veicoli sia con idrogeno liquido, sia compresso. Quest'ultimo viene generato in situ per via elettrolitica e quindi stoccato a 250 bar.

### Stato delle tecnologie e prospettive di sviluppo in Italia

L'interesse per i veicoli a idrogeno, e più in generale per lo sviluppo dell'idrogeno come vettore energetico, sta crescendo anche in Italia, in connessione con i sempre più gravi problemi di inquinamento ambientale delle aree urbane e con la necessità di ridurre le emissioni di gas serra. Tale interesse è testimoniato, da un lato, dalla disponibilità di maggiori finanziamenti pubblici per attività di ricerca, sviluppo e dimostrazione in questo campo (ad esempio i circa 90 milioni di euro che si prevede verranno resi disponibili per i prossimi tre anni dal Programma Nazionale Ricerca per

i progetti su idrogeno e celle a combustibile), dall'altro dall'attenzione dei mezzi di informazione e dalle numerose iniziative dei potenziali utenti (Regione Lombardia, vari Comuni ed aziende di trasporto).

Perché l'interesse e le risorse disponibili rappresentino un'opportunità di sviluppo per il Paese occorre operare, da un lato, nel miglioramento delle tecnologie e dei prodotti necessari, dall'altro nella creazione delle condizioni al contorno (infrastrutture, normative, sicurezza, accettabilità da parte degli utenti) in modo da superare gradualmente le barriere alla diffusione dei veicoli a idrogeno. Ciò deve realizzarsi nell'ambito di un intervento più generale per lo sviluppo dell'idrogeno come vettore energetico nel medio-lungo termine.

È opportuno rimarcare che la situazione nazionale, descritta brevemente nel seguito, ha visto le attività in questo campo assumere solo negli ultimi anni un rilievo significativo, anche se con un certo ritardo e con un impegno sensibilmente minore rispetto a quanto in atto a livello internazionale.

### **Sistemi di accumulo**

I veicoli sperimentali finora realizzati hanno tutti utilizzato idrogeno compresso in bombole commerciali. Limitate attività di ricerca sono state condotte in passato sui materiali (idruri) e sulle problematiche connesse con l'omologazione di bombole di tipo avanzato.

Un progetto biennale per lo sviluppo di sistemi di accumulo di idrogeno in leghe metalliche è stato finanziato nell'ambito del FISR (Fondo Integrativo Speciale per la Ricerca) ed è in fase di avvio, con il coordinamento dell'ENEA e la partecipazione di CNR-ITAE, INFN e SAES Getters; sono previste attività di ricerca e sviluppo tecnologico di materiali, sottosistemi e sistemi, fino alla validazione sperimentale, e in modo comparato, della tecnologia.

### **Veicoli con motore a combustione interna**

In questo settore sono state condotte in

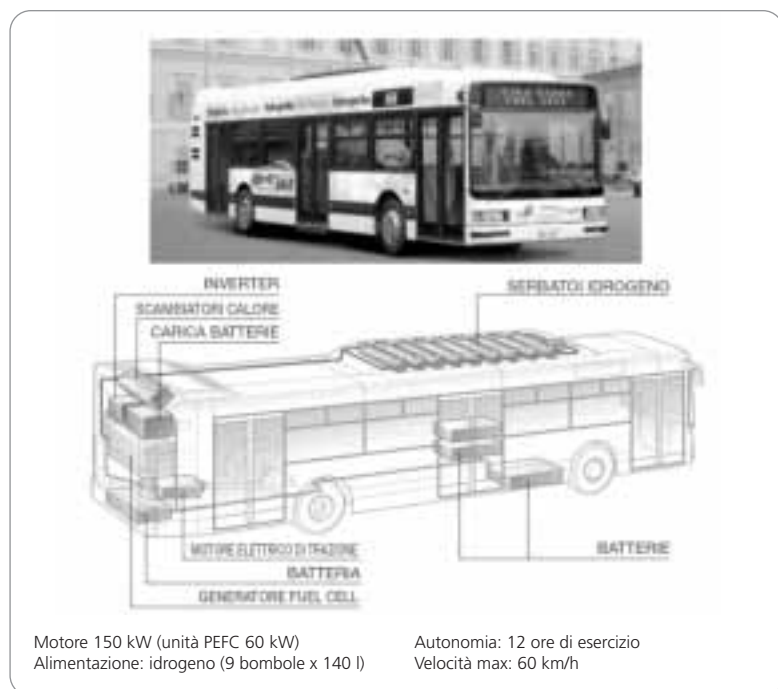
passato alcune attività di ricerca e sviluppo da parte dell'ENEA che, in collaborazione con VM Motori e l'Università di Pisa, ha modificato, nei primi anni 90, un veicolo FIAT Ducato, sviluppando iniettori ad hoc per l'alimentazione con idrogeno compresso, contenuto in bombole metalliche collocate in compartimenti isolati. Per evitare i problemi tipici posti dall'idrogeno nei motori è stata adottata la tecnica dell'iniezione (esterna al cilindro) in fase con l'aspirazione e ritardata rispetto all'ingresso dell'aria. In questo modo è stato ottenuto, a potenza massima, un rendimento del 27%, con emissioni di NO<sub>x</sub> ridotte a 40 ppm (valori confrontabili con quelli ottenuti negli stessi anni dalla Mercedes).

I costruttori automobilistici nazionali non hanno finora dedicato particolare attenzione allo sviluppo di veicoli a idrogeno con motori a combustione interna, in assenza di una prospettiva a breve-medio termine per la disponibilità di questo combustibile. Uno sforzo significativo è stato invece fatto per lo sviluppo di veicoli a metano (sia autobus sia vetture), e della rete di distribuzione relativa, acquisendo in questo settore un vantaggio competitivo rispetto ad altri paesi. Tale vantaggio potrebbe avere importanti ricadute, sia a livello di tecnologie veicolari (motori, sistemi di accumulo) sia di infrastrutture, sui veicoli a idrogeno, in configurazione sia con motori a combustione interna, per la cui realizzazione non si prevedono ostacoli tecnici di rilievo, sia più in prospettiva con celle a combustibile.

Il crescente interesse per i veicoli a idrogeno sta in questa fase promovendo alcune iniziative nel settore, come quella della PIEL, che ha modificato per l'alimentazione a idrogeno una FIAT Multipla a metano, e sta portando alcuni potenziali utenti a valutare la possibilità di provare i veicoli della BMW.

### **Celle a combustibile**

In Italia le attività sulle celle ad elettrolita polimerico per trazione sono iniziate nel



**Figura 10**  
Progetto Irisbus

1989 nell'ambito di una collaborazione dell'ENEA con la De Nora, che ha portato a mettere a punto una tecnologia di cella originale, che privilegia materiali a basso costo e di facile reperibilità e tecnologie di fabbricazione adatte alla produzione di serie.

La tecnologia sviluppata da De Nora è stata impiegata per la realizzazione di diversi veicoli sperimentali (Renault/Progetto FEVER, PSA Peugeot/Progetto Hydro-Gen, FIAT/600 Elettra) ed autobus (MAN, Neoplan, Ansaldo/Progetto EQHPP), anche se richiede ulteriori sviluppi per raggiungere prestazioni e costi competitivi rispetto alle applicazioni relative alla trazione.

In tal senso si sta muovendo la Nuvera Fuel Cells, società nella quale sono confluite nel 2000 le attività sulle celle ad elettrolita polimerico condotte dalla De Nora, con l'obiettivo di arrivare a disporre di prodotti commerciali per la trazione entro il 2005.

In parallelo allo sviluppo industriale della tecnologia degli stack l'ENEA e il CNR-ITAE di Messina hanno condotto negli ultimi dieci anni attività di ricerca su materiali e componenti, con il coinvolgimento di diverse università (Accordo di Programma

Ministero Industria-ENEA fino al 1998 e Programma Ministero Università e Ricerca legge 95/95 dal 1999). In tale ambito sono stati messi a punto componenti e tecnologie di fabbricazione che hanno consentito di raggiungere prestazioni allineate con le migliori ottenute a livello internazionale.

I risultati di tali attività sono importanti anche per promuovere la crescita di altri soggetti industriali nel settore.

Particolarmente interessante, in tal senso, è la collaborazione tra l'ENEA ed una piccola società di Bologna, la Roen Est, che ha portato allo sviluppo di soluzioni innovative, e molto promettenti, per l'ingegneria dello stack, con la realizzazione, a fine 2002, di un modulo da 5 kW.

Le attività di sviluppo di tecnologie e componenti per celle ad elettrolita polimerico proseguiranno per i prossimi due anni in un progetto coordinato dall'ENEA nell'ambito del FISR e svolto in collaborazione con istituti del CNR, università e Roen Est.

### Prototipi di veicoli con celle a combustibile

#### Gruppo FIAT

Il Gruppo FIAT è impegnato dal 1998 nello sviluppo di prototipi di veicoli a celle a combustibile con l'obiettivo prioritario di verificare le prospettive tecnico-economiche di questa tecnologia, sia nel campo degli autobus sia delle autovetture. I principali progetti finora realizzati sono illustrati brevemente nel seguito.

*Bus a idrogeno a emissioni zero* – L'Irisbus Italia, società nata dalla fusione dei settori autobus di Iveco e Renault, ha realizzato un autobus ibrido, che è stato presentato ufficialmente a Torino nel maggio 2001 ed il cui impiego su strada è previsto nel 2003. Il veicolo (figura 10), derivato dal CityClass CNG, utilizza una cella a combustibile da 60 kW, sviluppata dalla società americana UTC Fuel Cells.

Il progetto, parzialmente finanziato dal Ministero dell'Ambiente, vede il coinvolgi-



mento di ATM (Azienda Torinese per la Mobilità), per l'impiego in servizio del prototipo; Sapio, per la produzione e stoccaggio idrogeno; CVA (Compagnia Valdostana Acque), per fornire l'energia elettrica da fonti rinnovabili necessarie per la produzione di idrogeno); ENEA, per il monitoraggio dei risultati; Ansaldo Ricerche, per la fornitura degli azionamenti elettrici.

*600 Elettra Fuel Cell* – La 600 Elettra Fuel Cell (figura 11) è stata presentata al pubblico nel febbraio 2001. Il prototipo è derivato dalla Seicento Elettrica ed è stato sviluppato dal Centro Ricerche FIAT, con finanziamenti di FIAT Auto e del Ministero dell'Ambiente.

Lo *stack* installato nella vettura (fornito da Nuvera Fuel Cells Europe) è alimentato con idrogeno in pressione (200 bar), accumulato in sei bombole (9 litri ciascuna) sistemate nella parte posteriore del veicolo. Per il futuro si prevede di ripristinare l'abitabilità originaria della vettura, ricorrendo ad un diverso sistema di accumulo del combustibile (uso di idruri metallici, ovvero bombole ad alta pressione).

Il recente accordo con la General Motors, che già aveva un impegnativo programma di sviluppo per i veicoli a celle a combustibile, potrebbe modificare la strategia d'intervento della FIAT nel settore delle autovetture, con una riduzione delle risorse investite in questo campo, mentre non tocca i programmi di Iveco/Irisbus nel settore degli autobus.

#### *Ansaldo Ricerche*

Opera da diversi anni nel settore delle celle a combustibile per trazione e si è occupata in passato di tutte le problematiche relative alla progettazione e realizzazione del sistema di generazione e del suo impiego a bordo del veicolo, partecipando alla realizzazione di un autobus da 12 metri e di un battello per la navigazione sul Lago Maggiore, entrambi in configurazione ibrida e con idrogeno liquido come combustibile.

Motore: 30 kW (PEFC 7 kW)  
Alimentazione: idrogeno  
Autonomia: 100 km (140 km con batteria)  
Velocità max: 100 km/h



**Figura 11**  
Elettra H<sub>2</sub> Fuel Cell

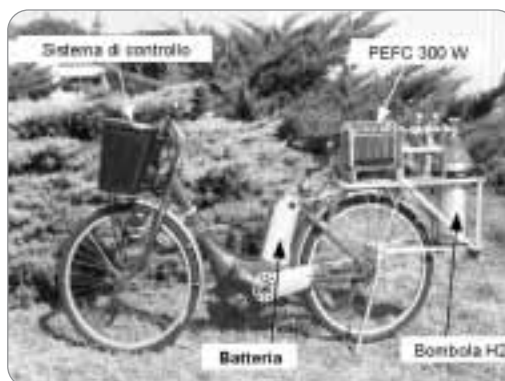
Ansaldo Ricerche ha curato anche lo sviluppo degli azionamenti elettrici nell'ambito di progetti europei per autovetture e autobus ed in questo settore è concentrata la sua attenzione per il futuro.

#### *Aprilia*

Ha presentato al Motorshow di Bologna nel dicembre 2000 il primo prototipo di ciclomotore a celle a combustibile, derivato dalla bicicletta a pedalata assistita "Enjoy". Sul veicolo è installata una cella PEFC da 700 W sviluppata dalla Manhattan Scientifics/NovArs. Il *Times* ha dichiarato questo prototipo "Invenzione dell'anno 2001". Durante il 2002 ha realizzato un prototipo di scooter, di potenza maggiore rispetto al precedente, destinato a diventare la base per il passaggio alla fase di test su flotte e quindi alla commercializzazione.

#### *ENEA*

Nell'ambito delle sue attività di sviluppo di prototipi dimostrativi di piccola taglia a idrogeno ha realizzato, utilizzando *stack* della Nuvera Fuel Cells, un sistema di generazione da 5 kW, attualmente in prova al banco, per l'alimentazione di un veicolo



**Figura 12**  
Bicicletta realizzata presso i laboratori ENEA

ibrido, ed un prototipo di bicicletta elettrica a pedalata assistita (stack da 300 W). La bicicletta (figura 12), che ha percorso finora quasi 400 km, utilizza idrogeno compresso e, con una bombola da 5 litri a 200 bar (pari a 1 Nm<sup>3</sup>), presenta un'autonomia di 100-130 km (variabile a seconda del tipo di percorso) a fronte dei 20-25 km della bicicletta utilizzante solo batterie.

#### *Altri*

Altri soggetti hanno avviato di recente o stanno avviando in questa fase delle iniziative nel settore. Si ricordano, tra gli altri, il programma promosso dal Comune di Firenze per la realizzazione di un prototipo di autobus a celle a combustibile e, in prospettiva, di una flotta, con la relativa stazione di rifornimento (partner: ATAF, CAM, Nuvera, SOL, ENEA, IM/CNR) e quello analogo previsto dall'ATM di Milano (in collaborazione con Iveco e altri da definire) nell'ambito del programma sull'idrogeno della Regione Lombardia.

## Le barriere all'introduzione dei veicoli a idrogeno

Le diverse tipologie di ostacoli, che si oppongono alla penetrazione del veicolo a idrogeno, richiedono uno sforzo notevole per la loro rimozione da parte di tutti i soggetti coinvolti ed in particolare da parte delle autorità pubbliche. Le principali barriere sono:

- tecnologiche;
- strutturali;
- economiche;
- normative;
- di accettazione sociale.

### Barriere tecnologiche

Tra i numerosi problemi da risolvere, quelli più critici sono il miglioramento delle potenzialità del sistema di accumulo dell'idrogeno a bordo e la riduzione dell'incidenza dei metalli nobili nel catalizzatore delle celle.

### Sistema di accumulo

Il sistema d'accumulo dell'idrogeno a bordo costituisce il classico collo di bottiglia per la penetrazione della tecnologia, sia per la limitata autonomia del veicolo ad idrogeno rispetto ai veicoli convenzionali, sia per l'eccessivo peso e ingombro rispetto ai serbatoi attuali. Vanno pertanto intensificati gli sforzi in ricerca, sviluppo e dimostrazione sulle opzioni di stoccaggio praticabili, con l'obiettivo di aumentare la densità energetica sia in volume sia in peso. Gli attuali sistemi di stoccaggio a bordo (idrogeno compresso in bombole d'acciaio a 250 bar e idrogeno liquido in vasi Dewar) rendono possibile la dimostrazione della funzionalità del veicolo ad idrogeno, ma sono ben lungi dalla soluzione ottimale che la diffusione di massa del veicolo ad idrogeno richiede.

### Uso di metalli nobili come catalizzatori

In prospettiva, il costo di una cella ad elettrolita polimerico, realizzata da un sistema di produzione ottimizzato su scala industriale, risulterà molto influenzato dal contenuto di metalli preziosi nel catalizzatore. È pertanto necessaria la prosecuzione dell'attività di ricerca e sviluppo per la riduzione del contenuto di platino e, in prospettiva, l'utilizzo di nuovi materiali sostitutivi di costo inferiore per i catalizzatori.

### Barriere strutturali

La mancanza di una rete di stazioni di rifornimento d'idrogeno per autotrazione è un grosso ostacolo che si oppone alla penetrazione del veicolo ad idrogeno in quanto ne condiziona fortemente l'uso.

L'avvio della realizzazione delle infrastrutture di distribuzione è un'operazione complessa, sia per l'incertezza sulla redditività dell'investimento, in mancanza di una domanda ben quantificabile, sia per la scelta delle tecnologie di produzione dell'idrogeno, della fonte da usare, della modalità d'approvvigionamento, della localizzazione dei siti. Lo sviluppo delle infrastrutture va

attuato insieme con i produttori di autoveicoli ad idrogeno, che devono far conoscere con un certo anticipo i loro piani di produzione, affinché i soggetti interessati alla realizzazione delle infrastrutture siano in grado di renderle disponibili in tempo utile.

Va individuata una prima fase pilota, relativa alla sperimentazione delle flotte, durante la quale l'idrogeno può essere fornito da strutture di produzione realizzate in impianti stazionari esistenti, oppure da strutture ad hoc predisposte presso i gestori delle flotte ed aperte all'utenza esterna, oppure da impianti da realizzare nel sito di stazioni di servizio esistenti, in corrispondenza di aree territoriali ove il livello della domanda garantisca l'economicità dell'impresa.

È molto importante che la commercializzazione degli autoveicoli ad idrogeno sia accompagnata, se non preceduta, dalla realizzazione di un numero adeguato di stazioni di rifornimento distribuite sul territorio, in modo da non pregiudicarne il successo. Si ritiene che la soluzione più vantaggiosa, per il rifornimento dell'idrogeno, sia l'uso dei siti di stazioni di servizio preesistenti che, nel breve-medio termine, si baseranno su impianti di *steam reforming* del metano, fornito dalla rete o trasportato da furgoni, in bombole o liquefatto.

Nella fase di avvio della realizzazione della rete di stazioni di rifornimento dell'idrogeno, prima che la domanda raggiunga livelli tali da assicurare utili per le imprese, è necessario l'apporto di sovvenzioni e incentivi pubblici tali da coprire le perdite iniziali.

Accanto alle infrastrutture non vanno dimenticate le barriere che dipendono dalla

mancanza o inadeguatezza di servizi, come la disponibilità di siti e personale capaci di erogare tutti gli interventi di manutenzione che si potrebbero rendere necessari durante l'uso dei veicoli. La crescita di tali servizi sul territorio dovrebbe essere pianificata in modo analogo a quella delle infrastrutture.

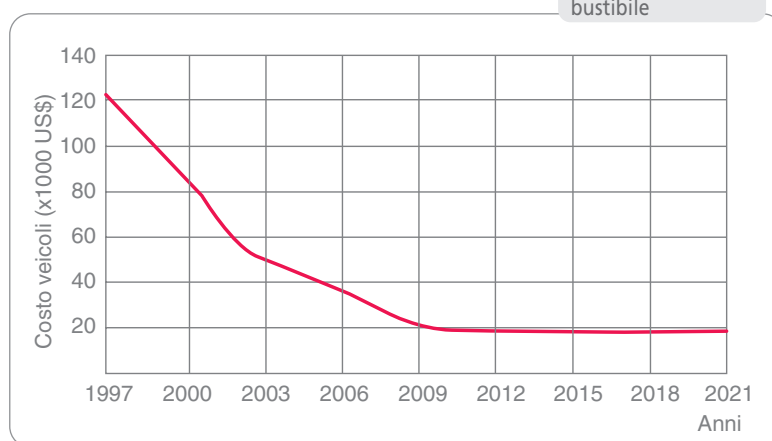
### Barriere economiche

Il costo di un veicolo innovativo, superata la fase prototipale di dimostrazione, durante la quale il costo dell'autoveicolo può rimanere fuori mercato, è fortemente influenzato dalle economie di scala. Anche nel caso del veicolo ad idrogeno il costo di prospettiva è stimato sulla base di ipotesi di crescita del mercato potenziale di medio termine.

Esistono diverse stime sull'evoluzione del prezzo d'acquisto di un veicolo a celle a combustibile alimentato ad idrogeno, sulla base di differenti ipotesi di evoluzione del mercato e della tecnologia nel medio termine.

Le valutazioni, dopo circa 15 anni dall'avvio

**Figura 13**  
Possibile evoluzione del prezzo di veicoli a celle a combustibile



Fonte delle stime	Alimentazione veicolo		Benzina		Metanolo		Idrogeno
	Costo (\$/auto)	VCI convenz.	VCI Tech-1	FCV	FCV indiretto	FCV diretto	FCV
DTI (1998)		18.000	-	22.400 24.500	20.800 21.600	-	20.000
Ogden (1998)		18.996	19.196	19.474 19.814	19.124 19.224	- -	19.996
Lipman (1999)		20.558	-	-	-	24.495	24.570

**Tabella 10**  
Stima dei costi dei veicoli a celle a combustibile

VCI = veicolo con motore a combustione interna  
FCV = veicolo con celle a combustibile

della fase di commercializzazione, oscillano verosimilmente intorno al prezzo di 20.000 US\$ per autovettura, superiore di circa 2.000 US\$ rispetto alla stima del prezzo di un'autovettura convenzionale equivalente. Alcune di tali valutazioni sono riportate nella tabella 10 e nella figura 13<sup>32</sup>.

Uno sforzo notevole, anche attraverso incentivi pubblici, è essenziale per assicurare una penetrazione significativa nel mercato e la conseguente riduzione dei costi per l'acquisto delle autovetture da parte dell'utente finale.

### Barriere normative

Le norme vigenti (autorizzative, di sicurezza, stradali), che regolano l'uso e la circolazione degli autoveicoli, sono generalmente emesse sulla base delle caratteristiche della tecnologia prevalente di trasporto e spesso costituiscono una barriera alla penetrazione delle nuove tecnologie. È stato così nel caso del veicolo elettrico e la stessa cosa si ripropone per il veicolo a idrogeno. È eclatante, in tal senso, l'impossibilità in Italia di omologare il recipiente in materiale composito, che ne impedisce l'uso per i combustibili gassosi in pressione.

Si rendono pertanto necessari interventi tempestivi, mirati all'adeguamento della normativa, per non ritardare ulteriormente e/o impedire la commercializzazione e l'utilizzo del veicolo ad idrogeno, così come sono utili norme incentivanti, che privilegino la circolazione degli autoveicoli a idrogeno nei centri urbani, in quanto caratterizzati da basso o nullo impatto ambientale.

### Barriere di accettazione sociale

A livello psicologico, i cittadini tendono mediamente a privilegiare l'uso delle tecnologie consolidate perché più familiari e quindi percepite più sicure e più vantaggiose. Accanto a ciò vanno aggiunte alcune perplessità di ordine pratico, dovute ad esempio all'incertezza di poter disporre di un mercato dell'usato per il veicolo dove eventualmente rivendere l'autovettura

dopo un certo numero di anni, alla difficoltà in alcuni casi di assicurare i veicoli e/o di avere premi di assicurazione simili a quelli dei veicoli convenzionali ecc.

La penetrazione di una nuova tecnologia va quindi sempre accompagnata da una campagna di informazione tendente a modificare l'atteggiamento del cittadino per ridurre le barriere di accettabilità sociale, attraverso una chiara evidenziazione dei vantaggi connessi alla tecnologia e delle modalità per superare i possibili inconvenienti. A tal fine le autorità pubbliche, anche in collaborazione con le industrie interessate, dovrebbero farsi carico delle campagne di informazione per rendere familiare presso la cittadinanza le tecnologie dei veicoli ad idrogeno, rassicurandola soprattutto sotto l'aspetto della sicurezza e dimostrando che le prestazioni non hanno niente da invidiare rispetto agli altri tipi di veicoli.

Ovviamente un compito fondamentale delle autorità dovrà essere quello di promuovere nei cittadini una sensibilità ambientale sempre più spinta e della coscienza di essere sempre più protagonisti nella realizzazione di uno sviluppo della società compatibile con la salvaguardia dell'ambiente. In mancanza della creazione di una tale coscienza civica sarebbe alquanto difficile preconizzare un grande successo per l'introduzione delle tecnologie dei veicoli ad idrogeno.

## Analisi d'impatto delle diverse tipologie di veicoli

### Approccio metodologico

Per procedere all'introduzione di una nuova tecnologia veicolare, come quella dei veicoli a idrogeno, occorre verificare che tale operazione sia caratterizzata da reali vantaggi in termini complessivi, vale a dire che i benefici siano concreti e misurabili e che i costi delle nuove soluzioni possano essere resi comparabili a quelli delle tecnologie in competizione.

La varietà di soluzioni veicolari possibili (intese come combinazione di veicoli e combustibili) per le varie tecnologie alternative, tra cui l'idrogeno, richiede che una scelta meditata delle tecnologie più promettenti possa essere fatta solo in seguito ad un'analisi quantitativa basata sull'uso di metodologie adeguate in grado di determinare gli effettivi impatti ambientali (locali e globali) ed i costi associati alla tecnologia in questione. Tale analisi è uno strumento indispensabile, non soltanto per l'utente finale, ma anche, e principalmente, per gli organi politici, che possono proporre adeguate politiche di sostegno per l'utilizzo delle tecnologie migliori. Occorre quindi confrontare tra loro le varie opzioni a disposizione, delineando quali siano le tecnologie più promettenti ed eventualmente il tipo di mercato che si prospetta (generale o di nicchia per usi di tipo specifico).

È importante sottolineare che, per avere senso, i confronti devono essere effettuati prendendo a riferimento tecnologie caratterizzate da un livello simile di maturità; ciò richiede che i veicoli esaminati abbiano già scontato i prevedibili difetti che i nuovi prototipi sovente mostrano e che soprattutto il ventaglio dei costi non risulti troppo ampio. È chiaro, infatti, che le tecnologie innovative sono caratterizzate da costi significativamente più alti delle tecnologie già mature e che questo handicap risulta tanto più grande quanto più i veicoli sono a livello prototipale. Pertanto un confronto fatto sulla situazione presente introdurrebbe fatalmente distorsioni in sede di analisi, in quanto sarebbero logicamente troppo favorite le tecnologie già affermate. Tali distorsioni potrebbero però essere notevolmente ridotte se il confronto fosse fatto partendo da soluzioni tecnologicamente mature. In realtà l'adozione di questa ipotesi comporterebbe altri tipi di problemi, poiché uno stesso stadio di maturazione non viene raggiunto dalle diverse tecnologie contemporaneamente, per cui il confronto andrebbe fatto considerando tempi diversi.

È conveniente perciò trovare un compromesso, che può essere basato sull'ipotesi di considerare veicoli già pienamente sviluppati dal punto di vista tecnologico, anche se con differenze di costi ancora sensibili, mantenendo però la coerenza temporale per quanto attiene al momento della verifica. In tal modo ci si può spostare ad una data futura che potrebbe essere collocata intorno all'anno 2010, ovviamente effettuando il confronto, prendendo in considerazione veicoli che già incorporano i miglioramenti prevedibili nell'intervallo temporale da adesso al momento della verifica.

Entrando nel merito delle tecnologie da valutare sono state prese in considerazione, per le autovetture, le seguenti tecnologie:

- VCI (veicoli a combustione interna) a benzina;
- VCI a gasolio;
- VCI a gas naturale compresso (CNG);
- Veicoli a metanolo a celle a combustibile (FC);
- VCI a idrogeno;
- veicoli a idrogeno a celle a combustibile;
- veicoli elettrici;
- veicoli ibridi.

### L'impatto energetico e ambientale

Per pervenire a valutazioni realmente rappresentative si deve tenere conto dell'intera catena energetica, considerando le varie fasi di produzione dell'energia finale a partire dalla fonte primaria, della sua trasmissione e distribuzione e dell'uso a bordo del veicolo per poter adeguatamente fornire l'energia e la potenza necessaria per il moto. Questo approccio, cosiddetto *well to wheels* ("dal pozzo alle ruote"), è utilmente suddiviso nelle due componenti principali: produzione del "combustibile" (*well to tank*, che comprende tutte le fasi fino alla stazione di servizio) ed uso a bordo (*tank to wheels*, che invece considera gli impatti associati con l'uso del veicolo). Questa distinzione mira anche a caratterizzare gli elementi più significativi di ciascuna tecnologia per evidenziarne gli aspetti critici o

maggiormente favorevoli.

In realtà un'analisi completa dovrebbe comprendere tutto il ciclo di vita del veicolo, partendo dai materiali di base ed includendo tutte le fasi di assemblaggio e produzione dei veicoli, il loro utilizzo ed infine la loro radiazione, con le relative fasi di smantellamento e recupero dei materiali. Tuttavia l'indisponibilità di indicazioni completamente certe per parecchie delle nuove tecnologie, stante l'impossibilità di determinare i processi di riferimento in alcuni casi e la mancanza di dati affidabili in altri, renderebbe alquanto complessa e lacunosa un'analisi di tale genere.

È invece molto più significativa un'analisi *well to wheels*, che conduce a stime nettamente più attendibili ed utilizzabili per scelte di tipo strategico. Ciò non vuol dire che un'analisi *well to wheels* sia estremamente semplice, in quanto la valutazione degli impatti e dei consumi delle tecnologie veicolari dipende da numerosi parametri non tutti determinati o disponibili in maniera omogenea e confrontabile. Ad esempio, i veicoli hanno comportamenti e prestazioni che dipendono dalle loro caratteristiche (massa, coefficiente aerodinamico, area frontale), dal loro uso (ciclo di lavoro e missione tipica) ed infine dalle modalità in cui gli impatti sono calcolati. Studi specifici confermano la necessità di adattamenti alle diverse condizioni geografiche, tecnologiche e/o politiche e di mercato e l'estrema

variabilità di tali valutazioni. Sono attualmente disponibili modelli, codici di calcolo e studi che consentono un'analisi degli impatti e delle emissioni *well to wheels* del sistema veicolo/combustibile con riferimento a diverse tipologie di tecnologie veicolari e di scenari evolutivi.

In questo documento, partendo dai risultati dei diversi studi disponibili per le autovetture, che rappresentano di gran lunga la maggiore componente del parco veicolare, e dalle condizioni tipiche italiane (mix energetico, processi di produzione e distribuzione del combustibile), si effettueranno le previsioni di sviluppo nel medio-lungo termine delle diverse tecnologie, incluse quelle convenzionali, per le combinazioni di veicoli e combustibili più interessanti, riportate in tabella 11.

### Il consumo durante la produzione ed il trasporto dei combustibili

L'energia richiesta per rendere disponibile il combustibile finale alla stazione di servizio dipende dalle caratteristiche del combustibile di partenza e dall'efficienza delle varie fasi del processo di estrazione, produzione e trasporto. La figura 14 mostra i collegamenti possibili tra fonti primarie, vettori energetici e veicoli.

L'efficienza di estrazione del petrolio grezzo e di gas naturale è intorno al 98%, mentre l'efficienza media di trasporto varia tra il 98,3% (petrolio) e il 99% (gas naturale).

**Tabella 11**

Combinazione di veicoli e combustibili esaminati

Fonte di energia primaria	Combustibile finale	Sistema di trazione del veicolo			
		Termico	Ibrido elettrico	Celle a combustibile	Elettrico a batteria
Petrolio	Benzina	X	X		
	Gasolio	X	X		
	Idrocarburi vari	X		X	
Gas naturale	Gas naturale compresso	X	X	X	
	Gas naturale liquido	X		X	
	GPL	X		X	
	Metanolo	X	X	X	
	Idrogeno	X	X	X	
Rinnovabili	Etanolo	X		X	
	Metanolo	X	X	X	
	Idrogeno	X	X	X	
Varie	Elettricità		X		X
	Idrogeno	X	X	X	

In raffineria il petrolio grezzo è trasformato, con un'efficienza media del 94% (90% per la benzina e 96% per il gasolio), in carburante che viene poi trasportato alle stazioni di servizio con un rendimento medio del 99,5% (trasporto per mezzo di autocisterne a stazioni entro i 100 km dal luogo di produzione).

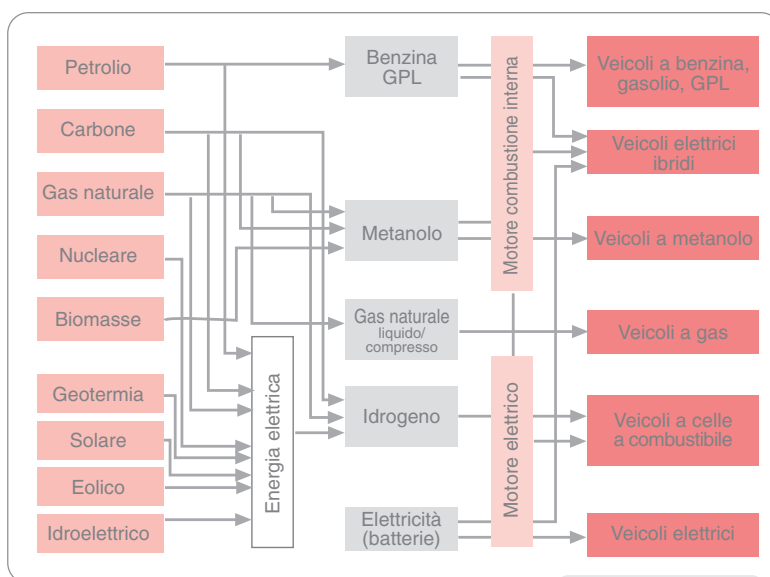
Il gas naturale è invece trasportato direttamente alle stazioni di servizio dove viene accumulato in forma gassosa (in contenitori sotto pressione con un rendimento energetico, per compressioni da 7 a 250 bar, pari al 98,8%) o in forma liquida (con un rendimento di liquefazione del 91%).

L'energia elettrica è una forma di energia di alta qualità, che può essere prodotta da varie fonti con rendimenti ed emissioni estremamente variabili, in dipendenza delle fonti primarie e degli impianti di produzione: il rendimento energetico medio per la produzione di energia elettrica, in Europa, può essere collocato intorno al 40% (in funzione del mix di generazione e dell'anzianità degli impianti). Per trasferire l'elettricità all'utente finale è necessario impegnare ulteriore energia con un rendimento di trasmissione e distribuzione pari al 93%.

Infine, la produzione di idrogeno può essere effettuata con processi diversi (elettrolisi/dissociazione dell'acqua, steam reforming, ossidazione parziale) a partire da composti/fonti diversi (gas naturale, carbone, petrolio, fonti rinnovabili, biomasse). La figura 15 riassume le possibili combinazioni tra processi, prodotti di partenza ed intermedi.

In funzione del processo scelto, intervengono nella catena energetica le relative distribuzioni e passaggi intermedi (eventuale compressione oppure liquefazione alle sottostazioni di ricarica). In caso di produzione centralizzata ed a bordo i rendimenti energetici variano tra il 71 ed il 79%.

Il processo di produzione tipico dell'idrogeno è lo *steam reforming* centralizzato da gas naturale, che è attualmente il più effi-



**Figura 14**  
Percorsi dei combustibili e vettori energetici dalle fonti ai veicoli

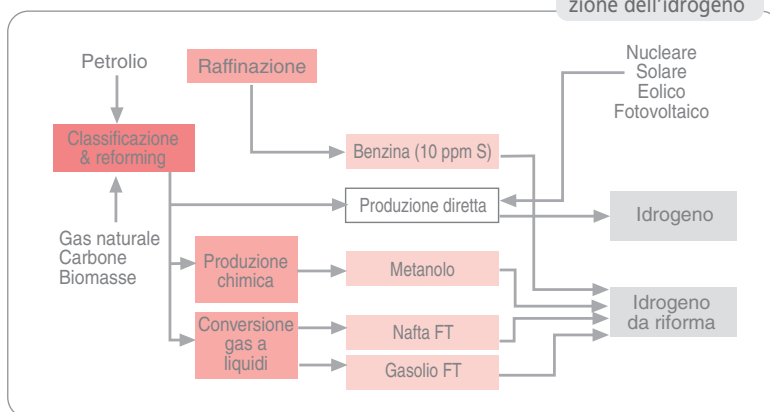
ciente (fino all'86% di efficienza energetica con emissioni associate di CO<sub>2</sub> pari a circa 70 g/MJ prodotto).

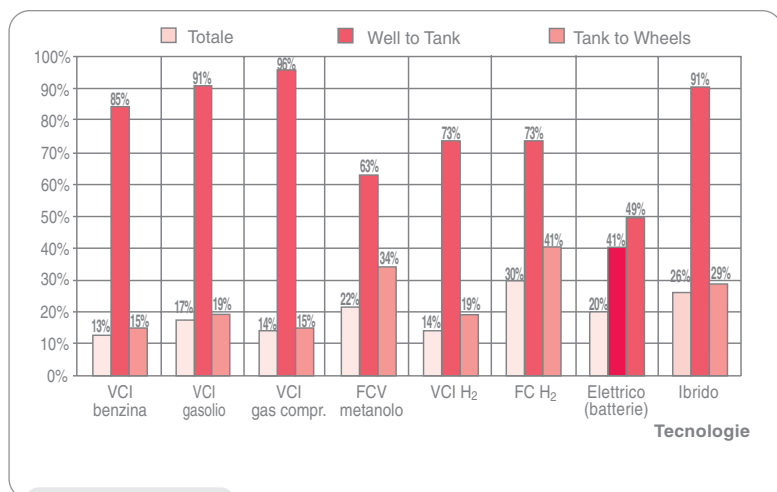
Una visione futura che ipotizzi l'instaurarsi di un'economia dell'idrogeno si fonda ovviamente su soluzioni tecnologiche capaci di minimizzare o eliminare le emissioni di CO<sub>2</sub> associate al processo di produzione. In particolare, si pensa alla separazione e confinamento della CO<sub>2</sub>, nel breve e medio termine, ed alla utilizzazione esclusiva di fonti rinnovabili nel medio-lungo termine.

### Il consumo durante l'uso del veicolo

Le prestazioni dei veicoli dipendono in misura rilevante dalle condizioni di uso (ciclo di lavoro) e dalle caratteristiche del veicolo stesso. Lo sviluppo tecnologico sta sempre

**Figura 15**  
Processi di produzione dell'idrogeno





**Figura 16**  
Confronto efficienze delle tecnologie veicolari

più cercando di migliorare le prestazioni dei veicoli nelle diverse configurazioni possibili, mediante una progettazione mirata alle modalità di uso ed al combustibile da impiegare. La figura 16 mostra i rendimenti dal pozzo alle ruote di alcune tipologie di veicoli che sono state prese in considerazione nell'attuale confronto.

Nella tabella 12 è infine fornita un'indicazione sui rendimenti delle varie fasi a partire dalla fonte primaria alle ruote, passando per il punto intermedio, ovvero la pompa di distribuzione. Per semplicità, i dati riportati in tabella dal pozzo alla pompa includono tutte le fasi di lavorazione e trasporto. Occorre ricordare che i rendimenti indicati in tabella sono estrapolati al 2010 da dati di letteratura ed includono i prevedibili sviluppi e modifiche nella produzione dei combustibili e nelle prestazioni dei veicoli. Dalla tabella si desume che il veicolo a benzina

**Tabella 12**  
Efficienza delle varie fasi dal pozzo alle ruote (well to wheels)

Tecnologia/fase	Well to tank	Tank to wheel	Well to wheel
	Totale	Veicolo	Totale
VCI benzina	84,7%	15,0%	12,7%
VCI gasolio	90,8%	19,2%	17,4%
VCI gas naturale compresso	96,0%	15,0%	14,4%
Celle a comb. metanolo	63,2%	34,0%	21,5%
VCI idrogeno	73,5%	19,2%	14,1%
Celle a comb. idrogeno	73,5%	40,5%	29,8%
Elettrico a batterie	40,7%	49,5%	20,1%
Ibrido	90,8%	28,6%	26,0%

VCI = Veicolo con motore a combustione interna

ha il più basso rendimento totale, dove però pesa in particolare il basso rendimento durante l'uso, mentre nel caso del veicolo elettrico a batteria, che pure ha un rendimento maggiore, avviene il contrario, pesando negativamente la fase di produzione di energia. Il veicolo a idrogeno utilizzando le celle a combustibile è caratterizzato da un rendimento complessivo più che doppio del veicolo a benzina e ciò rende già interessante l'approfondimento dei confronti.

### Le emissioni dei gas

Le emissioni dovute alla produzione dei combustibili ed al loro uso nei veicoli sono difficili da determinare, analogamente a quanto indicato per i consumi. In generale, la produzione di CO<sub>2</sub>, e più in generale dei gas serra, è strettamente collegata ai rendimenti dell'intera catena energetica. D'altra parte, le emissioni di vari agenti inquinanti a livello locale, quali monossido di carbonio (CO), idrocarburi incombusti (HC) ed ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), dipendono in misura rilevante dai combustibili utilizzati, dalle caratteristiche dei veicoli e dai dispositivi per controllare le emissioni. La distinzione delle emissioni nelle diverse fasi di produzione e distribuzione del combustibile e del suo uso a bordo del veicolo assume una particolare rilevanza pratica, in quanto è la base per capire ed individuare i luoghi e le fasi in cui risulta particolarmente critico l'impatto del sistema dei trasporti.

### Le emissioni di gas serra

Dalle considerazioni precedenti sui rendimenti ed i consumi di energia, è possibile determinare per le varie tipologie di autoveicoli le emissioni di gas serra. La figura 17 presenta le proiezioni di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> dei costruttori di veicoli europei, in parte oggetto di un accordo volontario con la Commissione Europea. La figura 18 presenta le emissioni distinte tra quelle emesse durante la produzione e distribuzione del vettore energetico, e quelle emesse durante l'uso del veicolo, ri-



spetto al limite europeo al 2008.

È evidente dal confronto dei risultati presentati che i veicoli che utilizzano idrogeno puro e quelli elettrici a batteria non hanno emissioni di CO<sub>2</sub> durante l'uso. Il livello più basso di emissione in assoluto corrisponde ai veicoli ad idrogeno a celle a combustibile, mentre alte emissioni si ottengono dall'uso di veicoli ad idrogeno a combustione interna, in quanto pesa molto la fase di produzione, che, si ricorda, è ipotizzata a partire dal gas naturale. La figura non tiene conto altresì della possibilità di separare e sequestrare la CO<sub>2</sub> prodotta. Ovviamente, in presenza di produzione da fonte rinnovabile o con sequestro della CO<sub>2</sub>, gli andamenti sarebbero molto diversi.

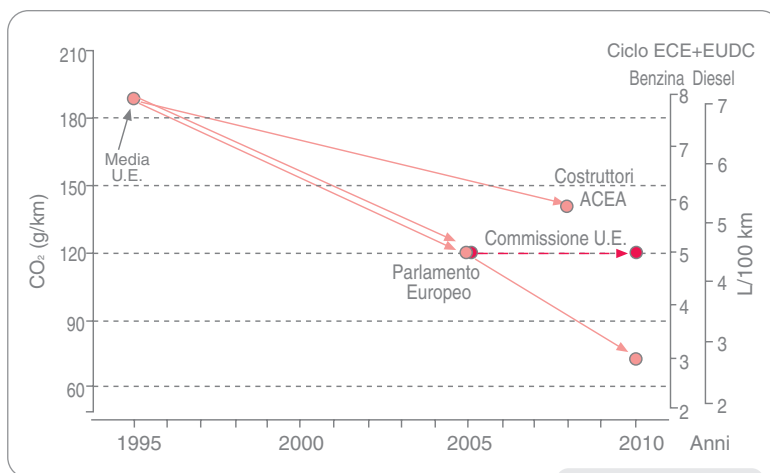
#### Le emissioni di gas regolamentate

Le attuali normative e regolamenti stanno sempre più riducendo le emissioni degli autoveicoli durante il loro uso. La figura 19 confronta i vari limiti di emissioni dei veicoli regolamentate in Europa (EURO III e IV) e negli Stati Uniti (TIER II) con le emissioni previste per veicoli a celle a combustibile alimentati da idrogeno puro o metanolo. Si nota chiaramente che le emissioni dei veicoli a celle a combustibile sono nulle al punto di uso, consentendo un salto di qualità rispetto alle pur ridotte emissioni consentite dalle nuove normative.

### L'impatto economico

#### Considerazioni generali e ipotesi di base

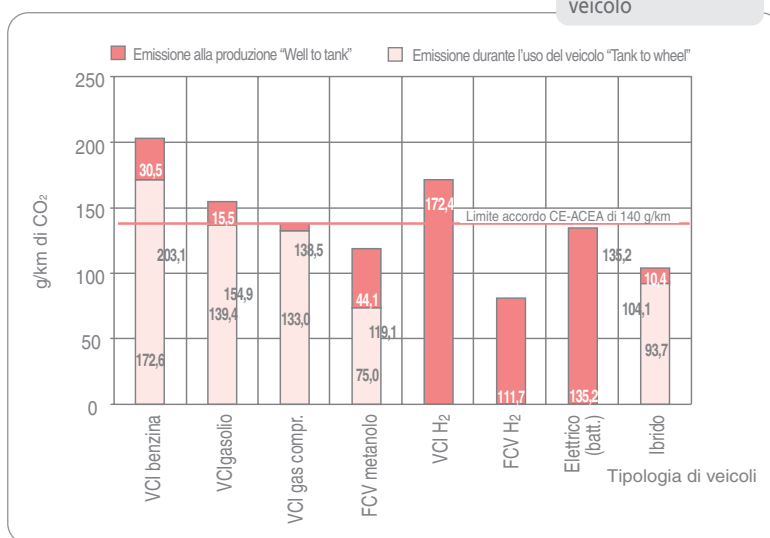
Il calcolo dei costi delle tecnologie veicolari deve essere fatto considerando tutti gli elementi che concorrono alla loro formazione. Essendo già state evidenziate le difficoltà di effettuare valutazioni sull'intero ciclo di vita (è, infatti, del tutto velleitario calcolare i contributi ad esempio delle operazioni di smaltimento di tecnologie non ancora ben definite), si procederà ad un'analisi leggermente più ristretta, che prende in considerazione il percorso "dal pozzo alle ruote" che è più facilmente

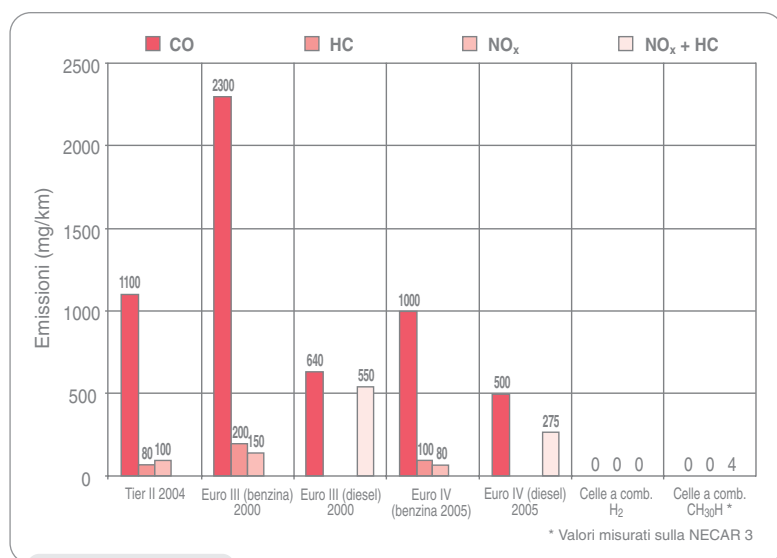


**Figura 17**  
Proposte di riduzione dei consumi ed emissioni di CO<sub>2</sub>

quantificabile. È importante segnalare che, per quanto attiene alle tecnologie veicolari innovative, la loro introduzione fornisce contributi positivi allorché si procede alla valutazione delle esternalità, soprattutto per quanto attiene agli effetti ambientali. Il portare in conto le esternalità corrisponde ad una tendenza che si sta sempre più estendendo sulla base del principio dell'internalizzazione degli impatti, ovvero dell'assunzione che chi produce i danni è tenuto a farsi carico parzialmente o completamente dei costi. Per procedere su questa linea si deve associare alle varie esternalità un valore monetario che deve tenere conto, in tutti i casi in cui ciò è possibile, anche di quanto occorre spendere per rimuovere gli impatti.

**Figura 18**  
Emissioni di CO<sub>2</sub> di autoveicoli dal pozzo alle ruote distinte nelle fasi di produzione del combustibile e di uso del veicolo





**Figura 19**  
Limiti di emissioni regolamentate degli autoveicoli

Per ogni tecnologia devono quindi essere portati in conto i contributi di costo associati ai seguenti elementi:

- fonte energetica primaria, includendo sia il costo del processo di trasformazione e trasporto sia le accise prevedibili;
- veicolo;
- esternalità negative (rapportando le valutazioni alle emissioni dei veicoli, piuttosto che alle concentrazioni di inquinanti).

In realtà un ulteriore contributo alle esternalità negative è quello corrispondente all'utilizzo di risorse energetiche non rinnovabili, che però è estremamente complesso tenere in considerazione. Anche il costo delle infrastrutture non viene messo in conto, in quanto ciò creerebbe un'ulteriore penalizzazione indebita per le fonti energetiche alternative e per l'idrogeno; infatti, per gli attuali carburanti sono già stati sostenuti i costi per realizzare una rete capillare di stazioni di servizio e si può ragionevolmente affermare che il loro costo non incide più in modo significativo sul costo del carburante (ovviamente per quanto attiene agli investimenti). D'altra parte i costi di operazione si possono ritenere simili, per cui l'effetto è l'aggiunta di un termine costante alle varie tecnologie. Parimenti, dal paragrafo precedente relativo alle barriere, anche il costo del veicolo ipotizzato in

corrispondenza di una presenza sul mercato per i veicoli ad idrogeno (e per le altre tecnologie) non è caratterizzato da ampie escursioni. Ciò autorizza a semplificare ulteriormente il calcolo, omettendo tale contributo dal computo, visto che l'obiettivo non è tanto quello di determinare un valore assoluto di costo, ma piuttosto quello di confrontare tra loro i costi delle tecnologie, in modo da determinare quali di esse potrebbero avere le maggiori prospettive di successo. In tal modo il confronto diviene più semplice, pur mantenendo un adeguato livello di attendibilità.

Il calcolo delle esternalità negative è un'operazione alquanto delicata, in quanto occorre parametrizzare i diversi impatti trasformandoli in grandezze tra loro omogenee. In genere ci si riconduce al calcolo di costi equivalenti, ma spesso i parametri di conversione non sono né facilmente reperibili, né caratterizzati da livelli di attendibilità soddisfacenti (sia in termini assoluti, sia in termini relativi, a causa di differenti livelli di determinazione dei vari parametri che possono comportare grosse incertezze sulle valutazioni finali). Ulteriori elementi che devono essere tenuti in considerazione sono i seguenti:

- un criterio di mera monetizzazione può non sempre essere corretto, in quanto in molti casi è comunque difficile esprimere i costi, soprattutto perché non tutti i processi sono caratterizzati da un livello adeguato di conoscenza;
- i costi vanno ad incidere su diversi soggetti, per cui le scelte degli utenti sono basate su considerazioni che hanno alla base solo alcuni dei contributi di costo; per rendere quindi più attendibili gli esiti dei confronti occorrerebbe individuare nella realtà dei meccanismi capaci di ricondurre tutti i costi sostenuti all'utente finale.

In conclusione i costi risultanti, se da una parte possono fornire un'idea più chiara sulla praticabilità di certe soluzioni, dall'altra devono essere comunque integrati da considerazioni aggiuntive per formulare

giudizi corretti ed evitare distorsioni nella scelta delle tecnologie vincenti.

La notevole letteratura disponibile<sup>33-39</sup> ha fornito il materiale di partenza per costruire le basi dei confronti.

Per i costi delle tecnologie si ricorda che il riferimento temporale è l'anno 2010, in cui tutte le tecnologie, comprese quelle dell'idrogeno e delle celle a combustibile, saranno giunte ad un sufficiente livello tecnologico di sviluppo. Ciò comporta che i confronti siano effettuati considerando anche il prevedibile miglioramento delle prestazioni delle tecnologie convenzionali, che dovranno soddisfare nuovi requisiti in termini sia di emissioni di inquinanti (Euro IV ed eventuali nuove direttive, benzene, contenuto di SO<sub>2</sub> nei carburanti ecc.) sia di emissioni di CO<sub>2</sub> (ad es. accordi volontari tra Commissione Europea e costruttori di autoveicoli).

Concludendo, i costi saranno calcolati sulla base delle seguenti ipotesi:

- per i costi della fonte primaria, il petrolio si manterrà sugli attuali livelli (22-30 \$/barile), così come il gas naturale, mentre i costi di raffinazione non subiranno variazioni sensibili;
- il costo dei carburanti includerà il contributo delle accise, e gli oneri fiscali della fase di produzione;
- per l'idrogeno e il metanolo si assumerà

nulla l'incidenza delle accise per verificare che almeno teoricamente ci siano prospettive di mercato;

- il costo delle autovetture rimarrà stabile, al netto dell'inflazione per i veicoli tradizionali, mentre quello dei veicoli innovativi sarà leggermente superiore; vista la piccola differenza tale contributo non sarà portato nel computo;
- non saranno portati in conto i costi operativi (manutenzione, assicurazione, tasse di proprietà ecc.), in quanto si presume possano incidere in modo simile sul costo unitario, ad eccezione del consumo di carburante;
- si prenderà a riferimento un'autovettura di media cilindrata;
- l'impatto ambientale sarà calcolato prendendo a riferimento una città di dimensioni medio-grandi (con numero di abitanti superiore a centomila), sia perché si riesce ad intercettare un segmento piuttosto ampio della popolazione europea, sia perché in tal modo le stime possono assumere un carattere maggiormente conservativo. Infatti, l'adozione di normative di carattere ecologico e ambientale potrebbero comportare l'esclusione dei veicoli convenzionali dall'accesso alle città rendendo quindi ancora più vantaggioso il ricorso a veicoli innovativi a emissione nulla o comunque molto ridotta.

Tecnologia	Unità	Costo unitario	Costo alla pompa	Costo (€/GJ)	Consumo (MJ/km)	Costo unitario (€/1000 km)		
VCI benzina	€/1000l	389,5	1091,78	33,12	2,42	80,15		
VCI gasolio	€/1000l	356,41	885,72	24,58	1,89	46,45		
VCI gas naturale compresso	€/GJ	4,03	11,35	11,35	2,42	27,47		
Celle a combustibile metanolo	€/1000l	368,57	368,57	23,67	1,07	25,26		
Elettrico a batterie	€/kWh	0,07	0,1258	34,94	1,89	66,05		
Ibrido	€/1000l	356,41	885,72	24,58	0,90	22,03		
VCI a idrogeno	Impianto centralizzato con sequestro CO <sub>2</sub>	min.	€/GJ	17,00	17,00	17,00	2,59	44,01
		max.	€/GJ	20,00	20,00	20,00	2,59	51,78
	Impianto on-site senza sequestro CO <sub>2</sub>	min.	€/GJ	15,00	15,00	15,00	2,59	38,84
		max.	€/GJ	30,00	30,00	30,00	2,59	77,67
Celle a combustibile a idrogeno	Impianto centralizz. con sequestro CO <sub>2</sub>	min.	€/GJ	17,00	17,00	17,00	1,23	20,87
		max.	€/GJ	20,00	20,00	20,00	1,23	24,56
	Impianto on-site senza sequestro CO <sub>2</sub>	min.	€/GJ	15,00	15,00	15,00	1,23	18,42
		max.	€/GJ	30,00	30,00	30,00	1,23	36,83

**Tabella 13**

Costi del consumo di combustibili per le varie tecnologie

VCI = Veicolo con motore a combustione interna

**Tabella 14**  
Costi unitari delle  
emissioni veicolari

Tipo veicolo	Costo degli inquinanti (€/1000 km)						Totale esternalità
	Gas serra (CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> )	PM	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	Cancerogeni (VOC)	
VCI benzina	15,75	6,00	0,01	0,03	0,11	0,72	22,62
VCI gasolio	11,99	6,00	0,01	0,01	0,11	0,54	18,66
VCI gas naturale compresso	11,04	0,60	0,00	0,01	0,11	0,36	12,12
Celle a combustibile metanolo	9,34	0,90	0,01	0,00	0,11	0,13	10,49
Elettrico a batterie	10,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,46
Ibrido	8,06	3,63	0,01	0,00	0,07	0,33	12,09
VCI idrogeno con sequestro CO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,11
VCI idrogeno senza sequestro CO <sub>2</sub>	18,22	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	18,38
Celle a comb. idrogeno con sequestro CO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Celle a comb. idrogeno senza sequestro CO <sub>2</sub>	8,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,67

VCI = Veicolo con  
motore a combustione  
interna

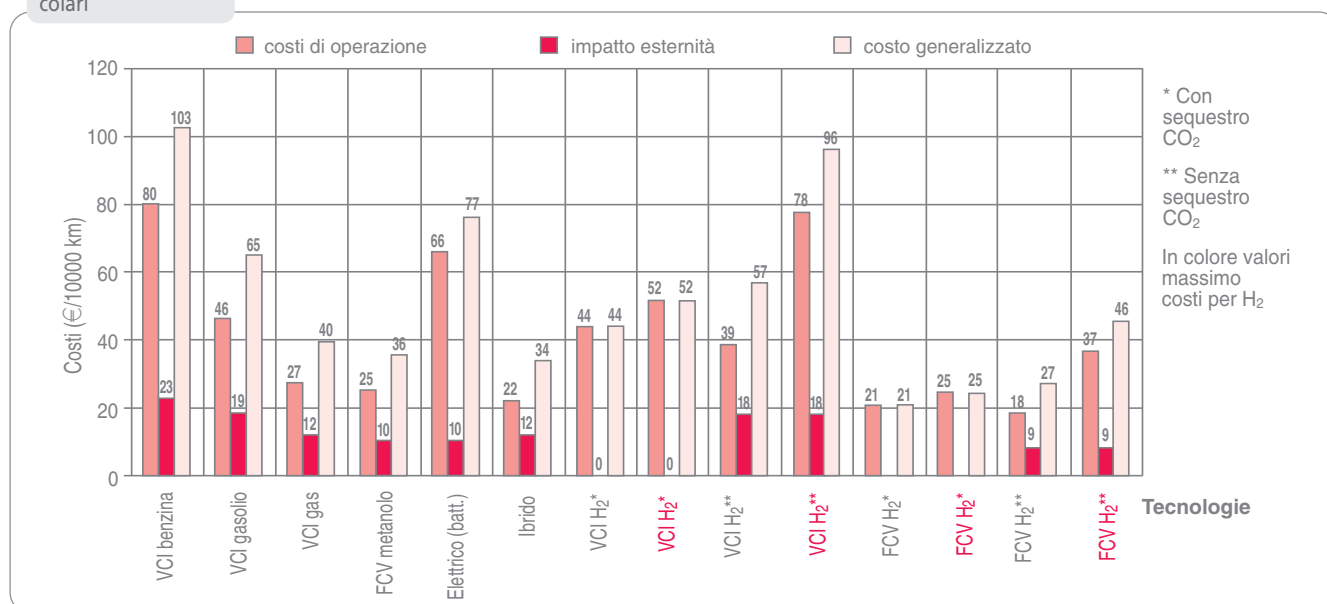
### Confronto dei costi

Sulla base delle efficienze “dal pozzo alle ruote” riportate nella tabella 12 del paragrafo precedente, vengono determinati i costi del combustibile per le diverse tipologie di veicoli considerate. Tali costi possono essere calcolati a partire dal costo alla pompa e dai consumi *tank to wheels* tenendo conto delle varie unità di misura.

I risultati sono indicati nella tabella 13, dove si ricorda che sia per l'idrogeno sia per il metanolo sono nulli i contributi delle accise, che potrebbero gravare sul costo del combustibile alla stazione di servizio, in modo da verificare se tali vettori possono essere

competitivi almeno in linea teorica. È facile verificare che per questi carburanti il costo unitario alla pompa è compreso nel ventaglio dei costi dei combustibili più tradizionali. Dalla tabella si può anche evincere che le indicazioni risultanti dei costi unitari dei consumi favoriscono notevolmente l'adozione dell'idrogeno, quando è usato con le celle a combustibile, mentre dimostrano una convenienza limitata quando l'idrogeno è impiegato nei motori di tipo convenzionale. Dati interessanti caratterizzano anche il metano che, al momento, risulta essere il combustibile avente il costo per unità di energia più basso, in corrispondenza di accise nulle.

**Figura 20**  
Confronto dei costi  
delle tecnologie veicolari



Considerando l'impatto delle emissioni inquinanti si ottiene la tabella 14<sup>40-43</sup> dove sono indicati i costi unitari delle emissioni, per i vari prodotti ed il totale, ovviamente riferendosi ad un ambito urbano.

Il calcolo, per i gas serra, prende in considerazione l'emissione complessiva *well to wheels*, mentre per gli inquinanti considera solamente l'emissione prodotta dal veicolo durante l'uso, in quanto le fasi di produzione dei carburanti interessano aree a bassa densità di popolazione e comunque possono essere adottati provvedimenti a valle per abbattere le emissioni nocive. In ogni caso l'effetto delle esternalità risulta essere complessivamente più piccolo del contributo relativo al consumo. Occorre anche rimarcare che spesso gli impatti più bassi delle esternalità si associano alle soluzioni energeticamente più efficienti, per cui ne migliorano l'appetibilità.

È utile sottolineare che, comunque, il contributo ambientale incide al momento in modo relativo, ma è prevedibile che il suo peso possa crescere in futuro per la sempre maggiore attenzione della collettività verso gli effetti sulla salute. In tal caso le nuove tecnologie saranno ancora più avvantaggiate e potranno assumere un ruolo più importante, soprattutto se porzioni sempre più ampie di tali costi saranno indirizzate direttamente verso i principali responsabili degli impatti. Considerando in conclusione tutti i contributi si può costruire la figura 20, dove per le tecnologie relative all'idrogeno sono riportate tutte le combinazioni relative ai costi e al sequestro o meno della CO<sub>2</sub> emessa durante la fase di produzione.

Dall'esame dell'ultima della figura si evince facilmente che l'idrogeno nella configurazione motore a combustione interna comporta costi complessivi piuttosto alti, appena inferiori a quelli dei veicoli a benzina. Perciò, anche se l'opzione nel breve termine può essere presa in considerazione, perché si devono introdurre modifiche molto limitate al sistema di trazione con

scarse ripercussioni sul costo del veicolo, a lungo termine tale tecnologia non sembra avere grosse prospettive.

Invece, nella configurazione in cui l'idrogeno è accoppiato alle celle a combustibile, i costi complessivi sono estremamente ridotti, anche quando l'opzione di sequestro della CO<sub>2</sub> non è attivata. Ciò dimostra che l'uso dell'idrogeno può essere un'opzione economicamente praticabile, che potrà assorbire una quota significativa di mercato, anche perché con il crescere del numero di veicoli le differenze di costo si ridurranno sempre più, garantendo i vantaggi asintotici indicati in figura.

Ottimi risultati caratterizzano anche l'uso del metano per il quale valgono considerazioni analoghe all'idrogeno utilizzato in motori a combustione interna, ma che diversamente da quest'ultimo assicura già da subito un basso costo di operazione e ridotto impatto ambientale. L'uso del metano potrebbe favorire l'accettazione dei combustibili gassosi da parte degli utenti e fornire una buona base per un successivo ingresso nel mercato dei veicoli a idrogeno basati sulle celle a combustibile. Tra l'altro, da un ampio uso del metano, si potrebbe avere come ricaduta la creazione delle infrastrutture necessarie per la distribuzione dei combustibili gassosi, di cui potrebbe beneficiare l'idrogeno, riducendo i costi per la creazione delle proprie infrastrutture.

## Conclusioni

La riduzione dell'impatto energetico e ambientale del trasporto, soprattutto stradale, richiede interventi ad ampio spettro, che devono riguardare sia la gestione della domanda e del sistema nel suo insieme, che lo sviluppo di combustibili alternativi e di nuove tecnologie veicolari.

L'impiego dell'idrogeno, in veicoli che utilizzano la tecnologia delle celle a combustibile, si presenta come una delle soluzioni più promettenti per il medio-lungo termine. Infatti lo sviluppo dell'idrogeno come

vettore energetico, ed il suo uso nei trasporti, può consentire, in prospettiva, una diversificazione delle fonti impiegate (fossili nella prima fase, con successivo passaggio alle rinnovabili) ed una riduzione significativa delle emissioni, sia a livello locale, sia globale (gas serra). Le analisi ed i confronti effettuati mostrano significativi vantaggi, sia in termini energetici che ambientali, dei veicoli a idrogeno rispetto alle altre tecnologie veicolari, pur tenendo conto per queste ultime della notevole evoluzione prevista nel medio termine.

Tali vantaggi spiegano gli ingenti sforzi, in atto da parte dei maggiori costruttori automobilistici, con il sostegno pubblico, per lo sviluppo di veicoli che abbiano caratteristiche competitive con quelli convenzionali, in termini di prestazioni e costi. I risultati finora ottenuti, con la disponibilità di prototipi sempre più avanzati per le diverse categorie di veicoli, fanno ritenere che possa aversi un avvio della commercializzazione entro due-tre anni, in accordo con quanto previsto dai costruttori più impegnati nel settore, come DaimlerChrysler e Toyota.

La penetrazione nel mercato sarà comunque graduale e potrà assumere valori significativi solo dopo il 2010, man mano che saranno superate le numerose barriere, sia tecniche sia non tecniche, che la diffusione di questa nuova tecnologia veicolare incontra. È necessario infatti che ulteriori miglioramenti dei componenti e del sistema siano affiancati da azioni che portino a notevoli riduzioni dei costi, ad un'estesa disponibilità di idrogeno nel territorio, con le relative infrastrutture di produzione e distribuzione, alla disponibilità di servizi di assistenza e manutenzione, all'adeguamento della normativa, alla diffusione di informazioni che favoriscano l'accettazione della tecnologia da parte degli utenti. Tali azioni richiederanno investimenti ingenti e distribuiti su qualche decennio, sia da parte dei governi che delle aziende coinvolte a vari livelli.

Anche in Italia è necessario produrre uno

sforzo organico in tal senso, superando la frammentarietà delle attività condotte finora, se si vuole partecipare in maniera attiva e con un ruolo significativo al processo di sviluppo e commercializzazione di questa nuova generazione di veicoli e, più in generale, delle tecnologie dell'idrogeno, che appare sempre più come il vettore energetico del futuro.

## Bibliografia

1. Key World Energy Statistics. 2001 Edition, <http://www.iea.org/statist/key2001/keyworld-2001.pdf>.
2. Z. SAMARAS, R. COFFEY, N. KYRIAKIS, G. KOUFODIMOS, F.J. WEBER, D. HASSEL, R. JOUMARD, *Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport*, Aristotle University Thessaloniki, MEET Deliverable 7, LAT Report 9829, Thessaloniki (1998).
3. Comunicato stampa, European Environmental Agency, Copenhagen, 20 aprile 2001 <http://org.eea.eu.int/documents/newsreleases/newsrelease20010423-en>.
4. Rapporto Energia e Ambiente 2001, ENEA Direzione Studi, <http://www.enea.it>.
5. C. KOURIDIS, L. NTZIACHRISTOS, Z. SAMARAS, *COPERT III - V2.0 - User's Manual*, Technical Report, giugno 2000.
6. U.S. Department of Energy/Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies, *Progress Report for Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program*, novembre 2002.
7. FreedomCAR Partnership Plan, settembre 2002, [www.carttech.doe.gov](http://www.carttech.doe.gov).
8. <http://www.fuelcellpartnership.org>.
9. T. HUIKATA, *Research and development of international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET)*, International Journal of Hydrogen Energy, 27 (2002) 115-129.
10. Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project, <http://www.jhfc.jp>.
11. ISHITANI, M. DAITO, K. TANAKA, S. TANGE, *Prospect for Fuel cells Vehicles; a Japanese Perspective*, Proceedings of Seventh Grove Fuel Cell Symposium, Londra, 11-13 settembre 2001; <http://www.auto-asia.com/viewcontent.asp?pk=5897>.
12. <http://www.hydrogen.org/germanh2/index.html>.
13. B. ÁRNASON, T. I. SIGFUSSON, *Iceland - A future hydrogen economy*, International Journal of Hydrogen Energy, 25 (2000) 389-394.
14. Libro Verde Verso una strategia europea di sicurezza dell'approvvigionamento energetico, 2001, [http://europa.eu.int/comm/energy\\_transport/it/lp\\_i\\_it.html](http://europa.eu.int/comm/energy_transport/it/lp_i_it.html).
15. VI Programma Quadro, <http://ftp6.cordis.lu>; Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, L 294/1 del 29 ottobre 2002.

16. Fuel cell Bus Project, <http://www.eu.web.de/fuel-cell-bus>.
17. Brochure Cute Project, <http://www.fuel-cell-bus-club.com/brochure1.pdf>.
18. B. WALSH, *Auto Companies on Fuel Cells*, <http://www.fuelcells.org/AutoCompanieonFuelCells.pdf>.
19. <http://gm.com/company/gmability/>.
20. <http://www.hydrogen.org/news/gazette.html>.
21. Rassegna stampa DaimlerChrysler, <http://www.daimlerchrysler.com>.
22. Ectos Project, <http://ectos.is>.
23. R. DEMPSEY, *Fuel Cell Bus Workshop*, New York, 27-28 aprile, 2000 .
24. ALLIED BUSINESS INTELLIGENCE, *ABI Updates Its Automotive Fuel Cell Forecast for the Coming Decade*, <http://www.alliedworld.com/fce.html> .
25. Rassegna stampa BWM Group, [www.bmw-group.com](http://www.bmw-group.com) .
26. R. WURSTEL, H. KNORR, W. PRÜMM, *Bavarian Liquid Hydrogen Bus Demonstration Project - Safety, Licensing and Acceptability Aspects*, 'Hydrogen Power Now' – 9<sup>th</sup> Canadian Hydrogen Conference, 7-10 febbraio 1999, Vancouver, BC, Canada.
27. H. KNORR, W. HELD, W. PRUMM, H. RUDINGER, *The MAN hydrogen propulsion systems for city buses*, International Journal of Hydrogen Energy 23 (1998). 201-208.
28. <http://www.herc.musashi-tech.ac.jp> .
29. K. PEHR, P. SAURMANN, O. TRAEGER, M. BRACHA, *Liquid hydrogen for motor vehicles - the world's first public LH2 filling station*, International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 777-782; <http://www.hyweb.de/h2muc/introe.html>.
30. W. HEUER, *The TES project. A joint initiative for an additional fuel infrastructures*, J. of Power Sources 80, (2000) 158.
31. U. BÜNGER, *Current Status and Perspectives of Hydrogen Energy Related Activities in Germany*, Proceedings dell'International Conference on Hydrogen Age of Asia, 27 - 28 novembre 2001, Tokyo (J).
32. C.E. THOMAS, B.D. JAMES, F.D. LOMAX, *Market Penetration Scenarios for Fuel Cell Vehicles*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 10, pp. 949-966, 1998.
33. R. RAUSO, *Nuove tecnologie per il risparmio energetico: i nuovi carburanti*, Conferenza Annuale OCSE sul Trasporto Sostenibile, Alghero, 14-15 giugno 2000.
34. *Well to Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems-North American Analysis*, Executive Summary Report, General Motors and alii, aprile 2001.
35. M. AHMAN, *Primary Energy Efficiency of Alternative Powertrains in Vehicles*, Eney 26 (2001), pag. 973-989.
36. B. JOHANSSON, M. AHMAN, *A Comparison of Technologies for Carbon Neutral Passenger Transport*, Transportation Research Part D 7 (2002), pag. 175-196.
37. J.J.J LOUIS, *Well to Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Various Vehicle Technologies*, SAE 2001 World Congress, marzo 2001.
38. B. JOHANSSON, *The Economy of Alternative Fuels when Including the Cost of Air Pollution*, Transportation Research Part D 4 (1999,) pag. 91-108.
39. P. MISZEY, E. NEWSON, *Comparison of Different Vehicle Powertrains*, Journal of power sources 102 (2001), pag. 205-209.
40. K.A. ADAMSON, P. PEARSON, *Hydrogen and Methanol: a Comparison of Safety, Economics, Efficiencies and Emissions*, Journal of power sources 86 (2000), pag. 548-555.
41. A. BAUEN, D. HART, *Assessment of the Environmental Benefits of Transport and Stationary Fuel cells*, Journal of power sources 86 (2000), pag. 482-494.
42. *I costi ambientali e sociali della mobilità in Italia - Quarto Rapporto*", Amici della Terra-Ferrovie dello Stato – Anno 2002.
43. *I Costi e i Benefici Esterni del Trasporto*, ANFIA – ACI 2001.

# Introduzione ai **processi nucleari** a bassa energia nella materia condensata



Vengono riportate le analisi di evidenze sperimentali relative a possibili fenomeni nucleari a bassa energia nella materia condensata. Storia, risultati salienti e una loro possibile interpretazione teorica

**VITTORIO VIOLANTE\***  
**EMILIO SANTORO\*\***  
**FRANCESCA SARTO\*\***  
**LUIGI CAPOBIANCO\*\*\***  
**ALBERTO ROSADA\*\*\*\***

ENEA

\* UTS Fusione,

\*\* Tecnologie Fisiche Avanzate

\*\*\* Ospite c/o i Laboratori ENEA di Frascati

\*\*\*\* UTS, Materiali e Nuove Tecnologie



A distanza di circa quattordici anni dall'annuncio dell'ottenimento di reazioni nucleari in reticoli metallici a temperatura ambiente, nonostante il generale scetticismo da parte della maggior parte della comunità scientifica internazionale, in numerosi e prestigiosi laboratori internazionali continua un interessante lavoro di ricerca non privo di risultati promettenti.

A tale riguardo e con lo scopo di fornire sia una *review* dello stato dell'arte sia una possibile interpretazione del fenomeno, si vuole affrontare il problema delle Reazioni Nucleari a Bassa Energia nella materia condensata nell'ambito di una descrizione basata sullo studio dei processi nucleari che hanno luogo nei plasmi densi. La cornice teorica proposta, fondata su una visione elettrodinamica dei fenomeni, riconduce la materia condensata, nelle condizioni che caratterizzano il manifestarsi dei fenomeni oggetto dello studio, ad un plasma denso.

Gli argomenti esposti sono stati, nella quasi totalità dei casi, pubblicati (da alcuni degli autori) nella letteratura internazionale.

Un rapido excursus sui risultati sperimentali più significativi può consentire di comprendere la grande diversificazione degli approcci sperimentali.

Evidenze di fenomeni riconducibili a processi nucleari a bassa energia si sono manifestate in esperimenti di calorimetria accompagnati da misure di  $^4\text{He}$  e raggi X, durante esperimenti elettrochimici con catodi di palladio (lamine o *rod*). Catodi a doppia struttura hanno prodotto un imponente spostamento della composizione isotopica, rispetto al valore naturale tra  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$ . Esperimenti condotti stimolando con ultrasuoni un sistema di nano-particelle in acqua pesante hanno mostrato con chiarezza una produzione di eccesso di potenza e di  $^4\text{He}$ ; analoghi esperimenti effettuati stimolando con luce laser un sistema di nano-particelle confinate in un ambiente di deuterio gas hanno evidenziato, con la medesima chiarezza, una produzione di eccesso di potenza e di  $^4\text{He}$ . Micro-particelle

di palladio depositate su particolari supporti dielettrici, in presenza di deuterio gassoso hanno manifestato un evidente innalzamento di temperatura del letto con associata produzione di  $^4\text{He}$ . Emissione di raggi X e forti spostamenti della composizione isotopica di alcuni elementi, talvolta accompagnati da produzione di eccesso di potenza, sono stati osservati con esperimenti elettrolitici condotti su film di metalli quali palladio e nichel; analoghi risultati sono stati ottenuti bombardando membrane o film sottili di palladio deuterato con particelle cariche, come, ad esempio, ioni deuterio. I risultati poc'anzi citati si riferiscono ad esperimenti condotti in prestigiosi laboratori di ricerca governativi, universitari o di grandi industrie. Lo scopo principale di questa *review* è quello di offrire, prendendo spunto dalle evidenze sperimentali, una visione in grado di ricondurre l'insieme delle osservazioni, anche se apparentemente molto diversificate tra esse, all'interno di un'unica cornice teorica derivata dalla rappresentazione dei fenomeni come processi elettrodinamici in plasmi densi.

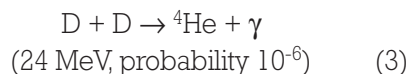
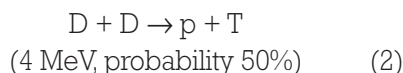
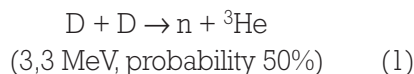
La problematica verrà affrontata attraverso una iniziale esposizione delle principali caratteristiche dei sistemi metallo idrogeno, con particolare riferimento agli idruri, a cui farà seguito una trattazione del problema della solubilizzazione dell'idrogeno e dei suoi isotopi nei reticoli metallici, sia attraverso un'analisi delle problematiche relative ai problemi di equilibrio termodinamico, sia attraverso una trattazione teorica dei processi di non equilibrio legati alla cinetica diffusionale nel reticolo. Verranno quindi affrontati gli aspetti di natura elettrodinamica, con particolare riferimento ai fenomeni collettivi degli elettroni e poi si esporrà uno studio, che parte, appunto, dalla natura elettrodinamica dei fenomeni, al fine di presentare sia una descrizione analitica di possibili meccanismi collisionali, all'interno del reticolo, sia una interpretazione dello spostamento dei canali di reazione rispetto a quanto generalmente osservato nei pla-

smi non densi o nel vuoto. Infine si affronterà il problema generale dei fenomeni di trasmutazione a bassa energia.

## L'inizio

Durante il mese di marzo del 1989 due eminenti elettrochimici, M. Fleishmann e S. Pons, dettero l'annuncio della scoperta che nuclei di deuterio (D), confinati nel reticolo metallico del palladio (Pd), davano luogo a reazioni di fusione nucleare a temperatura ambiente (fusione fredda)<sup>1</sup>. Il fenomeno forniva essenzialmente eccesso di potenza (come produzione di eccesso di calore) durante il caricamento, in elettrolisi con acqua pesante, di catodi di palladio; l'entità del calore prodotto era tale da rendere difficile se non impossibile una interpretazione in termini di reazione chimica. I bilanci di energia portavano a concludere che per spiegare l'entità dell'eccesso era necessario ritenere che esistessero legami chimici dell'ordine di diverse decine o centinaia di eV. La riproducibilità del fenomeno, tuttavia, risultava essere molto modesta.

La reazione di fusione tra nuclei di deuterio (D) è stata ampiamente studiata nella fisica nucleare e i canali di reazione noti, quando il processo avviene nel vuoto o in un plasma non denso sono:



Il primo *step* della reazione è sempre la formazione di un nucleo eccitato di  ${}^4\text{He}$  (instabile a causa dell'eccesso di energia); questo prodotto instabile decade, pertanto, secondo i canali (1-3).

I gruppi di ricerca, che inizialmente studiarono il fenomeno della fusione fredda, osservarono produzione di eccessi di potenza, con scarsa riproducibilità e senza signifi-

ficativa emissione di prodotti di reazione attesi, come previsto dai canali di reazione noti.

Neutroni e trizio, anche se con tecniche differenti, possono essere rivelati senza alcuna particolare difficoltà, pertanto, nella fase iniziale degli studi, queste ceneri nucleari sono state cercate come firma del processo nucleare ritenuto responsabile della produzione dell'eccesso di potenza talvolta osservato. Tuttavia le misure dimostravano che la produzione di trizio e di neutroni era diversi ordini di grandezza minore del valore atteso sulla base dell'eccesso di calore prodotto.

La scarsa riproducibilità, insieme all'assenza di neutroni durante la produzione di eccesso di potenza, convinse la maggior parte della comunità scientifica che il fenomeno annunciato era essenzialmente un errore o, al più, un processo sconosciuto di natura chimica. Tuttavia quest'ultima interpretazione obbligava ad accettare, come menzionato poc'anzi, l'esistenza di legami chimici di diverse decine o centinaia di eV. Questa situazione dette origine ad una controversia che si manifestò attraverso molte conferenze e *workshop* durante il primo anno dopo l'annuncio. Alcuni prestigiosi laboratori furono coinvolti con il compito di investigare il fenomeno. Le risposte furono, in generale, negative e la fusione fredda non fu accettata dalla comunità scientifica e fu definita cattiva scienza. Solo alcuni laboratori decisero di continuare a lavorare in questo campo così controverso. Nel 1991, in occasione della Seconda Conferenza Internazionale sulla Fusione Fredda, svoltasi a Como, lo scienziato statunitense Melvin Miles, del Naval Research Laboratory, per primo, mostrò risultati che sottolineavano l'origine nucleare del fenomeno, attraverso una correlazione tra la produzione di eccesso di potenza e la produzione di  ${}^4\text{He}$  quale cenere nucleare<sup>2</sup>. Inoltre Miles dimostrò che durante la produzione dell'eccesso di potenza venivano emessi raggi X di bassa energia. Questo

risultato, anche se ottenuto con scarsa riproducibilità, fu molto importante, in quanto dimostrava che la reazione  $D + D$ , nel reticolo del palladio, avveniva con produzione di  $^4\text{He}$  e calore, seguendo, pertanto, un canale di decadimento diverso rispetto a quelli relativi alla stessa reazione quando essa decorre nel vuoto o in un plasma non denso. Questa situazione era stata, peraltro, prospettata teoricamente dal fisico italiano Giuliano Preparata<sup>3</sup>.

La modesta riproducibilità fu la principale ragione per cui la fusione fredda fu respinta dalla comunità scientifica internazionale, anche se è lecito ricordare che la storia della scienza insegna che, talvolta, la modesta riproducibilità non impedisce che una nuova scoperta o un nuovo fenomeno vengano accettati come tali. Parlando di riproducibilità è stato detto<sup>4</sup>: "(...) Cosa significa riproducibile? Consideriamo un semplice esperimento da banco. Quando lo conduciamo scegliamo un campione e definiamo una procedura, quindi otteniamo dei risultati. Se riusciamo ad ottenere gli stessi risultati utilizzando lo stesso tipo di campione e la stessa procedura possiamo dire che l'esperimento è riproducibile. Uno stadio successivo consiste nel descrivere l'esperimento in una pubblicazione scientifica, in maniera tale che ogni altro ricercatore che effettua lo stesso esperimento, basandosi sul contenuto della pubblicazione, ottenga gli stessi risultati. Immaginiamo ora di condurre il nostro esperimento, prendendo nota accuratamente dei suoi parametri (campione e procedura), tuttavia, questa volta, la ripetizione dell'esperimento non consente di ottenere gli stessi risultati; in questo caso l'esperimento risulta essere irriproducibile. Esistono due possibili spiegazioni: o il primo esperimento era sbagliato oppure non abbiamo usato un campione identico e/o non abbiamo seguito la stessa procedura. Se il riesame del primo esperimento conduce alla conclusione che la misura era corretta e attendibile non resta che accettare la seconda

spiegazione. A tal punto ha inizio una ulteriore fase della nostra ricerca: possiamo cercare di comprendere quali siano gli aspetti, mal compresi, nella scelta del campione e della procedura, che possono aver condizionato i risultati. Non è corretto affermare, come molti hanno fatto per la fusione fredda, che l'assenza di riproducibilità equivale ad un esperimento errato. (...)".

Nel 1992, presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati, furono condotti esperimenti, con un accurato calorimetro a flusso, utilizzando elettrodi ottenuti da una lamina di palladio. I primi tre esperimenti, per i quali si utilizzava la stessa procedura, dettero, senza ombra di dubbio, evidenza di produzione di eccesso di potenza molto al di sopra della potenza immessa, con un segnale che era circa due ordini di grandezza più elevato dell'errore sperimentale.

Purtroppo il palladio a disposizione non consentì di realizzare più di tre elettrodi, pertanto, una volta utilizzato il materiale disponibile, si rese necessario l'acquisto di una nuova lamina di palladio, la quale, pur avendo le stesse caratteristiche commerciali della prima, proveniva da un diverso *batch* di produzione. La nuova serie di esperimenti, condotti con il nuovo materiale, osservando la stessa procedura adoperata nella prima serie, non fornì alcun eccesso di potenza significativo dopo settimane di elettrolisi.

Questa esperienza, alla luce dei risultati ottenuti, mostrava, come vedremo nel seguito, che il fenomeno della fusione fredda è un fenomeno a soglia. Ciò indusse ad intraprendere uno studio sugli aspetti metallurgici del palladio e sui meccanismi di trasporto degli isotopi dell'idrogeno nel reticolo.

### Gli sviluppi storici e lo stato dell'arte

Nel 1993, nel corso della Terza Conferenza Internazionale sulla Fusione Fredda, un altro scienziato statunitense, M. McKubre dello Stanford Research Institute della

California, mostrò un altro importante risultato con il quale si metteva bene in evidenza che la produzione di eccesso di potenza era un fenomeno a soglia, il quale aveva luogo, a temperatura ambiente, solo quando la concentrazione del deuterio nel palladio, espressa in frazione atomica, risultava circa eguale all'unità<sup>5</sup>. Inoltre, i dati sperimentali mostravano anche che, al disopra della soglia di innesco, l'eccesso di potenza aveva un comportamento parabolico rispetto all'aumentare della concentrazione di deuterio. Tale risultato fu di importanza fondamentale per lo sviluppo degli studi di scienza dei materiali svolti presso i Laboratori ENEA di Frascati nell'ambito del programma di ricerca sulla fusione fredda. Si comprese l'importanza, ai fini della riproducibilità, della conoscenza dello stato del materiale metallico. L'attenzione si spostò quindi dal problema della riproducibilità della produzione di eccesso di potenza a quello della riproducibilità delle condizioni in cui questo fenomeno aveva luogo. Questa impostazione, nel tempo, è risultata essere molto efficace ai fini del controllo del fenomeno e della sua riproducibilità, in particolare su campioni robusti di palladio, quali, ad esempio, lamine e membrane, per i quali, alla fine del 1996, si raggiunse

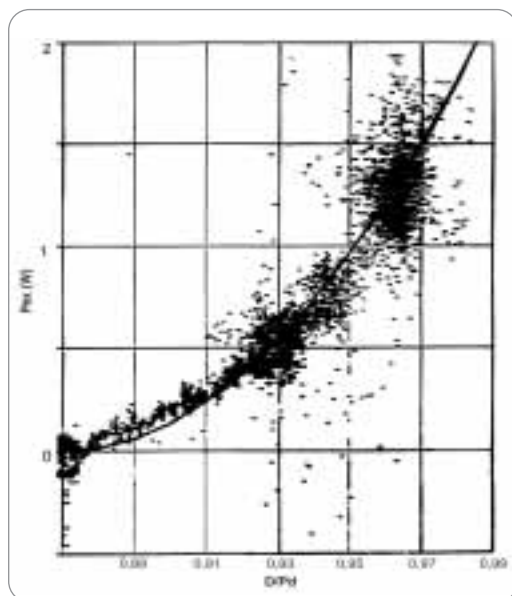
una riproducibilità quasi totale della produzione di eccesso di potenza.

Nel seguito, una parte del lavoro di ricerca fu svolta sia sulla identificazione della struttura metallurgica più idonea all'ottenimento di elevate concentrazioni di deuterio e/o idrogeno nel palladio, sia sulla comprensione teorica dei meccanismi controllanti il processo di solubilità e diffusione del gas nel metallo<sup>6-9</sup>. Una considerevole produzione scientifica è stata sviluppata, nel recente passato, al fine di ottenere una correlazione tra l'eccesso di potenza osservato e la quantità di <sup>4</sup>He prodotto dalla reazione di fusione ritenuta responsabile della produzione dell'eccesso di potenza<sup>10-12</sup>. I risultati, ottenuti con sperimentazioni rigorose, hanno mostrato, al di là di ogni ragionevole dubbio, l'esistenza di un nesso evidente tra l'anomalia termica e la produzione di <sup>4</sup>He, nonché l'emissione di raggi X di bassa energia contestualmente al fenomeno termico.

Uno sviluppo ulteriore della sperimentazione, in tale direzione, si è ottenuto utilizzando catodi a doppia struttura realizzati e sperimentati presso l'Università di Osaka e successivamente sperimentati anche presso Lo Stanford Research Institute della California (SRI)<sup>13-14</sup>. La particolarità dei catodi a doppia struttura risiede nel fatto che delle nano-particelle di palladio poroso (*palladium black*) vengono alloggiare in cilindri di palladio con pareti spesse alcuni millimetri, in grado di sopportare l'elevata pressione di deuterio (500-1000 atm) che si raggiunge all'interno del cilindro durante l'elettrolisi in acqua pesante.

Tali esperimenti evidenziarono molto chiaramente che nella materia condensata potevano aver luogo processi nucleari a bassa energia, in quanto fu possibile rivelare un fortissimo spostamento (fino ad un fattore superiore a 40.000), rispetto al valore naturale, del rapporto isotopico <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He. Lo studio dei profili di concentrazione di <sup>3</sup>He nel metallo fecero comprendere che questo isotopo dell'elio era stato prodotto

**Figura 1**  
Eccesso di potenza in funzione della concentrazione di deuterio nel palladio (frazione atomica) (risultato ottenuto da M. C. H. McKubre allo SRI - USA)



dal decadimento del trizio (isotopo radioattivo dell'idrogeno non presente in natura), del quale, in esperimenti di fusione fredda, era già stata segnalata la presenza in quantità non spiegabili con normali processi di arricchimento isotopico. Catodi a doppia struttura sono stati realizzati anche presso i Laboratori ENEA di Frascati e sperimentati, con successo, presso l'SRI<sup>15</sup>.

Alcuni gruppi di ricerca preferirono concentrare la loro attenzione su anomalie termiche che si manifestavano in alcuni esperimenti elettrochimici nei quali venivano usati acqua leggera e catodi realizzati con film sottili metallici. A tale proposito, uno studio effettuato dal Fusion Studies Laboratory dell'Università dell'Illinois evidenziò una variazione della composizione isotopica di alcuni elementi presenti nei film metallici utilizzati. Studi analoghi sono stati condotti anche presso l'Università dell'Okkaido in Giappone<sup>16</sup>. Tuttavia, molte critiche furono mosse nei riguardi di questi esperimenti, in quanto fu detto che i processi di elettrodeposizione potevano produrre inquinamenti dei film catodici capaci di ridurre fortemente il rapporto segnale rumore. Per questo motivo, gli sviluppi successivi di questi studi furono articolati in maniera tale da rimuovere tali dubbi, monitorando alcuni elementi marcatori e ricorrendo a sofisticate tecnologie per il controllo di eventuali inquinamenti al fine, appunto, di elevare quanto più possibile il rapporto segnale/rumore.

Un importante lavoro, con deuterio gassoso ed isotopi marcatori è stato svolto presso il centro ricerche della Mitsubishi<sup>17</sup>. Con una misura XPS (spettroscopia di fotoemissione mediante raggi X) è stata seguita l'evoluzione di isotopi marcatori depositati sulla superficie di un film sottile di palladio, depositato su un sottile strato di CaO, supportato a sua volta da una membrana di Pd. Sui campioni ove era stato depositato Cs si è osservata una progressiva diminuzione del Cs con comparsa di Pr, mentre sui campioni sui quali era stato depositato Sr si

è osservata, in maniera analoga, una progressiva diminuzione dello Sr con comparsa di Mo. Presso l'ENEA sono stati condotti, da chi scrive, esperimenti in elettrolisi su film sottili, rivolti a rivelare emissioni di raggi X e variazioni della composizione isotopica di alcuni elementi marcatori come ad esempio Cu, Zn e Ag<sup>18</sup>. Le misure condotte utilizzando un laboratorio classe 1000 e materiali puri, hanno consentito di elevare il rapporto segnale/rumore e di rivelare quindi una emissione di raggi X, nel range di energia compreso tra 2 e 20 keV, da parte di elettrodi a film sottile i quali, all'analisi SIMS (spettroscopia secondaria ionica di massa) o a quella di attivazione neutronica, hanno manifestato una forte variazione della composizione isotopica degli elementi marcatori.

Una particolare attenzione meritano i recenti risultati ottenuti da Y. Arata dell'Università di Osaka<sup>19</sup>, il quale è riuscito, stimolando con ultrasuoni nano-particelle di Pd poste in un bagno di acqua pesante, ad ottenere una notevole produzione di eccesso di potenza, accompagnata da una produzione di <sup>4</sup>He, riconducibile ad un processo di fusione D + D, quale responsabile del fenomeno termico. Lo stesso Arata ha poi ottenuto un analogo risultato stimolando con luce laser nano-particelle di Pd a contatto con deuterio gassoso. Questi ed altri risultati, nel corso degli anni, hanno contribuito a sostenere l'idea che nella materia condensata possano aver luogo, a bassa energia, processi nucleari, con modalità e percorsi differenti rispetto a quelli tipici dei plasmi prodotti in laboratorio.

## Materia condensata e decadimento nucleare

È stato detto che occorrono tre miracoli per poter spiegare il decorrere di processi nucleari, come la fusione D + D e più in generale reazioni a bassa energia, nella materia condensata. Il primo miracolo è un aumento imponente della probabilità che av-

venza una reazione nucleare. Se consideriamo, ad esempio, la reazione  $D + D$  poc' anzi menzionata ed estrapoliamo alle basse energie le probabilità di reazione note per le alte energie, troviamo che la probabilità per questo evento è più bassa di oltre 50 ordini di grandezza rispetto alla probabilità attesa in base all'eccesso di potenza misurato. Pertanto, non dovrebbe esservi alcuna possibilità che avvenga una reazione di fusione  $D + D$  a temperatura ambiente.

Il secondo "miracolo" riguarda l'assenza di una adeguata produzione di trizio e di neutroni, in grado di giustificare la produzione di eccesso di potenza in termini della nota reazione di fusione tra nuclei di deuterio. Occorre pertanto assumere che le probabilità relative delle tre branche (1-3) sono profondamente modificate, dando luogo al seguente scenario: le prime due branche diventano altamente improbabili, mentre la terza, che porta alla formazione di  $^4\text{He}$ , raggiunge una probabilità, che generalmente è circa del 100%.

L'assenza di produzione di raggi  $\gamma$ , tipica della terza branca, rende obbligatoria l'accettazione del terzo "miracolo": l'eccesso di energia, che è pari a 24 MeV per evento, è trasformato, in qualche maniera, in calore, il quale viene poi rilasciato ad una regione del reticolo sufficientemente estesa da poter essere considerata come un *reservoir* infinito.

Nel prosieguo verrà proposto uno sviluppo teorico in grado di fornire una possibile spiegazione dei tre miracoli, i quali, in linea di principio, possono essere chiamati in causa per lo studio di altri processi nucleari a bassa energia osservati nella materia condensata. Con riferimento alla reazione di fusione tra nuclei di deuterio, possiamo dire che la cenere nucleare attesa è proprio  $^4\text{He}$ ; per questo motivo la ricerca sulla misura di elio ha assunto una importanza rilevante nello scenario più generale della ricerca di ceneri quale firma del decorrere di fenomeni nucleari nella materia condensata.

Accettare i tre miracoli non comporta, in

nessun caso, la violazione delle leggi fondamentali della fisica: ad esempio, massa ed energia si conservano.

La cornice interpretativa generale deve basarsi sul fatto che proprio lo svolgersi dei fenomeni nella materia condensata, invece che in un plasma o nel vuoto, costituisce la differenza.

Il problema fondamentale diventa il seguente: possiamo accettare che una struttura atomica, come un reticolo metallico, condizioni, in qualche maniera, il percorso di un processo nucleare? E come?

È noto che il sistema atomico è caratterizzato da distanze, tempi ed energie rispettivamente dell'ordine di  $10^{-10}$  metri,  $10^{-12}$  secondi e  $10^0$  eV. Di contro, il sistema nucleare è caratterizzato da distanze, tempi ed energie rispettivamente dell'ordine di  $10^{-15}$  metri,  $10^{-20}$  secondi e  $10^6$  eV.

Apparentemente, i due sistemi sembrano incapaci di interagire. Tuttavia esistono due esempi di interazione tra questi due universi ben noti e comunemente accettati. Il primo è l'*Effetto Mossbauer*, riguardante l'emissione di fotoni (raggi  $\gamma$ ) da un nucleo eccitato, il quale, decadendo allo stato fondamentale, trasferisce in questo modo l'energia in eccesso. In alcune circostanze, caratterizzate dallo stato microscopico del reticolo nel quale è confinato il nucleo che decade, questa emissione avviene con caratteristiche differenti rispetto a quando lo stesso decadimento avviene nel vuoto. Il reticolo assorbe completamente – comportandosi come un tutt'uno – l'energia di rinculo del nucleo, dando luogo ad una significativa variazione della riga di emissione. È opportuno, a tale riguardo, sottolineare che le energie coinvolte nell'*Effetto Mossbauer* sono dell'ordine dei keV, mentre le energie tipiche in gioco in un processo di fusione sono dell'ordine dei MeV. Tuttavia, da un punto di vista qualitativo, è significativo che tutti gli atomi di un cristallo partecipino per assorbire l'energia emessa durante una emissione fotonica.

Altro esempio di interazione (elettrodinami-

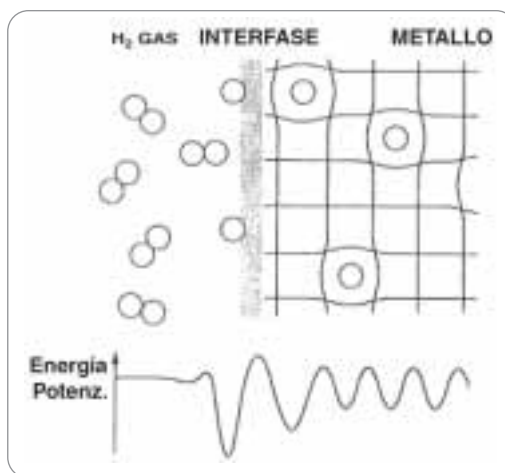
ca) tra atomi e nuclei è il processo di conversione interna: esso interviene sul decadimento di un nucleo eccitato il quale, invece di trasferire il proprio eccesso di energia attraverso una emissione  $\gamma$ , preferisce, con una certa probabilità, un accoppiamento con un elettrone di *shell* K, che viene emesso come  $\beta^-$ . È stato osservato che la probabilità di decadimento per conversione interna è condizionata dall'ambiente chimico che circonda il nucleo che decade.

Vedremo che per spiegare la genesi di reazioni nucleari nella materia condensata ed il decadimento dei nuclei prodotti, si potrà chiamare in causa un meccanismo elettrodinamico. Da un lato esso infatti assicura il superamento della barriera Colombiana, dall'altro consente un accoppiamento tra il nucleo che decade ed il reticolo.

## Aspetti di scienza dei materiali

Nel corso degli ultimi quattordici anni, lo studio dell'interazione degli isotopi dell'idrogeno con i metalli ha guadagnato un interesse crescente tra gli elettrochimici, i fisici dello stato solido, i fisici nucleari, i metallurgisti, gli ingegneri dei materiali e tutti quei ricercatori che contribuiscono a trovare una ragionevole interpretazione dei fenomeni nucleari che avvengono nella materia condensata a bassa energia. Un sistema metallo-idrogeno è costituito da un metallo, da idrogeno in fase gassosa o condensata e da una interfase. Il primo approccio alla materia richiede la conoscenza del meccanismo di reazione dell'idrogeno all'interfase e del processo diffusivo di trasferimento di materia nel reticolo metallico che poi conduce alla formazione di una soluzione solida.

Un idruro metallico è definito come una singola fase composta da un metallo ospite e da idrogeno, come ad esempio:  $\text{PdH}_{0.66}$ ,  $\text{MgH}_2$ ,  $\text{LaNi}_5\text{H}_{6.5}$ . La conoscenza delle proprietà di questi materiali e gli effetti isotopici indotti dalla dissoluzione di deuterio e trizio, sono aspetti fondamentali di questo



**Figura 2**

Rappresentazione schematica della dissociazione di idrogeno molecolare all'interfase metallica e dissoluzione dell'idrogeno atomico nel bulk

studio. Nel prosieguo, lo studio di particolari sistemi metallo-idrogeno consentirà di indagare la possibilità che due particelle confinate nel reticolo (ad esempio protoni o deutoni) possano avvicinarsi fino al punto da produrre una reazione nucleare<sup>20-25</sup>.

In figura 2 è mostrata una schematica rappresentazione mono-dimensionale dell'idrogeno gassoso che si solubilizza (assorbe) in un metallo. Una molecola di idrogeno che si avvicina al metallo può essere dissociata all'interfase, adsorbita da opportuni siti superficiali e adsorbita nei siti interstiziali del metallo ospite. Quando la concentrazione locale dell'idrogeno supera un certo limite, precipita una fase idruro. Durante il caricamento elettrochimico, la polarizzazione catodica del metallo ospite produce una reazione in cui un trasferimento di elettroni trasforma l' $\text{H}_2\text{O}$  adsorbita in H e OH adsorbiti.

La termodinamica della formazione degli idruri è descritta dalle isoterme pressione-composizione, mostrate in figura 3.

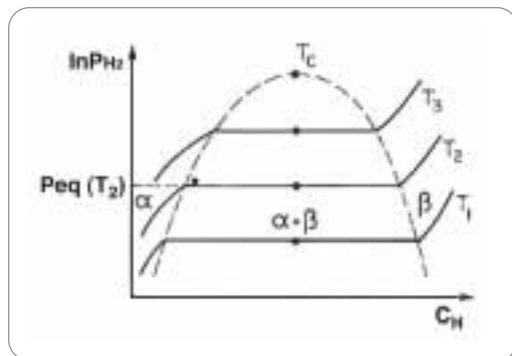
L'idrogeno si solubilizza nel metallo come soluzione solida (fase  $\alpha$ ). La concentrazione di idrogeno nel metallo aumenta all'aumentare della pressione esterna di  $\text{H}_2$ , conseguentemente inizia a formarsi la fase  $\beta$ .

Se l'interfase è elettrochimica, il potenziale elettrochimico sostituisce la pressione dell'idrogeno secondo una legge tipo Nernst, come si vedrà nel seguito.

La coesistenza delle due fasi è caratterizza-

**Figura 3**

Isoterme pressione composizione per la soluzione solida di idrogeno con formazione dell'idruro



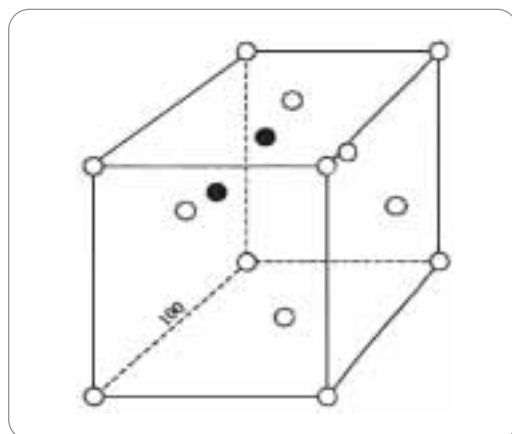
ta da un plateau: la sua estensione determina quanto idrogeno può essere accumulato con una piccola variazione della pressione. La regione di coesistenza delle due fasi ha termine al punto critico  $T_c$ . Il plateau  $p_{eq}(T)$  dipende fortemente dalla temperatura.

La maggior parte dei reticoli metallici si espande durante il processo di dissoluzione dell'idrogeno; il cristallo si modifica in maniera significativa e si forma un sottoreticolo idrogeno. L'effetto isotopico produce un aumento della pressione di equilibrio del deuterio e del trizio rispetto a quella dell'idrogeno. La posizione di equilibrio dell'idrogeno e dei suoi isotopi nei siti interstiziali è ottenuta sperimentalmente mediante diffrazione neutronica; non esiste evidenza sperimentale di *cluster* di idrogeno negli idruri.

In figura 4 è mostrata la cella elementare del reticolo del palladio (cubico a facce centrate, gli atomi del metallo sono contrassegnati dalle sfere bianche), gli atomi di idrogeno formano l'idruro collocandosi nei siti ottaedrici che si trovano sugli spigo-

**Figura 4**

Cella elementare del reticolo del palladio



li della cella, al centro tra due atomi di palladio. Durante il processo diffusivo, a temperatura prossima a quella ambiente, gli atomi di idrogeno diffondono da un sito ottaedrico ad un altro, superando una barriera di energia di circa 0,2 eV. Le posizioni contrassegnate dalle sfere scure sono i siti tetraedrici, accessibili all'idrogeno, come vedremo nel seguito, ad elevate concentrazioni e attraverso il superamento di una barriera di di energia di 0,3 eV.

Il primo passo verso la formazione dell'idruro metallico e della soluzione solida da idrogeno gassoso molecolare o da caricamento elettrochimico avviene alla superficie del metallo ospite. L'interazione di  $H_2$  consiste di una adesione della molecola alla superficie, di un chemiadsorbimento dissociativo, di un processo di diffusione superficiale e di dissoluzione nella regione prossima alla superficie o nel *bulk* del metallo. La dissoluzione dell'idrogeno nel metallo, a cui segue la formazione dell'idruro metallico, perturba fortemente gli elettroni ed i fononi<sup>(1)</sup> del reticolo ospite. Gli effetti osservati più rilevanti sono:

1. l'espansione del reticolo, la quale spesso comporta una variazione della struttura del cristallo;
2. il potenziale attrattivo dei protoni influenza quelle funzioni d'onda del metallo che hanno una densità finita nei siti dell'idrogeno e conduce alla formazione della banda relativa ai legami idrogeno-metallo, al disotto della banda-d del metallo;
3. l'apporto di elettroni prodotto dall'ingresso degli atomi H produce uno spostamento del livello di Fermi.

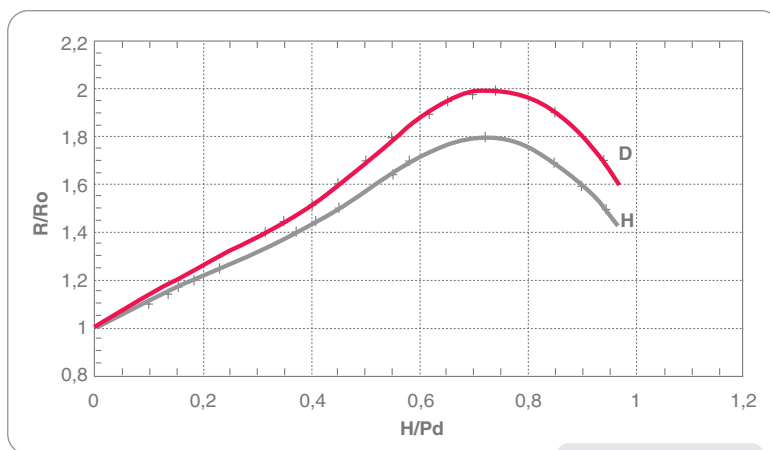
Gli atomi di idrogeno disciolti nel metallo danno luogo a fenomeni di trasporto con scale temporali molto diverse da quelle tipiche degli atomi metallici. Gli atomi H vibrano nei siti interstiziali a frequenze molto più elevate di quelle tipiche degli atomi metallici vi-

<sup>1</sup> I modi di vibrazione degli atomi del reticolo vengono chiamati fononi e sono il corrispondente vibrazionale "meccanico" dei fotoni, quanti di radiazione elettromagnetica.



cini, con ampiezze dell'ordine di 0,1-0,2 Å. Un atomo di idrogeno, dopo numerose oscillazioni in un sito, può saltare in un altro sito. Poiché il palladio è il metallo maggiormente investigato, nel prosieguo verranno esposte le caratteristiche salienti di questo materiale a seguito di una idrurazione.

- a) È stato osservato<sup>26-27</sup> che tra  $x = 0,6$  e  $x \approx 1$  il coefficiente di diffusione dell'idrogeno nel palladio aumenta di almeno due ordini di grandezza fino a  $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ .
- b) È noto<sup>28-29</sup> che la variazione di volume ( $\Delta V/V$ ) della cella reticolare del palladio in funzione della concentrazione di idrogeno è una linea retta, la quale mostra un deciso cambio di pendenza in prossimità di  $x = 0,8$ , il che indica una diversa interazione con il reticolo.
- c) Misure di suscettività magnetica e di calore specifico elettronico<sup>30</sup> mostrano che la densità degli stati al livello di Fermi diminuisce quando aumenta il contenuto di idrogeno. Tuttavia, misure di effetto Hall<sup>31</sup> mostrano una rapida diminuzione della costante di Hall intorno a  $x = 0,83$ , in corrispondenza di un aumento della resistività elettrica. Questa evidenza porta a ritenere che alle elevate concentrazioni altri portatori di carica, come le lacune elettroniche, contribuiscano alla conducibilità del materiale. La variazione della resistività dell'idruro di palladio consente di stimare il livello di concentrazione di idrogeno nel reticolo. L'andamento della resistenza elettrica dell'idruro di palladio, in funzione della concentrazione di idrogeno (deuterio) è mostrato in figura 5.
- d) La configurazione elettronica del palladio è  $[\text{Kr}]4d^{10}$ ; comunque il suo comportamento metallico conduce all'ibridizzazione con la banda 5sp. Gli elettroni riempiono la banda 4d fino al livello dell'energia di Fermi, lasciando 0,36 stati disponibili per atomo di palladio al top della banda. Nel composto palladio-idrogeno gli elettroni riempiono un gruppo di stati al disotto del livello di



**Figura 5**

Andamento della resistenza dell'idruro di palladio, normalizzata rispetto a quella del palladio puro, in funzione della concentrazione di idrogeno (deuterio D) in frazione atomica

Fermi<sup>30</sup>, quindi riempiono gli stati nelle bande 4d e 5sp. Questa è una operazione dal basso costo energetico fino a quando sono accessibili stati liberi e coincide con il plateau dell'isoterma di adsorbimento della figura 3. Dopo diventa obbligatorio un innalzamento dell'energia di Fermi, il che è in genere molto costoso in termini di bilancio di energia per il sistema e si traduce in una brusca variazione della pendenza delle isoterme, come risulta dalla figura 3.

Queste caratteristiche mostrano che la dissoluzione degli isotopi dell'idrogeno in un metallo come il palladio modifica fortemente il sistema e le proprietà del sistema, anche se in questi termini non esiste evidenza di un meccanismo in grado di produrre una interazione nucleare tra isotopi dell'idrogeno confinati nel reticolo, in quanto, sulla base delle conoscenze disponibili, la distanza tra le particelle resta dell'ordine di alcuni Å. Nel prosieguo si vedrà che, un meccanismo capace di ridurre queste distanze può essere ricondotto al comportamento coerente degli elettroni al livello di Fermi.

### Equilibrio termodinamico e solubilità dell'idrogeno nei metalli

La termodinamica ed i fenomeni di equilibrio che caratterizzano i sistemi metallo-idrogeno sono aspetti fondamentali sia per lo studio della riproducibilità della soglia di

caricamento sia per il controllo di gran parte dei processi riconducibili a reazioni nucleari a bassa energia che avvengono nella materia condensata.

Poiché è stato dimostrato che la produzione di eccesso di potenza nel sistema palladio-deuterio è un fenomeno a soglia, il primo passo da compiere è quello di identificare una opportuna funzione che ci consenta di descrivere la termodinamica dell'equilibrio la quale definisce il limite di concentrazione di deuterio che può essere raggiunto nel reticolo metallico. Questa funzione è la ben nota funzione termodinamica potenziale chimico, essa ci dice come cresce o decresce l'energia di un sistema quando rispettivamente aggiungiamo o sottraiamo una particella. Il limite di concentrazione per l'idrogeno (deuterio) che si assorbe in un metallo è raggiunto quando il potenziale chimico dell'idrogeno nel reticolo e nell'ambiente esterno risultano essere eguali.

Il potenziale chimico dell'idrogeno che si solubilizza in un metallo, come ad esempio il palladio, se sono assenti campi di forza in grado di modificare l'energia libera del sistema, si scrive come segue:

$$\mu_H = \mu_H^0 + RT \cdot \ln \frac{x}{1-x} + \Delta\mu_H \quad (4)$$

ove  $\mu_H^0$  è il potenziale standard, il secondo termine è il termine configurazionale della distribuzione statistica dell'idrogeno nei siti ottaedrici (questo termine diventa dominante quando la concentrazione di idrogeno, in frazione atomica, diventa prossima all'unità), l'ultimo termine contiene la somma del contributo ionico ed elettronico<sup>32</sup>.

Un'analisi del termine logaritmico che compare nella equazione (4) porta a concludere che, quando la concentrazione di idrogeno (o altro suo isotopo) nel reticolo raggiunge un valore, espresso in frazione atomica, molto prossimo all'unità, il potenziale chimico del soluto tende all'infinito. Questa è una situazione termodinamicamente inaccettabile, quindi è plausibile

che il sistema si riorganizzi assumendo una configurazione a cui compete una energia libera più elevata, ma un potenziale chimico finito. Di conseguenza, è lecito supporre che la frazione di atomi di idrogeno che eccede l'unità finisca con il collocarsi negli altri siti accessibili del sottoreticolo, ossia nei siti tetraedrici.

La solubilità di un gas in un metallo, intesa come concentrazione del gas nel metallo all'equilibrio, ad una data temperatura  $T$  e a pressione costante  $P$ , può essere calcolata facendo uso della termodinamica statistica.

### Equilibrio con ambiente esterno in fase gassosa

In prima analisi affrontiamo il problema della dissoluzione di un gas in un reticolo metallico, assumendo che il metallo si trovi alla temperatura  $T$  ed in contatto con il gas  $G_2$  (i.e.  $H_2$ ) alla pressione  $P$ . Il potenziale chimico, funzione della pressione  $P$  e della temperatura  $T$ , vale  $\mu_{G_2}$  all'esterno del metallo. Il gas adsorbito alla superficie penetra, in forma atomica, nel metallo e diffonde mediante salti non correlati, attraverso i siti interstiziali. Il potenziale chimico degli atomi assorbiti nel reticolo è dato dalla condizione di equilibrio per la seguente reazione:



ossia:

$$\mu_G = \frac{1}{2} \mu_{G_2} \quad (6)$$

dove

$$\mu_{G_2} = \mu^0 + RT \ln(f^*). \quad (7)$$

$R$  è la costante dei gas e  $f^*$  è la fugacità del gas. Quest'ultima può essere calcolata mediante l'equazione di stato per gas non ideali:

$$f^* = \frac{p^2 V}{RT} \quad (8)$$

dove  $V$  è il volume esterno.

## Equilibrio in un sistema elettrochimico

L'assorbimento di idrogeno, da parte di un reticolo, durante un processo di polarizzazione catodica di un metallo è direttamente legato al meccanismo di reazione elettrochimica riconducibile alle due reazioni seguenti:

1) reazione di Tafel:



2) reazione di Volmer:



$H_a$  è l'idrogeno adsorbito sulla superficie metallica e  $H^+$  è il protone che si solubilizza nel reticolo.

La teoria sviluppata da Enyo<sup>33-36</sup> stabilisce una relazione tra la concentrazione superficiale, la sovratensione  $\eta$ , e la densità di corrente  $J$ . Il concetto che il potere riducente del catodo possa essere tradotto in una pressione efficace è comunemente accettato ed è deducibile dalla ben nota equazione di Nernst, la quale però non può essere applicata ai sistemi oggetto del nostro studio. Per essi è stata ricavata una opportuna formulazione da Enyo.

Con riferimento alle reazioni di Tafel e Volmer<sup>9-10</sup>, possiamo scrivere per esse le variazioni di energia libera di Gibbs in funzione della variazione di potenziale chimico:

$$-\Delta g_T = \mu_{H_2} - 2\mu_H \quad (11)$$

$$-\Delta g_V = \mu_H - (\mu_{H^+} + \mu_{e^-}) \quad (12)$$

L'attività termodinamica  $a$  è legata al potenziale chimico dalla relazione:

$$\mu = \mu^0 + RT \ln(a) \quad (13)$$

Indicando con  $a_H$  e  $a_H^0$  rispettivamente l'attività dell'idrogeno adsorbito ed il suo valore in condizioni di corrente di equilibrio<sup>36</sup>, le equazioni (11) e (12) possono essere riscritte come segue:

$$-\Delta g_T = -2RT \ln\left(\frac{a_H}{a_H^0}\right) = -2RT \ln(\gamma_H) \quad (14)$$

$$-\Delta g_V = F\eta + RT \ln(\gamma_H) \quad (15)$$

Sommando la (14) e la (15) otteniamo la variazione complessiva di energia libera per l'intero processo:

$$-\Delta G = 2F\eta \quad (16)$$

Poiché  $\gamma_{H_2} = (\gamma_H)^2$ , la pressione equivalente di idrogeno può essere espressa come:

$$(17)$$

ossia:

$$P_{H_2} = \exp\left(-\frac{2mf\eta}{m+2}\right) \quad (18)$$

dove:

$$m = \frac{\Delta g_T}{\Delta g_V}; f = \frac{F}{RT} \quad (19)$$

L'equazione (18) è simile all'equazione di Nernst e mostra che nell'intervallo dei valori tipici di sovratensione che si raggiungono durante i processi elettrochimici, la pressione efficace dell'idrogeno può raggiungere valori fino a  $10^6$  atm.

Questo valore chiarisce perché, negli esperimenti di fusione fredda, nella maggior parte dei casi, si è adottato il procedimento di caricamento elettrochimico invece del procedimento in gas.

## Conclusioni

Al termine di questa prima esposizione è possibile focalizzare l'attenzione su alcuni aspetti del problema in particolare. In primo luogo, il consistente sforzo sperimentale che è stato compiuto nel corso di questi anni in molti paesi, al fine di dimostrare non solo che il fenomeno della produzione di eccesso di potenza esiste, ma anche che la natura del fenomeno è effettivamente nucleare.

Si è potuto, inoltre, stabilire che nel caso del processo di fusione fredda il fenomeno è a soglia e che esistono indicazioni sufficienti per ritenere che, nella materia condensata, in determinate condizioni, avvengono anche altri processi di natura nucleare diversi dalla reazione:



## Bibliografia

1. M. FLEISHMANN, S. PONS, *Electrochemically Induced Nuclear Fusion of Deuterium*, J. Electroanal. Chem., 261, 301 (1989); J. Electroanal. Chem., 263, 197 (1989).
2. M.H. MILES, B.F. BUSH, G.S. OSTROM, J.J. LAGOWSKI, *Heat and Helium Production in Cold Fusion Experiments*, Como '91, 363 (1991).
3. G. PREPARATA, *Some Theoretical Ideas*, Trans. Fusion Technology. 26, 397 (Dec. 1994).
4. F. SCARAMUZZI, *La Fusione Fredda Otto Anni Dopo*, Energia Ambiente e Innovazione N.1 (1997).
5. M.C.H. MCKUBRE, S. CROUCH-BAKER, A.M. RILEY, S.I. SMEDLEY, F.L. TANZELLA, *Excess of Power Observations in Electrochemical Studies of the DIPd System: the Influence of Loading ICCF3*, 5 (1993).
6. F. DE MARCO, A. DE NINNO, A. FRATTOLILLO, A. LA BARBERA, F. SCARAMUZZI, V. VIOLANTE, Progress Report on the Research Activities on Cold Fusion at ENEA Frascati, Proc. Six<sup>th</sup> International Conference on Cold Fusion, October 13-18, 1996, Toya, Japan, (145).
7. A. DE NINNO, A. LA BARBERA, V. VIOLANTE, *Selection of Palladium metallurgical parameters to achieve very high loading ratios*, Proc. Six<sup>th</sup> International Conference on Cold Fusion, October 13-18, 1996, Toya, Japan (192).
8. A. DE NINNO, A. LA BARBERA, V. VIOLANTE, *Deformations Induced by High Loading Ratios in Palladium-Deuterium Compounds*, J. Of Alloys and Compounds, 253-254 (1997) 181-184.
9. A. DE NINNO, A. LA BARBERA, V. VIOLANTE, *Consequences of Lattice Expansive Strain Gradients on Hydrogen Loading in Palladium*. Phys. Rev. B, Vol. 56, N. 5 (1997) 2417-2420.
10. D. GOZZI, F. CELLUCCI, L. CIGNINI, G. GIGLI, M. TOMELLINI, E. CISBANI, S. FRULLANI, G.M. URUIOLI, *Erratum to "X-Ray, Heat Excess and <sup>4</sup>He in the DIPd System"*, J. Electroanal. Chem. 435 (1997) 251-271.
11. Y. ARATA, Y.C. ZHANG, *Anomalous Difference between Reaction Energies Generated within D<sub>2</sub>O Cell and H<sub>2</sub>O Cell*. Jpn. J. App. Phys. Vol. 37 (1998) 1274-1276.
12. Y. ARATA, Y.C. ZHANG, *Observation of Anomalous Heat and Helium-4 Production from Highly Deuterated Palladium Fine Particles*, Jpn. J. App. Phys. Vol. 38 (1999) 774-775.
13. Y. ARATA, Y.C. ZHANG, *Deuterization and Deuterium Reactions in the Electrolyses of D<sub>2</sub>O with the double Structure Cathode and the Bulk Cathode*. Jpn. J. App. Phys. Vol. 39 (2000) 4198-4202.
14. W. CLARKE, B. OLIVER, M. MCKUBRE, F. TANZELLA, P. TRIPODI, *Search for <sup>3</sup>He and <sup>4</sup>He in Palladium-Black from Arata-Style Palladium cathodes, II; Evidence for Tritium Production*, Fusion Science and Technology, 40, September 2001.
15. M. MCKUBRE, V. VIOLANTE ET AL., *Progress Towards Replication*, Proceedings ICCF-9, Pechino Maggio 2002.
16. T. MIZUNO, *Nuclear Transmutations*, Infinite Energy Press, 1997.
17. Y. IWAMURA, M. SAKANO, T. ITHO. *Elemental Analysis of Pd Complexes Effects of D<sub>2</sub> Gas Permeation*. Jpn. J. Appl. Physics Vol 41 (2002) pp 4642-4650.
18. V. VIOLANTE, M. MCKUBRE ET AL., *X-Ray Emission During Electrolysis of Light Water on Palladium and Nickel Thin Films*, Proceedings ICCF-9, Pechino Maggio 2002.
19. Y. ARATA, HIROSHI FUJITA, Y.C. ZHANG, *Intense deuterium nuclear fusion of pycnodeuterium-lumps coagulated locally within highly deuterated atom cluster*. Proc. Japn Acad., 78, Ser. B (2002).
20. L. SHLAPBACH, *Hydrogen and its Isotopes in and on Metals*, Conference Proc. Vol. 33 "The Science of Cold Fusion. T. Bressani, E. Del Giudice, G. Preparata (Eds). Italian Phys. Soc., Bologna 1991.
21. W.M. MULLER, J.P. BLACKLEDGE, G.G. LIBOWITZ, *Metal Hydrides* (Academic Press, New York 1968).
22. G. ALEFELD, J. VOLKL, *Hydrogen in Metals*, Vols. I and II, Topics in Applied Physics Vols. 28 and 29, Springer-Verlag Berlin, 1978.
23. G. BAMBAKIDIS, R.C. BOWMANN, *Hydrogen in Disordered and Amorphous Solids*, NATO ASI, Series B: Physics Vol 136 (plenum Press, New York 1986).
24. L. SCHLAPBACH, *Hydrogen in Intermetallic Compounds*, Vol I and II, Springer Topics in Applied Physics, 63 (1988) and 67 (1990), Springer Verlag Berlin.
25. J.J. REILLY, G.D. SANDROCK, Sci. Am. 242, 118 (1980).
26. G. MENGOLI ET AL., *Surface and Bulk Effects in the Extraction of Hydrogen from Highly Loaded Pd Sheet Electrodes*, J. Electroanal. Chem., 350, 57 (1993).
27. V.I. CHERNENKO, T.G. YAKUNINA, *Diffusion of Hydrogen through Pd Membranes* Elektrokhimiya, 18, 7, 904 (1982).
28. H. PEISEL, *Lattice Strains Due to Hydrogen in Metals*, *Hydrogen in Metals*, Vol I, p. 53, G. Alefeld and J. Volkl, Eds., Springer-Verlag, Berlin (1978).
29. J.E. SHIRBER, B. MOROSIN, *Lattice Constant of  $\beta$ -PdH<sub>x</sub> and  $\beta$ -PdD<sub>x</sub> with x near 1.0*. Phys. Rev. B, 12, 1, 117, (1975).
30. J. ZBANSNIK, M. MAHNING, *The Electronic Structure of Beta-Phase Palladium Hydride*, Z. Phys. B, 23, 15 (1976).
31. R. WISNIEWSKY, A. ROSTOKY, *Hall Effect in The Pd-H System*, Phys. Rev. B, 3,2,251 (1971).
32. E. WICKE, H. BRODOWSKY, *Hydrogen in Palladium and Palladium Alloys*, *Hydrogen in Metals II*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1978) Chap. 3.
33. T. MAOKA, M. ENYO, Surf. Technology, 9, 147 (1979).
34. M. ENYO, J. Electroanal. Chem., 134, 75 (1982).
35. M. ENYO, P.C. BISWAS, J. Electroanal. Chem., 357, 67 (1993).
36. B.E. CONWAY, J. O'M. BOCKRIS, E. YEAGER, S.U.M. KHAN, R.E. WHITE, *Comprehensive Treatise of Electrochemistry*, Vol. 7, Chap. 5, p. 241, Plenum Press, New York (1983).

# Biomasse: dal legno “calore sostenibile”



La biomassa è la più antica e tra le più rilevanti fonti di energia rinnovabile a livello mondiale. Le innovazioni tecnologiche nel settore rendono il riscaldamento dei grandi edifici sensibilmente più economico di quello convenzionale e comparabile nelle emissioni di gas e polveri

**GIUSEPPE TOMASSETTI \***  
**LUCA CASTELLAZZI\*\***  
**FRANCESCO VIVOLI\*\***

ENEA

\* Unità di Agenzia

\*\* Fonti Rinnovabili  
e Cicli Energetici Innovativi

**S**i definiscono biomasse tutte quelle sostanze a matrice organica, appartenenti al mondo animale o vegetale, aventi stato fisico solido, liquido o gassoso, che possono essere impiegate a scopo energetico; l'energia chimica in esse contenute deriva, in ultima analisi, dal sole ed è accumulata attraverso la sintesi clorofilliana.

Nell'ambito delle fonti rinnovabili di energia il termine biomassa si applica solo alle sostanze che hanno la possibilità di essere rinnovate in termini di tempo congruenti con la vita umana, per cui sono escluse quelle forme completamente fossilizzate, quali carboni, ligniti, catrami, petroli e metano.

Le biomasse costituiscono una forma sofisticata di accumulo dell'energia solare. Questa, infatti, consente alle piante di convertire la CO<sub>2</sub> atmosferica in materia organica, tramite il processo di fotosintesi. La biomassa è ampiamente disponibile ovunque e rappresenta una risorsa locale, pulita e rinnovabile.

Alcune tipologie di biomassa, come la legna da ardere, sono coltivate, raccolte e commercializzate direttamente per uso energetico. Al contrario, altre tipologie di biomasse hanno un ciclo principale di vita, di valore maggiore, come materia prima per l'industria delle costruzioni, per la carta, per i mobili o per uso alimentare, mentre sia gli scarti dei processi di trasformazione (lolla del riso) che i prodotti stessi a fine vita (pellets e cassette da imballo) possono essere poi valorizzati a scopo energetico. Sulla base di queste premesse le biomasse sono raggruppabili nelle seguenti famiglie principali:

1. biomasse forestali, legno ricavato da piante destinate alla combustione (legna da ardere);
2. colture energetiche dedicate (sia per combustione diretta che per trasformazione in biocombustibili);
3. residui delle attività agricole (paglie e potature arboricole), residui delle attività forestali (ramaglie e cime, scorze,

- ceppi), residui della lavorazione del legname (segatura, refili, intestature), residui agroindustriali (sanse, raspi, lolla di riso) e dell'industria alimentare (grassi di macellazione, noccioli di frutta, gusci);
4. rifiuti speciali a matrice biologica (tavole dei cantieri, legno delle demolizioni degli edifici, mobili a fine vita, oli di frittura, pali e traversine);
5. frazione biogenica dei rifiuti solidi urbani (carta, legno, tessuti, residui alimentari, residui di giardinaggio e potature urbane);
6. rifiuti organici degli impianti delle fognature urbane e degli allevamenti zootecnici.

Le biomasse, la prima fonte energetica che l'umanità ha avuto a disposizione, ancora oggi costituiscono la fonte di energia rinnovabile più importante in molti paesi in via di sviluppo e a livello mondiale, insieme all'idroelettrico, tra le più rilevanti.

Dal punto di vista tecnico le biomasse accumulano energia negli anni, fino a una densità, a parità di peso secco pari a poco meno della metà di quella del petrolio; è pertanto possibile utilizzare questa fonte rinnovabile se l'utente ne ha bisogno, mentre altre fonti rinnovabili sono disponibili solo in alcuni momenti del giorno e dell'anno, per di più difficilmente prevedibili; le biomasse, quindi, hanno per l'utente affidabilità comparabile con quella delle fonti fossili.

Ultimo aspetto, non meno importante è quello tecnologico. Sono già sul mercato dispositivi, a costi contenuti e complessità limitata, che permettono di utilizzare subito le biomasse anche in maniera decentrata.

## L'utilizzo delle biomasse in Italia

Per l'utilizzo delle biomasse coesistono oggi, in particolare in Italia, sia impianti con tecnologia obsoleta, quasi senza strumentazione, che impianti più moderni (dalle tecnologie del letto fluido alla fiamma rovescia), e tecnologie che invece puntano ad una valoriz-

zazione delle potenzialità termiche nel rispetto dei vincoli ambientali sulle emissioni. Il primo tipo di impianti è basato sull'autoconsumo di materiali di scarto considerati di poco valore, mentre nel secondo caso si impiegano combustibili lavorati per migliore efficienza e comodità del cliente, come i pellets, con prezzi che, nel caso di utilizzo per caminetti, possono arrivare ad avvicinarsi a quelli del gasolio. La coesistenza di tecnologie così disparate costituisce un indicatore del fatto che l'Italia non ha condotto, nel campo delle biomasse, una politica molto efficace; il punto più debole del sistema italiano delle biomasse per uso energetico è costituito dal mancato raccordo fra consumatori e disponibilità del combustibile. Inoltre il patrimonio boschivo risulta essere particolarmente degradato sia per la scarsa manutenzione, a causa dell'abbandono generalizzato della montagna e della ripidezza dei pendii, sia per il numero sempre crescente di incendi estivi nonostante ci siano decine di migliaia di persone impegnate nelle foreste, anche se a titolo di occupazione di emergenza. In compenso è generalizzato l'autoconsumo, il prelievo diretto, al limite dell'illegalità, sui terreni di proprietà pubblica.

Da queste considerazioni si evince che in Italia il combustibile "legno" costa e costerà sempre molto e perciò risulta proponibile solo per impieghi che accettino tali prezzi. È questo il caso del riscaldamento nel settore civile, ove si sostituiscono combustibili di qualità costosi e tassati per la produzione di elettricità; ove si sostituiscano combustibili meno tassati, non sembra invece avere prospettive all'infuori del CIP 6, fatto salvo l'uso di rifiuti per i quali gli aspetti di smaltimento sono preponderanti. Sono invece disponibili grandi quantità di scarti dalle attività agricole e dalle industrie dei mobili; inoltre vengono importate, prevalentemente dalla Germania, circa 1,5 milioni di tonnellate all'anno di legno dalle demolizioni, legno peraltro conside-

rato tossico e pericoloso per la presenza di vernici ed impregnanti, legno che in Italia viene riciclato per costruire pannelli in parte riesportati dall'industria come mobili.

La normativa presenta un altro punto debole. A partire dagli anni 80 si è venuta sviluppando una legislazione ambientale secondo la quale tutti gli scarti delle attività produttive dovevano essere classificati come potenzialmente pericolosi e perciò essere ammessi alla combustione solo in grandi impianti dotati di particolari strumentazioni di controllo.

Anche il sistema degli incentivi, per lungo tempo centrato solo sulla produzione di elettricità (dal CIP 6 ai certificati verdi), non è risultato particolarmente efficace per la diffusione di questa tecnologia. Inoltre, a livello di programmi di ricerca europei si è preferito considerare le biomasse come possibile fonte "alternativa" e non "integrativa" di quella fossile; sono stati così privilegiati e finanziati progetti a lungo termine come quelli relativi alle colture energetiche dedicate, alla gassificazione, alla produzione di biocombustibili, piuttosto che concentrarsi sulle problematiche della combustione di prodotti già commerciali, dai caminetti alle stufe, fino alle caldaie.

Questo approccio si è adattato male alla realtà italiana, dove la produzione di biomassa non è concentrata nelle grandi segherie come in Svezia e Canada, ma avviene in modo molto diffuso su tutto il territorio; per questo motivo gli impianti dedicati alla produzione di sola elettricità (CIP 6) stentano a trovare oggi il materiale a loro necessario e, per via dei costi di esercizio, difficilmente continueranno ad operare quando gli incentivi non saranno più elargiti.

Tuttavia negli ultimi anni la situazione si è finalmente evoluta; infatti nel 1999 è stato messo in opera un sistema di incentivi per gli impianti di teleriscaldamento nelle zone montane, e nel marzo 2002, un decreto legislativo ha classificato le biomasse residuali

**Figura 1**  
Pellets di legno



Fonte: AA.VV., *Combustibili legnosi: calore sostenibile per gli edifici residenziali*, ENEA 2002

fra i combustibili solidi ammissibili, anche se sussistono alcune incongruenze con il complesso delle altre leggi; inoltre i decreti sull'efficienza energetica del 24/4/2001, "certificati bianchi", valorizzano in modo adeguato il calore prodotto dalle biomasse. Infine l'entrata nel mercato del legno compattato in pastiglie, "pellets", e delle relative stufe e caldaie totalmente meccanizzate, sta rivoluzionando il mercato; esiste tuttavia il pericolo che la diffusione rapida del loro utilizzo porti solo ad un aumento delle importazioni dall'estero del combustibile legnoso senza un reale beneficio per i nostri agricoltori e per il "sistema boschi" italiano<sup>1</sup>.

## La disponibilità di biomasse in Italia

Stimare le quantità di biomasse prodotte e utilizzate nel nostro Paese non è un compito facile sia perché spesso i dati relativi a questi prodotti provengono da diverse fonti e non sono omogenei, sia perché spesso vengono utilizzati e scambiati in circuiti non commerciali (autoconsumo, fuori commercio ecc).

Si vuole dare, di seguito, un'idea degli ordini di grandezza in gioco per avere una stima approssimativa della grande potenzialità di questa fonte energetica.

## Biomasse forestali

A seconda della metodologia e dei parametri di rilevamento della superficie boschiva si ottengono stime differenti<sup>2</sup>. Secondo l'Annuario di Statistica del 1995, la superficie forestale italiana è di 6.821.281 ettari, pari al 22,4% del territorio nazionale; i dati sono basati sui parametri di copertura minima pari al 50% e superficie minima di 0,5 ettari. Invece, secondo recenti stime EUROSTAT (1998), che si basano anche su rilevamenti satellitari, le foreste italiane si estendono su 9.857.000 ettari, poco meno di un terzo della superficie territoriale nazionale: queste stime sono state elaborate in base ai parametri internazionali ossia di copertura minima del 10% e superficie minima di 0,5 ettari.

Inoltre, in base a stime dell'Inventario Forestale Nazionale, mentre l'accrescimento boschivo si attesta a 3 metri cubi per ettaro l'anno il tasso di utilizzazione risulta essere di circa 1 metro cubo per ettaro l'anno; questo enorme accumulo di legno mostra quale sia la potenzialità energetica dei nostri boschi, ma anche di quanta maggiore cura e gestione avrebbero bisogno, dal momento che l'abbandono dei boschi, un tempo utilizzati a ceduo, cioè a taglio di breve periodo per produrre carbone, li rendono vulnerabili verso incendi e malattie.

Secondo i dati ufficiali dell'ISTAT, la superficie tagliata copre l'1,9% di quella totale, per una quantità pari a circa 9.912.000 metri cubi l'anno.

## Residui delle attività agricole, forestali, agro-industriali e dell'industria alimentare

Non è facile fornire una stima sulle quantità di residui in quanto non esiste alcun lavoro analitico nazionale recente e attendibile. Per avere un'idea degli ordini di grandezza in gioco ci si può riferire alla stima su un totale di 17,2 Mt/anno effettuata nel 1994 dall'AIGR (Associazione Italiana Genio Rurale):



- residui agricoli: 7,8 Mt/anno;
- residui industria legno: 7,7 Mt/anno;
- residui industria agroalimentare: 1,6 Mt/anno.

Per quanto riguarda la sola sansa ci si riferisce ai dati forniti dall'ASSITOL che indica in 0,5 Mt/anno la quantità disponibile di sansa esausta escludendo le importazioni. A seguito del fenomeno della "mucca pazza" ci sono anche centinaia di migliaia di tonnellate di farine animali alle quali vanno aggiunte i grassi e gli oli vegetali usati.

### Frazione organica, detta anche biogenica, dei rifiuti solidi urbani

La quota prodotta ogni anno è stimabile in 5 Mt di cui ne vengono utilizzate, per il recupero energetico, solo 0,27 tonnellate in 23 impianti.

### Rifiuti speciali a matrice biologica

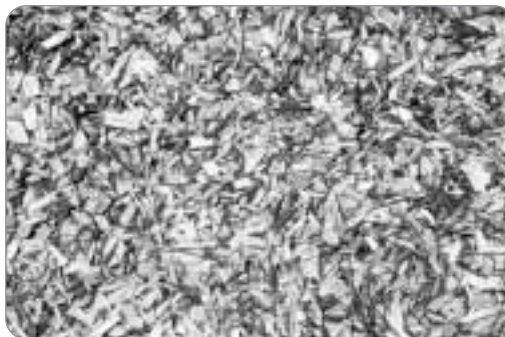
Non esistono dati che permettano di effettuare una stima precisa. Tuttavia secondo Federlegno, l'industria mobiliare italiana produce da sola 4 Mt/anno di residui legnosi di cui 1 Mt/anno autoconsumati.

### Coltivazioni energetiche

Attualmente le aree destinate a colture energetiche dedicate sono molto ridotte ed essenzialmente dedicate ad attività di ricerca. Attualmente infatti sono solo 40 gli ettari coltivati con specie forestali a rapido accrescimento e a breve turno di rotazione con finalità specificatamente energetiche, ma si prevede che entro il 2005 si possa arrivare a 3500-5000 ettari, procedendo anche alla sostituzione della pioppicoltura classica<sup>2</sup>.

### Importazioni

L'Italia alimenta un forte flusso di importazioni di legna da ardere, di carbone di legna, di legna di recupero dalla selezione



**Figura 2**  
Cippato di legno

Fonte: AA.VV., *Combustibili legnosi: calore sostenibile per gli edifici residenziali*, ENEA 2002

dei rifiuti (0,5 Mt/anno dalla sola Germania), di residui dell'industria agroalimentare (sansa e noccioli da tutto il bacino del Mediterraneo); mentre si sta aprendo ora l'enorme mercato mondiale del cippato e dei pellets.

## Come trarre energia dalle biomasse

Le biomasse, a seconda del tipo e della composizione, possono essere: bruciate per fornire calore; convertite in altro combustibile (metano, etanolo, metanolo, prodotti carboniosi) mediante l'impiego di microrganismi oppure dall'azione di elevate temperature o di agenti chimici; infine, direttamente usate per la generazione di energia elettrica. I processi di conversione delle biomasse sono, quindi, di due tipi:

- termochimici: combustione diretta, gassificazione, pirolisi, carbonizzazione, estrazione di oli vegetali, a seconda dei contenuti in carbonio e azoto (rapporto C/N) e dell'umidità presente nella materia organica da trattare;
- biochimici: digestione anaerobica, fermentazione alcolica, digestione aerobica.

### *Tecnologie di conversione termochimica*

Tali tecnologie possono essere così individuate:

- combustione diretta in caldaie di vario tipo secondo la taglia (vedi Appendice su "La tecnologia di combustione della legna");

- gassificazione, ossidazione incompleta per la produzione di un gas combustibile (CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) utilizzabile per alimentare direttamente motori alternativi a ciclo Otto;
- pirolisi, decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuto mediante l'applicazione di calore, a temperature comprese tra 400 e 800 °C in assenza di un agente ossidante;
- estrazione di oli e produzione di biodiesel, estratti da piante oleaginose, quali soia, colza, girasole ecc., che possono essere utilizzati come combustibili nello stato in cui vengono estratti.

#### Processi di conversione biochimica

Questi processi permettono di ricavare energia per reazione chimica dovuta al contributo di enzimi, funghi e micro-organismi che si formano nella biomassa sotto particolari condizioni:

- digestione anaerobica, un processo di conversione di tipo biochimico, consistente nella demolizione, ad opera di micro-organismi, di sostanze organiche complesse (lipidi, protidi, glucidi) contenute nei vegetali e nei sottoprodotti e ri-

fiuti (deiezioni animali, reflui civili, rifiuti alimentari e frazione organica dei rifiuti solidi urbani con rapporto C/N inferiore a 30%), che produce un gas (biogas) costituito per il 50÷70% da metano e per la restante parte soprattutto da CO<sub>2</sub> ed avente un potere calorifico medio dell'ordine di 23.000 kJ/Nm<sup>3</sup>;

- fermentazione alcolica, un processo, di tipo micro-aerofilo, di trasformazione in etanolo dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali; un derivato dell'etanolo è l'ETBE (EtilTertioButilEtere); l'etanolo e l'ETBE sono utilizzabili anche nei motori a combustione interna;
- digestione aerobica, un processo consistente nella metabolizzazione delle sostanze organiche per opera di micro-organismi, il cui sviluppo è condizionato dalla presenza di ossigeno. Questi batteri convertono sostanze complesse in altre più semplici, liberando CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e producendo un elevato riscaldamento del substrato, proporzionale alla loro attività metabolica. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno, mediante scambiatori a fluido.

**Tabella 1**  
Produzione lorda di energia elettrica da biomasse e rifiuti (1994-2001)

GWh	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
<b>Solo produzione di energia elettrica</b>	<b>156,6</b>	<b>202,8</b>	<b>365,7</b>	<b>527,5</b>	<b>770,6</b>	<b>995,4</b>	<b>933,5</b>	<b>1060,1</b>
<b>Solidi</b>	<b>135,6</b>	<b>167,6</b>	<b>239,7</b>	<b>231,1</b>	<b>317,8</b>	<b>454,2</b>	<b>409,4</b>	<b>465,0</b>
RSU	133,2	154,1	223,1	216,6	259,3	235,1	266,5	313,0
Colture e rifiuti agroindustriali	2,4	13,5	16,6	14,5	58,5	219,1	142,8	152,0
<b>Biogas</b>	<b>21</b>	<b>35,2</b>	<b>126</b>	<b>296,4</b>	<b>452,8</b>	<b>541,2</b>	<b>524,1</b>	<b>595,0</b>
Da discariche	21	35,1	125,9	296,1	452	539,6	539,6	593,8
Da fanghi	0	0,1	0,1	0,2	0,6	0,5	0,3	0,1
Deiezioni animali	–	–	–	–	–	0,8	0,2	1,1
Colture e rifiuti agroindustriali	–	–	–	–	–	0,3	0,2	–
<b>Cogenerazione</b>	<b>128</b>	<b>184,3</b>	<b>238,5</b>	<b>292,8</b>	<b>458,2</b>	<b>826,9</b>	<b>972,8</b>	<b>1527,3</b>
<b>Solidi</b>	<b>113,4</b>	<b>116,9</b>	<b>157,5</b>	<b>216,3</b>	<b>417</b>	<b>785,4</b>	<b>930,7</b>	<b>1437,8</b>
RSU	55,3	14,3	17,1	35,5	204,9	417,9	537,0	945,5
Colture e rifiuti agroindustriali	58,1	102,6	140,4	180,8	212,1	367,5	393,8	492,4
<b>Biogas</b>	<b>14,6</b>	<b>67,4</b>	<b>81</b>	<b>76,5</b>	<b>41,2</b>	<b>41,5</b>	<b>42,0</b>	<b>89,4</b>
Da discariche	3,4	53,8	67,9	64,5	26,8	26,8	27,8	70,8
Da fanghi	2,4	2,9	3,1	2,7	4,2	5,8	5,8	4,5
Deiezioni animali	6,3	8,1	7,6	6,9	5,7	5,6	4,7	8,7
Colture e rifiuti agroindustriali	2,5	2,6	2,4	2,4	4,5	3,3	3,7	5,3
<b>Totale</b>	<b>284,7</b>	<b>387,1</b>	<b>604,2</b>	<b>820,3</b>	<b>1.228,8</b>	<b>1.822,3</b>	<b>1.906,2</b>	<b>2.587,3</b>

Fonte: GRTN, dati statistici sull'energia elettrica in Italia 2001.

## Legna per riscaldamento domestico e per calore di processo industriale

Due recenti indagini statistiche dell'ENEA sul consumo di legna per il riscaldamento domestico<sup>3</sup>, basate su 6.000 interviste telefoniche, hanno stimato un consumo residenziale di legna da ardere tra 16 e 20 Mt/anno. Questo dato risulta essere di gran lunga superiore a quello rilevato dall'ISTAT, sia per una prevedibile sottostima delle indagini ufficiali sia perché più della metà della legna deriva da autoapprovvigionamento per autoconsumo.

Per quanto riguarda la produzione di calore di processo industriale, l'ENEA ha rilevato l'installazione di circa 1.300 impianti per un totale di 2.400 MWt installati.

## Una nuova tecnologia per il riscaldamento residenziale a legna

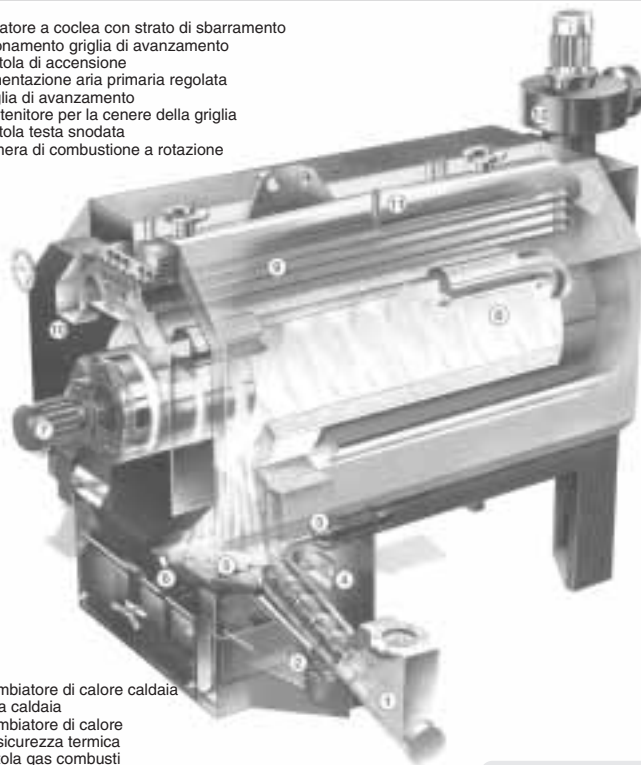
Ogni anno un ettaro di bosco produce tra gli 8.000 e i 40.000 kWh di energia termica potenzialmente utilizzabili e sufficienti per il riscaldamento di una singola unità abitativa o di una piccola scuola materna<sup>4</sup>.

Gli attuali canali di approvvigionamento possono variare a seconda della realtà produttiva locale: la legna da ardere, proveniente dai boschi e dalle potature dei viali e dei parchi; il cippato ed i pellets, provenienti dai residui di produzione, dalle segherie e dalle imprese di costruzione e di carpenteria; i residui derivanti dalla produzione agricola o dall'industria alimentare, come i gusci di nocciola e la sansa di olivo, che possono costituire una eccellente fonte energetica.

Dove risulti necessario il trasporto su lunghe distanze ed è necessaria una logistica completamente automatizzata, conviene ricorrere ai pellets.

I pellets sono prodotti pressando i residui dalla lavorazione del legno, e trasformano così un materiale da smaltire in un combustibile di alta qualità. Inoltre, il prodotto ot-

1. Dosatore a coclea con strato di sbarramento
2. Azionamento griglia di avanzamento
3. Ventola di accensione
4. Alimentazione aria primaria regolata
5. Griglia di avanzamento
6. Contenitore per la cenere della griglia
7. Ventola testa snodata
8. Camera di combustione a rotazione



9. Scambiatore di calore caldaia
10. Porta caldaia
11. Scambiatore di calore per sicurezza termica
12. Ventola gas combusti

Fonte: AA.VV., *Combustibili legnosi: calore sostenibile per gli edifici residenziali*, ENEA 2002

**Figura 3**

Caldaia con caricamento automatico del combustibile e scarico delle ceneri

tenuo presenta caratteristiche termochimiche e merceologiche superiori, sia in termini qualitativi che di omogeneità, rispetto a quelle del cippato e della legna tal quale: maggiore contenuto energetico, minore contenuto di acqua, pezzatura più uniforme e costante. Queste qualità rendono i pellets di più facile gestione e trasportabilità, e consentono periodi di immagazzinamento più lunghi: pertanto il prodotto può essere commercializzato economicamente su un raggio distributivo più ampio e rappresentare un passo avanti verso un sistema energetico più diversificato e ambientalmente sostenibile.

Recentemente sono stati realizzati diversi impianti per la produzione di pellets in varie parti d'Europa. Un elenco dei fornitori di questo combustibile è riportato sul sito [www.bioheat.info](http://www.bioheat.info) al quale si può accedere per consultare l'elenco dei produttori di caldaie e dei fornitori di combustibili legnosi nonché le schede relative agli impianti realizzati con successo.

**Figura 4**  
Caldaia a combustibile sfuso



Fonte: AA.VV., *Combustibili legnosi: calore sostenibile per gli edifici residenziali*, ENEA 2002

Il riscaldamento residenziale risulta essere responsabile di circa un quarto della domanda energetica totale del nostro sistema energetico. Utilizzare fonti di energia rinnovabile in questo settore può rappresentare un passo avanti verso un sistema energetico più diversificato e ambientalmente sostenibile.

In Italia, negli ultimi anni e soprattutto nelle regioni del Nord, è stato realizzato un numero sempre crescente di impianti a biomasse. Il successo di questa tecnologia nel nostro Paese è legato, oltre che alla crescente sensibilità alle tematiche ambientali,

**Tabella 2**  
Costi di impianti a biomassa e di impianti a combustibile fossile

Unità	Cippato	Pellets	Gasolio	Metano
€	10.000	10.000	4.000	3.000
€	2.500	2.500	1.500	1.500
€	10.000	8.500	4.500	4.000
<b>€</b>	<b>22.500</b>	<b>21.000</b>	<b>10.000</b>	<b>8.500</b>
€	15.750	14.700	10.000	8.500
€/a	1.110	1.049	704	594
<b>€/anno</b>	<b>1.110</b>	<b>1.049</b>	<b>704</b>	<b>594</b>
€/anno	4.982	6.112	14.968	11.663
€/anno	120	80	60	50
<b>€/anno</b>	<b>5.102</b>	<b>6.192</b>	<b>15.028</b>	<b>11.713</b>
€/anno	175	168	78	65
€/anno	1.000	750	0	0
€/anno	250	200	150	80
€/anno	400	400	200	200
€/anno	250	200	100	100
<b>€/anno</b>	<b>2.075</b>	<b>1.718</b>	<b>528</b>	<b>445</b>
<b>€/anno</b>	<b>8.287</b>	<b>8.959</b>	<b>16.259</b>	<b>12.752</b>
<b>€/MWh</b>	<b>55,25</b>	<b>59,72</b>	<b>108,39</b>	<b>85,01</b>

Fonte: AA.VV. - *Combustibili legnosi: calore sostenibile per gli edifici pubblici*, ENEA 2002

alla loro indubbia convenienza economica. Da notare, in particolare, che spesso sono disponibili diverse possibilità di supporto attraverso programmi di finanziamento regionali, nazionali ed europei che possono essere sfruttati per rendere ancora più conveniente questa opzione di riscaldamento. Negli ultimi 20 anni le caldaie a legna hanno registrato una notevole evoluzione tecnologica, passando dai vecchi sistemi a caricamento manuale alle moderne e sofisticate caldaie ad elevato grado tecnologico, dotate di dispositivo di controllo automatico, e in grado di soddisfare da sole il fabbisogno energetico delle unità abitative con rendimenti termici che possono raggiungere il 90%.

Le caldaie moderne infatti bruciano sia combustibili legnosi di alta qualità, come i pellets, sia il cippato e gli scarti di lavorazione, con emissioni paragonabili a quelle dei sistemi convenzionali a gas e gasolio. Sono dotate di sistemi per l'accensione automatica, di segnalazione in remoto di eventuali malfunzionamenti, di dispositivi automatici per la rimozione delle ceneri e per la pulizia degli scambiatori di calore. La combustione può venire controllata in modo automatico a seconda della domanda energetica, della qualità del combustibile e della composizione dei gas di scarico. Il raggiungimento di queste prestazioni è stato possibile principalmente grazie alle seguenti innovazioni tecnologiche:

- introduzione di almeno due flussi distinti di aria primaria e secondaria in modo da ottenere una regione di post-combustione dei gas prodotti durante la pirolisi;
- introduzione della sonda lambda che permette un controllo ottimale della combustione regolando l'immissione dell'aria secondaria in relazione alla percentuale di ossigeno presente nei gas combusti;
- ricircolo dei fumi in camera di combustione per controllare la temperatura ed aumentare la turbolenza.

## Sette requisiti per un valido progetto di riscaldamento a legna

### 1. Affidarsi a consulenti esperti

La realizzazione di un impianto di riscaldamento a biomassa in un edificio pubblico deve essere curata con particolare attenzione in modo che possa rappresentare un ottimo esempio da seguire sul piano economico, ambientale e architettonico. È quindi molto importante affidarsi per la progettazione e realizzazione ai migliori professionisti del settore e alla migliore tecnologia presente sul mercato. Come primo approccio si potrebbero contattare le Agenzie locali per l'Energia per una consulenza e un supporto tecnico, il cui elenco è reperibile sul sito [www.bioheat.info](http://www.bioheat.info).

### 2. Verifica della disponibilità del combustibile

È di fondamentale importanza individuare il combustibile (trattato o non) maggiormente disponibile in loco e scegliere di conseguenza la caldaia più adatta alla sua combustione. Gli impianti sono, infatti, progettati per funzionare al meglio con determinate tipologie di combustibile.

### 3. Scelta dell'edificio più adatto

Scegliere attentamente l'edificio dove realizzare l'impianto. L'edificio scelto deve disporre, oltre che di un locale caldaia sufficientemente ampio, anche di uno spazio adatto all'accumulo del combustibile legnoso facilmente accessibile ai mezzi di rifornimento.

### 4. Informare e coinvolgere l'intera comunità

È bene, comunque, che i cittadini e i rappresentanti politici vengano opportunamente informati, sin dalle prime fasi, sullo sviluppo del progetto, in modo che si sentano coinvolti il più possibile nel processo decisionale e aprire quindi un importante momento di confronto.

È utile e opportuno ricorrere quanto maggiormente a operatori ed esperti locali, in modo da aumentare ulteriormente l'interesse intorno all'iniziativa e gli effetti positivi sulla comunità.

### 5. Scegliere una caldaia di elevata qualità

Occorre, quindi, scegliere una caldaia di alta qualità che risponda almeno ai seguenti requisiti:

- abbia un'efficienza energetica > 85%;
- garantisca emissioni basse ( $CO < 200 \text{ mg/m}^3$ , polveri <  $150 \text{ mg/m}^3$ ) sia a pieno che a mezzo carico, e che comunque soddisfi la normativa vigente (DPCM 8 marzo 2002);
- sia dotato di un sistema automatico per la pulizia dello scambiatore di calore e per lo scarico delle ceneri;
- sia affidabile, facile da gestire e da mantenere; richiedere le referenze ai produttori e farsi consigliare dagli operatori del settore.

### 6. Affidarsi a un serio responsabile per la gestione della caldaia

Un impianto di riscaldamento a legna necessita di una supervisione costante e competente. Per la sua gestione è possibile scegliere tra le seguenti opzioni:

- individuare un dipendente comunale motivato e qualificato che diventi il responsabile della gestione globale dell'impianto;
- affidarsi a una struttura esterna di servizi, per esempio lo stesso fornitore del combustibile o una società di servizi energetici (ESCO), che fornisce all'amministrazione il calore.

### 7. Pubblicizzare e documentare la realizzazione del progetto

È di notevole utilità che la realizzazione di un progetto di riscaldamento a biomassa venga opportunamente promossa a livello locale e pubblicizzata nell'intera regione. Spesso, infatti, questi primi impianti diventano luoghi molto visitati e attirano diversi curiosi. Essere preparati a questa prospettiva, avendo preventivamente raccolto informazioni durante le fasi di realizzazione e predisposto materiale divulgativo sulla progettazione e funzionamento dell'impianto, è il modo migliore per stimolare la realizzazione di altre simili iniziative.

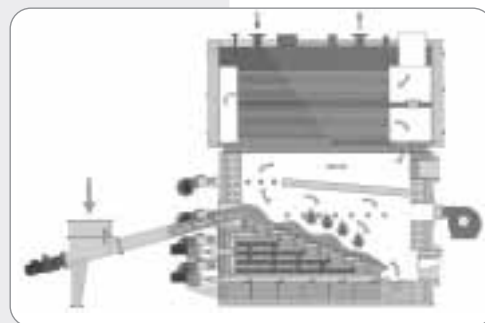


Figura 5a  
Caldaia con bruciatore sottoalimentato

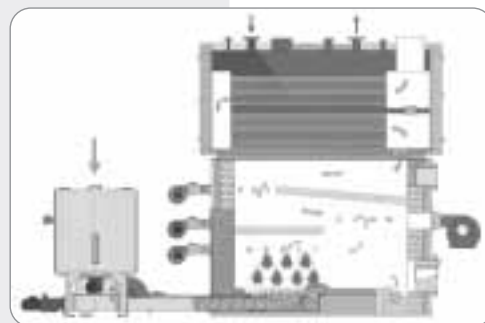


Figura 5b  
Caldaia a griglia mobile

Fonte: AA.VV., *Riscaldamento dei grandi edifici con combustibili legnosi*, ENEA 2002

## I costi

Le valutazioni economiche relative a sistemi a combustibile legnoso si basano sui costi d'investimento, che sono generalmente più alti di quelli per impianti a combustibile tradizionale, e sui costi d'esercizio, che risultano essere più bassi.

I costi presentati nella tabella 2 sono relativi ad un impianto da 100 kW che opera per circa 1500 ore/anno, per cui è stato ipotizzato un contributo in conto capitale del 30% per gli impianti a biomassa.

In Italia spesso è possibile usufruire di contributi regionali in conto capitale in percentuale variabile dal 30% al 60% a seconda della regione.

I combustibili legnosi, inoltre, a parità di contenuto energetico, sono significativamente più economici di quelli tradizionali.

## Impatto ambientale della combustione a legna

È convinzione comune che la combustione della legna sia molto inquinante: questo è vero per le caldaie tradizionali, dove la combustione non è ottimizzata, ma non per le moderne caldaie ad alta tecnologia, progettate per ottenere una combustione della legna quasi perfetta e con emissioni comparabili a quelle di una caldaia a combustibile convenzionale. Tale risultato è stato possibile grazie all'introduzione di diversi dispositivi, come la sonda lambda e, nelle caldaie di grossa taglia, di cicloni e filtri a manica ed elettrostatici, ma anche grazie alla separa-

zione dell'aria primaria da quella secondaria e dal ricircolo dei fumi di combustione. Molto deve essere però ancora fatto per quanto riguarda i piccoli dispositivi domestici, come ad esempio i termocaminetti. Infatti bisognerebbe separare la zona di combustione dalla zona di scambio termico e utilizzare dei catalizzatori che permettano di bruciare la fuliggine per aumentare sensibilmente i rendimenti termici e la qualità della combustione. Le emissioni climalteranti, nella combustione delle biomasse vegetali a ciclo rapido possono essere trascurate solo nel caso in cui non si prendano in considerazione le spese energetiche relative al taglio, al trattamento e al trasporto del combustibile legnoso, per cui una valutazione più puntuale richiede un'analisi sull'intero ciclo di vita del combustibile.

Le caldaie a legna hanno emissioni di SO<sub>2</sub> simili o inferiori ai sistemi convenzionali a metano, leggermente maggiori per quanto riguarda NO<sub>x</sub> e CO, mentre sono più alte, ma comunque accettabili, le emissioni di polveri<sup>4</sup>.

## Bibliografia

1. A. PANVINI, *Aspetti di mercato: la situazione nazionale e le prospettive* – Atti Convegno Progetto Fuoco, Verona 23 Marzo 2002;
2. ITABIA, *Rapporto biocombustibili al 2001*.
3. V. GERARDI, G. PERRELLA, *Il consumo di biomassa a fini energetici nel settore domestico*, ENEA 1998 e 2000;
4. L. CASTELLAZZI ET AL., *Combustibili legnosi: calore sostenibile per gli edifici pubblici*. ENEA 2002.

## Appendice

### LA TECNOLOGIA DI COMBUSTIONE DELLA LEGNA

L'impiego energetico dei combustibili di origine vegetale si presenta complesso per una serie di motivi che possono essere così raggruppati:

- la composizione chimica e la quantità d'acqua dipendono dalla specie e dalla parte utilizzata della pianta, dal luogo di crescita, dal momento della raccolta e infine, dalla modalità di conservazione;
- la pezzatura fisica, spesso molto variabile, dipende dal tipo di materiale, dal tipo di raccolta e dalle lavorazioni subite;
- il processo di combustione avviene per stadi di essiccazione, pirolisi e gassificazione ed infine ossidazione; essi rispondono a leggi differenti tra loro.

#### Le varie fasi della combustione e conseguenti implicazioni

Un combustibile vegetale è composto principalmente da cellulosa e lignina, di composizione  $CH_m O_n N_o$ , da acqua e, infine, da elementi scheletrici quali fosfati e potassio. Se si impiegano foglie o residui di coltivazioni si possono avere presenze anche di zolfo e cloro.

La prima fase, quella dell'essiccazione, si svolge per effetto del calore irraggiato dalle pareti e dalle braci ardenti; essa avviene a temperature da 20 °C di partenza fino a 150 °C circa e consiste nell'evaporazione dell'acqua contenuta tra fibra e fibra, legata non chimicamente. Il vapore d'acqua emesso dalle fibre viene asportato dall'aria primaria che attraversa il letto di materiale da bruciare.

La seconda fase è costituita da due fenomeni che si sovrappongono, la pirolisi e la gassificazione. Per effetto della temperatura, crescente fino ai 600 °C, le macromolecole delle cellule vegetali si rompono dando luogo, in dipendenza soprattutto della velocità di riscaldamento, alla produzione di molecole più piccole, allo stato gassoso e tutte combustibili a quelle temperature, quali alcoli, aldeidi, acqua, radicali liberi, metano e composti vari. Il residuo della pirolisi è sostanzialmente un carbone poroso, il carbone di legna.

Contemporaneamente per la presenza dell'aria primaria, all'interno del letto di materiale solido, si ha la combustione parziale sia del carbone residuo, sia di parte delle sostanze emesse con formazione di ossido di carbonio. In questa zona, specialmente in vicinanza del materiale, si ha quindi una atmosfera riducente, con carenza di ossigeno ( $l < 1$ ).

La corrente gassosa (dall'azoto dell'aria ai prodotti di pirolisi formati) può trascinare particelle solide ancora non completamente combuste.

La terza fase, quella della ossidazione, avviene al di sopra del letto di materiale combustibile; si ha l'aggiunta di altro ossigeno (aria secondaria) che si fa mescolare bene con i gas prodotti dal materiale solido, procurando la combustione completa con formazione di  $CO_2$ , a temperature fra i 900 °C e i 1000 °C, a seconda dell'eccesso d'aria.

Il meccanismo di combustione completo esposto è molto delicato: per effetto della pezzatura del materiale le condizioni cambiano. Se si brucia del polverino di legno la prima e la seconda fase si sovrappongono e c'è il rischio di trascinamento del residuo carbonizzato. Per dimensioni maggiori mentre lo strato esterno è già carbone l'interno continua a degasare e pirolizzare perché il legno è un buon isolante termico. Se si brucia su una griglia mobile, alimentata da un lato, le tre fasi si susseguono nello spazio, quindi nello stesso momento esse coesistono in zone differenti; in una tradizionale caldaia a caricamento manuale di tronchetti di piccolo diametro le tre fasi tendono a scalarsi nel tempo con una certa omogeneità in tutto il volume, mentre, se si bruciano pezzi grandi, quando l'esterno è già carbone, l'interno è ancora nella fase di degasaggio-pirolisi. La tabella riporta schematicamente il processo di combustione. Altri parametri sono, poi, da considerare; l'ossido di carbonio miscelato all'azoto ha una bassa velocità di combustione ed il processo di pirolisi assorbe energia. Ne consegue che, se i prodotti della gassificazione si disperdono in una corrente di aria fredda o lambiscono una parete fredda, la combustione rischia di non mantenersi e si ha il fumo acido e tossico, tipico dei caminetti che non tirano.

Altri problemi sono costituiti dalle ceneri, la loro composizione dipende dal tipo di pianta e dal

tipo di terreno; l'aumento del tenore di potassio provoca un abbassamento del punto di fusione delle ceneri stesse, con il rischio di produrre intasamenti dei condotti dell'aria.

Gli obiettivi da raggiungere sono: alta efficienza di combustione e basse emissioni di incombusti e di inquinanti.

Per un'alta efficienza occorre limitare l'eccesso d'aria, richiesto per evitare gli incombusti, occorre un lungo tempo di residenza ad alta temperatura; ne deriva uno schema di caldaia piuttosto diverso da quello dei combustibili tradizionali nel quale spesso le fiamme scaldano le pareti fredde per irraggiamento. Nel caso delle biomasse vegetali occorre prima assicurarsi la combustione completa in un ambiente caldo, isolato dal fluido freddo da scaldare, occorre dividere l'aria in due immissioni, una, quella primaria, sotto il materiale in combustione e l'altra, quella secondaria, che si misceli con i gas prodottisi dal legno, senza raffreddarli troppo.

Varie soluzioni sono state sviluppate per conciliare queste diverse esigenze.

Lo schema di una caldaia a griglia del riquadro che segue, con camera di combustione primaria e secondaria indica uno schema classico. La zona di gassificazione e quella di ossidazione sono ben separate, l'aria primaria, ridotta, limita il trascinarsi di polveri e ceneri, l'aria secondaria è distribuita in modo omogeneo al fine di assicurarsi la combustione del CO senza un forte eccesso d'aria, in ampio spazio di rivestimento da refrattari ben caldi.

### Il regolamento

L'aria primaria controlla la gassificazione, quindi va regolata secondo la domanda di potenza. La portata di aria secondaria deve invece ossidare tutti i gas che si sono formati. Il legame con la portata primaria non è diretto; serve relativamente poca aria secondaria all'avviamento, al contrario, in fase di riduzione di potenza, l'aria sotto le braci va ridotta mentre va lasciata l'aria secondaria. Questo problema è stato finalmente risolto da pochi anni, grazie allo sviluppo dei sensori elettrochimici dell'ossigeno che permettono di controllare in tempo reale la richiesta di ossigeno. L'uso di sonde specifiche per l'ossido di carbonio permette di operare con minori eccessi d'aria.

Le caldaie di potenza elevata, con combustione su griglia, hanno diversi sistemi di riciclo dei fumi prelevati dopo lo scambiatore. Questo riciclo può essere effettuato in punti diversi, l'effetto è di mantenere un'omogeneità delle temperature e delle portate anche in condizioni di carico ridotto, di limitare le temperature troppo elevate e quindi la formazione degli ossidi di azoto di origine termica, senza danneggiare il rendimento energetico.

Nelle caldaie a biomassa è in genere difficile ottenere variazioni rapide del carico, specie se il caricamento del materiale è discontinuo. La maggioranza delle caldaie di piccola potenza vendute in Italia prevedono un funzionamento on-off comandato da un termostato. Se nella caldaia è rimasto del materiale acceso esso continuerà a decomporsi e a degasare e perciò, anche chiusa l'aria primaria occorre garantire abbastanza aria secondaria per lungo tempo per evitare sia emissioni dannose che formazione di fuliggine sui tubi di scambio e nel camino. Senza una sonda per l'ossigeno è difficile controllare questo processo. Il modo più corretto previsto dalle normative per caldaie più semplici è quello di operare a portata d'aria costante fino all'esaurimento del materiale combustibile, accumulando il calore in un serbatoio di adeguato volume (qualche m<sup>3</sup>, non uno scaldabagno).

Per mantenere alta l'efficienza occorre disporre di sistemi per togliere la cenere dagli scambiatori, cosa facile se i tubi di fumo sono verticali.

Per caldaie di impiego per riscaldamento degli edifici è possibile far condensare i fumi con recupero di calore a temperature attorno ai 50 °C, con quantità rilevanti se si brucia materiale umido, come le scorze.

### Il controllo delle emissioni

Gli accorgimenti per limitare l'ossido di carbonio valgono anche per gli altri possibili idrocarburi incombusti, i policiclici, i catrami, la fuliggine. Anni fa negli USA, per stufe metalliche era proposto un catalizzatore ceramico a base di corderite, che abbassava l'innesco della combustione della fuliggine a 250 °C; sembra opportuno puntare a questo risultato col corretto progetto della zona di ossidazione. Per quanto riguarda gli ossidi di azoto ci sono problemi con quelle biomasse ric-



che in azoto. Possono utilizzarsi camere di riduzione o soprattutto sistemi secondari di tipo catalitico e non catalitico.

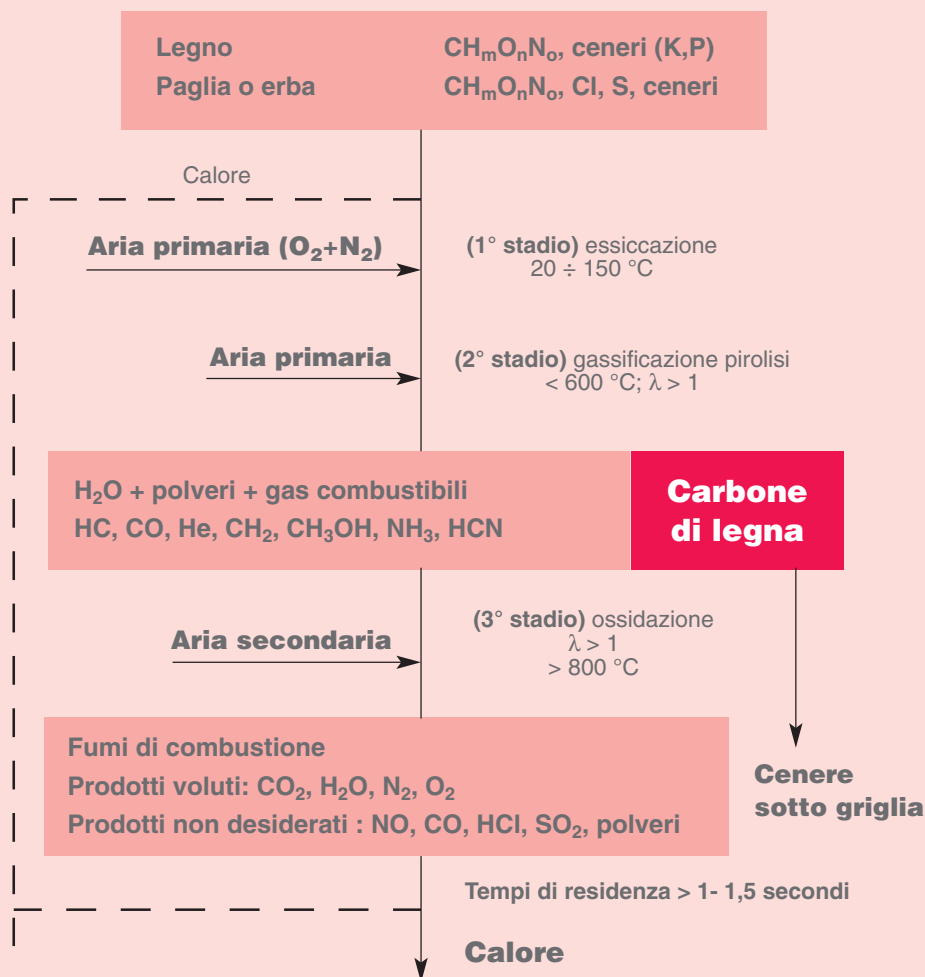
Il controllo delle polveri è importante sia per la loro capacità irritante (per effetto della potassa) sia perché possono contenere adsorbite sostanze incombuste, potenzialmente cancerogene.

Un'aria primaria ridotta aiuta a trattenere la cenere nella zona di base, mentre le emissioni di polveri richiedono una particolare attenzione. Un sistema a cicloni è certamente efficace per le particelle incombuste, lo è molto meno per materiale così poroso e leggero come le ceneri volanti del legno.

Un filtro a maniche in tessuto potrebbe essere danneggiato da una particella ardente, magari durante le fasi di accensione; per questo può essere necessario o accoppiarlo con un ciclone o usare un filtro ceramico.

Sono stati sviluppati anche separatori rotanti di particelle, mentre nei sistemi a condensazione è la precipitazione dell'acqua che contribuisce alla pulizia dei fumi da scaricare nell'atmosfera. Se si usano i legni di recupero, verniciati o impregnati, allora si ha presenza di metalli pesanti (Cd, Zn, Pb, Cu, As, Cr, Ni); al di sopra di certe percentuali si entra nel settore dei rifiuti. È importante che questi metalli restino nelle ceneri del focolare e che queste ceneri siano poi gestite separatamente da quelle volanti. Ugualmente la presenza di Hg e di Cl pone problemi da inceneritori per il trattamento dei fumi. Problemi aperti possono aversi con la paglia, i cereali o il mais (meno costosi delle pastiglie), i gusci, i noccioli ecc, più ricchi di K, Na, Cl e S rispetto al legno degli alberi, essi possono dare problemi sia di corrosione a caldo che di fusione delle ceneri, con depositi negli scambiatori.

### IL PROCESSO DI COMBUSTIONE DELLE BIOMASSE SOLIDE SU GRIGLIA



Fonte: OBENBERGER I.,  
Biomass Combustion-  
Technological Overview,  
possibilities of optimization,  
unsolved problems. 2<sup>nd</sup> Biomass  
Summer School 1997



# Universalità e dimensione internazionale della **scienza**

Il sistema del nostro Paese deve operare per attrarre qualità e competenze scientifiche, creare cioè quelle condizioni perché una comunità scientifica – aperta agli apporti di tutti i ricercatori – sia messa in grado di produrre nuove esperienze

**CARLO RUBBIA**

Commissario Straordinario  
ENEA

Oltre cento scienziati italiani provenienti da ogni parte del mondo hanno partecipato dal 10 al 12 marzo, a Roma, al "I Convegno internazionale degli scienziati italiani all'estero" promosso dal Ministro per gli Italiani nel Mondo, Mirko Tremaglia.

Duplica l'obiettivo dell'iniziativa organizzata in collaborazione con il Ministero degli Affari Esteri e d'intesa con il Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca e il Ministero della Salute: da un lato rendere il dovuto omaggio a una categoria di italiani eccellenti che continua a dare lustro al nostro Paese; dall'altro gettare le basi per un nuovo rapporto tra gli scienziati all'estero e i loro colleghi in Italia al fine di stimolare sinergie e collaborazioni tra le due parti.

Il Convegno svolto sotto l'Alto Patronato del Presidente della Repubblica, oltre alle relazioni dei due premi Nobel Rita Levi Montalcini e Carlo Rubbia, ha visto gli interventi di personalità di spicco del mondo scientifico italiano, dei rappresentanti dei maggiori enti di ricerca italiani e dei ministeri coinvolti nell'organizzazione.

Nelle tre sessioni di lavoro "geografiche" (Nord America, Europa e Sud America-Africa-Australia) sono intervenuti gli scienziati italiani affermatasi nei rispettivi Paesi di attività, i quali hanno descritto le caratteristiche più salienti delle proprie esperienze professionali e hanno lanciato idee e proposte di collaborazione con gli enti di ricerca italiani. In estrema sintesi, è emersa la necessità di promuovere: l'acquisizione di nuove risorse; la piena gestione dei progetti; il massimo sostegno al lavoro dei giovani ricercatori; un maggior coinvolgimento dei privati; l'introduzione del principio di meritocrazia; la creazione di uno specifico comitato scientifico di consultazione. È anche emerso che un problema importante è la mancanza di equilibrio tra il numero dei ricercatori che vanno all'estero e quello degli stranieri che giungono in Italia. Per questo è necessario incrementare i finanziamenti nel nostro Paese ricordando che la ricerca di

base è un investimento pubblico non solo opportuno ma anche fruttuoso, a lungo termine, di utili non indifferenti.

Pubblichiamo, insieme alla relazione del prof. Rubbia, l'Ordine del Giorno e il Documento finale del Convegno.

La moderna metodologia scientifica nacque in Italia nel diciassettesimo secolo con Galileo Galilei. Tuttavia, lo sviluppo delle scienze naturali incominciò a prendere piede solamente nella seconda metà del diciottesimo e l'inizio del diciannovesimo secolo. Ne furono i principali catalizzatori un numero limitato di grandi scienziati appartenenti ad alcune università europee. La loro influenza si diffuse rapidamente in Europa, grazie soprattutto al fatto che i limiti delle frontiere nazionali non impedivano ai giovani studenti di apprendere nelle università di loro scelta – da Londra o Parigi a San Pietroburgo, da Uppsala a Bologna. Fu questa la prima forma di una primitiva cooperazione internazionale. La collaborazione internazionale è quindi un fenomeno antico quasi quanto la scienza moderna.

Parallelamente, durante il XIX secolo, nel mondo occidentale l'industrializzazione incominciò a fare i primi passi. L'interazione fra le scienze e le nuove industrie crebbe progressivamente: uno dei primi esempi è rappresentato dall'industria chimica (l'*high-tech* del XIX secolo) nata in Germania, che divenne un leader internazionale del settore. Nel secolo scorso tali esperienze hanno portato anche ad un primo esempio del coinvolgimento governativo diretto, con la creazione di un nuovo e più forte organismo di ricerca, complementare al sistema universitario: gli Istituti Kaiser Wilhelm, fondati in Germania nel 1911, e ora conosciuti come Istituti Max Planck.

Ad evidenza della vitalità della scienza in Europa durante i primi 25 anni del 900, dei 71 laureati Nobel per la fisica, la chimica e la medicina, 68 furono assegnati a scienziati europei.

I tragici eventi in Europa durante il secondo quarto del 900 e le loro ripercussioni sulle attività scientifiche sono ben noti, e non hanno bisogno di essere descritti oltre. Tuttavia, fu durante la seconda guerra mondiale e gli anni immediatamente successivi che emerse finalmente una chiara consapevolezza del ruolo fondamentale che la scienza può avere per lo sviluppo industriale e per le sue applicazioni, sia civili sia militari. Il governo federale degli Stati Uniti d'America aumentò rapidamente i finanziamenti alla ricerca nei settori delle scienze naturali e della bio-medicina, su una scala che non ha precedenti nella storia. Si calcola che, subito dopo la guerra, il bilancio della ricerca degli Stati Uniti si avvicinasse alla metà del totale dei finanziamenti mondiali alla ricerca.

Durante il penultimo quarto del secolo, questi investimenti, coadiuvati dalle dimensioni del Paese e da una totale libertà di interazione e movimento degli scienziati, portarono la scienza americana ad una posizione di assoluta pre-eminenza in molti settori. A testimonianza di ciò, troviamo ancora una volta la nazionalità dei premi Nobel. Durante i primi 25 anni del XX secolo, solamente 3 su un totale di 71 laureati Nobel per la fisica, la chimica e la medicina furono americani. Nei 25 anni che vanno dal 1955 al 1980, i cittadini statunitensi furono 82 su un totale di 150. Molti di questi provenivano originariamente dall'Europa, alla ricerca della libertà fuggendo gli orrori di regimi totalitari.

Nello stesso tempo, un altro, nuovo e rivoluzionario modo di portare avanti la ricerca fondamentale trovò le sue radici nel Vecchio Continente, che si stava faticosamente risollevando dai disastri della guerra verso una rinnovata prosperità: un forte movimento di internazionalizzazione istituzionale della cooperazione scientifica si manifestò in un momento in cui un tale concetto – così popolare ai nostri giorni – era ancora essenzialmente sconosciuto. Un

primo eccellente esempio fu il CERN, l'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare con sede a Ginevra – che festeggia l'anno prossimo i suoi 50 anni – e che attualmente alimenta le ricerche di ben 5000 scienziati nel settore della fisica delle particelle elementari. Incidentalmente, per il numero di ospiti americani, il CERN equivale al secondo laboratorio statunitense in ordine di grandezza nel settore delle particelle elementari. Forte di 20 Stati membri europei, il CERN può annoverare tra gli altri gli Stati Uniti, il Canada, la Russia e Israele come paesi osservatori. È stata la necessità di consentire una comunicazione attiva a livello mondiale fra i suoi scienziati, che ha dato luogo all'invenzione del World Wide Web. La partecipazione scientifica dell'Italia è ben il 28,8% degli altri Stati membri, nonostante che il nostro contributo finanziario sia dell'ordine del 15%.

Questo nuovo metodo di cooperazione scientifica su scala globale, a partire dal CERN come modello, fece la sua comparsa anche in molti altri settori come la meteorologia, l'astronomia, la biologia, la fusione nucleare e l'ingegneria spaziale.

Purtroppo, non è solo la mente umana, ma sono anche le malattie a non conoscere frontiere. Di particolare interesse nel settore della medicina sono i programmi internazionali sulle malattie tropicali sotto l'egida dell'Organizzazione Mondiale per la Sanità, una speciale agenzia delle Nazioni Unite, anch'essa con sede a Ginevra. Sono organizzati sulla base di veri e propri consigli di ricerca internazionali, in cui pianificazione e decisioni sono nelle mani di scienziati esperti provenienti da tutto il mondo. L'Organizzazione Mondiale per la Sanità fornisce servizi di base e svolge l'importantissimo ruolo di organizzazione ombrello che garantisce l'accesso a questi servizi a tutti gli Stati membri. In questo modo, i migliori esperti su scala planetaria possono cooperare efficacemente su alcuni dei più difficili problemi che affliggono i

Paesi in via di sviluppo: allo stesso tempo, il sistema delle Nazioni Unite può espandersi in maniera costruttiva e priva di controversie.

Sono convinto che questi siano tutti validi esempi di forme diverse di collaborazione internazionale. Nel settore della ricerca civile sta gradualmente crescendo il ricorso alla formula della cooperazione internazionale che viene percepita come il prerequisito necessario alla pace e alla prosperità da una sempre più ampia porzione della popolazione mondiale.

La cooperazione internazionale ha avuto infine il suo riscontro anche a livello del Comitato Nobel. Negli anni '30, la maggior parte dei Nobel erano tedeschi. Nel 1976, anno eccezionale, tutti i laureati Nobel provenivano dagli Stati Uniti. Durante gli ultimi anni, fatto senza precedenti nella storia della Fondazione Nobel, mai tanti scienziati provenienti da tanti Paesi diversi furono insigniti di tale onorificenza. Inoltre, nei settori della scienza in cui il coinvolgimento internazionale è il più avanzato, la maggior parte dei laureati Nobel hanno effettuato le loro scoperte nel quadro di programmi di ricerca internazionali.

È questa una nuova tendenza, o semplicemente una fluttuazione statistica, destinata a scomparire negli anni a venire? A mio parere, è questo un nuovo cammino intrapreso dalla scienza, destinato ad essere percorso sempre più frequentemente con il passare del tempo. Non è un evento incidentale, è una via importante che si sta trasformando nella strada maestra per la scienza del futuro.

Ma, per quale motivo dovremmo ricorrere alla cooperazione internazionale nella ricerca della conoscenza?

La necessità di fare ricorso ad essa si giustifica solitamente in termini di finanziamenti, vale a dire con il bisogno di condividere gli enormi investimenti indispensabili alla costruzione di laboratori su larga scala. Quantunque esso ne sia il motivo più evi-

dente, non è la sola ragione del rimarchevole successo della scienza basata sull'internazionalizzazione. Vi sono, infatti, altre due, ben più significative, giustificazioni all'allargamento della ricerca ad una dimensione internazionale. La prima ragione è quella che definirei "il fattore umano". Il progresso nella ricerca fondamentale è generato principalmente da "fluttuazioni", ossia da cambiamenti improvvisi dovuti a progressi concettuali. Senza un tale "catalizzatore", anche i più massicci investimenti in termini di risorse non sarebbero in grado di produrre effetti confrontabili. Nella scienza, si progredisce maggiormente grazie ad una singola idea innovativa che attraverso gli sforzi continuati e pianificati di centinaia di ricercatori con un approccio più convenzionale – lavoro che si rende peraltro necessario, quantunque non sufficiente per il più rapido progresso. Come nell'arte, anche nella scienza, dietro alle personalità di grande successo troviamo il talento. La Natura genera questi talenti con lentezza, con parsimonia e a ritmo costante. Esso origina soprattutto da doti naturali, tuttavia affiancate ad una solida e approfondita formazione accademica. Il loro numero non si può aumentare a comando: crescono spontaneamente laddove le conoscenze di una comunità sono adeguate a fornire quella formazione di base di cui questi talenti hanno bisogno. Questo terreno di coltura è oggi presente in molte nazioni, compresi molti dei Paesi in via di sviluppo.

Il secondo elemento di cui vorrei parlare è quello che chiamerei "l'effetto collettivo". Il progresso scientifico viene notevolmente amplificato da un effetto non-lineare. Ciò è particolarmente vero per le interfacce fra discipline, ad esempio, un'idea chimica applicata alla biologia, un concetto matematico applicato alla fisica, la comprensione delle funzioni di base e così via. In altre parole, un centinaio di scienziati in discipline non troppo differenti che operano – per

così dire – sotto lo stesso tetto, effettuano progressi di gran lunga maggiori e rapidi rispetto allo stesso centinaio di persone che lavorano separatamente e isolate le une dalle altre. Questa è una caratteristica fondamentale del pensiero scientifico innovativo. Ciò costituisce, ad esempio, una delle maggiori ragioni per cui, durante gli ultimi dieci secoli, il progresso scientifico si è associato principalmente alle università, e cioè a comunità in cui studiosi di discipline diverse si trovavano riuniti. Ai giorni nostri, esso è percepito anche dal mondo dell'industria come un elemento essenziale allo svolgimento delle proprie attività di ricerca e sviluppo.

Pertanto, tenendo conto delle enormi dimensioni dell'impegno scientifico di oggi, sia la raccolta delle menti migliori che la creazione di un appropriato *melting pot* sono realizzabili in maniera ottimale solamente grazie alla collaborazione internazionale.

Va detto tuttavia che questo processo di internazionalizzazione della scienza era già latente da lungo tempo e che ciò di cui ci stiamo rendendo conto oggi rispecchia semplicemente la necessità di una migliore e più sistematica istituzionalizzazione di un processo pre-esistente. Ad esempio, negli Stati Uniti la scienza ha grandemente approfittato del *melting pot* internazionale, grazie al rimarchevole e spontaneo processo che ha creato questo grande Paese a partire dalle radici di genti emigrate da tutte le parti del mondo.

Fino ad ora, il carattere internazionale della scienza statunitense altro non è stato se non il risultato della straordinaria generosità di quel Paese nell'accogliere tante persone provenienti da tutte le parti del mondo. Io sono stato uno di questi e, come loro, mi sento profondamente in debito nei confronti degli Stati Uniti per la generosità e l'ospitalità che vi ho trovato.

Tuttavia, anche nel caso di un Paese immensamente potente e ricco come gli Stati

Uniti, questo meccanismo sarà ancora sufficiente a far fronte ai problemi che si presenteranno negli anni a venire? Potrà l'afflusso di latino-americani e asiatici compensare il diminuito afflusso degli europei? Penso che la complessità sempre crescente della ricerca scientifica richiederà con forza nuovi passi, al fine di assicurare che il coinvolgimento internazionale sia orientato verso forme più organizzate e meglio pianificate. Solo così ci si potrà assicurare che tutta l'energia libera, potenzialmente presente sotto forma di risorse umane, possa essere incanalata efficacemente all'interno di una più ampia organizzazione di cooperazione fra nazioni amiche. Una tale cooperazione su vasta scala non va intesa come limite o come obbligo, ma come stimolo alla libera circolazione di idee e scienziati all'interno del sistema. La scienza va incoraggiata e non imbrigliata dalla burocrazia. È una precipua responsabilità della società creare le condizioni più propizie affinché la comunità scientifica sia messa in grado di produrre nuove conoscenze, un componente essenziale per il progresso dell'Occidente in particolare e di tutto il genere umano, più in generale. Oggi ciò dipende inevitabilmente da una cooperazione scientifica internazionale, sempre più estesa e meglio strutturata.

Da lungo tempo si sono stabiliti dei profondi legami fra il vecchio e i nuovi continenti. Di recente, una nuova componente ha iniziato a giocare un ruolo sempre crescente. Il moderno Giappone e altri paesi orientali, come ad esempio l'India e la Cina, stanno emergendo con la necessità impellente di migliorare i loro standard di vita, e al fine di acquisire una nuova e influente posizione all'interno di un'economia globale. A prima vista, ci sembra tuttavia (e questo vale in particolare dal punto di vista degli europei) che questi nuovi, emergenti *melting pot* non parlino il nostro stesso linguaggio o delle stesse cose. Penso che questo sia dovuto ad una nostra conoscenza piuttosto

superficiale dei loro fondamenti culturali e delle loro genti. Ciò è forse dovuto anche perché ci risulta difficile capire la loro prorompente ossessione per la produttività e l'efficienza. Non stanno essi forse trascurando un'altra dimensione, altrettanto importante, vale a dire l'estetica e la qualità del prodotto, quella impercettibile alchimia fatta di originalità e fantasia?

Produrre di più e a prezzi più bassi: d'accordo, ma a che fine/scopo?

I prodotti correnti parlano alla nostra mente come lo hanno saputo fare i capolavori dei nostri antenati? È mia opinione che il futuro apparterrà a coloro che sapranno cogliere quel confine misterioso, ma difficilmente qualificabile, che separa il brutto dal bello. È questa una filosofia che ha permeato la maggior parte delle grandi civiltà del passato; è questo un elemento fondamentale, che caratterizza il modo di percepire il mondo circostante, almeno per noi occidentali. Non va dimenticato, ad esempio, che questo concetto affonda profondamente le sue radici nella storia e nella cultura italiane, e che rappresenta uno dei più preziosi patrimoni che abbiamo ereditato dal nostro passato ed è il motivo principale per cui siamo apprezzati nel mondo.

Confido nel fatto che attraverso una migliore comprensione gli uni degli altri possa cambiare anche il nostro atteggiamento nei confronti dei rimarchevoli successi ottenuti dagli altri popoli con diverse radici culturali. È solamente attraverso dei legami più solidi fra tutti noi, attraverso la realizzazione di un mondo veramente internazionalizzato, basato su attività scientifiche fondate sulla cooperazione, nella quale tutti i differenti patrimoni culturali – risultato dell'eredità del passato – saranno in grado di rafforzare i legami che ci uniscono, che riusciremo a pianificare lo scenario generale del ventunesimo secolo, in un più esteso e

rinnovato quadro di unificazione scientifica fra tutti i popoli civilizzati del pianeta.

Cari colleghi, voi siete una risorsa di altissima qualità, un "prodotto" molto richiesto nel mondo. Siete riusciti ad imporvi, a trovare il vostro ruolo – come ho fatto anch'io nel passato – in un ambiente certo non facile, molto diverso da quello della nostra Patria. Andare a lavorare all'estero è sempre un trauma. Lo fanno i nostri lavoratori, che un tempo dovevano partire lontano per "guadagnarsi la pagnotta". Lo avete imparato anche voi: non senza sacrifici, siete andati – e state andando – a portare all'estero la vostra intelligenza e le vostre conoscenze.

Andare all'estero non è affatto un disonore. La cosiddetta fuga dei cervelli dimostra paradossalmente che abbiamo un sistema di formazione competitivo, e risorse umane veramente di prima classe. Altrimenti, all'estero, non avreste trovato rispetto ed accoglienza. Se oggi la ricerca incontra serie difficoltà all'interno del nostro Paese, la colpa non è quindi dei ricercatori. È il sistema complessivo del Paese che deve adeguarsi, al fine di riconoscere ed attrarre nel modo giusto le qualità e competenze nel campo scientifico.

La ricerca ormai si sviluppa preminentemente in un ambito internazionale, ed è perfettamente fisiologico che anche i nostri ricercatori si dirigano per tutte le vie nella comunità scientifica mondiale. A mio parere, il problema è altrove, è nella mancanza di un equilibrio tra il numero di ricercatori italiani che vanno all'estero e il numero, oggi ben esiguo, di ricercatori stranieri che vengono in Italia. Il capovolgimento di un tale disequilibrio sarà la migliore e la più rilevante misura del successo della riforma della ricerca in Italia che il nostro Governo attuale ha, ancora una volta di più, deciso di intraprendere.

## Primo Convegno Internazionale degli Scienziati italiani all'Estero

(Roma, 10-12 marzo 2003)

### ORDINE DEL GIORNO

Il Primo Convegno Internazionale degli Scienziati italiani all'estero, svoltosi a Roma dal 10 al 12 marzo 2003 sotto l'Alto patronato del Presidente della Repubblica, ha rafforzato lo spirito di collaborazione tra gli scienziati italiani nel mondo e gli organi istituzionali coinvolti nella promozione e nel sostegno della ricerca e della tecnologia italiana.

In tale contesto ed al fine di assicurare un seguito costruttivo alle proposte emerse nel corso dei lavori, è stata decisa la costituzione di un Comitato scientifico permanente degli scienziati italiani nel mondo, sotto la presidenza del Ministro per gli Italiani nel Mondo, On. Mirko Tremaglia.

Questo organismo sarà composto dai delegati del Ministero degli Affari Esteri, del Ministero della Salute, del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, del Ministero degli Affari Regionali, del Ministero delle Comunicazioni, del Ministero per le Attività Produttive, nonché dai membri del comitato organizzatore del Convegno.

Ne faranno parte altresì una rappresentanza degli scienziati italiani operanti nelle tre aree geografiche Nord America, Europa, America Latina, Australia e Sudafrica e degli addetti scientifici in servizio presso le sedi diplomatiche nelle medesime aree geografiche.

Obiettivi prioritari del Comitato scientifico, che si avvarrà della collaborazione dell'Ufficio di presidenza del Consiglio Generale degli Italiani all'Estero, sono il potenziamento delle relazioni tra gli scienziati italiani all'estero e quelli operanti in Italia, la progettazione di centri d'eccellenza per la ricerca scientifica in Italia, la realizzazione e lo sviluppo di una banca dati dei ricercatori italiani all'estero, nonché il collegamento tra le Università italiane e i ricercatori italiani all'estero.

## Documento finale del Convegno degli Scienziati e Ricercatori italiani nel mondo

(Roma, 10-12 marzo 2003)

I partecipanti al primo Convegno degli Scienziati Italiani all'estero, tenutosi a Roma il 10-12 marzo 2003, su iniziativa del Ministro per gli Italiani nel Mondo, On. Mirko Tremaglia, esprimono la loro soddisfazione per l'accresciuta attenzione che l'Italia oggi mostra per la realtà costituita dalla diffusa presenza di ricercatori italiani negli enti e nelle istituzioni straniere.

Sottolineano altresì come questa presenza, lungi dal doversi connotare in senso negativo come "fuga dei cervelli" e come spoliamento di risorse umane intellettuali, debba essere considerata positiva in termini di circolazione delle idee e delle informazioni e di arricchimento del "sistema Italia".

A fronte di questa situazione esiste una ricchezza costituita dal capitale intellettuale italiano diffusamente presente nelle strutture di ricerca e di alta formazione dei paesi oltreoceano che non si può ignorare.

Si tratta di capitalizzare la risorsa costituita dagli italiani operanti all'estero nel settore della ricerca scientifica e dell'alta formazione, nella logica di valorizzarne le competenze, il ruolo, il sistema di relazioni ed il lavoro attraverso forme di integrazione della loro attività nell'ambito del nostro sistema formativo e di ricerca sia pubblico che privato.



Tale integrazione può essere realizzata attraverso la mobilità individuale dei singoli studiosi ed anche con forme di promozione e di incentivazione della loro partecipazione a distanza ai programmi di ricerca effettuati nelle istituzioni italiane.

Prendendo atto delle molteplici indicazioni emerse nel corso dell'ampio e approfondito dibattito e rallegrandosi dell'impegno del Ministro Tremaglia a voler sviluppare una politica atta ad assicurare il contributo che gli scienziati italiani all'estero potranno recare allo sviluppo della ricerca in Italia, i partecipanti indicano alcuni momenti significativi.

Tra questi vi è il progetto di istituire una anagrafe telematica degli studiosi italiani all'estero che permetta di avere un quadro aggiornato della loro consistenza e distribuzione.

In particolare si suggerisce di porre in essere un sistema volto a potenziare la costituzione di reti e di iniziative di ricerca che coinvolgano centri e studiosi operanti in Italia ed i ricercatori italiani all'estero. Si potrebbe immaginare sin da ora in Italia, tenendo anche presente gli importanti contributi che possono venire dalle Regioni, un sistema di finanziamenti riservati a progetti di ricercatori italiani, a *stages* semestrali, annuali o biennali per soggiorni di ricercatori italiani all'estero presso centri nazionali, nell'ambito di specifici programmi di cooperazione scientifica.

In questa prospettiva si suggerisce anche l'incentivazione della partecipazione a distanza a programmi di ricerca effettuati nelle istituzioni italiane attraverso il finanziamento individuale allo studioso residente all'estero ed il finanziamento di micro-reti di ricerca tra individui ed istituzioni italiane.

Si auspica inoltre la costituzione di reti telematiche tra gli studiosi italiani all'estero, articolate per disciplina, in corrispondenza alle reti italiane, in modo da costituire una banca dati al servizio di tutti gli scienziati. Questo vale in modo specifico per gli accordi già presi tra gli ospedali italiani all'estero ed i centri sanitari di eccellenza operanti in Italia.

La selezione delle proposte dovrebbe essere effettuata dal Ministero per gli Italiani nel Mondo sulla base di criteri di congruità scientifica espressi dai rappresentanti eminenti della stessa comunità di ricercatori e dal Comitato Scientifico Nazionale, tenendo conto del livello di integrazione delle proposte con gli orientamenti dell'ultimo piano nazionale di ricerca e del sesto Programma Quadro di ricerca comunitaria.

Nel corso del convegno è stata avviata una comune riflessione sul contributo che le esperienze dei vari ricercatori, nelle loro diverse realtà, possono dare al potenziamento ed alle necessarie trasformazioni dell'organizzazione della ricerca in Italia ed alle ricadute sulla società e l'economia italiana.

Il confronto tra grandi sistemi e una attenta analisi sulle strategie atte ad introdurre elementi di innovazione di maggiore efficacia nel nostro sistema, possono costituire uno stimolo al cambiamento ma, soprattutto, devono offrire una preziosa consulenza tecnica ai responsabili politici. L'obiettivo è duplice ed è emerso con chiarezza nel corso del convegno: agevolare il lavoro di ricerca degli studiosi in Italia e rendere più efficaci i risultati aiutando a superare inaccettabili ritardi.

I partecipanti al Primo Congresso degli Scienziati Italiani all'Estero auspicano di poter arrecare il loro contributo, assieme al Ministero per gli Italiani nel Mondo, dando seguito a questa iniziativa con ulteriori periodici contatti con la comunità scientifica italiana e con i responsabili della politica di ricerca e di sviluppo industriale al fine di assicurare al nostro Paese una posizione internazionale degna della sua storia e delle sue ricche potenzialità umane.

Questo per noi significa la politica dell'Italianità.



# La **nanotecnologia**: premessa per una nuova rivoluzione scientifica?

Dopo microelettronica e biotecnologia si sta affermando un nuovo paradigma scientifico e tecnologico, foriero di formidabili sviluppi in tutti i settori applicativi nel prossimo decennio. Fisica, chimica e biologia contribuiscono a questa nuova disciplina. Fra i paesi all'avanguardia, molte conferme e alcune sorprese

**ANTONIO NOBILI\***  
**SALVATORE SCAGLIONE\*\***

ENEA,

\* Senior Board

\*\* UTS Tecnologie e Fische Avanzate

A chi pone una certa attenzione al progresso della scienza e della tecnologia, non sarà sfuggito lo strano e anomalo processo che sta avvenendo nell'ultimo decennio intorno allo sviluppo delle nanoscienze e delle nanotecnologie. La definizione di questo processo è ben riportata da J.A. Armstrong nel suo intervento al workshop, organizzato dal National Science Foundation nel settembre del 2000, dal titolo "Societal Implications of Nanoscience And Nanotechnology"<sup>1</sup> nel quale ci si chiede la ragione per cui un piano di sviluppo tecnologico di tipo governativo (National Nanotechnology Initiative - NNI) necessiti di uno sforzo per comprendere le implicazioni sociali dei risultati del piano stesso.

Si intuisce, dalle questioni poste dall'autore, che i meccanismi messi in moto dallo sviluppo delle nanoscienze sono diversi rispetto a quelli messi in moto dai grandi processi tecnologici del secolo trascorso. È facile infatti incontrare sia nella letteratura specialistica sia nei quotidiani a più larga diffusione, un numero sempre maggiore di articoli che elencano le grandi sfide che la nanoscienza si appresta ad affrontare e, di conseguenza, le grandi speranze che suscita. Quest'ultima affermazione apparirà forse esagerata rispetto ad un'attività scientifico-tecnologica che, da Galileo in poi, ha visto l'attività intellettuale dell'uomo specializzarsi sempre di più in un processo che ha affrontato delle sfide formidabili in termini di profondità della comprensione ma che ha perso una visione di insieme<sup>2</sup>. Appare infatti curioso che, mentre da una parte si è assistito al continuo allarme, lanciato dagli addetti ai lavori e non, sul pericolo della specializzazione dell'attività

scientifico che porta insito in sé anche un abbassamento dell'efficienza (si duplicano le stesse attività applicate in campi diversi ed impermeabili fra loro), dall'altra si assiste alla convergenza di discipline che fino ad oggi hanno dialogato tra loro in modo marginale.

Discipline come la fisica, la scienza dei materiali, la medicina, la chimica e la biologia stanno avendo un grado di sovrapposizione tale che ormai si parla apertamente della nanoscienza come di una nuova branca della conoscenza che sta costruendo un proprio autonomo paradigma che non può essere certamente assimilato alla semplice somma delle regole che governano le singole parti.

Esistono vari indicatori che evidenziano la costruzione del nuovo paradigma o come viene riportato in alcuni interventi, *paradigm shift*, come per esempio: le analisi "bibliometriche" sulle pubblicazioni e sui brevetti presentati nell'ambito delle nanotecnologie; la comparazione tra l'andamento del rapporto tra le nano-pubblicazioni ed i nano-brevetti disaggregato per disciplina.

Un altro indicatore, forse meno concreto e che ci riporta alla prima frase di questa premessa, è il susseguirsi di *workshop* e congressi in cui vengono organizzate delle sessioni monotematiche sull'impatto che la nanoscienza ha sulla società e sulle conseguenze che avranno sull'uomo e sull'economia le "promesse" eventualmente mantenute dalla nanotecnologia stessa.

Anche da un'analisi preliminare dei documenti di lavoro messi a disposizione dall'Unione Europea per il perfezionamento del VI Programma Quadro nell'ambito delle nanotecnologie e nanoscienze<sup>3</sup>, si

<sup>1</sup> "First question: *Why are we having this workshop at all?* When the Administration and Congress fund an NSF initiative to build a high energy physics detector, or a supercomputer, or an Engineering Research Center, we do not normally proceed to collective scrutiny of possible societal impacts.....".

<sup>2</sup> MARCELLO CINI, *Un paradiso perduto*, ed. Feltrinelli, IV edizione, 1999, pp 17-30. "...L'unità dell'universo, tuttavia, è soltanto teorica. Nella pratica occorre infatti interrogare il gran libro della natura là dove si presenta nella sua massima semplicità e regolarità: lontano dalla complicazione e dall'irregolarità che caratterizzano il turbinio dei fenomeni terrestri. Soltanto un'accurata selezione all'interno di questo mondo disordinato può permettere di individuare alcuni fenomeni particolarmente semplici, sfrondandoli dalle accidentalità contingenti, e di interpretarli mediante l'armonia del linguaggio geometrico. Ma in questo modo ciò che si guadagna in profondità si perde in estensione.....".

<sup>3</sup> VI Framework Programme, Draft work Programme Thematic Area 3, "Nanotechnology and nanosciences, knowledge-based multifunctional materials, new production processes and devices", 28 ottobre 2002.

evinces che l'obiettivo primario di quest'area tematica è quello di favorire una discontinuità rispetto al passato in modo da promuovere dei cambiamenti radicali nei prodotti, nei processi industriali e nella organizzazione della produzione. Inoltre, sempre nel VI Programma Quadro, le attività di ricerca dovrebbero incoraggiare il dialogo con la Società e generare "entusiasmo" per la scienza. Interessante è anche il paragrafo, di cui uno stralcio viene qui riportato, nel quale si evidenzia esplicitamente una sensibilità nuova per le implicazioni sociali dei risultati di quest'area tematica<sup>3</sup>.

*La sfida per l'Europa è di incoraggiare una transizione industriale verso una produzione basata sulle conoscenze e sull'organizzazione di sistema e considerare la produzione da una prospettiva olistica, che comprenda non solo "l'hardware" e il "software" ma anche le persone ed il modo con cui esse imparano e condividono le conoscenze.*

## Che cosa si intende per "nanotecnologia"

La definizione non è semplice e neanche univoca; infatti nel tempo si è evoluta con l'incremento del numero delle varie discipline scientifiche che si sono occupate di tale argomento. L'origine delle nanotecnologie, almeno per quanto riguarda la sua ideazione, va comunque ricercata nel campo della fisica: infatti il fisico Richard Feynman nel 1959, durante il suo *lunch-talk* al Caltech, afferma che gli atomi su piccola scala si comportano diversamente rispetto al comportamento che hanno su larga scala e, quindi, se si opera su dimensioni atomiche le leggi della fisica sono diverse,

così come ci si aspetta che gli atomi facciano delle cose diverse<sup>4</sup>. Le attività vere e proprie sulle nanotecnologie possono essere fatte risalire a circa 15 anni fa<sup>5</sup> anche se è solo negli ultimi 5-6 anni che il numero delle pubblicazioni ha avuto una crescita esponenziale.

Per quanto riguarda la definizione di "nanotecnologia", quella riportata da A. Franks<sup>6</sup>, "la nanotecnologia è quell'attività tecnologica in cui le dimensioni o le tolleranze che variano nell'intervallo tra 0,1 e 100 nm (dalle dimensioni di un atomo alla lunghezza d'onda della luce) giocano un ruolo cruciale", ha avuto per un lungo periodo un largo consenso.

Negli ultimissimi anni, questa definizione tende ad essere sostituita da una più complessa ma che tiene meglio conto dell'approccio inter-disciplinare alla materia.

Nell'articolo di D.E. Nicolau et al.,<sup>5</sup> viene riportata un'analisi dei vari concetti che sottendono alla definizione di nanotecnologia. Se per nanotecnologia viene intesa l'attività su scala nanometrica, si ricade nella tecnologia classica: infatti, nella microlitografia nel lontano UV sono stati "scritti" dei dispositivi a semiconduttore di dimensione ben al di sotto dei 200 nm. Se si intende invece l'alterazione di singoli atomi o molecole, anche in questo caso sia la microscopia a forza atomica sia quella ad effetto tunnel sono in grado di manipolare atomi e molecole. Quindi, se si intende come prodotto finale della nanotecnologia ogni componente in scala nanometrica, i "dispositivi elettronici quantistici" soddisfano questo criterio.

Tuttavia, si è ancora ben lontani dalla creazione di un nuovo paradigma scientifico necessario per un prodotto rivoluzionario. Sembra quindi che queste versioni del concetto di nanotecnologia (miniaturizza-

<sup>4</sup> HANS FOGELBERG, *The Grand Politics of Technoscience: Contextualizing Nanotechnology*, lavoro presentato al seminario: "The Battle at the bottom: Making the most of Feynman Legacy", Stockholm, 19 aprile, 2001.

<sup>5</sup> D.E. NICOLAU, J. PHILLIMORE ET AL., *Nanotechnology at the crossroads: the hard or the soft way?*, *Microelectronics Journal*, 31, (2000) pp. 611-616.

<sup>6</sup> A. FRANKS, "Nanotechnology", *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, 20 (1987), pp. 1442-1451.

zione sempre più spinta) siano alla ricerca di un prodotto "vincente" che si suppone debba produrre una rivoluzione simile a quella prodotta dalla microelettronica.

Un approccio diverso da quello riportato sopra viene proposto dal Foresight Institute per i criteri dell'assegnazione del Premio Feynman<sup>7</sup>, secondo i quali criteri devono essere realizzati contemporaneamente due dispositivi operanti su scala nanometrica, uno per il calcolo ed uno di posizionamento. Questi dispositivi rappresentano probabilmente il culmine ultimo delle potenzialità della fisica a stato solido e quindi della tecnologia basata su di essa. Anche se l'ambito in cui ricercare le soluzioni per vincere il premio Feynman non è esplicitamente menzionato, in modo un po' riduttivo si suggerisce che la tecnologia dello stato solido sembra essere la disciplina da cui verranno prodotti tali "nano-dispositivi".

Una più attenta analisi degli indicatori precedentemente menzionati (nano-pubblicazioni, nano-brevetti), fa emergere un altro fattore, la natura interdisciplinare della nanoscienza e nanotecnologia. Probabilmente è proprio questa la direzione giusta per dare una corretta definizione della nascente disciplina. Infatti, Tegart afferma che i ricercatori ed i tecnologi operano nel campo delle nanotecnologie da tre diverse direzioni: la fisica, la chimica e la biologia<sup>8</sup>.

**In fisica, la microelettronica procede verso dimensioni sempre più piccole ed è già in grado di realizzare delle strutture sub-micrometriche. Il processo di miniaturizzazione renderà necessari per i processori dei computer delle strutture nanometriche.**

**In chimica, la migliore conoscenza dei sistemi complessi ha portato a nuovi catalizzatori, membrane, sensori e tecnologie dei coating che sono correlati alla capacità di realizzare delle strutture a livello atomico e molecolare.**

**In biologia, i sistemi viventi hanno delle sotto-unità le cui dimensioni sono nelle scale dei micron e dei nanometri, queste possono essere combinate con materiali nanostrutturati non viventi in modo da creare nuovi dispositivi.**

Alla luce di quanto riportato, si può aggiornare la definizione precedente come: "La nanotecnologia è il controllo diretto di materiali e dispositivi su scala atomica e molecolare".

Viene introdotto quindi il concetto di dispositivo che, in questo caso, è da intendersi nella sua definizione più vasta: si parla infatti anche di sistemi micro-elettro-meccanici (MEMS, micro-electro-mechanical system). E, come riportato dalla letteratura, sono proprio questi ultimi che rappresentano una formidabile sfida per il futuro ed il punto d'incontro tra le discipline sopra accennate.

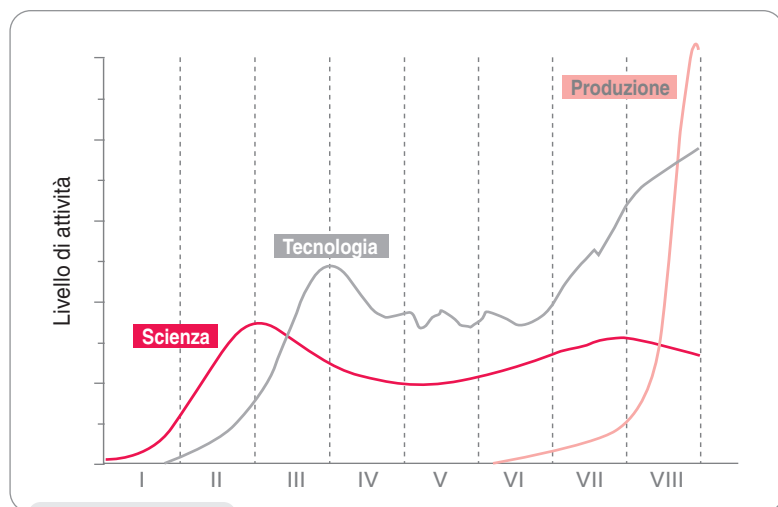
### **Analisi della produzione di *nano-paper* e *nano-patent***

Per descrivere l'evoluzione di una qualsiasi attività scientifica e tecnologica H. Grupp ha sviluppato un modello, illustrato in figura 1, per cui questa viene divisa in otto fasi<sup>9</sup>. La fase I si riferisce al lavoro iniziale di esplorazione scientifica, la fase II comprende sia

<sup>7</sup> "The yet to-be-awarded computing device has to fit into a cube no larger than 50 nm in any dimension, and be capable of adding accurately any pair of 8-bit binary numbers and producing its output as a pattern of raised nanometer-scale bumps on an atomically precise and level surface. The second device, to be built simultaneously with the former, is a positional device that fits into a cube no larger than 100 nm in any dimension. The device must be able to move to a directed sequence of positions anywhere within a cube 50 nm in each dimension, perform all directed actions with a positioning accuracy of 0.1 nm or better, and perform at least 1000 accurate, nanometer-scale positioning motions per second for at least 60 consecutive seconds".

<sup>8</sup> G. TEGART, *Nanotechnology, The Technology for the 21<sup>st</sup> Century*, presentato al "APEC CTF Workshop", Ottawa, 5-7 novembre 2001.

<sup>9</sup> R. COMPAÑO, A. HULLMANN, *Nanotechnology*, 13 (2002) 243-247.

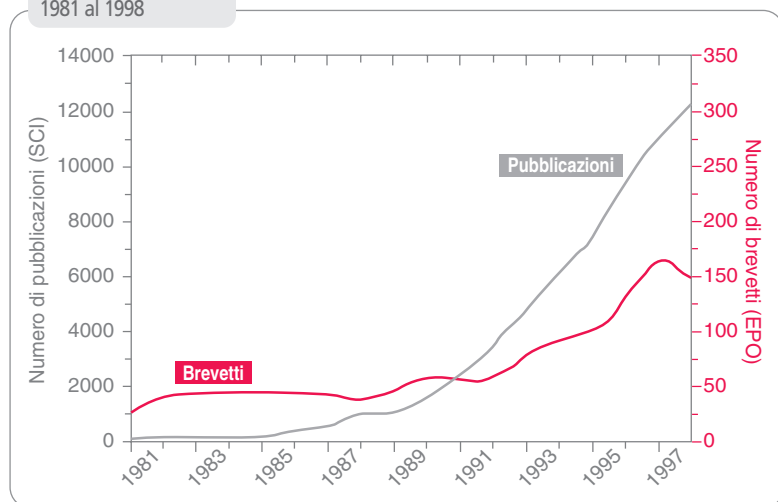


**Figura 1**  
Modello dell'attività scientifica e tecnologica elaborato da H. Grupp. Le attività dalla scienza alla produzione sono state suddivise in otto fasi

l'incremento dell'attività scientifica che l'apparire di quella tecnologica. I primi prototipi appaiono nella fase III mentre le fasi IV e V sono caratterizzate da una stagnazione dell'attività più propriamente scientifica e dalla difficoltà ad applicare commercialmente i risultati tecnologici.

Un processo di riorientazione nelle strategie industriali e quindi l'emergere di un importante numero di applicazioni industriali caratterizza le fasi VI e VII. La fase di maturità, la VIII, segna una forte penetrazione nel mercato mentre l'attività di ricerca scientifica diminuisce rispetto a quella tecnologica di innovazione del prodotto. Questo modello è basato su due indicatori, le pubblicazioni ed i brevetti e la sua applicazione ha dato dei buoni risultati nello

**Figura 2**  
Andamento dei brevetti e delle pubblicazioni scientifiche sulle nanotecnologie dal 1981 al 1998



spiegare l'evoluzione di tecnologie oramai mature come la biotecnologia e la tecnologia dei microsistemi.

In figura 2 è illustrato l'andamento dei brevetti e delle pubblicazioni scientifiche sulle nanotecnologie<sup>9</sup> nell'intervallo temporale che va dal 1981 al 1998. Applicando questi dati al modello sviluppato da H. Grupp, risulta che le nanotecnologie si trovano nella fase II o nella parte iniziale della fase III. Quindi ci si dovrebbe aspettare un'attività scientifica, in termini di indagine di tipo esplorativo, e un numero di pubblicazioni che tendono a quella fase che prelude la stagnazione (fra tre-cinque anni). È proprio in questa fase che l'attività tecnologica dovrebbe avere il suo massimo sviluppo. Nei prossimi dieci anni ci si aspetta quindi un forte incremento dei prototipi applicativi e dei brevetti anche se saremo ancora lontani dalla loro commercializzazione.

Dalla definizione di nanotecnologia si evince chiaramente che l'accostamento inter-disciplinare, o meglio ancora trans-disciplinare<sup>5</sup> alla materia, è l'unico in grado di assicurare un prodotto finale che sia più della somma lineare delle parti e che generi una nuova disciplina con una propria struttura teorica.

Allo stadio di sviluppo attuale della nanotecnologia (da intendersi come l'insieme di tutte le tecnologie operanti su scala nanometrica) possiamo immaginare che essa è la convoluzione di un numero di nanotecnologie con diversi obiettivi la cui scala temporale di evoluzione potrebbe essere significativamente diversa una dall'altra. Ci sono "nano-prodotti" già disponibili sul mercato (nanoparticelle di ossido di titanio usate nelle creme per la protezione solare o nanoparticelle di carbone per migliorare la resistenza dei pneumatici) mentre altri prodotti sono ancora nella fase iniziale di ideazione ma che già hanno una previsione sulla loro evoluzione temporale come per esempio i componenti elettronici CMOS operanti su scala nanometrica o nano-componenti sviluppati nell'ambito della chimica e della farmaceutica per dia-

Disciplina	1991	1992	1993	1994	1995	1996	Totale	Crescita*	Errore Standard
Scienze naturali	119	205	386	612	765	946	3033	3,2	3,7
Scienze multidisciplinari	51	103	141	189	289	367	1140	0,4	2,2
Ingegneria e Scienza dei materiali	74	92	127	184	235	209	921	-2,3	1,9
Scienze della vita	30	47	30	59	70	56	292	-1,5	1,8
Non-classificato	0	0	0	1	5	24	30	0,2	0,4
<b>Totale</b>	<b>274</b>	<b>447</b>	<b>684</b>	<b>1045</b>	<b>1364</b>	<b>1602</b>	<b>5416</b>		

\* Distribuzione degli articoli per disciplina

**Tabella 1**

Numero di articoli scientifici pubblicati negli anni che vanno dal 1991 al 1996

gnosi medica non invasiva o trattamenti per il cancro ecc.

Nella tabella 1 viene riportato il numero di articoli scientifici pubblicati negli anni che vanno dal 1991 al 1996<sup>10</sup>. L'informazione più significativa di questa tabella è che il dato viene disaggregato per materia ed inoltre, per ognuna di esse, viene calcolato il coefficiente di crescita lineare.

Come si può vedere le pubblicazioni in scienze naturali hanno la crescita maggiore, mentre l'ingegneria, la scienza dei materiali e le scienze della vita sembrano perdere in importanza. Questo dato sembrerebbe in contraddizione rispetto a quanto detto nei precedenti paragrafi sulle origini della nanoscienza, cioè la tecnologia dei materiali a stato solido.

Nel lavoro di Meyer e Persson il numero di articoli pubblicati per anno nello stesso intervallo temporale di quello riportato nella tabella 1, viene suddiviso per sotto-discipline indicando nelle scienze chimiche e fisiche la crescita maggiore insieme agli articoli con un forte taglio multidisciplinare. Il dato apparentemente contraddittorio della tabella 1 viene quindi risolto considerando che aumenta sempre di più il numero di chimici e fisici che prestano la loro opera nell'ambito delle scienze naturali abbandonando i loro ambiti tradizionali.

Per concludere questo paragrafo si citano

qui di seguito alcune frasi riprese dalle premesse di due rapporti in cui viene ulteriormente sottolineato il carattere interdisciplinare dell'attività scientifico-tecnologica sulle nanotecnologie.

*La nanotecnologia è un termine molto popolare per la costruzione e l'utilizzazione di strutture funzionali che abbiano almeno una delle dimensioni caratteristiche dell'ordine dei nanometri. Tali materiali e sistemi possono essere progettati in modo da esibire nuove proprietà, nuovi fenomeni e nuovi processi di tipo fisico, chimico e biologico proprio grazie alle loro dimensioni. Quando le caratteristiche strutturali hanno dimensioni intermedie tra quelle di un atomo isolato e quelle del materiale massivo (da 1 a 100 nm) gli oggetti spesso mostrano dei comportamenti fisici sostanzialmente differenti da quelli mostrati sia dai singoli atomi sia dai materiali massivi<sup>11</sup>.*

*Emergono due importanti risultati dallo studio del WTEC: nel primo si afferma che la capacità di realizzare dei materiali nanostrutturati per nuove prestazioni può considerarsi acquisita. La capacità di nanostrutturare è essenziale quindi nel campo*

<sup>10</sup> M. MEYER, O. PERSSON, "Nanotechnology-Interdisciplinarity, Patterns of Collaboration and Differences in Application", *Scientometrics*, 42(2) (1998) 195-206.

<sup>11</sup> National Science and Technology Council Committee on Technology, Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN), *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade*, September 1999.

**Tabella 2**

Numero di nano-pubblicazioni e nano-brevetti pubblicati nell'intervallo temporale indicato. Viene calcolato anche il rapporto tra le nano-pubblicazioni ed i nano-brevetti. La ricerca è stata effettuata estraendo i dati da Science Citation Index<sup>10</sup>

Nazioni	Numero di pubblicazioni 1988-96	Numero di brevetti 1990-97	Rapporto pubblicazioni/brevetti
USA	2062	1636	1,26
Giappone	649	150	4,33
Germania	547	84	6,51
Francia	505	68	7,43
Regno Unito	249	34	7,32
Svizzera	142	15	9,47
Taiwan	39	15	2,60
Olanda	96	12	8,00
Italia	148	10	14,80
Australia	51	6	8,50
Svezia	52	5	10,40
Belgio	67	4	16,75
Finlandia	20	4	5,00
Irlanda	20	3	6,67
Norvegia	4	3	1,33
Danimarca	45	2	22,5
Spagna	162	1	162,00
Hong Kong	11	1	11,00
<b>Totale</b>	<b>4869</b>	<b>2053</b>	<b>2,37</b>

delle applicazioni che necessitano di prestazioni di nuovo tipo. Tale capacità rappresenta una rivoluzione nella manipolazione dei materiali per il bene dell'Umanità e segna quindi l'inizio di una nuova era. La sintesi ed il controllo dei materiali di dimensioni nanometriche permette l'accesso a nuove proprietà dei materiali ed alle nuove caratteristiche di dispositivi che non ha precedenti. Ogni anno, un sempre maggior numero di ricercatori provenienti da un'ampia gamma di discipline viene coinvolto in questo campo, ed ogni anno si assiste ad un aumento di nuove idee ed all'esplosione di nuove opportunità nella scena internazionale delle attività sulle nanostrutture. Dal secondo risultato dello studio si evince come in tutto il mondo ci sia un ampio spettro di discipline che contribuisce allo sviluppo della nanoscienza e della nanotecnologia. Il rapido aumento del livello delle attività interdi-

sciplinari nel campo della nanostrutturazione è eccitante e diventa sempre più importante, è proprio nella intersezione tra le varie discipline che risiede la vera novità<sup>12</sup>.

Anche se i dati presentati non sono ovviamente esaustivi, possono essere però considerati sufficienti per trarre alcune conclusioni, peraltro già accennate, ma che trovano ora maggior forza. Le attività sulle nanotecnologie, sia esse di tipo scientifico sia tecnologico, devono tenere conto dell'aspetto interdisciplinare con cui evolvono le conoscenze in tale campo.

### Nano-paper e nano-patent nel mondo

Il numero di pubblicazioni e di brevetti disaggregati per nazione sono un altro indicatore su come le nanoscienze rivestano un ruolo importante per lo sviluppo futuro della ricerca scientifica e tecnologica. È fuor di dubbio infatti che alcuni paesi sono

<sup>12</sup> RICHARD W. SIEGEL, Rensselaer Polytechnic Institute Panel Chair in: *Nanostructure Science and Technology a Worldwide Study*, Edited by R. W. Siegel, E. Hu, M. C. Roco, WTEC (World Technology Division), Loyola College in Maryland, 1999, p. xvii.



tradizionalmente all'avanguardia nelle attività di ricerca, sia in termini di investimenti che in termini di indicazioni delle linee strategiche di tali attività. Infatti, paesi come gli Stati Uniti, la Germania, il Giappone, la Francia ed il Regno Unito hanno rivestito negli ultimi 50 anni un ruolo di guida nella ricerca scientifica e tecnologica. Anche nel caso delle nanotecnologie e nanoscienze, i dati riportati nelle tabelle 2 e 3 sui nano-articoli e sui nano-brevetti confermano tale ruolo almeno in termini assoluti. È interessante l'inserimento della Repubblica Popolare Cinese nel gruppetto di testa delle nazioni a più alta produttività di pubblicazioni e brevetti (tabella 3). Fare un'analisi critica del perché esiste una classifica dei paesi coinvolti nello sviluppo delle nanoscienze (tabella 2 e seguenti) va oltre gli scopi di questo articolo, mentre invece è importante utilizzare come ulteriore indicatore dell'importanza delle nanoscienze, il livello di coinvolgimento dei paesi tecnologicamente avanzati che tradizionalmente hanno una funzione di traino dell'economia mondiale. Un'ulteriore informazione può essere ottenuta anche dal valore del rapporto tra le nano-pubblicazioni ed i nano-brevetti che, in prima approssimazione, indicano la capacità di trasferire le conoscenze dal mondo della ricerca a quello applicativo-industria-

le. Nella quarta colonna della tabella 2, il valore di tale rapporto viene riportato e mostra che i paesi in testa alla classifica (nazioni guida) hanno anche un proficuo rapporto tra il mondo della ricerca ed il mondo industriale. I dati della tabella 2 e 3 vanno però letti con attenzione, in quanto riportano i valori assoluti delle pubblicazioni e non tengono conto per esempio del numero di abitanti (che in qualche modo dovrebbe essere correlato con il numero di addetti alle nano-attività) o del prodotto interno lordo (generalmente proporzionale ai finanziamenti impiegati nella ricerca). Una certa sorpresa viene riservata da questi dati eseguendo la normalizzazione per milione di abitanti come riportato nella tabella 4, e confrontando questa con la tabella 3, si può notare che la classifica viene completamente cambiata. I primi posti sono infatti occupati da paesi di modeste dimensioni in termini di numero di abitanti (fatta eccezione per la Germania) ma che evidentemente hanno elaborato delle strategie che li porta ad investire pesantemente le proprie risorse umane sulle nano-scienze e nano-tecnologie.

## Conclusioni

Nanoscienza e nanotecnologia costituiscono un binomio il cui impetuoso sviluppo ha ormai superato le ristrette cerchie degli

	Pubblicazioni (1997-99) (%)		Brevetti EPO&PCT (1991-99) (%)	
1	23,7	USA	42,0	USA
2	12,5	Giappone	15,3	Germania
3	10,7	Germania	12,6	Giappone
4	6,3	Cina	9,1	Francia
5	6,3	Francia	4,7	Regno Unito
6	5,4	Regno Unito	3,7	Svizzera
7	4,6	Russia	2,0	Canada
8	2,6	Italia	1,7	Belgio
9	2,3	Svizzera	1,7	Olanda
10	2,1	Spagna	1,7	Italia
11	1,8	Canada	1,4	Australia
12	1,8	Corea del Sud	1,1	Israele
13	1,6	Olanda	1,1	Russia
14	1,4	India	0,9	Svezia
15	1,4	Svezia	0,5	Spagna

**Tabella 3**

Classifica delle nano-pubblicazioni e dei nano-brevetti delle prime 15 nazioni. I dati sono espressi in termini percentuali rispetto al totale pubblicato<sup>9</sup>

**Tabella 4**

Classifica delle nano-pubblicazioni e dei nano-brevetti normalizzati delle prime 15 nazioni. I dati sono normalizzati per milione di abitanti

	Pubblicazioni per milione di abitanti (1997-99)		Brevetti (EPO&PCT) per milione di abitanti (1991-99)	
1	150,2	Svizzera	12,2	Svizzera
2	91,4	Israele	4,4	Germania
3	73,5	Svezia	3,9	Israele
4	61,5	Germania	3,8	Belgio
5	56,9	Danimarca	3,6	Francia
6	56,8	Singapore	3,5	USA
7	52,6	Austria	2,4	Olanda
8	50,0	Francia	2,4	Svezia
9	48,3	Finlandia	2,3	Giappone
10	47,7	Olanda	1,8	Regno Unito
11	46,4	Giappone	1,5	Canada
12	43,6	Belgio	1,3	Australia
13	42,7	Regno Unito	1,0	Austria
14	39,2	USA	0,5	Italia
15	36,0	Slovenia	0,3	Spagna

specialisti investendo parti crescenti della società civile in confronti, dibattiti, riflessioni; queste due parole inoltre sono ormai divenute parole chiave in numerosi piani nazionali o sopranazionali di ricerca.

Partendo da questa base, si è voluto sviluppare un ragionamento che costituisce ad un tempo una fondamentale premessa per la comprensione del fenomeno (è una rivoluzione scientifica?) ed un incisivo spunto di riflessione strategica sugli impatti delle tecnologie derivate sul sistema produttivo (è un salto di paradigma tecnologico?). La risposta a tali domande non è povera di conseguenze e può condizionare profondamente le modalità di approccio al problema sia in termini di risorse che di strumenti di intervento. A questo proposito suona come monito quanto affermato da J. Zysman nell'articolo "Nazioni, istituzioni e sviluppo tecnologico"<sup>13</sup>: "...Man mano che nuove ricerche diventano rilevanti, sono necessari requisiti di tipo diverso per quanto riguarda il finanziamento, le competenze, l'organizzazione e le regole di mercato."

Per affrontare il problema in termini il più possibile oggettivi, si sono considerati i dati "bibliometrici" su pubblicazioni e brevetti a partire dal 1988, con l'intento di di-

mostrare in termini quantitativi quanto seriamente siano intervenuti in questo campo i paesi tradizionalmente trainanti in campo tecnologico. I risultati naturalmente non sono sorprendenti, anche se da un'analisi più dettagliata (dati normalizzati per milioni di abitanti) portano ai primi posti alcuni paesi piccoli, ma di grande spessore tecnologico come Svizzera ed Israele. Quest'ultimo aspetto appare particolarmente significativo ed è sicuramente uno dei punti che è necessario approfondire, specialmente in relazione a considerazioni di strategia industriale per un paese come l'Italia.

C'è però un aspetto a questo proposito che è più rilevante degli altri e che si ritiene opportuno evidenziare e porre in discussione: esso consiste nel collegare la presenza di tali paesi nell'attuale fase dello sviluppo delle nanotecnologie con uno straordinario accorciamento dei tempi di trasferimento delle tecnologie dai paesi trainanti ai paesi utilizzatori di grande tradizione *hi-tech*; se è questo che sta realmente avvenendo, significa che si va rapidamente consolidando e definendo il gruppo di paesi che ha superato lo spartiacque del nuovo paradigma tecnologico e che il divario rispetto agli altri rischia di diventare incolmabile.

<sup>13</sup> ZYSMAN, "Nazioni, istituzioni e sviluppo tecnologico", in *Scienza e tecnologia verso il nuovo millennio*, AA.VV., (2001), pp. 31-79, ed. ENEA.

---

# Calcolatori quantistici



Un racconto sulle macchine calcolatrici del futuro,  
in cui si parla della vera lunghezza dei numeri,  
dell'entropia di un calcolatore e di quel che si può o  
non si può calcolare

**FABRIZIO CLERI**

ENEA  
UTS Materiali e Nuove Tecnologie

Accade spesso nella scienza che risultati importanti scaturiscano dalla combinazione di idee apparentemente prive di alcuna relazione. E due idee apparentemente scorrelate sono meccanica quantistica e calcolatore. Che relazione c'è tra la descrizione fisica del mondo atomico e subatomico e una macchina che serve 'solo' per fare calcoli? Una possibile osservazione che verrà subito in mente a qualche lettore è la seguente: "Beh, ma in fondo se al nome 'calcolatore' si aggiunge, correttamente, l'attributo 'elettronico' le due idee non sono mica poi tanto scorrelate: tutti sanno che i transistor che svolgono il lavoro computazionale dentro un moderno calcolatore elettronico sono costruiti con materiali speciali, i 'semiconduttori', il cui funzionamento è profondamente basato proprio sulle leggi della meccanica quantistica." Osservazione vera solo a metà. È infatti perfettamente vero che un transistor funziona solo in virtù di processi fisici governati in ultima analisi dalla meccanica quantistica, ma d'altra parte è altrettanto vero che ogni transistor in un calcolatore elettronico viene comandato da impulsi di corrente elettrica 'macroscopici', forniti cioè da un normalissimo alimentatore a corrente continua che obbedisce alle leggi dell'elettromagnetismo classico stabilite da James Clerk Maxwell ben più di cento anni fa. Dunque, il comportamento di un transistor dal punto di vista dell'utente che pesta numeri e lettere sulla tastiera è perfettamente comprensibile e prevedibile sulla base della fisica classica di fine '800.

Per capirci, quando premete sulla tastiera il tasto con la lettera 'k', sullo schermo del vostro personal computer appare esattamente il simbolo 'k' in maniera assolutamente prevedibile, ripetibile e sicura (tanto sicura che se questo evento, per caso, non dovesse succedere riportereste subito il vostro personal computer al rivenditore, protestando con buona ragione). La lettera 'k' appare, senza starsi a preoccupare del principio di indeterminazione o della com-

plementarità<sup>[1]</sup> tra le variabili posizione e velocità del tasto 'k', né di posizione e velocità di tutti gli elettroni che fluiscono nei circuiti interni del calcolatore ... la vostra brava lettera 'k' appare sullo schermo, precisa e prevedibile, proprio nel punto che voi richiedete. Non lasciatevi fuorviare. La combinazione di meccanica quantistica e calcolatori che stiamo inseguendo in questo articolo è, invece, legata in maniera molto più profonda al funzionamento dei dispositivi elementari che svolgono le operazioni dentro un calcolatore elettronico. In particolare, quello che ci domandiamo è se e come la natura quantistica dei costituenti fondamentali della materia, atomi, protoni, elettroni, possa interferire con il funzionamento di un calcolatore elettronico quando le dimensioni dei suoi dispositivi, i transistor, diminuiscono fino ad approssimarsi alla scala atomica, circa un decimo di milionesimo di metro, o  $10^{-10}$  (significa 10 elevato alla potenza -10, ovvero 1 diviso per 10 elevato alla potenza 10) metri.

Ricordiamo che già oggi i transistor hanno dimensioni dell'ordine di circa  $10^{-7}$  metri, solo mille volte maggiori del limite atomico, e tali dimensioni continuano a scendere a ritmo circa costante grazie alla tecnologia di integrazione elettronica sempre più spinta.

Dunque, armati solo di alcune elementarissime nozioni di meccanica quantistica, facciamo un potente salto concettuale e proviamo ad immaginare un calcolatore i cui componenti elementari siano delle dimensioni di un singolo atomo. Un calcolatore la cui memoria sia enormemente grande, esponenzialmente<sup>[2]</sup> più estesa della sua reale dimensione fisica in megabytes. Un calcolatore che possa lavorare in parallelo su un set di dati anch'esso esponenzialmente grande. Un calcolatore che svolga le sue operazioni non nell'ordinario spazio euclideo tridimensionale, quello nel quale noi continuiamo a schiacciare i tasti della sua tastiera, ma in uno spazio surreale e iper-reale, lo spazio di Hilbert, che comprende tutte le possibili

funzioni matematiche che si possono costruire a partire dalle variabili che definiscono lo stato dei suoi dati.

Quello che stiamo immaginando è un calcolatore quantistico.

## I misteri della funzione d'onda

L'idea di un calcolatore quantistico è semplice, sebbene la sua realizzazione pratica non lo sia altrettanto. Ragionando per analogia, cominciamo col ricordare che in un calcolatore ordinario tutte le cifre binarie, o bit, di un numero scritto in un registro di memoria hanno un valore ("stato") ben definito, 0 oppure 1, a ciascun istante nel tempo: ad esempio 01100101 per un registro di memoria ad 8 bit.

In un calcolatore quantistico, invece, diremmo che lo stato di quel certo registro è descritto da una "funzione d'onda"  $\Psi$  dei diversi stati 0 e 1 dei singoli bit, e scriveremo una formula matematica del tipo:

$$|\Psi\rangle = a_1 |01100101\rangle + a_2 |11101011\rangle + a_3 |01010001\rangle + \dots$$

Quella che abbiamo appena scritto è una espressione del cosiddetto 'principio di sovrapposizione' della meccanica quantistica. Tale fondamentale principio afferma che la descrizione più completa possibile di un sistema che ammette tanti stati diversi è data da una funzione matematica (appunto la funzione d'onda  $\Psi$ ) che descrive la combinazione, o sovrapposizione, di tutti questi stati. La formula dice quindi che tutte le possibili combinazioni di 0 e 1 degli otto bit che costituiscono il registro sono presenti nella  $\Psi$  moltiplicate per dei numeri, in generale complessi,  $a_1, a_2, a_3, \dots$  (la scrittura '...' in matematica vuol dire 'eccetera'). Questo vuol dire che se vi chiedete qual è il valore del terzo bit nel vostro registro ad 8 bit non è possibile semplicemente andarlo a guardare e vedere se segna 0 o 1. Il suo valore è contenuto nella funzione d'onda in maniera complicata, mescolato contemporaneamente a quello degli altri sette

bit. Per di più questo valore non è 'semplicemente' mescolato. La descrizione quantistica delle condizioni di un sistema mediante una funzione d'onda ci costringe a passare dal dominio delle certezze e della prevedibilità del mondo macroscopico all'apparente caos di incertezza ed imprecisione del mondo atomico. Secondo le regole della meccanica quantistica, le possibili combinazioni di bit, scritte nella formula precedente con la simbologia  $|\dots\rangle$ , rappresentano una descrizione completa (cioè una "base") di tutti gli stati possibili del registro considerato. Ed un'altra particolare funzione matematica costruita a partire dalla funzione d'onda, cioè il suo modulo elevato al quadrato – che si indica convenzionalmente con il simbolo  $|\Psi|^2$  – descrive la probabilità complessiva di trovare il registro in uno qualsiasi dei suoi possibili stati. Corrispondentemente a questa definizione, in meccanica quantistica possiamo misurare soltanto la probabilità che l'intero registro si trovi proprio in un certo stato ben definito, ad esempio 01100101: questa probabilità è uguale al valore numerico  $|a_1|^2$ , cioè il modulo elevato al quadrato del corrispondente coefficiente della funzione d'onda. Se la cosa vi appare troppo difficile, per ora concentratevi soltanto su questo concetto fondamentale: dobbiamo rinunciare all'idea che ogni singolo bit del registro abbia in ogni istante un valore ben preciso e dobbiamo invece convivere con l'idea che il registro nel suo complesso sia descritto da una particolare sequenza di 0 e 1 solo con una certa probabilità. Questo fatto si chiama 'involuppo' (o *entanglement*) della funzione d'onda complessiva di più oggetti elementari.

Come stiamo appena cominciando ad intravedere, un calcolatore quantistico si basa proprio sui concetti di probabilità ed indeterminazione tipici della meccanica quantistica. Però il descrivere probabilisticamente lo stato di un calcolatore quantistico non ha a che fare con le incertezze e le probabilità della vita di tutti i giorni. Ad

esempio, se la nostra banca disponesse di un calcolatore quantistico per svolgere le sue operazioni non dovremmo necessariamente aspettarci di trovare ogni tanto, con una certa probabilità, il doppio dei quattrini nel nostro estratto conto. In quanto numeri complessi, i coefficienti  $a_1, a_2, \dots$  sono caratterizzati da un 'modulo' e da una 'fase' (un po' come la freccia di un cartello stradale è caratterizzata da una lunghezza e da una direzione). Proprio le fasi dei coefficienti hanno un significato fisico particolarmente interessante: esse infatti possono descrivere fenomeni di interferenza tra stati diversi nel nostro calcolatore, molto simili agli ordinari fenomeni di interferenza ottica tra onde luminose che danno luogo, ad esempio, agli affascinanti colori cangianti sulla superficie delle bolle di sapone. L'uso di tali fenomeni, puramente quantistici, di interferenza 'numerica' (anziché ottica) risulta essere un modo di svolgere calcoli estremamente efficiente, assai più efficiente delle normali operazioni di addizione o moltiplicazione che tutti conosciamo.

Secondo la meccanica quantistica, la funzione d'onda  $\Psi$  dichiara che ogni registro del calcolatore quantistico esiste simultaneamente in tutti i suoi possibili stati finché non viene effettuata una misura del contenuto del registro: solo quando operiamo con un processo fisico di misura osserviamo un particolare stato  $k$ , ad esempio il solito 01100101, con probabilità  $|a_k|^2$ . Le proprietà "esponenziali" del calcolatore quantistico provengono proprio da questa esistenza simultanea di tutti i possibili stati dei suoi registri. Abbiamo accennato precedentemente che il calcolatore quantistico opera in uno spazio particolare, lo spazio delle funzioni matematiche (ad esempio il modulo, la retta, la parabola, ...) costruibili con tutti i suoi stati; tale spazio è detto spazio di Hilbert. Così come il nostro spazio euclideo ha tre dimensioni (la larghezza, l'altezza e la profondità), il numero di dimensioni dello spazio di Hilbert per un sistema (il calcolatore quantistico) composto

di  $N$  variabili ( $i$  registri di memoria) a 2 stati (lo 0 e lo 1) è pari a  $2^N$ , cioè aumenta esponenzialmente all'aumentare di  $N$ . In un calcolatore convenzionale, un chip di memoria RAM da 1 kbyte può immagazzinare solo 8 mila bit in forma di numeri 0 o 1 (un byte è pari ad 8 bit), mentre un calcolatore quantistico che disponga anch'esso di 1 kbyte è in grado di immagazzinare una quantità di informazione pari a tutti gli stati degli 8 mila bit che riempiono il suo spazio di Hilbert, cioè  $2^{8000}$ , un numero inimmaginabilmente enorme, che potremmo approssimare come dieci seguito da duecentoquattrocento zeri!

Ed il parallelismo, per quanto detto appena sopra, viene gratis. Un calcolatore convenzionale è sempre costretto ad eseguire le sue computazioni sequenzialmente: ad esempio, l'operazione  $X=3+5$  viene eseguita ponendo anzitutto il numero 3 in un registro temporaneo, poi il numero 5 in un altro registro temporaneo, spostando quindi il contenuto del primo registro nel registro della  $X$  e sommandoci infine il contenuto del secondo registro. Se, poi, tale operazione va compiuta per tanti registri di  $X$  diverse, nei quali debbono ad esempio essere sommate altrettante coppie di numeri interi  $N$  ed  $M$ , come  $X=N+M$ , il calcolatore dovrà eseguire in sequenza tante volte la stessa procedura descritta quante sono le coppie di registri per le quali la computazione va effettuata. Se ciascuna computazione prende una certa quantità di tempo elementare, il tempo totale necessario sarà dunque dato dal prodotto del tempo elementare per il numero dei registri contenenti le varie  $X$  da calcolare. In un calcolatore quantistico, invece, ogni variazione dello stato di un registro si ripercuote simultaneamente su tutte le possibili funzioni nello spazio di Hilbert che dipendono dallo stato di quel registro (ricordate, la formula della funzione d'onda scritta sopra contiene simultaneamente tutte le possibili combinazioni degli stati di un registro: variare la funzione d'onda del registro significa va-

riare simultaneamente il contributo di tutte queste possibili combinazioni). Quindi le operazioni come la  $X=N+M$  sopra descritta verranno compiute simultaneamente (in parallelo) per tutti i registri interessati, in un solo intervallo di tempo elementare. Questo rivoluzionario modo di svolgere calcoli ed ottenere risultati in parallelo su tutti i possibili stati quantici di un registro costituisce l'essenza della "computazione quantistica" (o *quantum computing*).

## La computazione quantistica

Bisogna innanzitutto notare una cosa. Oggi, a circa 15 anni di distanza dall'idea iniziale, sulla computazione quantistica si sa teoricamente già tutto. Ogni anno si svolgono nel mondo diversi convegni specialistici, popolati da numerosi scienziati, più che altro matematici, in grado di descrivere teoricamente computazioni estremamente complesse svolte sui cosiddetti *qubits* (*quantum bits*), che parlano comunemente di concetti tipo *entanglement*, decoerenza, teletrasporto, compressione dei dati, codifica superdensa, correzione degli errori. Sfortunatamente, però, non è stato ancora possibile fabbricare un solo reale circuito logico operante sui *qubits* in maniera stabile e riproducibile, e lo stesso concetto di *qubit* è difficile da tradurre in una qualche grandezza fisica affidabile e misurabile.

"Ehi!" starà dicendo adesso qualche lettore, "ma questo qui ci vuol prendere in giro. Sta parlando di un calcolatore che fa mirabilia, che calcola quantità impressionanti di numeri a velocità strabiliante, ma che ha un solo difetto: non esiste!". In effetti, a tutt'oggi esistono solo alcuni esperimenti di fisica atomica, estremamente complessi e raffinati, fatti su sistemi composti da due atomi o due quanti di luce (fotoni), cioè su spazi di Hilbert con appena  $2^2=4$  stati. E l'intero 'circuito logico' che lavora con questi due *qubits* occupa lo spazio di una stanza di laboratorio! Si direbbe che c'è ancora molta, molta strada da fare ... Ma ricordatevi che

all'inizio degli anni 50 il calcolatore ENIAC occupava un intero edificio, mentre il computer portatile che trent'anni dopo avete nella vostra borsa è circa un milione di volte più piccolo e circa un miliardo di volte più potente del mostruoso ENIAC. Vedremo alla fine di questo articolo alcune delle strade oggi ipotizzate per costruire dispositivi in grado di svolgere operazioni sui *qubits*. Ma, per il momento, continuiamo ad occuparci della teoria.

Stando alle cronache, tutta la storia della computazione quantistica sarebbe cominciata intorno alla metà degli anni 80 da una discussione tra Charles Bennett ed un personaggio molto amato e compianto anche dal pubblico non specialista, il premio Nobel per la fisica Richard Paul Feynman. Bennett, allora all'IBM di Yorktown Heights in California, stava studiando il problema della "termodinamica della computazione", cioè i fenomeni legati alla produzione di entropia e dissipazione di energia<sup>[3]</sup> nelle operazioni elementari svolte sia dai veri e propri dispositivi elettronici che da altri dispositivi di calcolo più generali, idealizzati. Tali problemi erano e sono di grande interesse, poichè uno dei principali limiti pratici alla potenza dei calcolatori è proprio legato alla dissipazione di energia e al surriscaldamento dei circuiti elettronici. Feynman afferma che Bennett, durante una discussione su tali argomenti, gli aveva suggerito di pensare, in qualità di esperto di meccanica quantistica, alle eventuali limitazioni poste dal principio di indeterminazione nei suoi problemi di termodinamica del calcolo. Sull'onda di questo suggerimento, Feynman (che era un tipo estremamente curioso e non si faceva spaventare dalle difficoltà scientifiche di nessun genere) svolse un bellissimo studio di principio, prontamente pubblicato in *Optics News* del febbraio 1985. Cercando di rispondere a Bennett, egli pensò ad una macchina ideale composta da elementi operativi quantistici per la quale definì una particolare classe di funzioni matematiche dette hamil-

toniane<sup>[4]</sup> che ne potessero permettere l'impiego come "calcolatore".

Il suo primo pensiero fu che le leggi della meccanica quantistica (come pure quelle della meccanica classica, dell'elettromagnetismo o della gravità) sono reversibili nel tempo, cioè i fenomeni che esse descrivono avvengono allo stesso modo se l'orologio del laboratorio si muove in avanti, verso il futuro, o all'indietro, verso il passato. Una macchina da calcolo quantistica dovrebbe quindi operare in maniera completamente reversibile.

Ma in termodinamica il concetto di macchina reversibile è sinonimo di operazioni ideali di trasformazione di energia, che avvengono cioè senza dissipare alcuna quantità di calore e con aumento di entropia nullo. E nessuna macchina termica reale è in grado di operare in maniera completamente reversibile, poichè il mondo reale contiene a tutti i livelli diversi gradi di irreversibilità (si pensi, ad esempio, all'attrito presente in maniera ineliminabile in un qualsiasi dispositivo meccanico). Il che è solo un altro modo di dire, secondo il secondo principio della termodinamica, che il calore può passare solo da un corpo più caldo ad uno più freddo, o che non esiste in natura alcuna forma di *perpetuum mobile*. Il massimo che si riesce ad ottenere nella pratica è una macchina in grado di compiere trasformazioni cosiddette *adiabatiche*, nelle quali lo stato del sistema varia in maniera impercettibile tra un istante e l'altro e la dissipazione di energia è quindi ridotta al livello minimo consentito dalla termodinamica. Fu proprio sfruttando in maniera estremamente originale ed intelligente il concetto di macchina *adiabatica* che il grande Rick Feynman risolse il problema dal punto di vista teorico, gettando le basi di tutti gli sviluppi successivi della teoria della computazione quantistica.

### Ma quanto è grande un numero?

Secondo la moderna scienza dei calcolatori, un "calcolatore universale" può essere

costruito da una rete, complessa a piacere, fatta di un numero, grande a piacere, di elementi primitivi interconnessi. In un calcolatore convenzionale tale rete sarebbe costituita da un insieme di fili elettrici che trasportano da un elemento primitivo all'altro i due voltaggi standard che rappresentano lo 0 e lo 1, ad esempio  $-5$  e  $+5$  Volt. Gli elementi primitivi che connettono tra loro i registri devono essere quelli della logica booleana, cioè AND, OR e NOT. Tali elementi primitivi sono in grado di fornire una risposta (cioè un certo valore di voltaggio in uscita) in funzione dello stato dei registri in ingresso. Ad esempio, un elemento AND dà una risposta positiva (voltaggio "alto", ovvero  $+5$  Volt, ovvero 1) solo se il valore di tutti i registri in ingresso è positivo; l'elemento OR invece dà un valore positivo se almeno uno dei registri è positivo; NOT trasforma un ingresso positivo in una uscita negativa o viceversa. Con l'aiuto di semplici teoremi di teoria della computazione si può far vedere che in realtà bastano solo due elementi primitivi combinati, ad esempio AND e XOR (OR esclusivo, positivo se uno e uno solo degli ingressi è positivo), oppure NAND (somma di NOT e AND) e OR, per compiere qualsiasi operazione logica nelle computazioni abitualmente svolte dai calcolatori convenzionali (compresi quelli che quasi ognuno di noi ha sul suo tavolo).

Per amor di completezza, notiamo che per gli scopi della computazione quantistica bisogna anche considerare il "filo" in un certo livello di dettaglio, poichè un calcolatore quantistico potrebbe non avere affatto fili ma, ad esempio, impulsi di luce che rimbalzano tra due molecole. Ci si accorgerà allora che abbiamo in realtà bisogno di altre due primitive logiche, chiamate rispettivamente FANOUT (due fili legati ad uno solo) e EXCHANGE (due fili collegati in croce). Ma questo non cambia l'essenza del ragionamento che stiamo facendo.

Nell'unità centrale di un calcolatore convenzionale (la famosa CPU, o *central pro-*



cessing unit) ognuno degli elementi primitivi booleani è realizzato mediante combinazione di un certo numero di transistor, una mezza dozzina o giù di lì. E in una CPU sono presenti centinaia di migliaia di elementi logici primitivi (i *gates*), per un totale di parecchi milioni di transistor, raggruppati ed organizzati secondo un ordine ben preciso predisposto dagli ingegneri che hanno progettato il chip di silicio contenente la CPU.

Ma quanto è grande un numero? Qualcuno penserà che questa è una domanda sciocca, e che un numero è ovviamente grande ... quanto il numero stesso. Cioè, il numero mille è proprio mille, ed è ovviamente più grande del numero centoventisette. Se però come 'lunghezza di un numero' definissimo, ad esempio, la quantità di lettere necessaria per scriverlo in italiano (o anche in inglese), il numero centoventisette sarebbe più grande del numero mille. Non vi sto di nuovo prendendo in giro. La 'lunghezza di un numero' è un concetto molto serio che sta, tra l'altro, alla base della teoria dell'informazione. Numeri che definiscono quantità estremamente grandi o estremamente precise (cioè che richiedono un elevato numero di cifre decimali) possono essere spesso codificati in maniera molto più compatta, che non stupidamente enumerando tutte le cifre che li compongono. Anche perchè queste potrebbero essere infinite... Ad esempio, per definire il numero periodico 1,333333... fatto da una cifra 1 seguita da una quantità infinita di cifre 3, basta convenzionalmente scrivere un trattino sopra una sola cifra 3, cioè  $1,\overline{3}$ . Oppure si può scriverlo in forma razionale, cioè come un rapporto di altri due numeri più 'semplici', cioè  $4/3$ . Con pochissimi simboli, quindi, possiamo codificare una quantità di cifre teoricamente infinita senza perderne il significato. Esiste però una categoria di numeri, identificata dal matematico russo Gregory Chaitin, che è 'incomprimibile', cioè che occupa una lunghezza pari alla quantità di cifre che de-

finiscono il numero stesso. Il prototipo di tali numeri è il cosiddetto numero 'omega di Chaitin', che è inoltre un numero reale cioè non scrivibile come il rapporto di due numeri interi. Un tale numero ha una quantità infinita di cifre, come qualsiasi numero reale, ma non lo si può scrivere in altro modo che elencando tutte le sue cifre una dietro l'altra!

Per un calcolatore elettronico questo è un compito in linea di principio impossibile. Nei registri dei calcolatori si possono scrivere, infatti, soltanto numeri di lunghezza ben definita, e se un numero ha più cifre significative di quante ne permetta il registro... beh, bisogna 'troncarlo', cioè scriverlo in maniera approssimata. E questo è vero per tutti i numeri reali, non solo per i numeri di Chaitin. Ad esempio, il simbolo "pi greco" indica un numero reale con infinite cifre, le cui prime sono come è noto 3,1415926539.... Questo non è un numero di Chaitin: possiamo darne infatti una assai concisa definizione geometrica lunga appena dodici parole italiane, cioè "il rapporto tra la lunghezza di una circonferenza e il suo diametro", oppure una ancor più sintetica definizione trigonometrica (che oltretutto è valida in qualsiasi lingua terrestre e non soltanto in italiano) come  $4 \cdot \arccos(1)$  che tradotta in italiano suona: "quattro volte la misura in radianti dell'arco il cui coseno vale uno". Peraltro, in uno dei nostri moderni, potentissimi calcolatori non possiamo far altro che scrivere il nostro  $\pi$  in forma approssimata, ad esempio fermanoci alle sue prime otto cifre significative 3,1415926. Questa è dunque la grandezza dei numeri che abbiamo in mente? Otto cifre alla volta? No, anche questa volta non lasciatevi fuorviare dai pur affascinanti argomenti della teoria dell'informazione.

Ci stiamo chiedendo, invece: qual è la dimensione fisica di un bit in un calcolatore elettronico convenzionale? Questa dimensione ci servirà, alla fine, per scoprire quanto calore dissipa un calcolatore per ogni operazione svolta. Vediamo di trovar-

ne una stima approssimata. Secondo numeri abbastanza recenti, un chip di tipo CMOS (la tecnologia più recente, che permette di fabbricare delle CPU molto compatte partendo da materiali fatti a strati di semiconduttori ed ossidi metallici) delle dimensioni lineari di qualche centimetro, contiene circa un miliardo di transistor per  $\text{cm}^2$ . Facendo un conticino a spanne, in un  $\text{cm}^2$  possiamo mettere oltre  $10^{16}$  atomi, quindi ogni transistor è fatto da almeno  $10^8$  atomi. Cioè, dal nostro punto di vista, un numero binario come 0 o 1 è 'grande' circa qualche centinaio di milioni di atomi. Questo valore torna abbastanza bene con la stima sperimentale della minima quantità di energia che bisogna dissipare per operare su un bit, che è dell'ordine di  $10^9$  unità  $k_B T^{[5]}$  per operazione. Cioè ogni atomo consuma all'incirca una unità  $k_B T$  di energia mentre il transistor svolge la sua operazione sulla cifra binaria assegnatagli. Abbiamo così trovato la dimensione fisica di un numero come viene immagazzinato nel registro di memoria di un calcolatore. In apparenza tale dimensione sembra, come abbiamo detto, ragionevole. E altrettanto ragionevole sembra la quantità ingegneristica ad esso collegata, la stima del calore dissipato per cambiare di valore questo numero 'fisico', ad esempio da 0 a 1. D'altra parte, la stima di principio di questa stessa quantità di calore per un calcolatore ideale è invece ridicolmente più bassa. Vediamo un po' come si ottiene questa stima teorica. Se cambiamo 'adiabaticamente' lo stato di un bit con una operazione AND, il nuovo valore dello stato sarà uno dei due valori possibili 0 o 1, indipendentemente da quello che era prima. Quindi secondo la termodinamica la variazione di energia interna sarà nulla (i due stati sono perfettamente equivalenti), mentre la variazione di entropia sarà di  $\log 2$  unità. In termini di dissipazione di calore avremmo quindi una quantità pari a  $k_B T \log 2$  unità, se la trasformazione avviene alla temperatura  $T$ , cioè circa  $0,69 k_B T$ : un valore un miliardo

di volte inferiore del  $10^9 k_B T$  trovato per un calcolatore elettronico reale.

Questo ragionamento era stato già fatto dal matematico Rolf Landauer nel 1961, ed è quindi noto come "principio di Landauer". Per molto tempo questo valore era stato ritenuto un limite inferiore assoluto, ottenuto sulla base di criteri rigorosamente termodinamici, per la dissipazione di calore in una operazione elementare di calcolo. In altre parole nessun calcolatore, reale o ideale, può consumare meno di  $0,69 k_B T$  unità di energia per svolgere anche il più elementare dei calcoli.

### Perché un calcolatore dissipa energia (e produce entropia...)

Ma la questione sembra del tutto accademica, poiché abbiamo appena detto che un calcolatore vero dissipa circa  $10^9 k_B T$  per ogni operazione elementare, un numero enormemente più grande: per questo nelle macchine del mondo reale siamo così preoccupati della dissipazione di calore! Bennett si accorse che questa enorme discrepanza è dovuta al modo operativo piuttosto brutale che viene usato nei calcolatori per cambiare il valore di un bit. Infatti, in un calcolatore convenzionale per cambiare il voltaggio di un transistor (cioè passare da 0 a 1 o viceversa) questo viene "scaricato a terra", facendo passare della corrente elettrica (cioè un flusso di elettroni) attraverso una resistenza (una specie di setaccio che fa perdere gradualmente energia agli elettroni); e per riportare il voltaggio al valore iniziale dobbiamo di nuovo far passare la stessa quantità di corrente attraverso la medesima resistenza. Un tale processo è altamente dissipativo poiché coinvolge il flusso di un enorme numero di elettroni lungo il filo metallico conduttore e gli elettroni, nel condurre elettricità da un punto all'altro del filo, sprecano quasi tutta la loro energia in calore riscaldando il filo (notiamo, di passaggio, che una delle strade per miniaturizzare l'elettronica digitale

è il tentativo di costruire dei transistor a "singolo elettrone", cioè di dispositivi in cui il passaggio di un solo elettrone permette di cambiare lo stato del sistema. Di questi processi, che vanno sotto il nome di "elettronica molecolare", magari parleremo un'altra volta...). La dissipazione di energia nel filo potrebbe essere fortemente ridotta se, ad esempio, la corrente da scaricare a terra potesse invece venire immagazzinata in una induttanza (una specie di circuito elettrico di parcheggio) per poi venire restituita al successivo cambiamento di stato. Tecnicamente però questa soluzione è di fatto impraticabile per una serie di complicate motivazioni tecniche, tanto che addirittura nelle macchine da calcolo "naturali" come il DNA si stima che l'operazione di copiatura di un singolo bit (rappresentato in questo caso una singola base proteica) da un punto all'altro della sequenza genetica dissipi una quantità di energia pari a circa 100 unità  $k_B T$ , anche questa assai maggiore del limite teorico di Landauer. Neanche la Natura è riuscita ad ottimizzare le risorse energetiche...

Dobbiamo dunque tenerci le nostre resistenze e rassegnarci a sprecare ogni volta un sacco di energia termica.

Ma se, allora, siamo già decine di miliardi di volte lontani dal valore ideale di Landauer  $k_B T \log 2$  può sembrare del tutto ridicolo starsi a chiedere se questo valore è davvero il limite inferiore o se questo limite non possa essere praticamente considerato uguale a zero. Questo problema però era fondamentale per Feynman, che aveva in mente processi di computazione completamente reversibili da poter poi trasferire nell'ambito del suo ideale calcolatore quantistico. Per Feynman lo zero doveva essere veramente zero, non bastava che fosse un numero ridicolmente piccolo. Feynman arrivò in effetti a formulare la teoria di un procedimento completamente reversibile (descritta sinteticamente nel riquadro "Calcoli quantistici termodinamicamente reversibili").

Feynman poteva così concludere il suo lavoro (puramente teorico) del 1985 in maniera abbastanza trionfalistica, affermando testualmente che "sembra che le leggi della fisica non presentino alcuna reale barriera nel ridurre le dimensioni dei calcolatori, fino ad avere bit della dimensione di un singolo atomo dove il comportamento quantistico dominerà". In un certo senso, questa era la sua brillantissima risposta agli amletici dubbi del suo amico Charles Bennett. E questo sembrerebbe essere il futuro che attende dietro l'angolo anche i nostri calcolatori, mentre le dimensioni fisiche dei singoli elementi attivi, i transistor di oggi, continuano a diminuire, arrivando pericolosamente a sfiorare il limite atomico.

### Complesso come un polinomio ... o di più?

Un punto importante che il pur esauriente Feynman non aveva toccato nel suo studio teorico riguarda un fatto di cui si accorse molto presto David Deutsch, un brillante matematico di Cambridge: un calcolatore quantistico può affrontare calcoli molto complessi in maniera estremamente efficiente con un uso "scaltro" della meccanica quantistica, realizzando cioè computazioni che sfruttino l'interferenza costruttiva tra le funzioni d'onda dei vari registri. Ma "quanto" complessi? Deutsch capì che la computazione quantistica era in grado di abbattere uno dei pilastri fondanti della scienza della computabilità, quello secondo cui esiste una unica definizione della complessità computazionale per ciascun problema matematico (vedi riquadro "Turing e la computabilità").

Un famoso esempio di calcolo non-polinomiale è la fattorizzazione di un numero nei suoi fattori primi. Consideriamo il numero  $N = 51688$ , il quale si fattorizza in  $2^3 \times 7 \times 13 \times 71$ . Questo numero ha cinque cifre, per cui la lunghezza del dato di input è dell'ordine di  $\log N$ , la base del logaritmo es-

## Calcoli quantistici termodinamicamente reversibili

In realtà Bennerr stesso aveva già dimostrato che il famoso limite di Landauer di  $k_B T \log 2$  per operazione era in realtà troppo grande poichè non è affatto necessario impiegare operazioni primitive ir-reversibili in un procedimento di calcolo ideale. In effetti, si può dimostrare che se il calcolo viene svolto con tutti elementi logici primitivi reversibili l'energia minima necessaria da dissipare diventa indipendente dal numero di operazioni logiche da eseguire nel calcolo, e vale ancora  $k_B T \log 2$  ma questa volta per ciascun bit del registro contenente il risultato finale della computazione (output). Questa energia dipendente solo dalla dimensione del registro dei risultati (quanto più grande è la cosa da calcolare, tanta maggiore energia va consumata) in realtà non è altro che quantità di energia necessaria per riazzere il calcolatore ad ogni nuovo utilizzo. In effetti, l'operazione logica di ERASE è l'unica operazione veramente non reversibile (neanche da un punto di vista logico), poichè partendo da uno stato qualsiasi (0 o 1) e riportandolo a zero dobbiamo portare a coincidere il risultato finale della nostra computazione (che sarà genericamente una qualsiasi combinazione di 0 e 1) con il registro 000000... (tecnicamente si direbbe che "dobbiamo comprimere lo spazio delle fasi di un fattore 2 per ogni bit di output"), cioè dobbiamo spendere una quantità di energia pari a  $k_B T \log 2$  per ogni bit dell'output.

Ma, si disse Feynman, anche questa minima energia di  $k_B T \log 2$  unità per ogni bit del registro di output potrebbe essere risparmiata, se si potesse usarla come parte dell'output stesso. Ad esempio la potremmo impiegare per controbilanciare l'entropia (legata alla trasformazione di informazione) nel trasmettere il risultato della computazione da un punto a un altro del calcolatore. Cerchiamo di capire come questo è possibile. Secondo Feynman, questo limite potrebbe essere raggiunto da un calcolatore ideale reversibile che lavori a velocità infinitesimale (cioè un calcolatore adiabatico). Feynman quindi si diede da fare a dimostrare come sarebbe possibile disegnare circuiti logici completamente reversibili mediante i quali costruire un calcolatore universale. Nella sua dimostrazione egli fa notare come un qualsiasi calcolo reversibile debba necessariamente produrre non solo il contenuto del registro di output ma anche una certa quantità di "spazzatura", cioè dei bit inutili. E dimostra poco dopo che questa spazzatura può sempre essere riarrangiata in modo tale che coincida proprio con il contenuto del registro di input. Questa produzione di spazzatura è necessaria per rendere reversibili operatori logici come AND, XOR, eccetera, che di per sé non lo sarebbero. Senza scendere in dettagli, diciamo che una tale procedura è reversibile poichè, conoscendo simultaneamente alla fine della computazione il contenuto del registro di input e di output, possiamo ripercorrere il circuito logico all'indietro e rimettere uno ad uno tutti gli stati nella loro condizione iniziale: spendiamo cioè l'informazione contenuta nei bit-spazzatura come una quantità di entropia esattamente corrispondente all'opposto della quantità di calore dissipata in ogni passo della computazione: il bilancio delle due quantità fa quindi zero.

Eureka! Disponiamo adesso di una logica di computazione a dissipazione nulla, cioè perfettamente reversibile e quindi applicabile ad un calcolatore quantistico.

E finalmente Feynman può passare a costruire un set di hamiltoniane quantistiche<sup>[4]</sup> in grado di riprodurre matematicamente tutte le operazioni primitive reversibili necessarie, componendo le quali in sequenze logiche arbitrarie si può realizzare l'equivalente quantistico del calcolatore universale a costo energetico nullo, in grado di svolgere una qualsiasi computazione arbitrariamente complicata.

sendo determinata dal sistema di numerazione nel quale esprimiamo  $N$ ; in questo caso stiamo usando il sistema decimale, per cui  $\log_{10}(51688) = 5.312$ , cioè circa 5, il numero di cifre dell'input appunto. Mentre per un numero relativamente piccolo, come quello dell'esempio, i suoi fattori primi (che abbiamo già scritti sopra: 2, 7, 13 e 71) possono essere facilmente trovati

con qualche semplice tentativo, trovare i fattori primi di un numero di lunghezza qualsiasi, anche con parecchie centinaia di cifre significative, può essere una operazione assai complessa. Per questo scopo esistono diversi procedimenti matematici di fattorizzazione che danno la soluzione. Un uso pratico assai importante di tali procedimenti di fattorizzazione è nella codifica

## Turing e la computabilità

Il concetto di complessità di una computazione venne introdotto dal matematico inglese Alan Turing in un suo famoso lavoro del 1936. Sebbene né Turing né nessun altro a quel tempo avesse alcuna idea del se e come un vero computer avrebbe potuto funzionare nel futuro (Von Neumann ancora non si era messo a pensare al problema), egli impiegò la suggestiva visione di una macchina immaginaria per il suo lavoro. Una "macchina di Turing" consiste di: un rotolo di carta, a tutti gli effetti di lunghezza infinita, suddiviso in cellette; una "testina" di scrittura (che potrebbe essere, indifferentemente, il cervello di Turing o il vostro cervello, o una calcolatrice tascabile, o anche un personal computer o chissà che altro) può scrivere un 1 quando trova uno 0 nella casella, può viceversa cancellare un 1 trasformandolo in 0, oppure può semplicemente leggere il contenuto della casella. Dopo aver compiuto una di queste tre operazioni, la testina può spostarsi di una cella a destra o a sinistra, oppure può fermarsi. Per ogni computazione matematica, secondo Turing, è possibile definire una combinazione di regole ("spostati a destra", "cancella il contenuto della cella", "vai a sinistra", "se trovi uno zero cambialo in uno" e così via...) che consentono alla testina di svolgere la computazione in un certo numero – magari lunghissimo, ma finito – di passi elementari. Un tale dispositivo, interamente ideale, è secondo Turing una macchina universale in grado di svolgere qualsiasi computazione, e quindi dovrebbe rappresentare il paradigma concettuale per qualsiasi macchina da calcolo passata o futura.

Il risultato straordinario di un tale procedimento astratto, che probabilmente lo stesso Turing inizialmente non sospettava, è che la macchina di Turing è anche un paradigma universale per stabilire che cosa si può o non si può calcolare. Quando ci si mette a ragionare sull'essenza profonda delle combinazioni di regole che definiscono una qualunque computazione nella macchina di Turing, ci si accorge che i problemi computazionali (tutti i problemi del mondo!) sono divisi in due classi: i problemi di complessità cosiddetta 'polinomiale' e gli altri, detti per converso 'non polinomiali'. Un problema polinomiale può essere risolto in un numero grande a piacere – ma comunque controllabile – di passi elementari; in particolare, quando la dimensione  $N$  dei dati da calcolare cresce, il numero di operazioni che la macchina deve compiere (e quindi il tempo necessario) cresce anch'esso, con una legge di potenza: ad esempio come il quadrato ( $N^2$ ) o il cubo ( $N^3$ ) o la quinta potenza ( $N^5$ ) della dimensione dei dati, o anche come una combinazione di varie potenze. Cioè il numero di operazioni può essere scritto come un polinomio la cui variabile incognita è la lunghezza dei dati da calcolare. Se invece il problema non cade in questa categoria esso è non polinomiale nel senso che, al crescere della dimensione dei dati di partenza, il numero di operazioni cresce con rapidità irraggiungibile (esponenziale) ed il problema non può essere risolto in generale, ma solo quando le dimensioni dei dati non sono troppo grandi. Inoltre, data la assoluta generalità della macchina di Turing, la risposta alla domanda se un problema sia polinomiale o meno dovrebbe essere indipendente dai dettagli dell'apparato fisico usato per svolgere il calcolo, sia esso appunto un cervello umano, un regolo meccanico, una calcolatrice tascabile o un enorme supercalcolatore.

di chiavi per crittografare messaggi e combinazioni di casseforti o archivi, sia reali che virtuali. Si tratta di procedimenti di calcolo piuttosto complessi e non ci interessa qui discuterli. Ci vogliamo solo preoccupare di quanto questi procedimenti matematici (algoritmi) siano complessi nel senso di Turing, cioè quanto siano faticosi da calcolare al crescere del numero di cifre del numero  $N$  del quale si cercano i fattori primi.

Sui calcolatori convenzionali il miglior al-

goritmo di fattorizzazione conosciuto (P. Odlyzko, AT&T Laboratories, 1995) costa:

$$O(\exp [(64/9)^{1/3} (\log N)^{1/3} (\log \log N)^{2/3}])$$

operazioni elementari al crescere di  $N$ . Questa scrittura,  $O(\dots)$ , significa che al crescere di  $N$  (il numero da fattorizzare) il numero di operazioni elementari che un calcolatore deve svolgere cresce almeno come l'esponenziale di  $\log N$  (cioè il numero di cifre di  $N$ ) elevato, a sua volta, alla potenza  $1/3$  e moltiplicato per qualche altro

fattore meno importante. Quindi lo *scaling* è esponenziale rispetto al numero di cifre dell'input. Non solo, dunque, l'algoritmo necessario per scomporre un numero in fattori primi cresce in tempo non-polinomiale, ma cresce anche con la massima rapidità matematicamente possibile: si può infatti dimostrare che nessun algoritmo matematico può crescere più rapidamente che in modo esponenziale.

La legge di *scaling* ci dice come aumenta il tempo necessario per il calcolo, ma non ci dice il tempo assoluto. Per conoscerlo bisogna avere un dato di riferimento. Eccolo qua. Nel 1994 un numero a 129 cifre, noto come RSA129, venne fattorizzato usando l'algoritmo di Odlyzko: il calcolo venne svolto suddividendolo in parallelo su circa 1600 potenti *workstation* sparse per il mondo, impiegando un tempo di circa 8 mesi. Basandosi sul calcolo di RSA129 per stimare il cosiddetto prefattore della legge di *scaling* esponenziale, si trova che fattorizzare un numero di 250 cifre (di quelli, per intenderci, che si trovano in un tipico codice di sicurezza bancario) richiederebbe circa 800.000 anni, mentre fattorizzare un numero di 1000 cifre richiederebbe non meno di  $10^{25}$  anni, cioè parecchi miliardi di volte l'età dell'universo! Sembra quindi che il vostro conto bancario sia esponenzialmente al sicuro...

Ma tutto questo è vero per calcolatori che seguono le leggi della fisica classica.

Nel 1985 Deutsch (tra il singolare disinteresse delle principali banche mondiali) dimostrò in maniera rigorosa che un calcolatore quantistico può risolvere in un tempo polinomiale problemi che sono non-polinomiali su qualsiasi macchina classica, proprio sfruttando i concetti che abbiamo sopra accennato di interferenza e parallelismo. E nel 1994 Peter Schor, traducendo in pratica il risultato teorico di Deutsch, presentò ad un congresso internazionale di matematica un nuovo algoritmo (detto per l'appunto "algoritmo di fattorizzazione di Schor") per la fattorizzazione di numeri in

fattori primi secondo la logica di calcolo della computazione quantistica, capace di scalare come:

$$O((\log N)^{2+e})$$

dove  $e$  è un numero piccolo, dell'ordine di 0,2 o 0,3. La scrittura  $O(\dots)$  in questo caso significa il numero di operazioni che il calcolatore quantistico deve compiere al crescere di  $N$ , cresce come  $\log N$  elevato alla potenza  $2+e$ , cioè lo *scaling* è stavolta polinomiale, un semplice polinomio di secondo grado o poco più, nella dimensione dell'input.

Descrivere in poche parole l'algoritmo di Schor non è impresa semplice (e non la tenterò certo qui) ma va sottolineato che da quando tale algoritmo è stato scoperto il calcolo quantistico ha cominciato ad esser preso tremendamente sul serio da tutta la comunità scientifica e dalle agenzie governative e ministeri preposti alla sovvenzione delle attività di ricerca, i quali ormai destinano crescenti quantità di denaro alle ricerche sulla computazione quantistica.

## Imperfetta, come una macchina ideale

Da un punto di vista tecnico, la macchina ideale di Feynman potrebbe essere realizzata in pratica costruendo un set di elementi fisici quantistici (per il momento non meglio identificati) i quali possano assumere due diverse configurazioni definite e misurabili, corrispondenti ai due stati 0 e 1. Ad esempio, una molecola con tutti gli elettroni allo stato fondamentale (lo stato 0) e la stessa molecola con un elettrone in un livello energetico eccitato (lo stato 1). Ogni operazione logica è rappresentata da un operatore fisico (ad esempio, un impulso di un raggio laser) che fa cambiare di stato l'elettrone nella molecola, eccitandolo o diseccitandolo e facendo passare così la "molecola-transistor" dallo 0 allo 1 e viceversa.

Come in tutti i sistemi fisici, in una macchina del genere ci saranno necessariamente

delle imperfezioni (ricordiamo, non esistono in natura macchine termiche ideali). Ad esempio, una prima sorgente di imperfezione potrebbe essere costituita dalla disomogeneità dei coefficienti di accoppiamento da un punto all'altro della catena di elementi fisici. Se gli elementi sono, ad esempio, atomi depositati su un substrato solido irregolare, tale disomogeneità è costituita da difetti strutturali della superficie e provoca una certa differenza tra le vibrazioni termiche degli atomi: propagare un certo stato, ad esempio la condizione di 0, da un atomo all'altro sarebbe allora equivalente a far muovere un elettrone lungo un filo metallico conduttore, e l'equivalente della resistenza elettrica sarebbe una certa casualità nella probabilità di collisione.

È degno di nota, a questo proposito, che il principio di indeterminazione di Heisenberg di per sé non costituisce una limitazione alla capacità operativa di una tale macchina. Nel senso che, non essendo assegnato un tempo definito entro cui realizzare il calcolo, il completamento di una computazione ha una estensione temporale probabilistica, indipendente dal numero di passi elementari. Tutte le questioni associate al principio di Heisenberg sono, invece, legate all'indeterminazione sulla preparazione dello stato iniziale (registro di input) e alla misurazione dello stato finale (registro di output), entrambe operazioni che richiedono la capacità di misurare velocità e posizione di elementi fisici quantistici. Come abbiamo detto (vedi <sup>[1]</sup>), per sistemi che obbediscono alla meccanica quantistica non è possibile specificare simultaneamente con precisione assoluta posizione e velocità, quindi non saremo mai in grado di definire con precisione assoluta l'energia iniziale di ogni singolo elemento posto in un punto preciso della catena. Il principio di indeterminazione ci impedisce di conoscere con precisione assoluta l'input e l'output del calcolatore quantistico, tutto quello che possiamo ottenere è di avere una ragionevole probabilità che

input e output coincidano con quello che vogliamo. ("Signor Rossi, il suo conto in banca contiene molto probabilmente un debito di ...".) Inoltre nella macchina di Feynman esisterebbero termini di accoppiamento debole tra gli elementi che costituiscono i registri, cioè ci sarebbero dei termini aggiuntivi (spuri) nella funzione hamiltoniana, oltre quelli che vengono considerati esplicitamente per svolgere la computazione. Insomma, una tale macchina sarebbe un oggetto molto delicato, in cui la preparazione dello stato iniziale, in particolare, richiederebbe una bella dose di abilità da parte dei fisici sperimentali preposti al suo funzionamento.

In generale, il tempo necessario per svolgere una computazione sarà determinato dall'intensità dell'accoppiamento tra elemento ed elemento, così come descritto nella funzione hamiltoniana della catena. Siccome i tempi legati alla variazione di uno stato in un atomo o una molecola (ad esempio, il tempo necessario per portare un elettrone allo stato eccitato) sono estremamente rapidi, le singole operazioni in un calcolatore quantistico avvengono molto rapidamente. Se ciascun termine dell'hamiltoniana fosse, ad esempio, dell'ordine di  $10^{-13}$  erg, dalla famosa relazione di indeterminazione di Heisenberg si ottiene che il tempo minimo di calcolo è dell'ordine di  $10^{-15}$  secondi per operazione. Peraltro, già secondo Feynman questo valore non rappresentava un terribile miglioramento rispetto ai tempi di commutazione tipici dell'elettronica digitale del 1985, all'epoca fermi a circa  $10^{-10}$  secondi (tali limiti sono ormai ampiamente superati). Centomila volte più veloce, forse meno. Molto, ma non moltissimo, certo, rispetto allo sforzo necessario per costruire una tale macchina... Ma il problema principale del funzionamento di un calcolatore quantistico è legato, ancora una volta, al concetto di reversibilità. In effetti, alcuni dei lettori che non conoscono la fisica potrebbero essersi chiesti, leggendo le pagine precedenti: "Se le

leggi della fisica, e in particolare quelle della meccanica quantistica, sono perfettamente reversibili rispetto al tempo come hai detto, com'è che il mondo macroscopico è invece assolutamente irreversibile? Come mai un organismo biologico può invecchiare ma non ringiovanire, un vaso rotto in mille cocci non può tornare intero, una miscela grigiasta di acqua e inchiostro non può separarsi spontaneamente in acqua limpida e inchiostro nero?" Il problema della generazione dell'irreversibilità a partire da leggi matematicamente reversibili è forse uno dei più centrali della fisica moderna e mantiene ben occupati numerosi cervelli da oltre un secolo, da quando cioè Ludwig Boltzmann per primo formalizzò i concetti di entropia e irreversibilità. Non saremo certo noi a risolvere tale problema in questo nostro racconto, ma diciamo almeno che una delle strade oggi più promettenti per riconciliare reversibilità microscopica e irreversibilità macroscopica sembra essere il concetto di "decoerenza". Tale concetto è un altro elemento fondamentale della descrizione quantistica della natura.

Quello che si intende in meccanica quantistica per decoerenza è che lo stato di sovrapposizione pura, descritto dalla funzione d'onda di un certo sistema, non dura indefinitamente ma permane solo per un certo tempo, cioè finché il sistema quantistico non comincia ad interagire con il mondo circostante. Quando tale interazione si manifesta, lo stato puro decade (cioè inizia a degradarsi) e come si usa dire tecnicamente 'perde coerenza'. L'interazione col mondo circostante è ineliminabile, come ci dice la seconda legge della termodinamica<sup>[3]</sup>, e descrive l'irruzione dell'irreversibilità nel mondo altrimenti perfettamente simmetrico e reversibile della fisica atomica e molecolare. Il tempo di decoerenza dipende dal tipo di interazione tra gli elementi quantistici del sistema, e definisce il 'tempo di vita' di un sistema quantistico per cui vale la perfetta sovrappo-

posizione tra tutti i suoi stati così come descritta dalla funzione d'onda. In pratica, un calcolatore quantistico è veramente reversibile solo per un tempo pari al tempo di decoerenza del processo fisico sul quale esso si basa per svolgere le sue computazioni sui *qubits*. I tempi di decoerenza misurati per alcuni processi fisici di potenziale interesse per la computazione quantistica, come la risonanza magnetica di *spin* nucleare (NMR), la risonanza paramagnetica di *spin* elettronico, la trappola ionica, la microcavità ottica, l'effetto Mossbauer e altri, variano moltissimo, tra un decimo di miliardesimo di secondo fino a qualche migliaio di secondi per la NMR. Non è però tanto importante la velocità assoluta con la quale il calcolatore quantistico sa calcolare, ma quanti calcoli può svolgere durante il suo tempo di decoerenza, prima cioè che lo stato iniziale preparato nel registro di input decada in un rumore numerico indistinto. Consideriamo il tempo di decoerenza di ciascun processo diviso per l'energia coinvolta nella transizione quantistica (ad esempio, il cambiamento da 0 a 1) divisa per la costante di Planck: tale quantità rappresenta il numero di transizioni elementari possibili durante un tempo di decoerenza, cioè il massimo numero di 'calcoli' che il calcolatore quantistico può svolgere. Per i processi fisici considerati fino ad oggi, questo numero varia tra circa mille e un miliardo di operazioni. In pratica, questo non è un dato molto interessante, poichè un qualsiasi programma di calcolo moderno, ad esempio la simulazione ad elementi finiti di un giunto cardanico, richiede parecchi miliardi di calcoli in virgola mobile. Bisogna quindi cercare di estendere al massimo il tempo di coerenza.

### Dalla teoria alla pratica, adelante con *judicio*...

Da un punto di vista tecnico, la macchina ideale di Feynman potrebbe essere realizzata in pratica cercando di sfruttare le più



moderne tecnologie sviluppate per alcuni complessi esperimenti di fisica atomica. Proverò a descrivere i tratti salienti di tre diversi esempi sperando che, pur senza nessuna pretesa di completezza, questa breve descrizione serva a far cogliere almeno l'eccezionale complessità ed originalità delle soluzioni, pur nella necessaria limitazione dei (difficilmente comprensibili) dettagli tecnici.

Un primo esempio è la "trappola ionica". In esperimenti realizzati all'Università del Colorado, è stato possibile intrappolare un singolo ione (un atomo carico di elettricità positiva) di berillio all'interno di una piccola regione di spazio delimitata da intensi campi elettrici oscillanti.

Con una combinazione di ulteriori campi elettrici e di fasci laser, lo ione intrappolato può essere rallentato fino quasi a fermarlo, compatibilmente con i limiti imposti dal quantistico principio di indeterminazione. I due elettroni rimasti intorno allo ione risultano sensibili a particolari impulsi laser, che possono spostarli da uno stato energetico ad un altro con una modalità ben controllabile. Ogni volta che un impulso laser induce la transizione di un elettrone, lo ione vibra leggermente nella sua trappola elettrica. Le vibrazioni dello ione sono strettamente accoppiate con la transizione dell'elettrone, in una unica funzione d'onda. Ogni ione così intrappolato, con i due elettroni che possono passare tra uno stato energetico e l'altro, rappresenta un *qubit*.

Per realizzare un circuito logico booleano, come AND, OR, NOT eccetera, bisogna accoppiare almeno due *qubits*, cioè avvicinare almeno due ioni nella stessa trappola in modo da poter effettuare calcoli quantistici con la funzione d'onda complessiva dei due ioni e dei quattro elettroni. In una modifica di questo esperimento, realizzata all'Università di Innsbruck, la trappola è stata realizzata in modo da disporre parecchi ioni uguali allineati. In questo modo le transizioni degli elettroni si accoppiano non più alle vibrazioni di ogni singolo ione

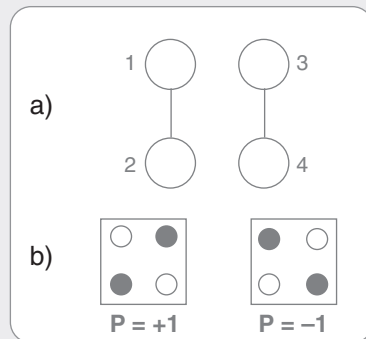
ma alle vibrazioni collettive della catena, che appare come una microscopica collana di perle. Ogni computazione svolta con una simile 'macchina' richiederebbe una sequenza di tantissimi impulsi laser ben definiti (pensiamo alle regole della macchina di Turing), tanto che il limite teorico massimo è stimato in questo caso in appena 10000 operazioni al secondo. L'idea di usare impulsi laser ultracorti, per accelerare la computazione, si scontra con la necessità di aumentare parallelamente l'intensità del fascio laser, aumentando così la probabilità di errore (questo è dovuto al fatto che aumentando l'intensità aumentano i cosiddetti effetti nonlineari, cioè il fascio laser interagisce con più elettroni simultaneamente).

Un secondo esempio è la ottica quantistica in cavità. Un tale esperimento, già realizzato separatamente alla Ecole Normale di Parigi e al Caltech di Pasadena, consiste di due specchi molto ravvicinati (a circa un centesimo di millimetro di distanza!) tra i quali vengono fatti passare a bassissima velocità gli atomi di un gas, mentre un laser li bombarda con luce ad una frequenza leggermente diversa da quella ottimale. Grazie al confinamento, ciascun atomo può emettere e ricattare un quanto di luce, o fotone, più e più volte, sfruttandone il "rimbalzo" contro gli specchi. In questo caso il *qubit* è rappresentato dal sistema combinato atomo più fotone.

Se un atomo in uno stato eccitato entra nella cavità tra i due specchi, con una certa probabilità può lasciare un fotone entro la cavità uscendone così diseccitato. La funzione d'onda della cavità descrive adesso la sovrapposizione dei due stati "fotone presente" e "fotone assente" (1 e 0, a suo modo). Quando un secondo atomo attraversa la cavità, il suo stato si mescola con quello già presente nella cavità e può cambiare o meno, in funzione della presenza o meno del fotone all'interno della cavità. A questo punto, un fascio laser bombarda il secondo atomo esattamente quando que-

## Attività dell'ENEA sui materiali e tecnologie per la computazione quantistica

Nel corso di un programma di ricerca congiunto, condotto dall'autore e dal prof. P. Keblinski, del Department of Materials Engineering del Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) negli USA, è stato recentemente proposto un metodo assai originale per implementare in maniera potenzialmente molto efficiente gli elementi di base di un circuito detto "Quantum Cellular Automaton", o Automa Cellulare Quantistico (QCA), suscettibile di essere convertito in un "qubit" per il calcolo quantistico. Tale circuito teorico elementare, introdotto qualche anno fa dal gruppo di C.S. Lent dell'Università di Notre Dame, composto da quattro "punti quantici" a distanze nanometriche e collegati fra di loro (figura 1), svolge le funzioni di un circuito bistabile e permetterebbe di realizzare idealmente tutte le funzioni dell'elettronica convenzionale senza bisogno di transistor.



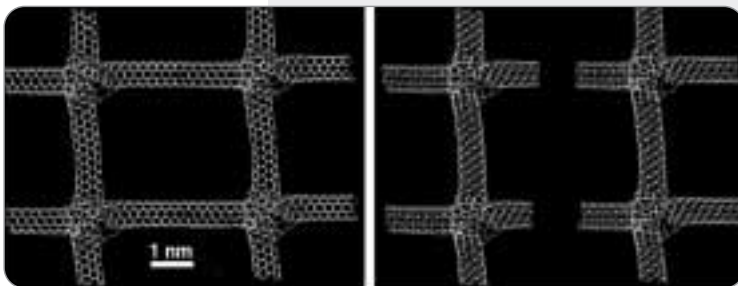
**Figura 1**

Schema dell'automa cellulare quantistico secondo Toth e Lent (pubblicato in *Physical Review A* 63, 052315 (2001)). **a.** Geometria della cella: i cerchi rappresentano punti quantici (o "quantum dots"), le linee rappresentano percorsi di tunneling, attraverso i quali un elettrone può saltare da un quantum dot all'altro. **b.** Due elettroni, in nero, sono iniettati in ciascuna coppia di quantum dots. Per repulsione coulombiana, esistono due configurazioni equivalenti  $P = +1$  e  $P = -1$ , che corrispondono ad un elemento bistabile, come un transistor.

In particolare, è stato recentemente mostrato dal gruppo di Notre Dame che collegando fra loro in maniera opportuna molti elementi del tipo descritto è possibile trasformare un insieme di QCA in un insieme di *qubits*, per realizzare circuiti che svolgono tutte le funzioni logiche elementari di un calcolatore quantistico. Fino ad ora, però, non esistono realizzazioni pratiche su scala nanometrica di dispositivi fisici in grado di svolgere le funzioni previste teoricamente per un QCA.

La nostra ricerca dimostra, mediante l'analisi di modelli teorici, che combinando quattro nanotubi di carbonio fra di loro è possibile realizzare il frammento elementare di QCA necessario per ottenere un qubit. (Le proprietà dei nanotubi di carbonio sono oggetto di attiva ricerca da parte dell'ENEA, vedi *Energia, Ambiente, Innovazione* n. 1/2001, pp.64-71).

In questo caso sono state studiate le proprietà di giunzioni tra coppie di nanotubi incrociati e successivamente irraggiati da un fascio di elettroni, in modo da creare una zona di "fusione" tra i due tubi di carbonio. Le dimensioni del sistema risultante sono di appena qualche nanometro. È stato trovato che sotto particolari condizioni di irraggiamento, la zona centrale di giunzione che connette i due nanotubi si comporta proprio come un punto quantico. È stato quindi ipotizzato che assemblando una nanostruttura come quella riportata nella figura 2 sarebbe possibile realizzare un QCA in maniera relativamente semplice e riproducibile. Combinando parecchi nanotubi in una configurazione a scacchiera e irraggiando (vedi didascalia) i punti di giunzione e i bracci che li congiungono in modo opportuno si potrebbero realizzare gli elementi circuitali (*qubits*) di un computer quantistico. Sono attualmente in corso attività sperimentali congiunte, presso ENEA e RPI, per verificare in pratica le previsioni teoriche.



**Figura 2**

Realizzazione di una cella QCA mediante quattro nanotubi di carbonio. **a.** I quattro nanotubi vengono posizionati su un substrato, ad esempio mediante nanomanipolazione con un microscopio a forza atomica. I quattro punti di giunzione vengono irraggiati con un fascio di elettroni, creando quattro punti quantici nelle regioni di giunzione. **b.** Successivamente, con un ulteriore irraggiamento con elettroni a dose più elevata, i contatti orizzontali tra le due coppie di punti quantici vengono "bruciati". Questa configurazione rappresenta una possibile realizzazione pratica su scala nanometrica della cella rappresentata in figura 1-a.

sto si trova entro la cavità. La luce del fascio laser ha una frequenza tale da non avere alcun effetto sul secondo atomo, a meno che nella cavità non sia già presente il fotone lasciato dall'atomo precedente. Solo in questo caso, infatti, gli stati quantici del secondo atomo vengono 'distorti' di quel tanto che basta a permettere al laser di interagire con l'atomo stesso, cambiandone così lo stato. La funzione d'onda che descrive l'insieme del primo e secondo atomo e del fotone è un *qubit*, che può essere pilotato nello stato 0 o 1 (misurato sul secondo atomo) a seconda del valore dello stato prefissato per il primo atomo.

Un ultimo esempio che voglio brevemente descrivere è il *quantum computer* in provetta, proposto da scienziati del Massachusetts Institute of Technology e dell'Università di Stanford. L'idea è basata sulla tecnologia, ormai matura, della risonanza magnetica nucleare, o NMR. Alcune molecole organiche, ad esempio il (2,3)-dibromotiofene, contengono atomi di idrogeno il cui nucleo (protone) può essere orientato nello spazio da un campo magnetico. Per motivi legati alla sua natura quantistica, l'orientazione del protone può assumere solo due valori rispetto alla direzione del campo magnetico esterno, ad esempio "su" e "giù", che costituiscono i due stati del *qubit*.

Nella molecola (2,3)-dibromotiofene ci sono due atomi di idrogeno, cosicché ogni molecola è un sistema di due *qubits* accoppiati. Cioè, ogni molecola è un calcolatore quantistico, dunque una mole di questa sostanza in una provetta contiene circa  $10^{23}$  calcolatori quantistici.... Molecole complesse possono contenere centinaia di atomi di idrogeno, e trasformarsi così in calcolatori con un enorme spazio di Hilbert, cioè con un enorme numero di stati. L'orientazione assoluta del protone (ovvero il suo *spin* nucleare) può essere cambiata in maniera molto ben controllata e rapida da un campo magnetico oscillante con le raffinate tecniche della NMR, ren-

dendo questa tecnica (già ampiamente usata ad esempio nella diagnostica medica) un ottimo candidato per il *quantum computing*.

Un bel problema, in questo caso, è costituito dal fatto che ciascuna molecola nella provetta ha una sua orientazione casuale e ignota, che si somma all'orientazione dello spin nucleare dell'idrogeno. Quando viene inviato l'impulso NMR tutti i protoni in ciascuna molecola cambiano il proprio *spin* nucleare ma, siccome a questo si somma l'orientazione spaziale ignota della molecola, il risultato misurato è praticamente inservibile. È come se ordinassimo a tutte le persone che passeggiano casualmente in una piazza di 'voltarsi' sperando di trovarli così tutti rivolti verso la stessa direzione! Con le raffinate tecniche sviluppate nella NMR negli ultimi quarant'anni è tecnicamente possibile selezionare gruppi di molecole nella provetta orientate tutte alla stessa maniera, combinando campi magnetici di frequenze diverse. Però in questo caso l'ampiezza del segnale contenente la "soluzione" della computazione quantistica viene sommersa nel rumore proveniente dai *qubits* casuali di tutte le altre molecole: il nostro calcolatore ci sussurra la risposta in uno stadio affollato di spettatori urlanti. Tale tecnica sembra molto promettente qualora ci si spinga a bassissime diluizioni delle molecole nella provetta, nel qual caso il rapporto segnale/rumore del calcolatore quantistico migliora molto efficacemente, anche perché il tempo di decoerenza dello *spin* nucleare è molto più lungo di quello di altri processi fisici proposti.

## Note

1. I due concetti di complementarità e di indeterminazione sono al centro della rivoluzione scientifica e concettuale portata dalla meccanica quantistica, anche nota come "interpretazione di Copenhagen". Il principio di complementarità, definito da Niels Bohr nel 1927, stabilisce che per i sistemi fisici che obbediscono alla meccanica quantistica le variabili dinamiche compaiono in coppie rigidamente collegate, ovvero 'complementari', in modo che la misura precisa di una impedisce la misura

- precisa e contemporanea dell'altra. Questo è vero, ad esempio, per le variabili posizione e velocità di un elettrone. Il principio di indeterminazione, scoperto poco prima da Werner Heisenberg sulla base della interrelazione delle proprietà allo stesso tempo corpuscolari ed ondulatorie della materia, descrive il concetto di complementarità in maniera quantitativa, fissando un errore minimo che lo sperimentatore commette nella misurazione simultanea di coppie di variabili complementari. Tale errore è espresso matematicamente nella famosa relazione di indeterminazione, la quale stabilisce che il prodotto tra gli errori commessi nel misurare le due variabili è almeno grande quanto la costante di Planck: per mantenere costante questo prodotto, una tanto maggiore precisione nella misura di una delle due variabili implica una crescente imprecisione nella simultanea misura dell'altra.
2. In questo contesto la definizione di esponenziale esprime la rapidità con la quale cresce una successione di numeri. Il concetto di rapidità di crescita è legato, in pratica, al rapporto tra due termini contigui nella successione. Una successione lineare è ottenuta sommando una costante ai termini, ad esempio 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... : in questo caso il rapporto tra due termini adiacenti decresce e tende all'unità. Una successione geometrica è invece ottenuta moltiplicando il termine precedente per una costante, ad esempio 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ... : in questo caso il rapporto tra due termini adiacenti è proprio la costante moltiplicativa (nell'esempio indicato la costante è 2, infatti ogni termine si ottiene moltiplicando per 2 il precedente). Una successione esponenziale corrisponde ad una sequenza di termini il cui rapporto è una potenza, ad esempio 1, 3, 9, 27, 81, ...
  3. La termodinamica è la branca della fisica che studia i processi di trasformazione di energia in calore. Come tale è alla base del funzionamento delle macchine termiche e, più in generale, di qualsiasi sistema (anche il corpo umano) che operi una trasformazione tra diverse forme di energia. Le due leggi fondamentali della termodinamica stabiliscono: (1) che l'energia totale di un sistema si conserva sempre durante tutti i processi di trasformazione, e (2) che il grado di disordine di un sistema fisico reale, cioè avente una efficienza di trasformazione inferiore al 100%, tende sempre ad aumentare. Per lo studio dei processi di trasformazione la termodinamica si serve di alcune grandezze fisiche come l'entropia, che misura il grado di disordine presente in un sistema; l'energia interna, che definisce la massima quantità di calore che un sistema fisico ideale, cioè con efficienza di trasformazione di energia in calore del 100%, può produrre; l'energia libera, che misura la capacità di un sistema ideale dotato di una certa quantità di energia interna di compiere una certa quantità di lavoro meccanico.
  4. La hamiltoniana di un sistema fisico è una funzione matematica (o un insieme di funzioni matematiche) che permette di definire l'energia totale del sistema conoscendo i valori di un insieme ben definito di variabili caratteristiche del sistema, dette variabili canoniche. Per un sistema che può essere descritto come un insieme di punti materiali, ad esempio i pianeti del sistema solare visti dalla Terra) le variabili canoniche sono la posizione e la velocità di ciascun pianeta. Per sistemi descritti dalla meccanica quantistica è possibile scegliere le variabili canoniche in vari modi tra cui, ad esempio, il modulo elevato al quadrato (o matrice della densità di probabilità) delle funzioni d'onda delle singole particelle che compongono il sistema.
  5. La misura di energia per sistemi a temperatura variabile viene convenientemente espressa in unità di  $k_B T$ , dove  $k_B$  è la costante di Boltzmann, pari a  $1.38 \times 10^{-16}$  erg/grado, e  $T$  è la temperatura misurata in gradi Kelvin. Ad esempio, alla temperatura di 300 gradi Kelvin (cioè a temperatura ambiente) una unità  $k_B T$  vale circa  $4 \times 10^{-14}$  erg, un numero estremamente piccolo rispetto alle energie tipiche dei fenomeni macroscopici. Per confronto, si consideri che una massa di 1 Kg che cade nel vuoto da una altezza di 1 metro arriva a terra con una energia di moto (cinetica) pari a circa 100 milioni di erg.

complessità & sviluppo

# Una **boa** per conoscere il Mar Mediterraneo



Progettare e costruire una “boa derivante” dedicata alle specifiche caratteristiche del Mar Mediterraneo è l’obiettivo del progetto MELBA (MEDiterranean Lagrangian Buoy Appliance), promosso dal Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca e condotto operativamente dall’ENEA

**FIRELLO CAVALLINI**  
**RAMIRO DELL’ERBA**  
**DANIELE MAFFEI**

ENEA  
UTS Fusione

## Contesto e ruolo dell'ENEA nel progetto

La prima applicazione della legge 95/95, art. 3, ha comportato, fra le altre iniziative, il lancio di un programma di ricerca di interesse dell'ENEA, denominato "Ambiente Mediterraneo"; tale programma, nello spirito della legge, prevedeva che imprese nazionali contribuissero allo sviluppo di tecnologie innovative da utilizzare per attività di ricerca in campo ambientale marino.

A seguito di apposito bando nazionale furono individuati 17 progetti, proposti da un certo numero di operatori nazionali, fra industrie e enti di ricerca; il finanziamento globale previsto a carico del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (ora Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca - MIUR), che poteva allora coprire una quota attorno al 60% dell'impegno totale, fu opportunamente suddiviso fra i singoli progetti. All'interno di ciascuno di tali progetti compariva ENEA come uno dei partner, oggetto quindi anche di una parte del suddetto finanziamento.

Fra questi progetti, contrassegnato dalla sigla 3.3.1.4, trova luogo quello dedicato allo sviluppo di un robot sottomarino autonomo, da adibire a campagne di misure di lunga portata e fino a profondità di 2000 m. L'acronimo MELBA sta per Boa Lagrangiana derivante per il Mediterraneo. Il MIUR ha indicato l'ENEA quale organizzatore esecutivo di questo progetto.

\* \* \*

Il progetto MELBA ha come scopo la realizzazione di una boa derivante lagrangiana dedicata alla particolare morfologia del Mar Mediterraneo, il quale presenta ristrette dimensioni spaziali, rispetto agli oceani, ma, in molti casi, una grande variabilità dei fondali. Le boe lagrangiane seguono i flussi di corrente marina misurando le proprietà di un elemento di acqua solidale con la boa stessa (da cui il nome lagrangiana) per gli scopi più svariati, dalla sorveglianza ambientale agli studi oceanografici. La boa

può immergersi e risalire, fornendo così misure in profondità prestabilite; alcuni tipi di siffatte boe sono in commercio per lo studio di correnti oceaniche. Il Mediterraneo, però, è caratterizzato da rapide variazioni della profondità, rispetto ai più piatti fondali oceanici, nonché dall'influenza della costa, caratteristiche che risultano determinanti per le correnti marine: l'elemento di acqua in studio riflette queste peculiarità. La nostra boa, inoltre, è progettata per operare in vicinanza della costa che rende le missioni operative molto differenti da quelle in oceano aperto nelle quali sono in uso ad oggi. La dinamica di un elemento acquoso è infatti grandemente influenzata da questi fattori; l'analisi dello stesso va quindi svolta su scale spaziali inferiori, tipicamente delle decine di miglia; conseguentemente anche la durata delle missioni è inferiore, rispetto a quelle oceaniche.

Poiché il nostro studio concerne prevalentemente l'inquinamento ambientale abbiamo concentrato la nostra attenzione verso la zona costiera, maggiormente influenzata dalle attività umane. Una delle possibili attività costiere di MELBA, ad esempio, è il campionamento ad alta frequenza (ovvero ad intervalli di alcune ore) di acque di bassa profondità (minori di 100 metri) in cui è osservabile l'evoluzione della massa di plankton e le conseguenze dell'attività umana sullo stesso. Il sistema di controllo di MELBA deve tenere presente queste considerazioni, sia per missioni di medio o lungo periodo in mare aperto, sia per missioni di breve periodo molto ripetitive e dedicate allo studio dell'ambiente marino costiero su scale spazio temporali brevi.

Il corpo della boa è formato da un tubo di alluminio, capace di resistere fino a 2000 metri di profondità, e contenente il motore di ascesa e discesa (unico moto consentito alla boa), il sistema di comunicazione satellitare e il sistema di controllo della missione. La strumentazione sensoristica accessoria è variabile in base al tipo di missione da eseguire: essa può comprendere misure di conducibilità, salinità, temperatura,

clorofilla ecc. Il sistema di comunicazione, attraverso il quale la boa invia i dati misurati ricevendone le nuove missioni conseguenti, è a due vie supportato tramite la costellazione satellitare Orbcomm.

Un GPS (Global Position System) è integrato per la georeferenziazione dei dati misurati, una volta che la boa è emersa.

Le novità principali di MELBA, rispetto a prodotti commerciali, sono due: l'utilizzo di una costellazione satellitare affidabile per lo scarico dei dati e la comunicazione a due vie che consentono all'operatore nel laboratorio di riprogrammare la missione della boa via satellite in base ai risultati di una missione precedente o altro. Inoltre vi è un sistema di controllo "intelligente" capace di intervenire in situazioni semplici mediante una serie di regole.

## Boe derivanti

Le boe Lagrangiane, sono così chiamate poiché solidali nel moto con l'elemento acquoso in studio; esse sono sia di superficie che di profondità. In particolare queste ultime, dette anche "profilatori" dato il loro moto verticale, sono strumenti di misura capaci di scendere ad una predefinita profondità, misurare alcune caratteristiche, risalire alla superficie e trasmettere i dati ad una stazione di terra. Alla fine del loro lavoro vanno generalmente perdute.

L'uso di tali strumenti ha aperto vasti e nuovi orizzonti nel campo degli studi climatici ed oceanografici; i loro costi, infatti, sono incomparabilmente minori (il valore di una boa è di circa 10.000 euro) rispetto alla conduzione di una campagna di misure con strumenti usuali, quali una nave oceanografica, che costa sì 10.000 euro, ma al giorno.

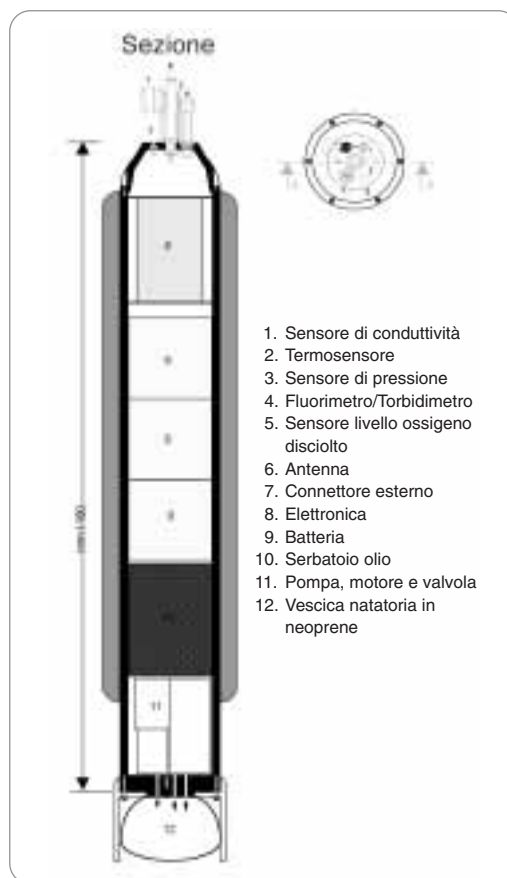
## Caratteristiche del Mar Mediterraneo

L'applicazione di queste tecnologie in mari chiusi, quali il Mediterraneo, dove le scale spazio temporali sono spesso ridotte ri-

spetto agli oceani e le dinamiche mostrano alti gradienti dovuti alla struttura del fondo e delle coste, quasi sempre presenti nell'area di esplorazione, richiedono l'uso di strumenti intelligenti. Un sistema di controllo flessibile è di grande utilità per programmare e soprattutto riprogrammare le missioni così come la realizzazione di procedure di fuga per evitare che la boa possa rimanere intrappolata sul fondo marino.

## MELBA

Lo scopo del progetto MELBA è la realizzazione di una boa Lagrangiana profilante dedicata all'ambiente marino mediterraneo. Il sistema di controllo è stato realizzato tenendo presente le considerazioni di cui sopra per missioni di lungo e medio termine ma anche per missioni brevi e molto ripetitive; in particolare missioni costiere, brevi e dedicate a misurazioni di inquinamento e biologiche.



**Figura 1**  
La boa MELBA

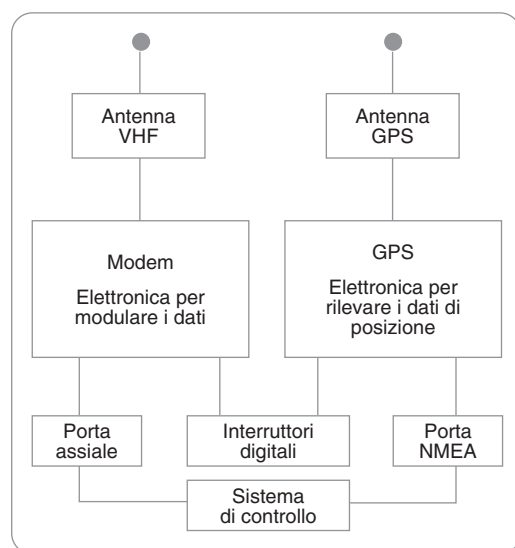
La boa derivante (mostrata in figura 1) ha una profondità operativa massima di 2000 metri. Il progetto è organizzato in quattro blocchi funzionali per la boa ed uno per l'interfaccia uomo-macchina. Ogni blocco sarà implementato separatamente e sarà poi connesso con gli altri tre. La struttura è descritta nei seguenti sottoinsiemi:

- corpo
- batterie
- sensori
- elettronica di bordo
- interfaccia uomo-macchina.

### Corpo

Il corpo è formato da un cilindro di alluminio (costruito con tecniche di derivazione aeronautica per essere capace di resistere fino a 2000 metri di profondità) contenere la strumentazione elettronica, il motore a vescica per il movimento verticale, il sistema di controllo per la missione ed il sistema di emergenza. Il corpo è lo stesso in ogni missione. L'unica variazione ammessa è la tipologia dei sensori esterni in base ai dati che è necessario acquisire nella specifica missione, allo scopo di ridurre il peso della boa. Il movimento verticale della boa è assicurato dal pompaggio di olio in una vescica esterna, similmente a quanto fatto dai pesci, per controllare il livello di profondità a cui la boa è in equilibrio.

**Figura 2**  
Schema a blocchi del sistema di comunicazione



### Batteria

Una parte considerevole del peso del corpo è costituito dalle batterie, le quali devono durare per l'intera vita della boa (200 cicli circa nel caso di missioni brevi). Il pacco batterie è realizzato dall'unione in serie ed in parallelo di 72 batterie al litio di alta capacità (16,5 Ah 3,6 V).

### Sensori

Nel corpo di MELBA sarà possibile caricare diverse tipologie di teste equipaggiate con sensori di base CTD (conducibilità, temperatura e profondità) e con altri sensori per la misura della quantità di ossigeno disciolto, torbidità, fluorescenza; sarà possibile montare diversi sensori specifici per l'uso in particolari missioni. La boa è capace di effettuare misure idrologiche, chimiche, biologiche e di geologia oceanografica.

### Elettronica di bordo

L'elettronica di bordo consiste in :

- sistema di comunicazione
- sistema di controllo
- sistema di acquisizione dati

#### Sistema di comunicazione

Il sistema di comunicazione è del tipo satellitare a due vie (full duplex). Un GPS (Global Position System), come mostrato in figura 2, è utilizzato per la georeferenziazione dei dati all'atto dell'emersione della boa, quando questa trasmette i dati acquisiti. Per questo specifico sistema di comunicazione stiamo sviluppando un'antenna unica adatta sia a ricevere dati GPS che a trasmettere e ricevere dati dal satellite. Caratteristica essenziale di questa antenna è la capacità di resistere alle pressioni marine operative (2000 metri pari a circa 200 atmosfere). Lo schema logico del software per il controllo del modem è mostrato in figura 3. La gestione di questo software sarà un compito del sistema di controllo della boa.

#### Il sistema di controllo e supervisione

Il sistema di controllo è responsabile per la realizzazione della missione programmata.



Nonostante i soli movimenti e permessi alla boa siano dei sali e scendi noi proveremo ad implementare un sistema di controllo sofisticato. Sottolineiamo, ancora una volta alcune peculiarità che distinguono le necessità di una boa operante nel Mar Mediterraneo rispetto ad una operante nell'oceano. La principale differenza è l'alta variabilità del fondale marino e del contorno della costa, che produce vortici su una scala spazio temporale ristretta. Noi vorremmo che la boa fosse capace di seguire non solo un profilo di profondità programmato, ma anche altri parametri quali salinità, temperatura ecc. Un sistema di supervisione dovrebbe quindi essere implementato per migliorare le probabilità di successo di una missione. Il sistema di supervisione dovrebbe essere capace di mantenere la boa in un elemento di acqua a temperatura costante seguendo una corrente termica. Inoltre lo stesso dovrebbe essere capace di prendere qualche decisione elementare in caso di rotture o malfunzionamenti non vitali quali, ad esempio, una cattiva trasmissione dei dati o un assorbimento elettrico anomalo da parte di una utenza. L'eccessivo assorbimento di corrente da parte di una utenza, ad esempio, può far decidere al sistema di supervisione di isolare quell'utenza e di continuare la missione senza quel sensore. Le attuali boe sono totalmente passive nella trasmissione dei dati cosicché molti di essi sono persi.

In pratica c'è la possibilità di cambiare parametri della missione mentre questa viene effettuata. Il sistema di supervisione dovrebbe poi ripianificare la missione ottimizzando le prestazioni ottenibili anche nel caso di attrezzatura ridotta. La nostra intenzione è di partire da un semplice metodo di regole e di incrementarle progressivamente in complessità. Si vuole cioè partire da una semplice tabella di regole e del tipo "Se... allora" per le decisioni da assumere o di chiedere aiuto umano, grazie al sistema di comunicazione bidirezionale. Lo schema logico del sistema di controllo con le sue connessioni è mostrato in figura 4.

**Figura 3**

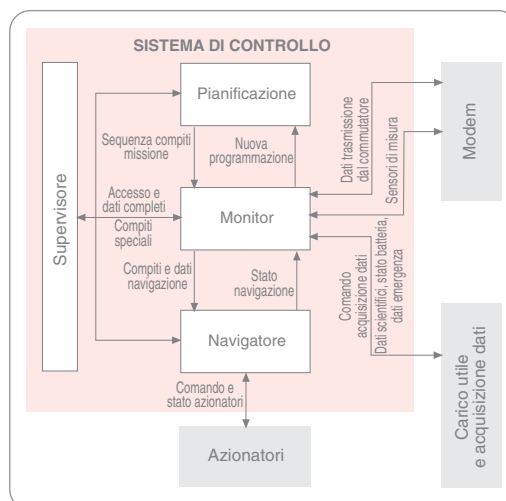
Schema logico del sistema di comunicazione

In particolare possiamo distinguere le seguenti unità logiche:

*Schedulatore*: il compito dello schedulatore è di dividere la missione ricevuta in una sequenza di compiti semplici e di passarla al monitor. Lo schedulatore riceve poi dal monitor la missione pianificata.

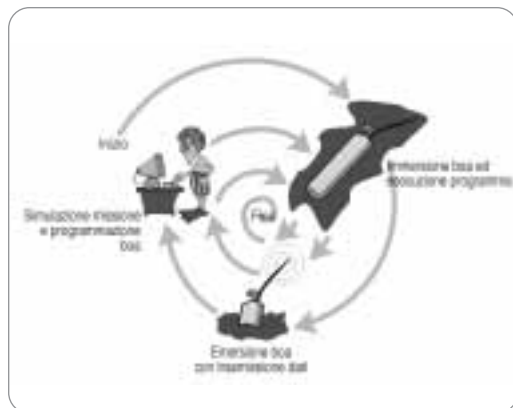
*Monitor*: il monitor riceve la missione schedulata e invia i comandi di misura ai sensori; inoltre invia il piano di navigazione al sistema di navigazione, ricevendone lo stato corrente.

*Sistema di navigazione*: il sistema di navigazione riceve il piano dal monitor e lo informa sullo stato di navigazione. Inoltre spedisce i compiti elementari agli attuatori, ricevendone risposta.

**Figura 4**

Schema logico del sistema di controllo

**Figura 5**  
Ciclo di programmazione della missione



*Supervisore:* il supervisore è informato circa tutti i dati e può seguire una tabella di regole elementari, del tipo "Se...allora" o in caso di difficoltà a decidere di chiedere aiuto umano.

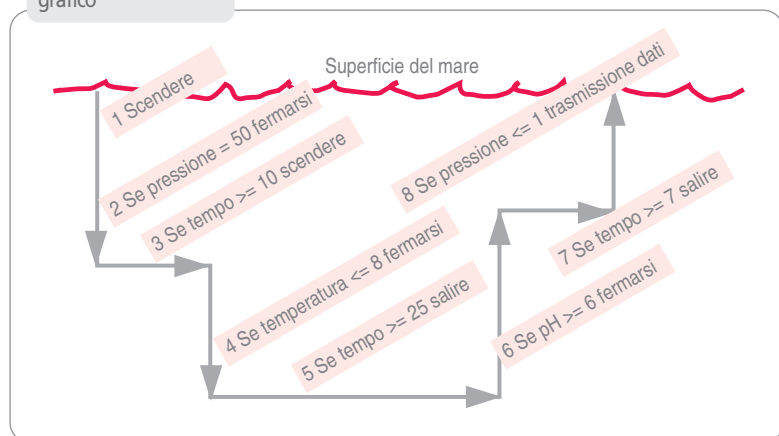
*Acquisizione dati*

Allo scopo di rendere maggiormente flessibile la boa, è stato deciso durante la fase di progettazione di inserire un micro controllore per il controllo di tutti i sensori di bordo. Il micro controllore è capace di verificare un primo livello di congruità dei dati misurati e di controllare lo stato dei sensori.

**Interfaccia uomo-macchina e il programma di missione**

L'interfaccia uomo-macchina (HCI) trae spunto dalla esperienza condotta con il progetto ARAMIS. Per aiutare il pilota/scienziato nel compito di programmare la missione è stato usato un linguaggio di tipo

**Figura 6**  
L'ambiente visuale di sviluppo (VDE) di MELBA. Ogni freccia e vertice è un comando grafico



visuale simile a quello realizzato per il progetto ARAMIS. Naturalmente l'insieme di comandi adottato è diverso in quanto la boa si può muovere solo verticalmente. Esso è formato da:

- comandi di movimento (del tipo da "vai su", "vai giù", "stop") per pilotare su e giù la boa;
- comandi di controllo per testare le variabili di stato della boa. (del tipo "Se...allora") e prendere semplici decisioni in accordo con il valore della temperatura, pressione posizione geografica, tempo, piazza ecc.;
- comandi e istruzioni di misura per i sensori.

L'ambiente di sviluppo integrato (IDE) è mostrato in figura 5. Questo set di comandi può essere utilizzato nell'ambiente grafico così come il relativo insieme di grafici di comandi che sono mostrati in figura 6. L'IDE, insieme al simulatore di scenario e della boa, se le informazioni ambientali sono sufficienti, permette di prevedere il reale comportamento della boa nell'acqua e di pianificare quindi la missione con alta probabilità di sopravvivenza.

Così la missione viene simulata e ricalcolata ad ogni emersione (figura 7).

Il modello dei dati è scaricato, dall'operatore a terra, periodicamente da National and European Projects (as MFSP - Mediterranean Forecasting System Pilot Project, MODB - The Mediterranean Oceanic Data Base, SINAPSI - Seasonal, Interannual and decadal variability of the atmosphere, oceanS and related marine ecosystems etc.) ed integrato con il modello della boa e i suoi programmi. Ad ogni ciclo di missione la posizione della boa, il VDE mostra il modello aggiornato (figura 8).

Per fare questo è necessario che la boa possa contattare il pilota/scienziato ovunque esso sia. Per questa ragione l'interfaccia è mobile e il legame con la boa è realizzato attraverso una stazione server.

Naturalmente il sistema deve operare anche se le connessioni non sono possibili, cosicché il server deve essere capace di

prendere decisioni circa la continuazione della missione (figura 9) giocando il ruolo del sistema di controllo missione.

### Conclusioni

Lo scopo finale del progetto MELBA è la realizzazione di uno strumento a basso costo multifunzionale, che accordi facilmente le specifiche attività, che sia possibile usarlo sia in mare aperto sia, con molta maggiore probabilità, vicino le coste e che sia capace di spedire una grande quantità di dati ben georeferenziati. Tale strumento potrebbe essere usato anche a livello comunale, per le periodiche misurazioni dello stato della costa prospiciente.

Il vero elemento innovativo del progetto è la realizzazione di una boa capace di seguire uno dei parametri (densità, salinità, temperatura, profondità chiusa) calcolato dalle misure effettuate dal proprio sistema sensoriale. Per esempio è possibile mantenere la boa in una zona a temperatura costante.

Un sistema di comunicazione bidirezionale dà la possibilità sia di trasmettere dati che di ricevere ordini (ad esempio una nuova missione chiusa) dalla stazione terrestre o dalla stazione navale.

Per questo tipo di applicazioni è importante che lo strumento sia espandibile così come la capacità di trasmissione venga aumentata, in modo da potervi programmare la missione o un facile ritrovamento di MELBA alla naturale o forzata fine della sua missione.

### Ringraziamenti

In particolare vogliamo ringraziare:

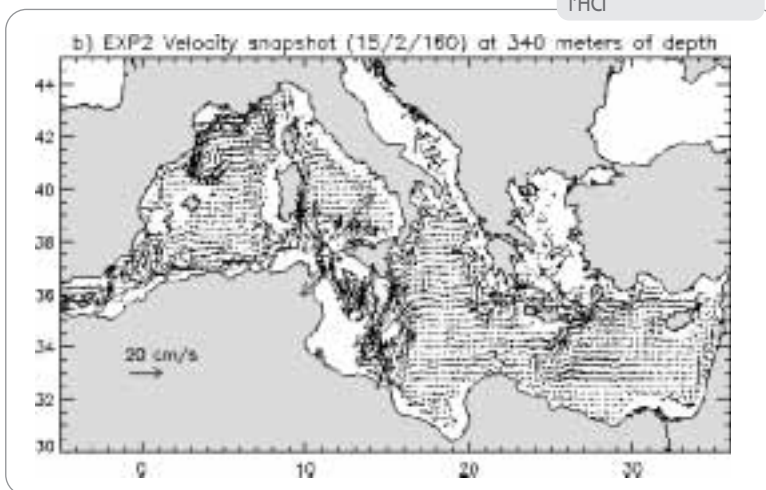
- CNR – IAN Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Automazione Navale
- Idromar srl
- Tecnomare SpA

### Bibliografia

1. TERRIBILE A. AND OTHER, *ARAMIS: a system for robotic inspection of sediments*, Conference Proceedings Oceanology International 2000, Brighton (UK), 7-10 March 2000.
2. MAFFEI D., PAPALIA B., ALLASIA G., BAGNOLI F., *A computer interface for controlling the ROV mission in scientific survey*, Conference Proceedings Oceans 2000, Providence (RI), 11-14 September, 2000.



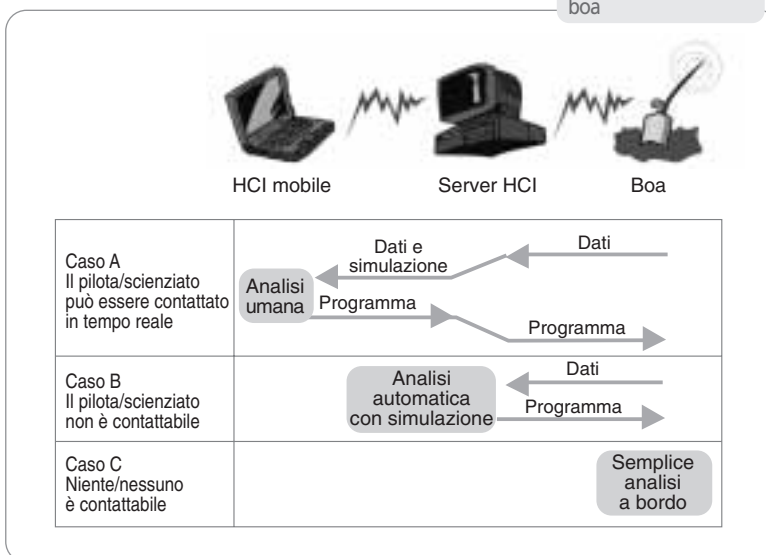
**Figura 7**  
Il ciclo di vita di una missione



**Figura 8**  
Le correnti del Mediterraneo, come mostrate dal Environment and Drifter Simulator (EDS) dell'HCI

3. EU-MAST Project, <http://www.cineca.it/mfssp/>
4. EU-MAST Project, <http://modb.oce.ulg.ac.be/>
5. Italian-MIUR Project, <http://sinapsi.cineca.it/>
6. RUPOLO V., BABIANO A., ARTALE V., IUDICONE D., *Horizontal space-time dependent tracer diffusivity parameterization for a OGCM. A sensitivity study in the Mediterranean Sea.*

**Figura 9**  
L'HCI accessibilità dalla boa





---

# La combustione “senza fiamma”: una nuova tecnologia energetica

Il lavoro descrive brevemente i principi della combustione senza fiamma e passa in rassegna le applicazioni a forni industriali e a generatori di potenza in Italia, menzionando anche i programmi nazionali di ricerca e sviluppo su questo argomento. ENEA si pone come capofila di una “rete di eccellenza” nel settore della combustione (enti di ricerca, università, industrie) impegnati nello sviluppo di queste tecnologie, che mostrano promettenti chances per la soluzione dei problemi posti dagli “impegni di Kyoto” sottoscritti dal governo italiano

**STEFANO GIAMMARTINI**  
**GIUSEPPE GIRARDI**  
**AMBROGIO MILANI\***

ENEA  
UTS Fonti Rinnovabili  
e Cicli Energetici Innovativi  
\* Consulente ENEA

Il persistente e cospicuo aumento dell'impiego di gas naturale come combustibile, gli impegni a livello nazionale conseguenti al Protocollo di Kyoto sulle emissioni di gas serra, la pressione crescente per misure atte a migliorare la qualità dell'aria pongono sempre maggiori sfide alle tecnologie di combustione e alle scelte di ricerca e sviluppo scientifica e tecnologica (R&ST) necessarie a far progredire le scienze di combustione e lo sviluppo applicativo. Negli ultimi 20 anni sia gli studi di base che le applicazioni tecnologiche hanno compiuto passi avanti notevoli: un forte motore di questi progressi nella comprensione fondamentale è stato lo sforzo per abbattere le emissioni di ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) agendo sulla fiamma (misure primarie), mentre uno stimolo tecnologico potente per l'affermarsi di nuove tecnologie è stato il risparmio energetico. A differenza che nel passato, nell'ultimo decennio si sono affermati strumenti di indagine sperimentale avanzati assieme a sofisticati modelli matematici, in grado di competere con la costosa sperimentazione in scala pilota, per cui, mai come ora, le scienze della combustione promettono di collaborare con le tecnologie.

La combustione senza fiamma è tra i migliori frutti di questo tipo di sviluppo decennale: le applicazioni nel settore dei forni e dei gasificatori sono state esaminate in una conferenza dedicata, organizzata a Roma da ENEA nel novembre 2001 (HTACG4 Symposium – Roma, 26-30 novembre 2001).

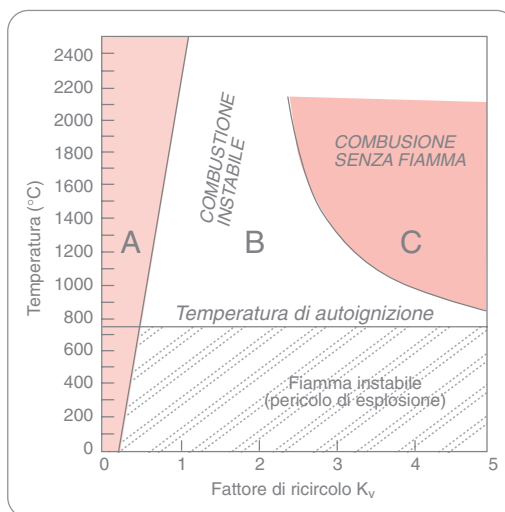
Le prospettive attuali sbilanciate su nuovi combustibili, generazione distribuita e, in prospettiva, uso di  $\text{H}_2$  per impianti e utenze a emissione zero, tengono conto di queste tecnologie *flameless* (o *mild*) sia per implicazioni di risparmio energetico, grazie al forte recupero di calore con l'aria comburente, sia per le ridotte emissioni. L'articolo ricorda il principio base e passa in rassegna applicazioni industriali e progetti di R&ST in Italia.

## Combustione senza fiamma

La tecnologia è stata applicata con successo in processi ad alta temperatura, in particolare in forni siderurgici di riscaldamento o di trattamento termico, dove è stata sviluppata in origine. La tecnica è stata inizialmente studiata per la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e si è poi sviluppata su larga scala grazie al forte potenziale di risparmio energetico associato a forti preriscaldamenti dell'aria comburente<sup>1</sup>.

Se la camera di combustione è stabilmente sopra i  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , quindi ben al di sopra della temperatura di auto-accensione del combustibile, è possibile rinunciare a fiamme stabilizzate ai bruciatori senza rischi per la sicurezza (per i forni industriali, a temperature inferiori di  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , le norme prescrivono rivelatori di fiamma e blocco automatico). Sopra la soglia, è possibile individuare un meccanismo di combustione, basato sulla auto-accensione termica e sul trascinarsi di una grande quantità di prodotti di combustione caldi (ricircolazione interna).

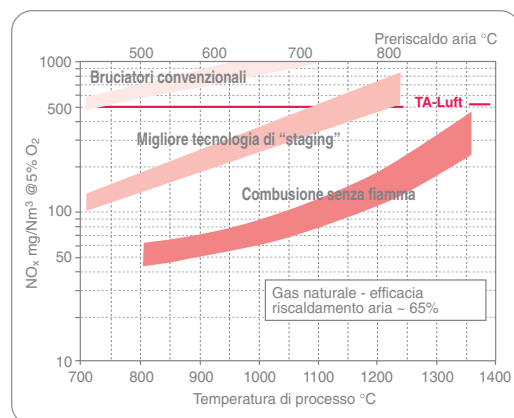
Nella figura 1, che sintetizza graficamente il campo di esistenza della cosiddetta "combustione senza fiamma" o *flameless*, il termine  $K_v$  indica la quantità di fumi riciclati riferita alla portata dei reagenti puri (aria e combustibile); grandi valori di  $K_v$  si possono ottenere con relativa facilità per effetto fluidodinamico, utilizzando bruciatori ad



**Figura 1**  
Campo di esistenza della combustione senza fiamma

**Figura 2**

Dati accumulati di emissione di ossidi di azoto, aggregati per differenti tecnologie *low NO<sub>x</sub>*



alta velocità. Il mescolamento di 2-4 volumi riciclati per volume prodotto, prima della reazione, preriscalda la miscela ma allo stesso tempo impedisce che la temperatura dopo la reazione possa salire fortemente rispetto alla temperatura di processo. In sostanza, il mescolamento con una gran quantità di inerte costringe le temperature della fase gas entro una banda di poche centinaia di gradi attorno alla temperatura di processo ( $\Delta T$  limitato a  $\sim\sim 200-400$  °C in combu-

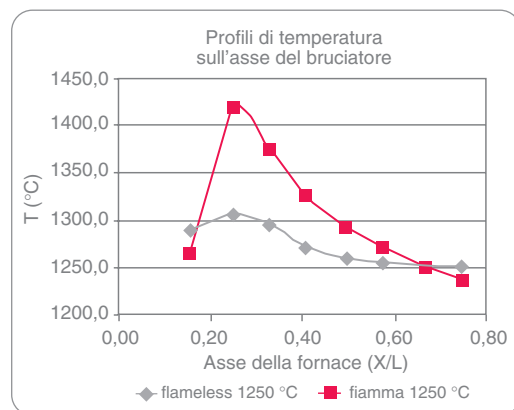
stione senza fiamma, contro  $\Delta T \sim\sim 800-1600$  °C in un tipico fronte di fiamma)<sup>1,2</sup>.

La prima conseguenza del drastico abbattimento dei picchi di temperatura in fiamma si riscontra sulla formazione di NO termico. Il grafico di figura 2 si riferisce a dati aggregati di forni a gas naturale dotati di un efficiente pre-riscaldamento dell'aria comburente (circa 70% della temperatura di processo). Nonostante l'aria molto calda, l'emissione NO<sub>x</sub> viene abbattuta di un fattore  $\approx 5$  rispetto alle migliori tecniche *low-NO<sub>x</sub>* tradizionali.

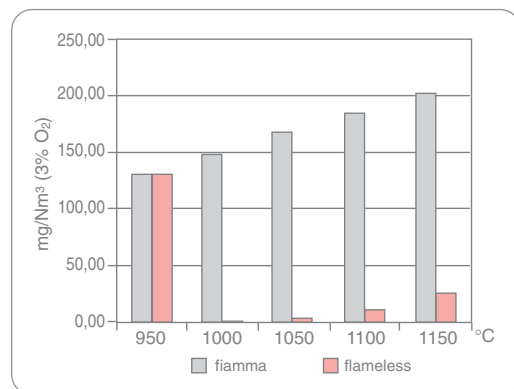
La struttura chimico-fisica del processo di combustione è drasticamente modificata: in una fiamma convenzionale di diffusione turbolenta, una grossa parte delle reazioni si localizza in un fronte di fiamma ricco di radicali confinati in uno strato altamente convoluto, turbolento e quasi bidimensionale con forti gradienti di tutte le grandezze in gioco. Al contrario, la zona di reazione della combustione senza fiamma è piuttosto distribuita su un volume e soggetta a pulsazioni turbolente molto più contenute. La figura 3 pone a confronto due profili di temperatura lungo l'asse del bruciatore, ottenuti su un forno sperimentale ENEA (forno MDC più oltre descritto) in condizioni di fiamma convenzionale e senza fiamma (*flou*). Il picco di temperatura messo in luce dalla modalità di combustione convenzionale (fiamma diffusiva) è responsabile delle sensibili emissioni di ossidi di azoto di origine termica, ben evidenziati in figura 4, ove le stesse condizioni operative sono messe a confronto dal punto di vista delle emissioni.

**Figura 3**

Profili di temperatura per combustione tradizionale e senza fiamma (*flameless*)

**Figura 4**

Emissioni a confronto tra combustione tradizionale e senza fiamma (*flameless*)



Le figure 5 e 6 mostrano la distribuzione di temperatura su una metà del piano di mezzeria del forno sperimentale ENEA-MCD nelle due condizioni di funzionamento. Il picco riscontrabile sulla destra in figura 5 è relativo al fronte di fiamma in combustione convenzionale.

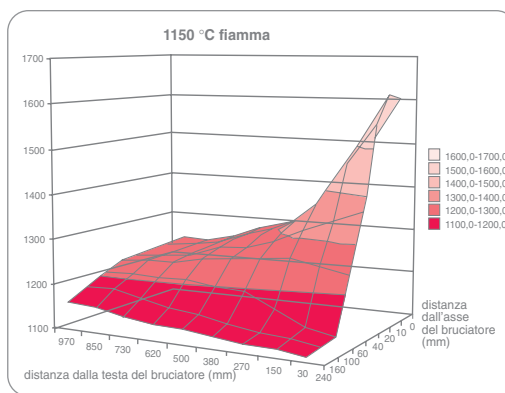
La figura 7 si riferisce a un bruciatore a *swirl* classico per olio denso: la fiamma (foto di sinistra) è ottenuta con aria a 200 °C.

La combustione senza fiamma è stata ottenuta ricircolando prodotti di combustione nell'aria comburente, che risulta viziata ( $O_2 \approx 10\%$ ) ma preriscaldata a  $500\text{ }^\circ\text{C}$  (foto di destra). È ben chiaro che la struttura della combustione risulta molto diversa (nel secondo caso procede per evaporazione delle gocce e successiva combustione omogenea senza fiamma); di conseguenza risulta anche ben diversa la formazione di inquinanti. Quindi, il risultato tecnologico può costituire un deciso vantaggio ambientale, in particolare per quanto riguarda combustibili liquidi e solidi.

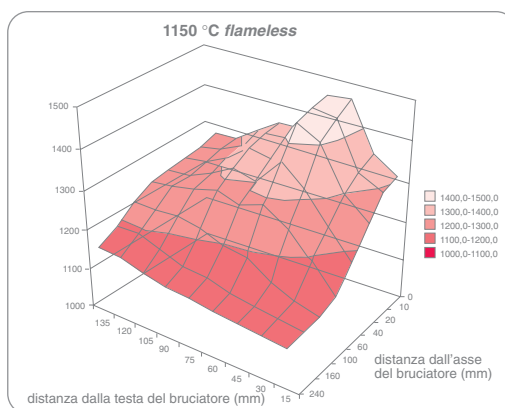
## Applicazioni industriali

### Forni di riscaldamento e forni per il trattamento termico

Il grande vantaggio delle tecnologie senza fiamma consiste nel rendere possibile l'uso di aria molto preriscaldata (fin oltre  $\approx 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ), senza emissioni incontrollate di  $NO_x$  e senza eccessivi stress termici sui materiali. Preriscaldamenti così efficaci consentono un salto in avanti nel recupero energetico nei processi ad alta temperatura, come è facile calcolare a tavolino. Si richiedono non solo la combustione senza fiamma, ma anche una progettazione speciale del bruciatore e dei componenti. La soluzione che ha reso possibile tale recupero energetico è stata quella di alloggiare lo scambiatore di calore per preriscaldare l'aria nel corpo stesso del bruciatore: i fumi

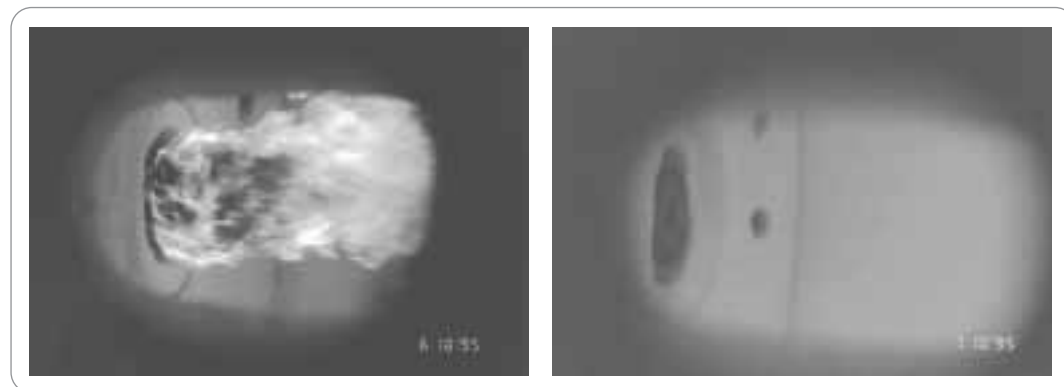


**Figura 5**  
Mappa di temperatura su metà piano di mezzeria in condizioni standard



**Figura 6**  
Mappa di temperatura su metà piano di mezzeria in condizioni senza fiamma

caldi vengono estratti attraverso il bruciatore in contro corrente all'aria, che viene così riscaldata proprio al momento giusto. Con queste geometrie e con materiali costruttivi appropriati, il rendimento termico della camera di combustione può essere aumentato decisamente, del  $\approx 20-50\%$ , rispetto alla tecnologia corrente, ciò che si riflette direttamente in un risparmio di combustibile e pertanto in una corrispondente mitigazione delle emissioni di gas serra, oltre nella citata riduzione di  $NO_x$ .



**Figura 7**  
Combustione con fiamma e senza fiamma<sup>2</sup>: a sinistra fiamma convenzionale, a destra senza fiamma (*flameless*)

**Figura 8**

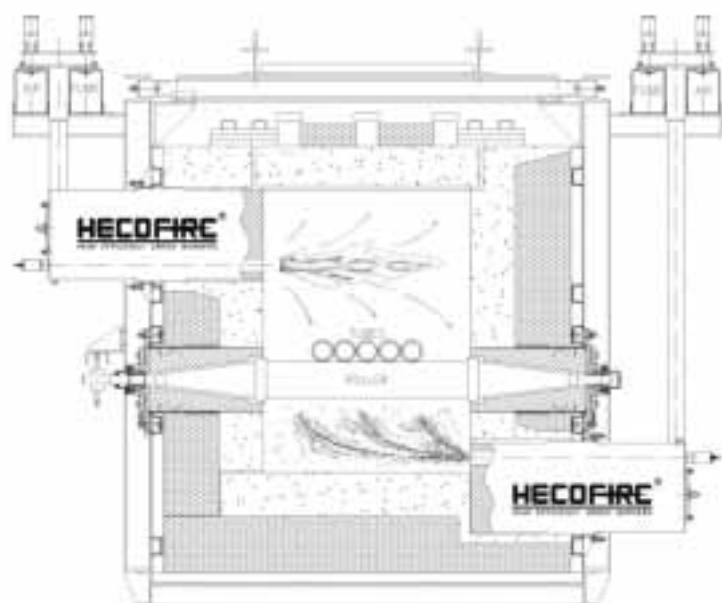
Forno continuo di ricottura per nastri di acciaio inossidabile presso AST-Terni

**Figura 9**

Forno a longheroni di riscaldamento e normalizzazione tubi presso Acc. Pietra di Brescia

**Figura 10**

Schema e vista del forno a rulli per tubi inox



stri di acciaio inossidabile presso AST-Terni (figura 8); l'impianto di combustione è basato su un bruciatore auto-rigenerativo (Regemat®), che racchiude una coppia di letti rigenerativi in un assemblaggio particolarmente compatto. Lo stesso bruciatore è stato usato per il nuovo forno a longheroni di riscaldamento e normalizzazione tubi presso Acc. Pietra di Brescia (figura 9), con ottimi risultati, sia di risparmio energetico che di precisione di controllo e qualità prodotto.

Un sistema rigenerativo, basato su principi simili, è stato adottato con successo per un forno a rulli di ricottura di tubi in acciaio inossidabile: i bruciatori Hecofire® sono montati in coppia sopra e sotto il pass-line (figura 10) e le prestazioni qualitative sono eccellenti. Lo stesso disegno è stato adottato su altri forni in scala maggiore, sempre confermando le prestazioni di risparmio energetico e di bassa emissione inquinanti. Oltre al caso della fiamma libera, il principio si applica altrettanto bene ai tubi radianti, che possono venir costruiti in carburo di silicio (SiSiC) con recuperatore di calore integrato. Tubi radianti operanti in modo senza fiamma sono oggi impiegati con vantaggio in forni statici e continui sempre per trattamenti termici di metalli.

La tabella 1 è basata su *feedback* di molte applicazioni industriali e confronta il recupero di calore centralizzato al camino con il recupero decentralizzato più combustione senza fiamma. La potenza unitaria dei bruciatori utilizzati varia di ben due ordini di





grandezza (~ 25-2500 kW) senza iniziare la generalità delle conclusioni.

## Prospettive del mercato dei forni

Questi dati di ritorno, anche se lusinghieri, non sono sufficienti a innescare un'applicazione su vasta scala, sebbene le applicazioni continuino ad aumentare nei settori industriali già provati con successo. Senza dubbio, la tecnologia può essere applicata con vantaggio anche a settori industriali diversi dalla metallurgia ferrosa e non ferrosa, purché i processi siano essenzialmente a temperatura superiore alla soglia di sicurezza (~ 750 °C). Basti pensare ai forni per vetro, per ceramica e ai forni di processo nell'industria chimica.

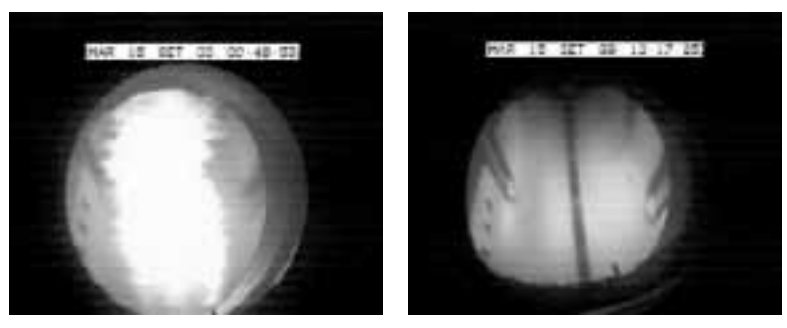
## Generazione di potenza

L'applicazione industriale di tecnologie senza fiamma a generatori di vapore tradizionali e a forni di incinerimento è stata presa in considerazione a livello ancora preliminare<sup>2</sup>. Tuttavia, prove su larga scala sono state condotte su una caldaia munita di un bruciatore a gas da ben ~ 30 MW (figura 11) ottenendo risultati incoraggianti, in particolare per quanto riguarda emissioni di CO e NO<sub>x</sub> a pieno carico.

L'abbattimento di emissioni inquinanti, soprattutto in presenza di combustibili non tradizionali, e la flessibilità delle tecniche senza fiamma in varie condizioni operative, quando applicabili, sono i maggiori punti di forza per la diffusione delle nuove tecnologie.

## Attività di R&ST

Un campo di applicazione molto promettente riguarda i combustori per turbogas: le tecnologie senza fiamma potrebbero essere la carta vincente per risolvere i pro-



**Figura 11**  
Fiamma e senza fiamma in caldaia da 30 MW

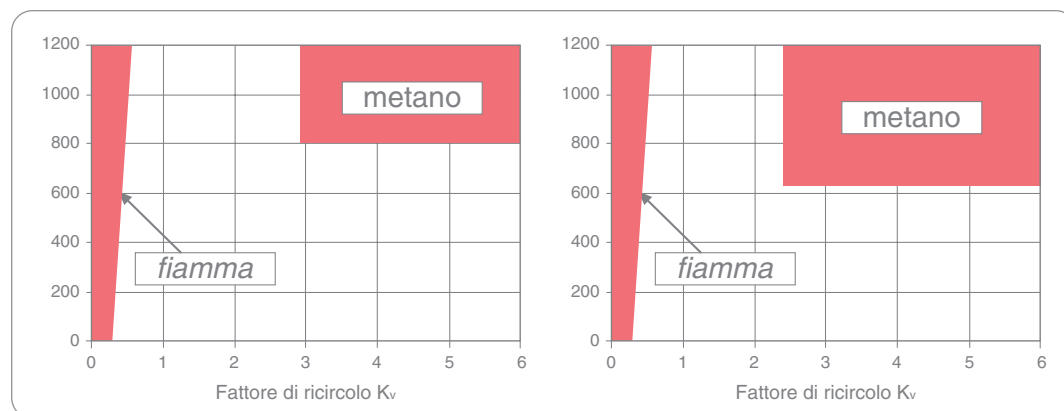
blemi di instabilità termoacustiche (*humming*) e di emissione NO<sub>x</sub> che tuttora affliggono il disegno delle turbine low-NO<sub>x</sub> a fiamma pre-miscelata.

Progetti di ricerca comunitari su combustori di turbogas senza fiamma sono in corso negli ultimi anni e comprendono tutti una partecipazione di partner italiani. Le applicazioni di riferimento puntano a macchine di taglia piccola, adatte a sistemi cogenerativi. In questi casi, la presenza di un recuperatore di calore (aria pre-riscaldata a ≈ 600 °C) potrebbe accoppiarsi molto bene con un combustore *flameless*. Anche l'uso dell'idrogeno nel turbogas potrebbe trovare vantaggioso un disegno senza fiamma, al fine di minimizzare le emissioni di NO<sub>x</sub> ed incrementare la stabilità.

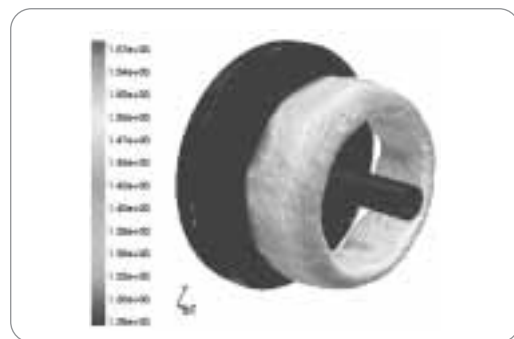
Un'altra applicazione interessante riguarda un sistema di post-combustione piazzato a valle di una turbina a gas che sfrutta l'effluente, caldo (≈ 500 °C) e impoverito di ossigeno (≈ 13%), come comburente ideale per la combustione senza fiamma di qualsiasi combustibile povero o fuori specifica (inclusi gas di recupero, biogas, oli ecc). A questo proposito risulta opportuno citare il Progetto BAGIT (Biomass and Gas Integrated CHP Technology) finanziato dalla Comunità Europea nell'ambito del V Programma Quadro, che vede, per l'Italia, la collaborazione di Ansaldo Ricerche (ARI) ed ENEA sul tema della co-combustione di gas da biomasse e gas naturale in un bruciatore di tipo Trapped Vortex (TVB), più oltre descritto, in configurazione TEG (Turbine Exhaust Gas). Nell'ambito di tale progetto è previsto lo sviluppo del brucia-

**Figura 12**

Zona di combustione senza fiamma per due idrocarburi<sup>5</sup>

**Figura 13**

Bruciatore *Trapped Vortex*: isobara con sovrapposto campo di temperatura



tore TVB (ARI) e la sua qualificazione con un'ampia attività di tipo teorico e sperimentale (ENEA).

Anche la ricerca fondamentale si è orientata verso lo studio sistematico della combustione senza fiamma (o *flameless*, *flox*, *mild*,

**Figura 14**

Forno sperimentale ENEA-MCD



HTAC, *excess enthalpy* ...: non c'è ancora unanimità nell'individuare il fenomeno con una denominazione accettata da tutti<sup>3</sup>), usando modelli matematici sofisticati e approcci sperimentali basati su strumentazione avanzata non invasiva.

Il gruppo di ricerca dei laboratori universitari (ingegneria chimica) e del CNR a Napoli è da sempre molto attivo nell'indagine sistematica della combustione senza fiamma. Lavori recenti sono stati presentati al Combustion Institute Meeting di Sapporo<sup>4</sup> e in altre pubblicazioni sull'argomento. Gli studiosi di Napoli mettono in evidenza non solo gli aspetti fondamentali del fenomeno, ma anche i potenziali benefici della nuova tecnologia per quanto riguarda la formazione di inquinanti.

Indagini fondamentali sul fenomeno sono condotte al Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Chimica<sup>5</sup>, con un dispositivo relativamente semplice in grado di fornire informazioni molto utili, come ad esempio l'effetto del tipo di idrocarburo impiegato come combustibile (figura 12).

La combustione senza fiamma richiede anche ulteriori indagini sulla cinetica chimica del processo, per studiare la transizione da fiamma a senza fiamma, la formazione di inquinanti e la possibilità di inibirne la formazione. È dunque importante disporre di modelli cinetici accurati e affidabili, quali sono stati sviluppati e verificati in un ampio intervallo di condizioni operative (dai motori alle caldaie), *flameless* inclusa,

dai gruppi di ricerca universitari<sup>6</sup>.

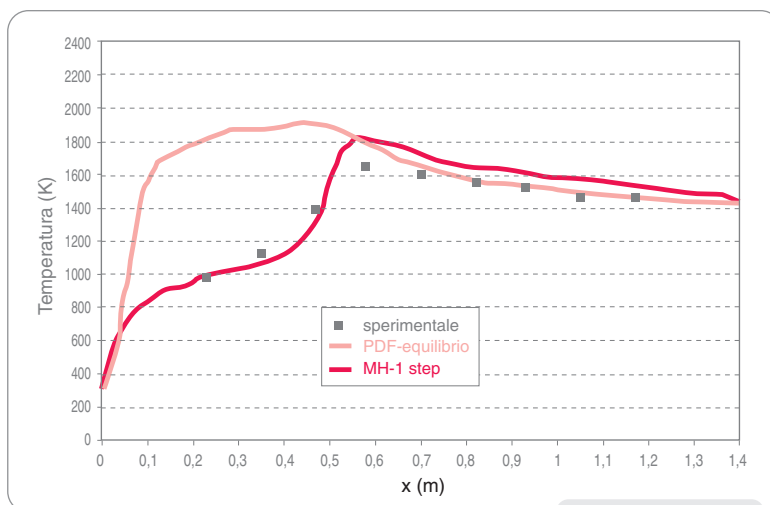
Modellistica numerica avanzata viene sviluppata da parecchi anni da ENEA in stretta collaborazione con il Dipartimento di Meccanica e Aeronautica della Università La Sapienza (Roma).

Progressi significativi riguardano la combustione in turbogas. Sono stati pubblicati diversi lavori su questo tema e in particolare sull'effetto della pressione in termini di emissioni di  $\text{NO}_x$ , sul previsto comportamento dell'idrogeno puro o in miscela ecc. Lavori recenti studiano in particolare la geometria *trapped vortex* il cui schema è riportato in figura 13<sup>7,8</sup>.

Lo sviluppo di un software di calcolo potente, robusto e affidabile per predizioni fluidodinamiche non solo a freddo, ma anche in campi reattivi in condizioni difficili e/o troppo costose da simulare con modelli sperimentali (per esempio alta pressione, idrogeno puro ecc.), è pienamente promosso e supportato da ENEA<sup>9,10</sup>.

I laboratori di ENEA Casaccia sono fortemente impegnati nell'indagine sperimentale e nello sviluppo della modellistica numerica avanzata<sup>10</sup> inclusi i grandi codici di predizione LES (Large Eddy Simulation) o DNS (Direct Numerical Simulation), che richiedono grandi macchine parallele oltre che naturalmente approfondite competenze su questi temi di grande portata scientifica.

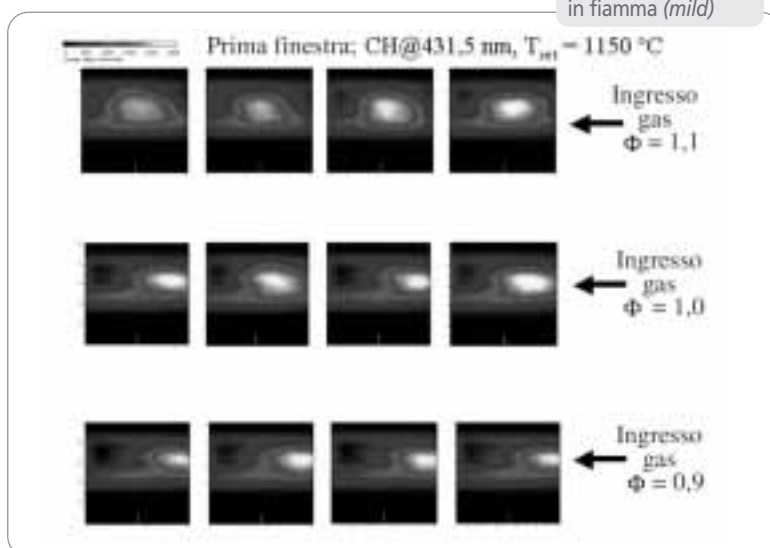
La combustione, incluso ovviamente anche il caso *flameless*, costituisce infatti una delle sfide più ardue del calcolo numerico a causa del forte accoppiamento dei fenomeni di trasporto di materia, di quantità di moto e di energia nel dominio di calcolo. Un dispositivo sperimentale *ad hoc* (Forno MCD, figura 14) viene usato per la validazione di codici numerici specifici ed è equipaggiato con spettroscopi, velocimetri laser, analizzatori e altri avanzati strumenti di misura nella fiamma. La figura 15 mostra, a titolo di esempio, un profilo di temperatura *flameless* confrontato con due diverse predizioni numeriche basate su diversi modelli.



**Figura 15**  
Comparazione di differenti modelli con dati sperimentali, per un profilo assiale *flameless*

Parallelamente alle attività di ricerca di tipo teorico-numerico/sperimentale, se ne è affermata un'altra, propedeutica alla conduzione di dettagliate campagne sperimentali destinate alla validazione e messa a punto di simulazioni numeriche, essa riguarda lo sviluppo di dispositivi diagnostici in grado di soddisfare le tre condizioni fondamentali di: non intrusività, alta risoluzione spaziale e alta risoluzione temporale (figure 16÷18). Questa attività ha portato allo sviluppo ed ingegnerizzazione di dispositivi, spesso basati su tecnologia laser, in grado di fornire informazioni di dettaglio e affidabili sul campo fluidodinamico, termico e sulla distribuzione e abbondanza di specie chimiche stabili e non (radicali).

**Figura 16**  
Mappe della distribuzione del radicale CH al variare del rapporto di equivalenza in fiamma (*mild*)



**Figura 17**

Spettroscopio per analisi di spettri chimici a banda larga

**Figura 18**

Sistema CARS compatto per misura puntuale di temperatura



Oltre a sviluppare queste competenze *intra muros*, ENEA promuove la cooperazione in progetti di ricerca congiunti con partner nazionali (università, centri di R&ST e industrie)<sup>10</sup>. Questo atteggiamento aperto viene applicato con particolare convincimento nel campo delle tecnologie senza fiamma, perché si ritiene che abbiano un futuro industriale e applicativo fecondo anche in nuovi settori come l'uso di idrogeno, di biogas, di turbine a gas ecc.

## Conclusioni

Riteniamo che le tecnologie senza fiamma abbiano un forte potenziale di sviluppo e che il mercato italiano dell'uso industriale del gas e della generazione di energia possa trarre molto beneficio da queste nuove chance di sviluppo, non solo per mitigare il problema delle emissioni di gas serra e per contribuire agli impegni del Protocollo di Kyoto, sottoscritto dal governo italiano, ma anche per rinnovare il parco nazionale dei sistemi di combustione industriale, consentendo lo sviluppo di impianti più efficienti, affidabili e competitivi, mi-

gliorando la qualità del prodotto oltre che dell'aria.

In questo ambito nuove sinergie risultano necessarie e saranno attivate attraverso l'affermarsi ed il consolidarsi di una Rete Nazionale di operatori scientifici nel settore della combustione, rete che ha prodotto il suo primo embrione grazie ad iniziative sponsorizzate dal Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica, nell'ambito di Programmi di Ricerca Applicata variamente finanziati, e che nuove opportunità di collaborazione dovrà sviluppare nel futuro nell'ottica di un network europeo sul tema della combustione.

## Bibliografia

1. WÜNNING J.A., WÜNNING J.G., *Ten Years of Flameless Oxidation: Technical Applications and Potentials*, HTACG4 Symposium, Roma, 26-30 novembre 2001.
2. MILANI A., SAPONARO A., *Tecnologie di combustione senza fiamma*, La Termotecnica, gennaio-febbraio 2000, 87-94.
3. IFRF Combustion Handbook, Combustion Files#171-174, ISSN 1607-9116, [www.ifrf.net](http://www.ifrf.net)
4. DE JOANNON M., CAVALIERE A., DONNARUMMA R., RAGUCCI R., *Dependance of autoignition delay on oxygen concentration in mild combustion of heavy molecular paraffin*, Combustion Institute Meeting, Sapporo 2002.
5. ROTA R., GUARNERI F., GELOSA D., EFFUGGI A., RABAIOLI M., *Mild combustion in a small-scale apparatus*, Proceedings of the Fourth International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, 40:1-40:11 (Roma, novembre 2001).
6. RANZI E., DENTE M., BOZZANO G., GOLDANIGA A., FARAVELLI T., *Lumping Procedures in Detailed Kinetic Models of Gasification, Pyrolysis, Partial Oxidation and Combustion of Hydrocarbon Mixtures*, Progr. Energy Comb. Science 27 (2001) 99-139.
7. TABACCO D., CUOCO F., BRUNO C., *Theoretical and numerical investigation on flameless combustion and its potential for applications to gas turbines* - HTACG4 Symposium, Roma, 26-30 novembre 2001.
8. LOSURDO M., BRUNO C., CALCHETTI G., GIACOMAZZI E., RUFOLONI M., *Effects of Different Fuels in a Trapped Vortex Combustor*, XXV Event of the Italian Section of the Combustion Institute, Roma, 3-5 giugno, 2002.
9. GIRARDI G., GIAMMARTINI S., *Numerical and Experimental Study of Mild Combustion of Different Fuels and Burners*, 5<sup>th</sup> HTACG Conference Yokohama, ottobre 2002.
10. Workshop conclusivo dell'Accordo di Programma MIUR-ENEA, *La rete di eccellenza nazionale sulla combustione: risultati della collaborazione e prospettive future*, Roma, 4-5 febbraio 2003.

# Generazione energetica localizzata: energia sostenibile e stimolo alle rinnovabili



I vantaggi della generazione distribuita dell'energia, rispetto alla produzione tramite impianti centralizzati e grandi centrali elettriche, sono riconducibili alla possibilità di produrre ed utilizzare l'energia in prossimità dell'utenza, con conseguenti benefici in termini di migliori rendimenti di generazione, riduzione delle perdite in rete e/o minori investimenti economici per lo sviluppo ed il potenziamento della rete elettrica, ai vantaggi di carattere ambientale, nonché alla opportunità di un impiego sempre maggiore e capillare delle fonti energetiche rinnovabili

**FRANCESCO PAOLO VIVOLI**  
**GIORGIO GRADITI**

ENEA  
UTS Fonti Rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi

Questo lavoro va letto in una prospettiva di consapevolezza, da un lato della coscienza che l'approvvigionamento energetico mondiale, nella misura e nelle quantità previste, non potrà che essere assicurato dai combustibili fossili ancora per alcune decine di anni, dall'altro dell'urgenza del problema posto dai costi ambientali e sociali determinati dalle fonti primarie a disposizione e dall'uso che ne facciamo.

Siamo infatti consapevoli che, a meno di una rivoluzione determinata dall'avvento di una nuova tecnologia oggi nemmeno intravista, l'unica fonte primaria che potrà saziare la "fame" di energia dell'umanità è certamente la fonte fossile nelle sue varie forme: carbone, olio combustibile, gas naturale. D'altro canto non si può non tentare di rispondere alla richiesta, ormai presente alla coscienza e alla volontà di tutti i cittadini, di uno sviluppo sociale ed economico compatibile con la risorsa ambiente, che comincia a mostrare i suoi limiti a fronte di una popolazione mondiale che si misura ormai in miliardi di esseri che reclamano, anche quelli che oggi ne dispongono in misura limitata, il diritto al benessere che è inevitabilmente associato a sempre più elevati consumi energetici.

Una risposta, sia pure solo parziale, a questa richiesta potrà venire da un lato sviluppando il ricorso alle fonti rinnovabili, dall'altro ricorrendo a strategie e tecnologie di

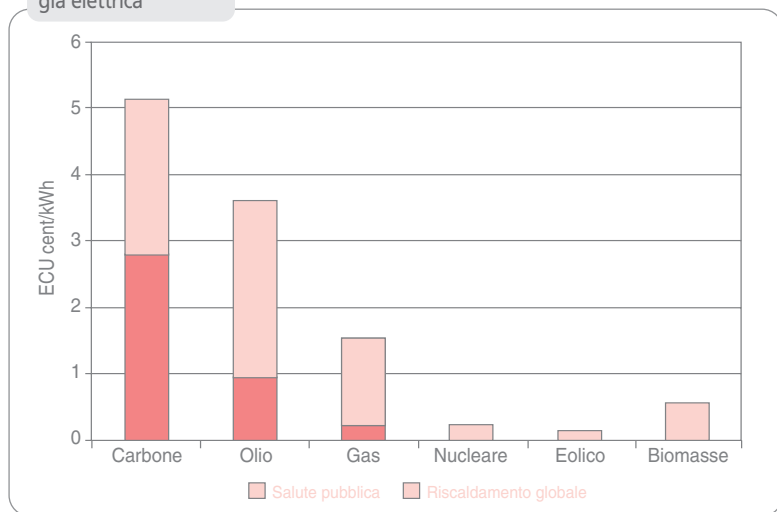
produzione innovative che vadano nel senso e nella direzione richiesta. La generazione di energia, termica, meccanica od elettrica che sia, localizzata quanto più possibile sul luogo stesso di utilizzo è certamente una di queste. Si consideri peraltro che il possibile apporto delle fonti rinnovabili si è detto abbastanza limitato, ma esso potrebbe come vedremo, in associazione al vettore idrogeno e alla nuova tecnologia delle celle a combustibile, assumere un ruolo importante se saranno raggiunti i traguardi che la ricerca in questi due settori promette nel medio termine.

Le previsioni energetiche, basate sulle proiezioni economiche IEA per i prossimi decenni, indicano che l'energia, pure ai ritmi di crescita attuali, non verrà certamente a mancare perchè al 2030 sarà assicurata (al 90% del totale) dai combustibili fossili: olio combustibile e gas naturale potrebbero bastare per 30 o 40 anni, mentre il carbone potrebbe soddisfare la domanda di energia dell'umanità per 500 anni. In assenza di grandi innovazioni tecnologiche o della scoperta di nuove fonti o nuovi processi di conversione delle fonti potenziali ed attualmente non economicamente sfruttabili, la richiesta energetica potrà essere soddisfatta mediante il ricorso ai giacimenti di fonti fossili già reperiti e di quelli che si presume verranno scoperti nel prossimo futuro.

Il peso percentuale del nucleare e dell'idroelettrico andrà progressivamente diminuendo, mentre la percentuale di penetrazione delle nuove fonti rinnovabili, idroelettrico escluso, raddoppierà, mantenendo un tasso peraltro modesto dell'approvvigionamento, dall'attuale 2 al 4%. Ancora secondo le previsioni IEA, dal 2000 al 2030 si può prevedere un raddoppio dei consumi mondiali di elettricità (determinati in maggior misura dal forte aumento della domanda dei Paesi in via di sviluppo [PVS]).

Stimiamo che per prepararsi a questo scenario si pongano ai nostri decisori quattro sfide energetiche strategiche:

**Figura 1**  
I principali costi esterni delle fonti di energia elettrica



- assicurare la necessaria sicurezza di approvvigionamento delle fonti di energia;
- decidere gli investimenti utili a creare le necessarie infrastrutture di produzione e trasporto dell'energia;
- cercare una risposta alla minaccia all'ambiente dall'aumento dei processi di trasformazione ed uso dell'energia<sup>1</sup>.

Le rinnovabili potrebbero contribuire a dare risposte a queste sfide energetiche, perché:

- danno nuovo valore aggiunto al mix energetico;
- riducono i rischi negli attuali portafogli energetici e nei trend previsti;
- aumentano l'efficacia dei sistemi energetici;
- contribuiscono a realizzare i target ambientali;
- forniscono servizi energetici in applicazioni in cui altre fonti non possono rispondere (ad esempio nei pvs in cui 1,6 miliardi di persone non hanno accesso all'elettricità);
- aumentano la partecipazione pubblica nelle decisioni che riguardano l'energia.

## Generare localmente l'energia

In relazione al problema rappresentato dall'inquinamento ambientale, dall'ottimizzazione delle risorse energetiche e dall'esigenza di minimizzare le perdite per il trasporto, si sta diffondendo la convinzione dell'opportunità di implementazione di un innovativo modello di sviluppo del sistema energetico e delle infrastrutture correlate basato sulla produzione locale, in corrispondenza di ciascuna utenza ed in quantità corrispondente al singolo fabbisogno (a vari livelli di potenza) sostituendo là dove possibile i punti di "presa" con punti di "generazione attiva".

Diverse ragioni, legate sia ad aspetti tecnici e tecnologici (saturazione della rete elettrica esistente e riduzioni dei margini di stabilità e sicurezza, aumento della richiesta d'energia, sviluppo e diffusione di nuove

forme di produzione energetica) sia ad esigenze di carattere ambientale (necessità di ridurre le emissioni in atmosfera di sostanze inquinanti) hanno contribuito alla maturazione dell'opportunità di cambiare l'attuale modello a vantaggio della massimizzazione del potenziale sviluppo di un sistema diffuso di impianti di piccola-media taglia distribuiti sul territorio (generazione distribuita).

Con il termine "generazione distribuita" si intende la produzione di energia – in particolare di quella elettrica – mediante impianti di piccola-media potenza (da decine di kW a qualche MW), realizzati con fonti tradizionali, se necessario, ma ove possibile con fonti rinnovabili (sistemi fotovoltaici, eolici, mini-idroelettrici, a biomassa, geotermici, celle a combustibile ecc.), dislocati in prossimità dell'utenza e, per il caso dell'energia elettrica, connessi alla rete di distribuzione, come soluzione integrativa e, per quanto tecnicamente possibile, alternativa al modello centralizzato. La tecnologia utilizzata, caso per caso, è strettamente correlata alla densità energetica richiesta, alle specifiche dell'utilizzatore e agli aspetti ed alle valutazioni di carattere sociale ed economico.

Questo modo di produrre avvicinerrebbe la generazione di energia al consumo, inquadrando nella nuova ottica della liberalizzazione del mercato dell'energia e favorirebbe la nascita di nuove iniziative di investimento da parte dei singoli o di piccoli gruppi di consumatori (condomini, consorzi di aziende, municipalizzate ecc.) che potrebbero dotarsi di un "proprio" impianto di produzione di energia elettrica, aumentando l'efficienza complessiva del sistema di generazione e distribuzione.

Lo sviluppo di un sistema diffuso, efficiente ed economicamente valido di generazione dell'energia condurrebbe l'utente-utilizzatore a indirizzare la sua richiesta verso "forme energetiche" diverse da quella elettrica abbassandone il tasso di penetrazione nel sistema energetico complessivo.

<sup>1</sup> Le emissioni di CO<sub>2</sub> da energia aumentano dell'1,8 % annuo fino a 38 miliardi di ton nel 2030 – 70% sopra i livelli 2000 soprattutto nei Pvs – l'energia elettrica sarà responsabile della metà dell'aumento delle emissioni.

Il “vettore” energia elettrica ha infatti trovato ragione di sviluppo negli ultimi decenni in ragione della facilità di trasmissione e distribuzione, che ne ha aumentato a dismisura la diffusione con una evidente diseconomia del sistema (si rifletta sul fatto che spesso si arriva a soddisfare un’esigenza di energia termica utilizzando elettricità che, a sua volta, è stata ottenuta da energia termica generata in centrale con bassi rendimenti di conversione).

Le energie rinnovabili ed in maniera più generale la generazione distribuita di energia nelle sue forme termica, elettrica, meccanica, ne consentiranno la produzione locale senza dover dipendere da inquinanti e complessi sistemi di movimentazione e distribuzione di prodotti petroliferi o altri tipi di combustibili fossili, dai grandi impianti di pesante impatto sul territorio, da costose reti di distribuzione o di altre infrastrutture, e tutto ciò con più efficienti rendimenti di generazione e di conversione. Pertanto, le nuove tecnologie e la generazione distribuita di piccola taglia rivestiranno un ruolo fondamentale nello sviluppo del settore elettrico, non solo perché potranno contribuire in maniera determinante all’aumento della quota di mercato delle energie rinnovabili, ma anche perché consentiranno rilevanti risparmi dal punto di vista dei costi, derivanti anche dalla minore dispersione d’energia nella fase di vettoriamento.

Vari motivi giustificano l’attenzione crescente che si pone a questo nuovo concetto di generazione:

- le potenzialità delle tecnologie di produzione sul luogo di utilizzo e di cogenerazione, conferiscono alla generazione distribuita la capacità di raggiungere elevate efficienze di conversione (anche prossime all’80%), con effetti sulle emissioni di inquinanti e di gas serra;
- il settore residenziale e terziario, che assorbe ormai circa un terzo degli impieghi finali di energia, richiede calore a temperature più basse di quello industriale, la stessa ubicazione del ciclo di potenza e dell’utenza termica, la sincronia della richiesta di calore ed energia elettrica, sia *on site* che con la rete nelle ore di punta. Questa domanda si ataglia particolarmente bene alle caratteristiche degli schemi di generazione distribuita.

Un contesto – quello della ripartizione nel territorio – ideale per le fonti rinnovabili, che sono diffuse per loro stessa natura, in un’ottica evoluta di sostenibilità, che potrebbe rappresentare la prima importante e necessaria premessa verso un ulteriore salto di qualità consistente nell’integrazione del modello di produzione distribuita con quello di “risorse distribuite”.

Quest’ultimo comporta non solo la realizzazione degli impianti di produzione in prossimità degli utilizzatori, ma la localizzazione degli stessi, almeno di quelli che non sfruttino direttamente ed in tempo reale la fonte solare, nelle vicinanze delle fonti che li dovranno approvvigionare.

## Le tecnologie

Le principali tecnologie disponibili per la generazione distribuita dell’energia includono i motori/generatori a combustione interna, le micro-turbine, i generatori statici (celle a combustibile), i convertitori solari, gli impianti eolici, i generatori termici a biomasse. La tecnologia adottata dipenderà di volta in volta dalla densità energetica richiesta, dalle caratteristiche del carico, da altre valutazioni di rilevanza socio-economica.



## Usi finali dell'energia: energia elettrica e fonti rinnovabili

L'energia viene utilizzata, nei vari settori civile, abitativo e dei servizi, dell'industria, dei trasporti, in varie forme: da quella meccanica, a quella termica, a quella elettrica.

Mentre gli impieghi di tipo meccanico e termico nell'industria sono, negli ultimi vent'anni, diminuiti per l'effetto combinato della diminuzione del peso percentuale delle attività "energy intensive" e di azioni di razionalizzazione energetica; non così nel settore dei trasporti a causa di una aumentata domanda di mobilità, e in quello degli impieghi di elettricità, per il dilagare in tutti i settori, dall'abitativo, ai servizi, all'industria, di apparecchi che utilizzano questa forma "nobile" di energia.

L'elettricità, infatti, è venuta assumendo in tutti i settori del vivere quotidiano e della tecnologia umana una importanza ed un peso crescenti e di interesse fondamentale e strategico. Senza di essa si arresterebbe il sistema dei servizi e tutto l'apparato industriale; da essa dipendono in misura quasi assoluta comfort, abitudini di vita e benessere. Essa rappresenta un fattore determinante della qualità della vita; lo sviluppo economico e sociale che l'uomo ha conosciuto nell'ultimo secolo ed ancor più quello previsto non potrebbero essere senza l'apporto dell'energia elettrica.

Quest'ultima, prodotta nelle centrali termoelettriche a partire dai combustibili fossili di cui non si riesce, per limiti propri dei cicli termici, a sfruttare in maniera efficiente il contenuto energetico, deve però essere trasportata ai grandi agglomerati urbani che la utilizzano. Il processo di generazione dell'energia elettrica comporta perciò, da un lato perdite di energia nella conversione dall'energia chimica del combustibile fossile a quella elettrica, oltre a perdite nella trasmissione e distribuzione puntuale, dall'altro la risoluzione di problemi di inquinamento ambientale ed elettromagnetico.

In ordine al tentativo di risoluzione di que-

ste problematiche, da quando negli ultimi vent'anni esse si sono poste alla coscienza culturale collettiva dei paesi più progrediti, sono aumentati gli sforzi del sistema politico-economico e di quello della ricerca tesi alla messa a punto di tecnologie di generazione dell'energia – in particolare di quella elettrica – da fonti alternative a quelle tradizionali, in pratica dalle fonti rinnovabili, e cioè da quella solare, nelle sue varie forme: eolica, idroelettrica, solare termica e fotovoltaica, da biomasse ecc.

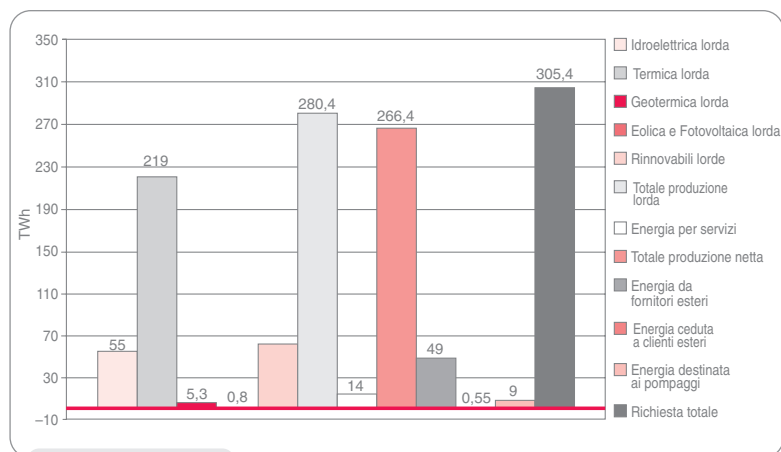
Per molti anni, infatti, il fabbisogno nazionale di energia elettrica è stato soddisfatto, in larga parte, mediante grossi impianti di produzione (centrali di grande taglia) che sfruttano quale fonte primaria i combustibili fossili e l'energia elettrica è stata trasportata utilizzando reti elettriche a diversi livelli di tensione. Questa struttura, verticalmente integrata, è stata costruita su criteri di massima resa economica, sicurezza e qualità del servizio.

Il sistema energetico non potrà che basarsi sulla generazione centralizzata dell'energia da distribuire capillarmente sul territorio. Ma lo sviluppo e la diffusione di sistemi di generazione locale contribuiranno certamente all'ottimizzazione del sistema principale.

I vantaggi della generazione distribuita, rispetto alla produzione tramite "maxicentrali" sono, infatti, riconducibili alla possibilità di produrre ed utilizzare l'energia elettrica in prossimità dell'utenza, con conseguenti benefici in termini di riduzione delle perdite in rete e/o minori investimenti economici per lo sviluppo ed il potenziamento della rete elettrica, vantaggi di carattere ambientale, nonché alla opportunità di un impiego sempre maggiore e capillare delle fonti energetiche rinnovabili.

### Perchè le rinnovabili

La risoluzione del rischio ambientale, come la riduzione dei gas serra, richiede un impegno politico internazionale ma anche l'innalzamento della consapevolezza



**Figura 2**  
Richiesta di elettricità  
in Italia (anno 2001)

collettiva e individuale. Occorre, con senso di responsabilità, pensare a una strategia per un sistema energetico accettabile sotto il profilo ambientale ed economico, promuovendo al massimo, in alternativa ai combustibili fossili, il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili e l'adozione di corrette politiche e misure per un uso razionale dell'energia.

Bisognerà, a tal fine, sviluppare nuove tecnologie che permettano di sfruttare adeguatamente l'enorme risorsa solare, puntando sulla sua conversione diretta sul luogo stesso dove l'energia è richiesta, ed utilizzando l'idrogeno come vettore e forma di accumulo dell'intermittente fonte solare. Bisognerà cambiare radicalmente i principi tecnici sui quali poggiano le nostre attuali tecnologie energetiche che sono basate sulle trasformazioni termodinamiche delle quali sono noti i bassi rendimenti.

I bassi rendimenti propri dei cicli termici utilizzati dai processi tecnologici di sfruttamento delle fonti energetiche primarie hanno, infatti, condotto alla strutturazione di un sistema energetico fortemente accentrato (caratteristica diametralmente opposta alla "diluzione" della fonte solare) che centralizza le trasformazioni energetiche per poi distribuire le stesse risorse rese tecnologicamente utilizzabili attraverso una capillare rete elettrica; senza curarsi dello "spreco" energetico determinato dagli evocati bassi rendimenti termodinamici e

dalle perdite in rete per il trasporto dell'energia. D'altra parte in regimi di bassi costi delle fonti fossili primarie il mercato ha indirizzato la tecnologia verso un sistema che converte la notevole quantità di energia immagazzinata nelle fonti fossili in una forma energetica pregiata – quella elettrica – con costi energetici elevati (bassi rendimenti di conversione) ma con caratteristiche di facile trasportabilità e capillare distribuzione.

Il ruolo della generazione distribuita è da intendere tuttavia, allo stato attuale, come strumento di supporto e integrazione al sistema di produzione centralizzata dell'energia elettrica che risulta, ad oggi, l'unico che consenta economie di scala e dia le necessarie garanzie di sicurezza e continuità di fornitura del servizio, non realizzabili con un sistema costituito esclusivamente da impianti distribuiti di piccola taglia, garantendo nel contempo adeguati livelli di qualità e affidabilità del servizio. Infatti, la qualità e la sicurezza del servizio elettrico nel caso di un eccessivo frazionamento del parco di generazione dell'energia (elevato numero di impianti di generazione di piccola e media taglia con conseguenti difficoltà di gestione del servizio di dispacciamento) e di alimentazione della rete interconnessa, possono essere garantite soltanto da una rete elettrica alimentata in misura prevalente da impianti di adeguate dimensioni. Impianti di tal genere con caratteristiche di generazione stabile e regolabile, connessi in parallelo con la rete, permettono mediante complessi sistemi di regolazione e condivisione della capacità di riserva, l'equilibrio in tempo reale tra domanda e offerta di energia elettrica.

Tuttavia la generazione distribuita costituisce un nuovo modo di produrre ed utilizzare l'energia elettrica che nell'ipotesi del raggiungimento di una sufficiente maturità tecnologica e di una significativa diffusione su larga scala, entrambe prospettive di medio-lungo termine, potrà occupare una posizione di primo piano nelle strategie di

mercato e pianificazione energetica delle compagnie elettriche.

## L'apporto delle fonti rinnovabili

### La fonte idroelettrica

Con il termine "micro centrali idroelettriche" si è soliti indicare impianti di produzione di energia elettrica che utilizzano risorse idriche limitate, con salti disponibili compresi tra qualche decina e qualche centinaio di metri e con portate dell'ordine di 100 mc/s. La realizzazione di una micro centrale idroelettrica prevede opere di sbarramento e convogliamento dell'acqua (dighe, canali di derivazione, traverse ecc.) e interventi (canali di scarico) per la restituzione della stessa al suo alveo naturale. Pertanto, la tipologia del sito di installazione risulta un elemento fondamentale per la riduzione dei costi di progettazione e costruzione delle opere civili e delle diverse parti dell'impianto.

Da un punto di vista funzionale gli impianti si possono classificare in impianti ad acqua fluente, nei quali la portata sfruttata coincide con quella disponibile nel corso d'acqua, ed impianti a deflusso regolato, dotati di un vaso con capacità tale da consentire la modifica e la regolazione del regime delle portate impiegate dalla centrale rispetto a quelle di deflusso naturale. Per salti elevati, compresi tra 20 e 200 m e basse portate (da 0,5 l/s a 100 l/s) vengono di solito utilizzate le turbine Pelton, mentre per piccoli salti ed levate portate si impiegano le turbine Francis.

La condotta forzata termina nella turbina idraulica, dove avviene la trasformazione dell'energia potenziale di pressione del fluido in lavoro meccanico, la quale a sua volta è calettata, eventualmente tramite un moltiplicatore di giri, ad un generatore elettrico di tipo sincrono o asincrono. Il generatore sincrono è idoneo ad essere utilizzato nel caso in cui si preveda il servizio di integrazione con una rete già esistente

dalla quale possa prelevare la necessaria potenza magnetizzante; mentre nella condizione di funzionamento in isola o di funzionamento normalmente isolato con possibilità di interconnessione è preferibile utilizzare un generatore sincrono.

L'interfaccia con la rete elettrica è gestita tramite semplici e affidabili sistemi di controllo e regolazione che consentono di adeguare il livello della tensione e della frequenza in uscita dal gruppo di generazione a quello richiesto dalla rete elettrica di alimentazione. I costi d'investimento per impianti idroelettrici sono dell'ordine dei 2.500 €/kW.

Per quanto riguarda il contributo che questa forma rinnovabile di energia potrà apportare al bilancio elettrico nazionale, si stima che l'idroelettrico non sarà purtroppo in grado di offrire rilevanti incrementi all'apporto attuale, peraltro notevole e superiore a quello di quasi tutti gli altri paesi europei, a causa dei vincoli ambientali alla localizzazione di nuovi impianti di dimensioni significative. Un discreto contributo potrebbe invece venire dai microimpianti da generazione distribuita il cui sviluppo non sarà frenato dal vincolo ambientale di cui sopra.

### Il fotovoltaico

Fra le diverse tecnologie messe a punto per lo sfruttamento dell'energia solare, quella fotovoltaica, che consente di trasformare "in loco" l'energia proveniente dal sole in energia elettrica, è la più innovativa e promettente, a medio e lungo termine, in virtù delle sue caratteristiche di semplicità impiantistica, affidabilità, disponibilità e ridotte esigenze di manutenzione. Essa è in grado di fornire agli utilizzatori finali, dislocati sia in contesti urbanizzati, sia in località remote, un complesso di servizi basilari per le più elementari esigenze umane, contribuendo ad un livello di comfort e di qualità del vivere e dell'abitare, che solo l'elettricità è oggi in grado di dare.

Gli impianti di produzione di origine foto-

**Figura 3**

Un esempio di integrazione di pannelli fotovoltaici



voltaica si possono distinguere in due tipologie: impianti connessi alla rete elettrica (*grid-connected*) destinati a cedere in parte o totalmente l'energia prodotta alla rete elettrica di distribuzione, ed impianti isolati (*stand-alone*) i quali forniscono, congiuntamente ad un sistema di accumulo, l'energia elettrica a sistemi di utenze isolate ed autonomi.

I principali vantaggi dei sistemi fotovoltaici sono riconducibili ad aspetti legati alla semplicità d'utilizzo e modularità, alle ridotte esigenze di manutenzione (dovute all'assenza di alcun genere di stress meccanici o termici), e soprattutto, ad un impatto ambientale estremamente basso.

Tali caratteristiche rendono la tecnologia fotovoltaica particolarmente adatta, ad esempio all'integrazione negli edifici in ambiente urbano (coperture, facciate, frangisole ecc.). In questo caso, sfruttando superfici già utilizzate e non utili per altri scopi, si elimina anche l'unico impatto ambientale in fase di esercizio di questa tecnologia, rappresentato dall'occupazione di superficie. Gli impianti di piccola taglia trovano così sempre maggiori consensi, per ridurre, anche se solo parzialmente, i problemi di approvvigionamento energetico delle piccole e medie utenze, in particolare per rispondere ad una sempre più pressante richiesta di riduzione del rischio ambientale. La produzione di energia elettrica nelle ore di maggiore insolazione permette poi di ridurre la domanda alla rete durante il giorno, proprio quando si verifica la maggiore richiesta.

Dal punto di vista operativo gli impianti fotovoltaici producono energia con caratteristiche di tensione e corrente (grandezze elettriche continue) generalmente differenti da quelle richieste in ingresso dalle utenze convenzionali (e/o rete) idonee al funzionamento in corrente alternata e con valori costanti di tensione. Pertanto è indispensabile, per l'interfacciamento con la rete elettrica di distribuzione, l'utilizzo di convertitori statici "dc-ac", ovvero di sistemi per il condizionamento della potenza, PCS (Power Conditioning System) dotati anche di un insieme di dispositivi ausiliari di protezione che assicurano il rispetto delle norme di sicurezza e, nel caso di collegamento alla rete pubblica di distribuzione, delle prescrizioni degli enti distributori di energia elettrica.

I costi di tale tipo di impianti e quindi del kWh fotovoltaico, strettamente dipendenti dal tipo di applicazione e di installazione, sono allo stato attuale ancora troppo elevati per competere con quelli delle fonti fossili. I costi d'impianto sono, infatti, dell'ordine dei 7.000-7.500 €/kW ed il kWh "costa" almeno 6-7 volte di quanto costi quello uscito dalle centrali termoelettriche.

Tuttavia le significative riduzioni dei costi verificatesi nell'ultimo decennio e le stime previste nei prossimi dieci anni, lasciano intravedere il raggiungimento delle condizioni di pareggio in un futuro non molto lontano.

Nel breve termine, l'opzione fotovoltaica potrà rilevarsi economicamente valida soltanto se si considereranno i "costi evitati" e cioè i costi al contorno (allacciamento, acquisto e trasporto del combustibile, manutenzione ecc.) dell'energia prodotta con fonti convenzionali; oltre ai cosiddetti "costi esterni", costituiti dai costi sanitari sulla popolazione e dai costi ambientali associati alla generazione di energia da fonti fossili.

## Il geotermico

L'energia geotermica è l'energia primaria che si sprigiona dall'interno della terra;

quindi per una effettiva possibilità di estrazione ed utilizzazione pratica è necessario individuare siti dove il calore può concentrarsi in spazi ristretti ed a profondità accessibili senza aggravii di carattere sia economico che tecnico. Infatti, soltanto in queste situazioni è possibile parlare di "serbatoio o giacimento" geotermico.

Le fonti geotermiche idrotermali rappresentano allo stato attuale le uniche utilizzabili commercialmente per la produzione di energia elettrica.

In base allo stato fisico del fluido contenuto nel serbatoio di alimentazione le sorgenti di energia geotermica utilizzabili si possono suddividere in tre tipologie: giacimenti di vapore secco, giacimenti di vapore umido e giacimenti con minor contenuto termico (i quali sono costituiti da acqua al di sotto del punto di ebollizione a pressione atmosferica). I primi due, economicamente più attraenti sono anche denominati rispettivamente a vapore dominante e ad acqua dominante. Ognuno dei tipi indicati, per le proprietà che possiede, si presta ad un ben preciso uso.

I giacimenti a vapore dominante sono costituiti soprattutto da vapore ad elevata pressione e temperatura, che può essere utilizzato per produrre direttamente energia elettrica. Infatti, il vapore può essere convogliato direttamente alla turbina e, quindi, per ridurre al massimo i costi di trasporto del vapore, l'impianto deve essere costruito il più vicino possibile al pozzo; in più, dal momento che il vapore affiora dal giacimento a bassa pressione, mentre è necessario disporre in grandi quantità, le dimensioni effettive delle turbine sono limitate. Ciò significa che l'impianto non può avere una potenza elevata.

I giacimenti ad acqua dominante sono invece caratterizzati dal fatto che la miscela si trova allo stato liquido nonostante temperature molto elevate (fino a 400 °C) a seguito di un alto punto ebulloscopico dovuto all'elevato grado di salinità.

Dal punto di vista dell'allacciamento alla

rete elettrica l'impianto geotermico per la produzione di energia elettrica può essere collegato in parallelo alla rete tramite un trasformatore di isolamento/protezione con un opportuno regolatore di tensione, contribuendo alla fornitura di potenza attiva e reattiva senza alcun problema di interfacciamento con la rete. La realizzazione degli impianti relativi al gruppo elettrico implica l'impiego di alternatori chiusi e raffreddati in circuito chiuso idonei ad operare in ambienti caratterizzati dalla presenza di sostanze gassose; in alcuni casi, a seguito di una elevata concentrazione delle sostanze gassose, è necessario effettuare una pressurizzazione dell'interno della macchina al fine di evitare infiltrazioni di gas.

I costi d'impianto sono decisamente interessanti e dell'ordine dei 2.500 €/kW installato; non così per quelli di manutenzione e gestione.

Relativamente al contributo che è ragionevole aspettarsi da questa fonte di energia, si stima che essa potrà offrire in un prossimo futuro un apporto di entità limitata e senza una significativa riduzione dei costi.

## Le biomasse

La biomassa, ampiamente disponibile quasi ovunque, rappresenta una risorsa locale, distribuita sul territorio e rinnovabile. Essa può essere convertita in combustibili solidi, liquidi e gassosi, ovvero essere impiegata, tramite tecnologie commercialmente disponibili, direttamente come combustibile. Le biomasse sono costituite da residui delle coltivazioni destinate all'alimentazione umana ed animale oppure piante esclusivamente coltivate per fini energetici, da residui dal campo forestale, da scarti provenienti da attività industriali, scarti delle aziende zootecniche o rifiuti urbani.

La biomassa rappresenta la forma più sofisticata di accumulo di energia solare; questa infatti consente alle piante di convertire l'anidride carbonica atmosferica in materia organica tramite il processo di fotosintesi.

Con il processo di fotosintesi vengono "fissate", nel mondo, circa 200 miliardi di tonnellate di carbonio all'anno, con un contenuto energetico dell'ordine di 70 miliardi di tonnellate di petrolio equivalente. In Italia, la disponibilità di biomasse residuali (legno, residui agricoli e dell'industria agroalimentare, rifiuti urbani e dell'industria zootecnica) viene stimata in quasi 70 milioni di tonnellate di sostanza secca all'anno, equivalente a 28 Mtep, che con gli attuali rendimenti di conversione (25 e 40% per impianti a biomassa e a gas) potrebbero fornire annualmente circa 84 TWh di energia termica. L'uso attuale, però, è limitato a circa il 14 % di tale potenziale.

Alcune delle tecnologie di conversione energetica delle biomasse hanno oramai raggiunto un elevato grado di maturità tale da consentire l'utilizzazione su larga scala, mentre altre necessitano di ulteriori fasi di sviluppo al fine di raggiungere la competitività economica. Della prima categoria fanno parte la combustione diretta, l'estrazione di oli, la fermentazione alcolica e la digestione anaerobica, mentre nella seconda rientrano la gassificazione, la pirolisi e la digestione aerobica.

In Italia, rispetto alla situazione europea, è da registrare allo stato attuale, a fronte di un elevato potenziale teorico, uno sviluppo limitato dell'utilizzo energetico delle biomasse. Si consideri che la superficie dei terreni marginali abbandonati dall'agricoltura tradizionale nel corso degli ultimi de-

cenni nell'Italia meridionale ammonta a più di 20.000 Km<sup>2</sup>; tali aree potrebbero essere riqualificate alla produzione di reddito energetico, se fossero destinate a coltivazione di biomasse da utilizzare per la produzione di energia con un significativo contributo alla richiesta energetica nazionale.

I costi medi d'impianto sono compresi tra 1.500 e 2.500 €/kWe (a seconda della tecnologia e della taglia d'impianto); da cui segue un costo dell'energia di 0,085-1,4 €/kWh (il costo del kWh da fonti fossili è dell'ordine dei 0,055 €/kWh).

Le biomasse pur presentando buone prospettive e costi accessibili a medio termine, devono ancora superare opposizioni esercitate a livello locale e necessitano ancora di sviluppi e industrializzazione degli impianti che ne rendano i costi di generazione comparabili con quelli dei combustibili fossili.

Le barriere di natura non tecnica alla diffusione dell'uso energetico delle biomasse sono di varia natura: di tipo economico, normativo, organizzativo e sociale. Fra questi sono significativi i costi di investimento elevati, la debolezza organizzativa nel coordinare le azioni dei vari attori (produttori, consorzi, trasformatori, utenti), la mancanza di normative e controlli sulla qualità dei prodotti, la scarsa diffusione di informazioni sulle possibilità offerte da questa tecnologia, la mancanza di consenso sociale riguardo ai siti di localizzazione, l'incertezza della politica agricola comunitaria (set-aside) e l'incerta e non ancora definita politica nazionale.

### L'energia eolica

L'energia posseduta dal vento è legata al movimento delle masse d'aria che si spostano al suolo da aree ad alta pressione atmosferica verso aree adiacenti di bassa pressione. La captazione dell'energia del vento si attua mediante mac-

**Figura 4**  
CR ENEA della Trisaia:  
impianto Joule per la  
gassificazione di resi-  
dui della coltivazione



chine in cui delle superfici mobili, le pale, raccolgono l'energia cinetica della massa d'aria in movimento e la trasformano in movimento rotatorio dell'asse di un rotore; l'insieme pale-rotore costituisce l'aeromotore. L'asse di quest'ultimo trasmette l'energia raccolta all'asse primario di un gruppo d'ingranaggi, moltiplicatore di giri, che fa in modo da determinare sull'asse secondario una velocità di rotazione adatta a pilotare un alternatore.

Il generatore elettrico realizza la conversione dell'energia associata al movimento rotatorio dell'aeromotore in energia elettrica da immettere nella rete di trasmissione che la renderà disponibile ai luoghi ed agli apparecchi che la utilizzano. L'insieme costituito dall'aeromotore, dal moltiplicatore di giri, dal generatore elettrico e dai relativi sistemi di controllo, freni e limitatori di velocità, trasforma l'energia eolica in energia elettrica e viene denominato "aerogeneratore".

L'investimento per la realizzazione chiavi in mano di una centrale eolica (aerogeneratori da almeno 600 kW) con allacciamento alla rete in alta tensione è dell'ordine degli 850-1100 €/kW installato: a seconda del sito e con valori più bassi per le macchine di taglia più elevata e costi di sito più bassi. Il costo della macchina varia da 2/3 a 3/4 del costo totale d'installazione, in funzione delle caratteristiche orografiche del sito.

Il costo dell'energia di origine eolica – che dipende in primo luogo dalle condizioni anemologiche del sito – viene stimato in un "range" che va dai 5,5 ai 7,5 centesimi di €/kWh.

La potenza elettrica di derivazione eolica ad oggi installata in Italia, ammonta a circa 800 MWe, e ci sono progetti per la realizzazione di impianti per altre centinaia di MW, distribuiti in varie regioni. Pur non disponendo delle risorse eoliche di altri paesi europei, stime ottimistiche indicano in oltre 10.000 MW la potenza teoricamente sfruttabile in Italia, per cui il potenziale energetico complessivamente sfruttabile viene stimato in 20-25 Mld di kWh elettrici, a fronte



**Figura 5**  
Centrale eolica

di un consumo totale nazionale di energia elettrica di poco più di 300 Mld di kWh.

La tecnologia eolica ha raggiunto un livello di maturità e costi di produzione dell'energia elettrica tali da consentirne – anche se con l'ausilio dei certificati verdi – la sostenibilità economica, che permetterebbe di raggiungere, si stima nell'arco del prossimo decennio, i 10.000 MW teoricamente sfruttabili.

Almeno due barriere si frappongono però a questo obiettivo:

- l'avversione di alcuni gruppi di opinione motivati da una, a nostro parere immotivata, negativa opinione circa l'inquinamento paesaggistico collegabile a questo tipo di impianti;
- la barriera normativo-burocratica: in Italia la normativa che presiede alla realizzazione di impianti a fonti rinnovabili è molto complessa e a volte poco chiara; la procedura autorizzativa coinvolge decine di enti (a volte sino a trenta), il sistema dei certificati verdi non è ancora chiaro se risponderà alle aspettative (è attualmente in fase di rodaggio), l'allacciamento degli impianti alla rete spesso, per varie ragioni, non è semplice.

### L'idrogeno per il sistema energetico sostenibile del futuro

L'idrogeno, quale vettore energetico, rappresenta una componente chiave di un sistema energetico sostenibile, in quanto:

- uno scenario energetico basato nel breve-medio termine sull'idrogeno con-

sentirebbe di contenere l'effetto serra senza abbandonare i combustibili fossili e lasciando tempo per sviluppare nuove fonti energetiche;

- può essere prodotto dai combustibili fossili, previa conversione degli stessi e separazione della CO<sub>2</sub>; quindi può essere considerato come il modo più pulito di utilizzo di tali combustibili;
- può essere prodotto da altre fonti (rinnovabili, nucleare) senza emissioni di CO<sub>2</sub>;
- non genera né CO<sub>2</sub> né altri inquinanti durante il suo utilizzo, coprendo applicazioni che vanno dai trasporti, alla generazione elettrica centralizzata e distribuita.

### Incrocio con le tecnologie dei trasporti

I propulsori ibridi per autotrazione rendono disponibili flussi di energia elettrica in uscita dal generatore (motore termico e alternatore ovvero cella a combustibile) e in ingresso agli organi di propulsione del veicolo<sup>2</sup>. In realtà, tali sistemi costituiscono in primo luogo dei microgeneratori di energia elettrica, per i quali sono concettualmente plausibili e tecnicamente praticabili utilizzi diversi da quello per l'autotrazione. Fra le segnalazioni dello statunitense Institute Rocky Mountains, figura l'ipotesi di utilizzare l'autoveicolo ('hypercar') anche come occasionale/sistematico erogatore/accumulatore di energia, durante le lunghe pause (valutabili mediamente in circa 22 ore pro die) comprese fra due successive missioni di trasporto, presso la propria abitazione e/o il luogo di lavoro. Le quote di mercato accessibili da una tale soluzione possono variare da ridotte e confinate applicazioni di nicchia, fino a costituire una vera e propria rete di produzione/distribuzione di energia elettrica diffusa sul territorio, sovrapposta, complementare o alternativa alla rete fissa alimentata dalle centrali. Una stima approssimativa della potenzialità produttiva della rete di microgenerazione diffusa basata unicamente su generatori *on board*, può essere condotta in via schema-

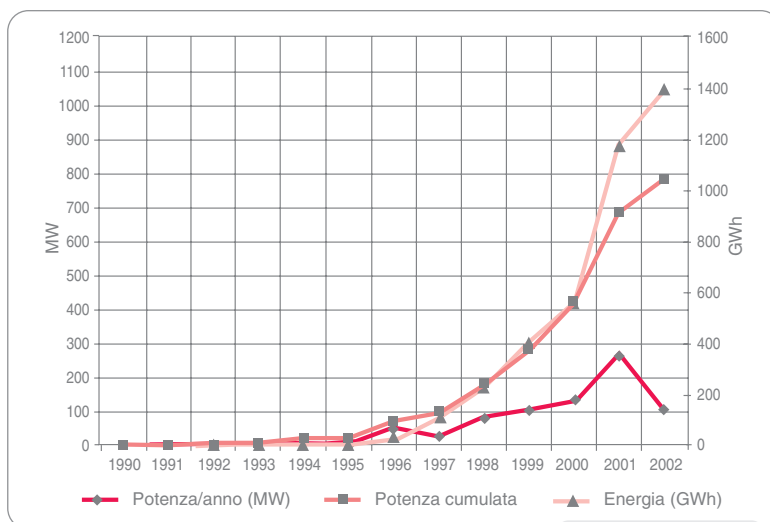
tica nei termini dell'esempio seguente. La potenza nominale installata nelle centrali di produzione elettrica italiane ammonta a poco meno di 80 GW elettrici. Questa potenza potrebbe essere virtualmente assunta da 2 milioni di microgeneratori da 100 kW termici, equivalenti a circa 40 kW elettrici, ipotizzando, per semplicità, un rendimento di conversione del 40%. Questo valore di potenza elettrica è paragonabile a quello nominale e virtualmente ottenibile dal motore di un'auto di piccola-media cilindrata. Il numero di tali veicoli, necessario in questo esempio a soddisfare l'intero fabbisogno nazionale, ammonterebbe a circa il 5% dei veicoli circolanti, attualmente pari a circa 35 milioni. Ulteriori e analoghe stime sulla produzione effettiva mostrerebbero che il numero dei microgeneratori realmente richiesti sarebbe ancora minore, per il favorevole coefficiente di utilizzo e delle possibilità, qui non considerate, di cogenerazione. L'energia elettrica è correlata alla rete da un'esternalità positiva. Più utenti sono collegati, maggiore è il valore della rete, più attraente diventa connettersi. In tali condizioni è determinante mantenere una connessione anche per coloro che scelgono di generare in proprio l'energia elettrica. Il generatore locale fornisce allora il carico di base e la rete può "tagliare le punte", generalmente a prezzi più bassi. Le compagnie elettriche tradizionali forniscono energia conveniente e affidabile, potenzialmente a basso costo. La generazione distribuita invece offre primariamente auto-affidabilità, flessibilità di esercizio, modularità di investimento, elevati rendimenti, cogenerazione, compatibilità ambientale. Inoltre, potrebbero trasformarsi in punti di criticità per la generazione centralizzata ulteriori elementi, quali la crescente enfasi ambientale sugli elettrodotti (elettrosmog), la difficoltà di reperimento di nuovi siti per l'espansione della potenza installata, la difficoltà di gestire la crescente domanda elettrica attraverso l'attuale sistema di reti.



## Conclusioni

Sino ad oggi è prevalsa la logica dei macroimpianti per la produzione di energia, caratterizzati da una forte centralizzazione dei sistemi di produzione, che hanno predominato ritenendo che gli impianti piccoli e decentrati fossero difficili da gestire ed economicamente svantaggiosi. Ora le tecnologie rinnovabili, in particolare quella solare, hanno reso disponibili impianti di piccole dimensioni, a costi non lontani dalla competitività e con una notevole riduzione delle emissioni di sostanze inquinanti. I vantaggi del decentramento produttivo, attraverso una "generazione energetica diffusa" sono numerosi ed evidenti: minore stress per la rete distributiva, minori rischi di *black-out*, maggiore versatilità d'impiego e modularità, maggiore velocità di messa in opera, maggiore elasticità del sistema, minore impatto ambientale per il minor carico della rete di distribuzione, maggiore controllo locale e – ovviamente – minori emissioni ambientali di particolare, di ossidi di azoto, di zolfo e di biossido di carbonio.

La generazione energetica diffusa – in particolare quella elettrica – può, in certa misura già oggi essere realizzata mediante l'utilizzo di tecnologie utilizzanti le fonti rinnovabili di energia, ed in prospettiva, in misura significativamente più importante attraverso l'utilizzo del nuovo vettore "Idrogeno", soprattutto se derivato da fonti rinnovabili, la cui tecnologia è in corso di messa a punto e industrializzazione. Le nuove tecnologie aiutano a trovare soluzioni efficienti, efficaci, economicamente vantaggiose, sempre più vicine all'utente finale che diviene così proprietario e controllore di una risorsa fondamentale come l'energia. L'uso di pannelli solari termici per singole abitazioni e servizi collettivi, di impianti fotovoltaici per gli edifici o di generatori eolici, a biomasse, minidraulici collegati alla rete, potranno in futuro contribuire al processo di "decarbonizzazione" e "generazione energetica pulita" da parte di



**Figura 6**  
L'energia eolica in Italia

un utente che non sarà più solo un soggetto passivo divoratore di energia, ma egli stesso attivo produttore della maggior parte dell'energia che gli serve per assicurarsi una adeguata e sempre migliore "qualità della vita". Bisognerà, però, che il mondo dell'industria e gli attori politici si impegnino per una eliminazione sostanziale degli ostacoli ancora esistenti, ristabilendo regole di mercato più razionali e meno rigide che contribuiranno ad abbassare i costi, prevedendo nuove regole per la detenzione e l'esercizio degli impianti di generazione di energia, l'eliminazione di oneri e tasse improprie perché pensate per i grandi impianti di produzione, una maggiore facilità di collegamento alle reti energetiche che connettono tra loro gli edifici di abitazione e di servizio.

Le attività di R&S dell'Unità Tecnico-Scientifica Fonti rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi dell'ENEA, orientate allo sviluppo delle tecnologie di produzione di energia da fonti rinnovabili e al miglioramento dell'efficienza energetica nei settori industriale, civile e dei trasporti, riguardano la realizzazione di progetti/programmi strategici d'interesse nazionale ed internazionale e servizi di qualificazione energetica, sviluppati in collaborazione con le principali industrie del settore, con centri di ricerca e università, con enti regionali e locali.



---

# La valorizzazione delle **scorie** di combustione dei rifiuti urbani

Lo studio esamina la situazione europea, quella francese e quella italiana relativa alla produzione e gestione dei rifiuti urbani, con particolare riguardo all'incenerimento e alle potenzialità di recupero dei residui (ceneri pesanti, acciaio e alluminio). Le ceneri pesanti, miscelate con additivi idonei, possono costituire materia alternativa utilizzabile nell'edilizia, per opere stradali e ferroviarie, per il ripristino di aree degradate quali le discariche

**VITO IABONI**  
**PASQUALE DE STEFANIS**

ENEA  
UTS Protezione e Sviluppo dell'Ambiente e del Territorio,  
Tecnologie Ambientali

L'aumento dei consumi di risorse naturali, ha portato negli ultimi anni ad un crescente interesse dell'opinione pubblica nei confronti dell'ambiente, aprendo la strada verso una nuova politica di gestione ambientalmente sostenibile sia delle materie prime sia dei rifiuti. Le ultime direttive dell'Unione Europea ed il decreto legislativo 22/97 ("decreto Ronchi")<sup>1</sup> confermano una tendenza al recupero, al riciclo e alla minimizzazione delle quantità di rifiuti da conferire in discarica.

Riguardo quest'ultimi la propensione a limitare l'impiego di materie prime porta a considerare con grande interesse l'uso di materiali alternativi o di risulta prodotti dall'industria, da centrali termoelettriche e da impianti di incenerimento di rifiuti. Tali materiali vengono così ad assumere una valenza energetico-ambientale ed economica non trascurabile.

Il problema quantitativo dei rifiuti e la sempre minor disponibilità di aree di smaltimento idonee, portano sempre più a ricercare sistemi e tecniche di inertizzazione degli stessi e, quando possibile, di recupero. Particolare interesse rivestono i trattamenti finalizzati al loro reimpiego, tramite i quali è possibile ottenere i seguenti vantaggi:

- realizzare un risparmio riguardo l'approvvigionamento di materie prime, intervenendo direttamente sul processo produttivo;
- realizzare un risparmio energetico complessivo, attraverso una razionalizzazione delle risorse impiegate;
- conseguire una sensibile riduzione di rifiuti da smaltire;
- recuperare frazioni all'interno del ciclo di smaltimento.

Inoltre, l'aumento dei costi di smaltimento dei rifiuti e le crescenti difficoltà legate al loro destino finale incidono notevolmente sulla competitività e sulla fattibilità economica del loro recupero in alcuni processi industriali.

Dalla combustione dei "rifiuti urbani" (RU)

oppure di rifiuti selezionati, si originano le seguenti tipologie di residui solidi:

- a) le scorie di combustione, costituite da frazioni inerti e da incombusti di dimensioni tali da non essere trascinate dai fumi; vengono raccolte sul fondo della camera di combustione ed identificate, dal Codice Europeo Rifiuti (CER)<sup>2</sup>, come ceneri pesanti (CP);
- b) le ceneri di caldaia, costituite da quelle frazioni (basso fondenti) che si separano dai fumi e si depositano sulle superfici di scambio delle sezioni inferiori del recupero termico;
- c) le ceneri leggere, costituite da particelle di dimensioni minute, raccolte nella sezione d'abbattimento fumi. Queste, a causa del loro contenuto di composti organici e metalli pesanti, sono classificate come rifiuti pericolosi.

In quest'ottica, particolare importanza riveste l'utilizzo delle CP che, miscelate con additivi idonei, possono costituire un'interessante materia alternativa utilizzabile in varie attività. Tra le principali applicazioni civili e industriali esiste la possibilità di un loro riutilizzo nell'ambito dei materiali e manufatti per l'edilizia (granulati per isolamento termo-acustico, granulati per cementi e calcestruzzi, materiali vari per l'edilizia ecc.).

Infine, tra le principali applicazioni geo-ambientali si possono citare la realizzazione di opere stradali e ferroviarie, nonché il recupero del territorio attraverso il ripristino di aree degradate da attività antropogeniche, quali le discariche.

Nel presente documento, saranno esaminati i seguenti aspetti:

- la situazione europea relativa alla produzione ed alle modalità di gestione dei RU con particolare riguardo all'incenerimento con recupero;
- la situazione francese relativa alla produzione ed alle modalità di gestione dei RU, con particolare riguardo all'incenerimento e al recupero e riutilizzo dei residui (CP, acciaio e alluminio);

- la situazione italiana relativa alla produzione, alle modalità di gestione dei RU, con particolare riguardo all'incenerimento ed alle potenzialità di recupero dei residui (CP, acciaio e alluminio).

## La situazione europea

### I rifiuti urbani

#### Produzione e smaltimento

A livello comunitario, su una popolazione di circa 375 milioni abitanti<sup>3</sup>, sono prodotti circa 198 Mt/anno di RU, corrispondenti a circa 527 kg/anno pro-capite (tabella 1).

Lo smaltimento di tali quantitativi viene effettuato principalmente attraverso l'interramento in discarica (55,4%), l'incenerimento (18,8%) ed altre forme come il compostaggio, il riciclaggio ecc. (25,8%).

Pur essendo aumentata negli ultimi anni la tendenza al recupero e al riciclaggio, resta preminente l'impiego della discarica (mediamente 50-60% della produzione totale, con livelli superiori nel caso dell'Italia e di

altre realtà, tipiche soprattutto del Sud Europa).

Inoltre, dal confronto dei diversi paesi comunitari emerge che la maggioranza di essi presenta sistemi di gestione integrati di recupero di materia ed energia con contestuale riduzione dell'impiego della discarica. I paesi che minimizzano l'impiego della discarica (Francia, Svezia) invece presentano in genere alti livelli di utilizzo dell'incenerimento, associato a buoni livelli di recupero.

Infine occorre rilevare che in molti paesi la situazione si sta evolvendo verso un maggior tasso di riciclaggio, con conseguente riduzione dei quantitativi smaltiti in discarica.

#### Incenerimento

Per quanto riguarda specificatamente l'incenerimento, a livello comunitario il quantitativo trattato risulta pari al 18,8% della produzione di RU, con forti squilibri tra Europa centrale e paesi scandinavi da una parte e paesi dell'area del Mediterraneo dall'altra; facendo riferimento ai soli paesi del-

**Tabella 1**

Produzione e modalità di smaltimento dei rifiuti urbani in Europa

N.	Nazione	Anno di riferimento	Popolazione (3)	Produzione rifiuti urbani		Trattamento/Smaltimento						
				Totale	Pro-cap.	Discarica		Incenerimento		Altro		
			x 1.000	t/anno	kg/anno	t/anno	%	t/anno	%	t/anno	%	
1	Austria (1)	1999	8.083	4.437.567	549	1.551.936	35	452.648	10,2	2.432.983	54,8	
2	Belgio (1)	1998	10.192	5.371.184	527	1.485.800	27,7	1.386.112	25,8	2.499.272	46,5	
3	Danimarca (1)	1999	5.314	3.331.878	627	361.352	10,8	1.673.910	50,2	1.296.616	38,9	
4	Finlandia (1)	1999	5.160	2.399.400	465	1.465.440	61,1	196.080	8,17	737.880	30,8	
5	Francia (1)	1999	58.973	31.786.447	539	13.268.925	41,7	9.966.437	31,4	8.551.085	26,9	
6	Germania (1)	1998	82.057	39.797.645	485	14.113.804	35,5	9.682.726	24,3	16.001.115	40,2	
7	Grecia (1)	1997	10.487	3.901.164	372	3.565.580	91,4	0	0	335.584	8,6	
8	Italia (2)	2000	57.844 (2)	28.958.545	501	21.744.693	75,1	2.321.648	8,02	4.892.204	16,9	
9	Irlanda (1)	1998	3.694	1.931.962	523	1.765.732	91,4	0	0	166.230	8,6	
10	Lussemburgo (1)	1999	429	277.992	648	60.060	21,6	132.990	47,8	84.942	30,6	
11	Olanda (1)	2000	15.864	9.692.904	611	1.221.528	12,6	3.950.136	40,8	4.521.240	46,6	
12	Portogallo (1)	2000	9.998	4.529.094	453	3.409.318	75,3	929.814	20,5	189.962	4,19	
13	Spagna (1)	1999	39.394	24.463.674	621	17.490.936	71,5	2.678.792	11	4.293.946	17,6	
14	Svezia (1)	1998	8.848	3.999.296	452	1.300.656	32,5	1.397.984	35	1.300.656	32,5	
15	Regno Unito (1)	1999	59.391	33.140.178	558	26.785.341	80,8	2.553.813	7,71	3.801.024	11,5	
			<b>Totale EU</b>	<b>375.728</b>	<b>198.018.930</b>	<b>527</b>	<b>109.591.101</b>	<b>55,4</b>	<b>37.323.090</b>	<b>18,8</b>	<b>51.104.739</b>	<b>25,8</b>

Fonte: (1) Elaborazione ENEA su dati EUROSTAT<sup>4</sup> (2) Elaborazione ENEA su dati APAT ONR<sup>15</sup> (3) Elaborazione ENEA su dati EUROSTAT 2001<sup>3</sup>

N° unità	N° unità	Mt/anno	Mt/anno	TWh	TWh
Europa occidentale	Unione Europea	Europa occidentale	Unione Europea	Europa occidentale	Unione Europea
304	269	50,2	47,3	49,6	44,4

Fonte: Elaborazione ENEA su fonte ASSURRE<sup>6</sup>

**Tabella 2**  
Incenerimento di rifiuti urbani a livello europeo (2000)

l'Europa centrale il quantitativo medio di RU inceneriti si attesta attorno al 35%.

Un quadro aggiornato della situazione attuale riguardo l'incenerimento dei RU a livello comunitario è riportato in uno studio elaborato da ASSURRE<sup>6</sup> nel quale sono stati censiti gli impianti aventi potenzialità superiore 30.000 t/anno. I risultati dello studio sono sintetizzati nella tabella 2.

## La situazione francese

### I rifiuti urbani

#### Produzione

La produzione dei RU nel 1999 ammontava a 31,7 Mt<sup>4</sup> pari a circa 539 kg/abitante.

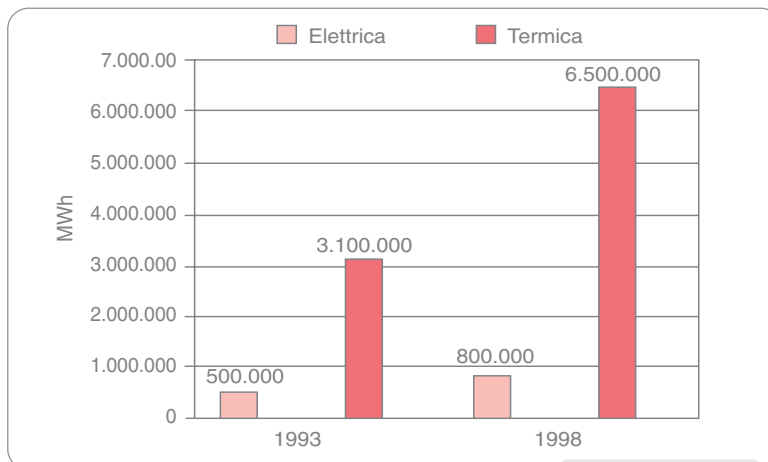
#### Incenerimento

Il recupero d'energia dal trattamento dei rifiuti è una delle priorità definita nella legge del 13 luglio 1992. Stime recenti riportano che il 31,4% dei RU prodotti viene incenerito, di cui il 35% con recupero d'energia termica ed elettrica (figura 1), con un incremento di previsione fino al 50% a breve termine.

Nel 1998, secondo ADEME<sup>7</sup>, l'energia ricavata e venduta a seguito dell'incenerimento di RU sottoforma di calore e di elettricità è stata pari ad oltre 7 milioni di MWh, equivalenti a 725.000 tep (tonnellate equivalenti di petrolio), vale a dire ai bisogni energetici annuali di una popolazione di 200.000 abitanti.

Il parco degli inceneritori francesi in esercizio (al 31 gennaio 2002), secondo ADEME e il Ministère de l'Environnement<sup>8-9</sup> era di 161 unità, di cui:

- 77 di potenzialità superiore a 6 t/h;
- 84 di potenzialità inferiore a 6 t/h.



Fonte: Elaborazione ENEA su dati ADEME<sup>7</sup>

**Figura 1**  
Produzione d'energia termica ed elettrica da rifiuti urbani in Francia

## Recupero dei materiali

### Ceneri pesanti

Fin dal 25 gennaio 1991 con una apposita circolare il Ministero dell'Ambiente francese ha dato degli orientamenti per lo smaltimento delle CP integrata con la circolare DPPR 94-IV-1 del 9.5.1994<sup>10</sup> che ha fissato i limiti per l'accettabilità delle CP da incenerimento di RU come materiale da costruzione.

Il SVDU (Syndicat national du traitement et de la Valorisation des Dechets Urbains et assimilés)<sup>[1]</sup> ha redatto a tale proposito due specifiche direttive per il trattamento delle CP, riguardanti sia le modalità di campionamento sia i rischi di potenziale inquinamento:

- *Guides méthodologiques pour l'échantillonnage des mafefer d'usine d'incinération d'ordure ménagères* (marzo 1995);
- *Protocole technique pour la détermination du potentiel polluant des mafefer d'incinération d'ordures ménagères* (dicembre 2000).

L'annesso III alla sopracitata circolare, suddi-

<sup>1</sup> Associazione d'impres operanti nella gestione dei rifiuti (raccolta, riciclaggio, valorizzazione, compostaggio, metanizzazione ed incenerimento).

**Tabella 3a**

Limiti secondo la circolare DPPR n. 94-IV-1 del 9.5.1994

Inquinante	Ceneri pesanti		
	Categoria V	Categoria M	Categoria S
Tasso d'incombusti	< 5%	< 5%	> 5%
Frazione solubile	< 5%	< 10%	> 10%
Hg	< 0,2 mg/kg	< 0,4 mg/kg	> 0,4 mg/kg
Pb	< 10 mg/kg	< 50 mg/kg	> 50 mg/kg
Cd	< 1 mg/kg	< 2 mg/kg	> 2 mg/kg
As	< 2 mg/kg	< 4 mg/kg	> 4 mg/kg
Cr <sup>6+</sup>	< 1,5 mg/kg	< 3 mg/kg	> 3 mg/kg
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	< 10.000 mg/kg	< 15.000 mg/kg	> 15.000 mg/kg
COT	1.500 mg/kg	2.000 mg/kg	2.000 mg/kg

Fonte: Ministère de l'Environnement<sup>10</sup>

**Tabella 3b**

Andamento della produzione di ceneri pesanti in Francia

Anno	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
	Tonnellate anno x 1.000							
Quantità	3.135	3.260	3.390	3.490	3.562	3.804	4.150*	4.450*

Fonte: Cercle Récyclage<sup>13</sup>

\* Quantità stimate

vide le CP in 3 categorie (tabella 3a), la cui classificazione viene eseguita sulla base dei test di lisciviazione (norma NF X31-210) di alcuni contaminanti.

Le tre categorie sono:

- cenere valorizzabile (V) che individua un prodotto a bassa lisciviabilità;
- cenere maturabile (M) che individua un prodotto intermedio destinato a maturazione – 3 mesi (min.) 12 mesi (max);
- cenere destinata allo smaltimento (S) che individua un prodotto ad alta lisciviabilità.

Nel 1999 la produzione delle CP è stata di oltre 3,8 Mt e per il trattamento e la maturazione delle stesse esistevano 40 piattaforme. Alla stessa data ADEME<sup>12</sup> stimava che le CP residue, dopo l'incenerimento di RU,

erano percentualmente così suddivise:

- 46% di categoria V;
- 37% di categoria M;
- 17% di categoria S.

L'andamento della produzione delle CP dal 1994 al 2001 viene riportata in tabella 3b.

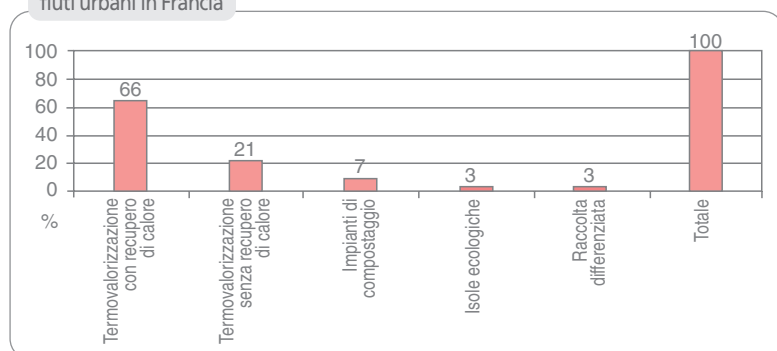
La valorizzazione delle CP costituisce una parte importante nella gestione integrata dell'incenerimento dei RU, in quanto esse rappresentano almeno il 2% dei granulati utilizzati per la realizzazione di sottofondi stradali; tra gli altri utilizzi principali possiamo citare:

- terrazzamenti;
- ripristini morfologici.

Tali utilizzi sono espressamente previsti nella "Guide technique pour la réalisation de terrassements (GTR)" e nel "Rapport 415 (98-99) - Office Parlementaire d'Évaluations des Choix Scientifiques et Technologiques"<sup>11</sup>.

Le caratteristiche fisico-chimiche delle CP hanno consentito il loro utilizzo in opere pubbliche, come ad esempio:

- 12.000 tonnellate per il rifacimento dei marciapiedi di stazioni SNCF;
- 9.000 tonnellate come sottofondo per il collegamento a stazioni SNCF;
- 117.000 tonnellate nei cantieri d'Euro-Disney.

**Figura 2**  
Ripartizione del recupero dell'acciaio di rifiuti urbani in Francia

Fonte: Office Parlementaire d'Évaluations des Choix Scientifiques et Technologiques<sup>11</sup>

### Acciaio

La produzione dell'acciaio era pari (1999) a 18 Mt<sup>11</sup> di cui 0,5 Mt destinate alla realizzazione d'imballaggi.

La ripartizione riguardo le modalità di recupero viene riportata in figura 2.

Affinché possa essere recuperato, l'acciaio deve rispondere alle prescrizioni tecniche minime (PTM) del "Référentiel européen des ferrailles", i cui corrispettivi praticati dall'Eco-Emballages (1997), sono riportati in tabella 4.

a 1 Mt<sup>11</sup> di cui 72.000 t/anno destinate alla realizzazione d'imballaggi. L'alluminio utilizzato per tale scopo è di spessore pari a 0,3 mm e di 6,35-20 micron per i poliaccoppiati. La presenza d'imballaggi d'alluminio nei RU è pari all'1%, ripartiti come in figura 3. Il recupero dell'alluminio ed il suo utilizzo è regolamentato nell'ambito dell'Eco-Emballage con procedure, contratti, sovvenzioni e ricavi che dipendono principalmente dalla qualità ottenuta, ovvero dei "requisiti tecnici minimi" ("Prescription Technique Minimale" PTM)<sup>[2]</sup>.

Tipo di recupero	Da ceneri pesanti		Da raccolta differenziata	
	Tal quale	Tal quale	Balle da 300 kg	Balle pressate
<b>Condizionamento</b>				
Contenuto in ferro	55%	60%	90%	90%
Umidità	6%	6%	10%	10%
Densità	0,3	0,3	0,3	1,2
Corrispettivo (€/t)	0,0	7,75	7,75	30
Prezzo direttamente sostenuto dall'Eco-Emballages (€/t)	11,6	11,6	46,5	46,5

**Tabella 4**

Corrispettivi acciaio da recupero in Francia

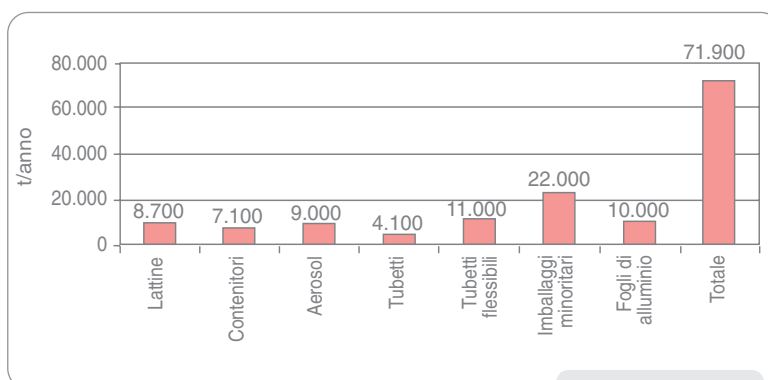
Fonte: Office Parlementaire d'Evaluations des Choix Scientifiques et Technologiques<sup>11</sup>

I riferimenti legislativi riguardo il recupero ed il riciclaggio dell'acciaio sono i seguenti:

- legge 75-663 del 15 luglio 1975 relativa all'eliminazione dei rifiuti ed al recupero dei materiali.
- decreto del 14 luglio 1992 sulla regolamentazione degli imballaggi.
- decreto del 13 luglio 1994 sugli imballaggi industriali e commerciali.

### Alluminio

La produzione dell'alluminio (1997) era pari



**Figura 3**

Imballaggi d'alluminio nei rifiuti urbani in Francia

Fonte: Office Parlementaire d'Evaluations des Choix Scientifiques et Technologiques<sup>11</sup>

Contenuto in alluminio	Corrispettivo €/t	
	Da raccolta differenziata	Da ceneri pesanti d'incenerimento
Fino a 55%	Non remunerato	Non remunerato
> 55 fino a 60%	153,9	115,4
> 60 fino a 65%	192,4	115,4
> 65 fino a 70%	230,9	153,9
> 70 fino a 75%	269,3	184,7
> 75%	307,8	200,1

**Tabella 5**

Corrispettivo alluminio recuperato in Francia

Fonte: Office Parlementaire d'Evaluations des Choix Scientifiques et Technologiques<sup>11</sup>

<sup>2</sup> Particolare interesse riveste il recupero dell'alluminio, sottoforma di noduli, dalle CP. In Francia il prezzo minimo di vendita di tali noduli è valutabile in circa 115 €/t. Naturalmente il prezzo è anche funzione della qualità dei noduli, e può arrivare, con riferimento al London Metal Exchange (LME), in funzione della purezza, anche a 308 €/t.

L'alluminio recuperato, sia da "raccolta differenziata" (RD) sia dalle CP deve rispondere alle prescrizioni tecniche minime (PTM); i corrispettivi praticati (1998) sono riportati in tabella 5. I riferimenti legislativi riguardo il recupero ed il riciclaggio dell'alluminio sono i seguenti:

- direttiva 94/62 del 20 dicembre 1994 sugli imballaggi e rifiuti di imballaggio;
- decreto 92-337 del 1° aprile 1992 sulla valorizzazione dei rifiuti da imballaggi;
- decreto 96-1008 del 18 novembre 1996 sugli obiettivi di valorizzazione.

## La situazione italiana

### I rifiuti urbani

#### Produzione

La produzione dei RU, secondo recenti stime APAT ONR<sup>15</sup>, è pari a circa 29 Mt/anno (anno 2000), corrispondenti ad una produzione giornaliera pro-capite di circa 1,37 kg (501 kg su base annua). Di questi 4,17 Mt/anno (14,4%) sono stati oggetto di RD, anche percentualmente infe-

riore all'obiettivo minimo del 15% fissato dal decreto legislativo 22/97 per l'anno in questione.

Secondo i dati storici disponibili per gli ultimi anni (1996-2000) si riscontra dunque una tendenza alla crescita della produzione, come riportato in figura 4a. Inoltre secondo i dati storici disponibili per gli ultimi anni (1997-2000) si riscontra una tendenza alla crescita della RD con forti squilibri tra Nord-Centro-Sud, come riportato in figura 4b.

#### Composizione merceologica

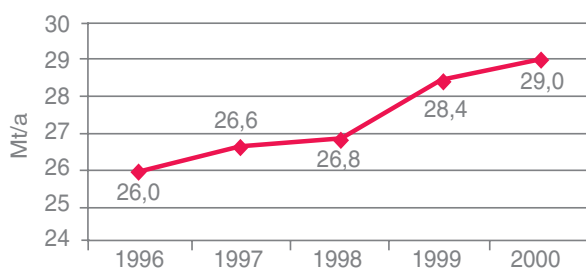
La produzione nazionale d'imballaggi secondo i dati rilevabili dal "Rapporto sui rifiuti 2002 (APAT ONR)" è riportata nella tabella 6a. In tabella 6b viene riportata la composizione merceologica dei RU in Italia (1997), suddivisa per classe di popolazione dei Comuni.

#### Gestione

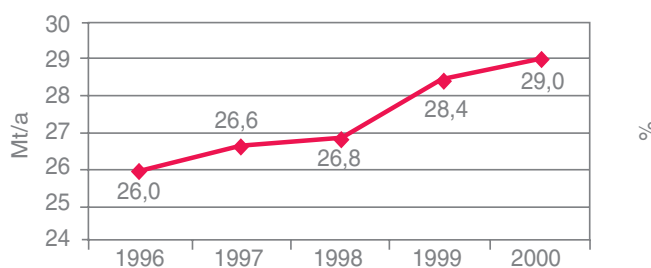
Di particolare interesse risulta essere la situazione relativa alle diverse forme di gestione dei RU, che possono essere così sintetizzate:

**Figura 4**

a. Andamento della produzione di rifiuti urbani in Italia  
b. Andamento della raccolta differenziata in Italia



a



b

**Tabella 6a**

Quantità di imballaggi immessi sul mercato in Italia (2000)

Imballaggi	Produzione imballaggi vuoti (t/anno)	Import imballaggi vuoti+pieni (t/anno)	Import imballaggi vuoti+pieni (t/anno)	Imnesso consumo finale imballaggi pieni (t/anno)
Acciaio	848.000	114.000	362.000	600.000
Alluminio	57.000	9.200	7.000	59.200
Plastica	2.950.000	300.000	1.350.000	1.900.000
Carta	5.060.000	432.000	1.316.000	4.167.000
Vetro	3.246.000	466.000	1.749.000	1.963.000
Legno	2.630.000	454.000	605.000	2.479.000
<b>Totale</b>	<b>14.791.000</b>	<b>1.775.200</b>	<b>5.389.000</b>	<b>11.168.200</b>

Fonte: APAT ONR<sup>15</sup>



Frazione merceologica	Classe di popolazione dei Comuni (abitanti x 1.000)				
	<20	20-50	50-100	100-200	>200
	%	%	%	%	%
Sottovaglio	12,7	13,2	11,7	11,8	13,3
Organico	29,8	28,7	28,5	27,4	25,4
Legno e verde	5,8	5,2	5,1	3,6	3,8
Carta e cartoni	21,8	22,5	23,5	24,4	24,7
Plastiche leggere	6,9	8,3	7,9	7,5	7,6
Plastiche pesanti	2,7	2,9	3,8	2,8	2,9
Vetro e inerti pesanti	7,4	6,7	6,9	7,4	7,6
Tessili	4,9	4,7	5,4	6,0	5,5
Metalli	2,8	3,2	2,9	3,5	3,3
Cuoio e gomma	3,4	2,9	2,4	3,3	3,1
Pannolini	1,8	1,7	1,9	2,3	2,8
<b>Totale</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**Tabella 6b**  
Composizione merceologica di rifiuti urbani in Italia (1997)

Fonte: Federambiente<sup>16</sup>

- compostaggio della frazione organica selezionata<sup>[3]</sup>;
- trattamenti meccanico-biologici della frazione raccolta in modo indifferenziato (produzione di combustibile derivato da rifiuti – CDR biostabilizzato)<sup>[4]</sup>;
- incenerimento, con o senza recupero di energia;
- altre forme di recupero (principalmente trattamenti meccanici finalizzati al riciclo e recupero di materiale proveniente da RD);
- smaltimento in discarica controllata.

La situazione a livello nazionale è sintetizzata in tabella 7a; il dettaglio per regioni è riportato nella tabella 7b.

#### Incenerimento

Secondo l'ultimo censimento APAT ONR<sup>15</sup>, riferito all'anno 2001, erano operativi sul territorio nazionale 43 impianti d'incenerimento RU (tabella 8a), le cui principali caratteristiche sono riportate in tabella 8b.

La normativa nazionale sull'incenerimento di rifiuti è attualmente costituita dai decreti ministeriali: DM 19 novembre 1997, n. 503, che recepisce le direttive 89/369/CE e 89/429/CE sull'incenerimento dei rifiuti urbani e dei rifiuti non pericolosi; DM 25 febbraio 2000, n. 124, che recepisce la direttiva 94/67/CE sull'incenerimento dei rifiuti pericolosi.

Trattamento	Smaltimento e trattamento rifiuti urbani								
	Anno 1997			Anno 1999			Anno 2000		
	Totale	Pro-cap	%	Totale	Pro-cap	%	Totale	Pro-cap	%
Compostaggio	0,9	15,5	3,3	1,4	23,6	4,8	1,5	25,9	5,2
Trattamenti meccanico-biologici (1)	1,6	28,5	6,2	2,2	38,2	7,7	3,1	54,0	10,8
Incenerimento	1,7	30,2	6,5	2,1	36,8	7,5	2,3	40,3	8,0
Altre forme recupero (2)	1,1	18,4	4,0	0,3	5,7	1,2	0,1	1,2	0,2
Discarica controllata	21,3	369,3	80,0	21,7	377,4	76,5	21,9	380,5	75,8
<b>Totale</b>	<b>26,6</b>	<b>461,8</b>	<b>100</b>	<b>28,4</b>	<b>493,1</b>	<b>100</b>	<b>28,9</b>	<b>501,7</b>	<b>100</b>

**Tabella 7a**  
Modalità di gestione dei rifiuti urbani in Italia

Fonte: Elaborazione ENEA su dati APAT ONR<sup>15</sup>, Federambiente<sup>16</sup> e CIC<sup>17</sup>

(1) Selezione, produzione di combustibile derivato da rifiuti/biostabilizzato, altri trattamenti.  
(2) Principalmente trattamenti meccanici finalizzati al riciclo di materiali

<sup>3</sup> L'industria del compostaggio (maggio 2002) può contare su 114 impianti di produzione compost derivante dal trattamento di matrici organiche selezionate, con una capacità operativa annua di 1,5 Mt/anno e una produzione di 0,5 Mt/anno di compost di qualità.

<sup>4</sup> Sul territorio nazionale (maggio 2002) sono presenti 35 impianti, per il trattamento di matrici non selezionate, con una capacità operativa di 2,5 Mt/anno e una produzione di 0,25 Mt/anno di materiale biostabilizzato.

Regione	Discarica			Incenerimento			Compostaggio			Biostabilizzazione e combustibile derivato da rifiuti		
	1997 kt	1999 kt	2000 kt	1997 kt	1999 kt	2000 kt	1997 kt	1999 kt	2000 kt	1997 kt	1999 kt	2000 kt
Emilia Romagna	1.657,3	1.879,3	1.873,8	566,0	546,8	547,9	44,8	200,4	254,9	157,6	129,8	174,7
Friuli V. Giulia	288,4	334,8	250,5	134,8	121,0	132,4	1,2	6,8	6,2	35,9	29,9	217,2
Liguria	989,3	833,1	976,3	0,0	0,0	0,0	0,0	10,9	10,1	0,0	0,0	0,0
Lombardia	1.722,3	1.504,6	1.716,7	426,1	749,0	917,2	312,3	328,1	382,1	605,0	586,8	1.047,3
Piemonte	1.676,7	1.526,6	1.883,5	70,4	83,1	96,2	166,7	213,9	257,8	7,1	72,9	32,4
Trentino Alto Adige	348,3	308,1	314,9	58,0	64,4	75,4	42,9	36,9	34,2	0,0	14,0	0,0
Valle d'Aosta	54,7	54,9	60,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Veneto	1.554,6	1.489,7	1.299,9	71,3	127,9	173,0	286,3	348,4	553,3	80,0	206,0	130,2
<b>Totale Nord</b>	<b>8.291,6</b>	<b>7.931,1</b>	<b>8.375,9</b>	<b>1.326,6</b>	<b>1.692,3</b>	<b>1.942,1</b>	<b>854,1</b>	<b>1.145,4</b>	<b>1.498,5</b>	<b>885,5</b>	<b>1.039,5</b>	<b>1.601,7</b>
Lazio	2.907,7	2.619,2	2.392,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8	99,1	393,5	556,4
Marche	538,0	684,2	679,2	24,8	20,5	21,0	0,0	42,9	60,5	39,7	76,0	136,8
Toscana	1.333,0	1.275,1	1.269,9	222,1	192,3	142,1	45,0	92,0	177,5	159,9	167,3	297,1
Umbria	202,4	324,8	366,2	0,0	29,8	32,0	0,0	0,0	15,0	241,1	296,1	216,2
<b>Totale Centro</b>	<b>4.981,0</b>	<b>4.903,2</b>	<b>4.707,6</b>	<b>246,9</b>	<b>242,6</b>	<b>195,1</b>	<b>45,0</b>	<b>134,8</b>	<b>301,7</b>	<b>539,8</b>	<b>932,9</b>	<b>1.206,5</b>
Abruzzo	603,9	477,7	461,9	0,0	0,0	0,0	0,0	11,2	25,7	84,7	71,9	67,1
Basilicata	140,1	198,1	161,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,1	22,0	0,0
Calabria	476,8	724,8	698,4	20,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	69,0	49,2	77,4
Campania	2.184,7	2.635,6	2.598,2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	34,6	65,8
Molise	132,2	111,6	102,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Puglia	1.799,1	1.776,1	1.727,1	0,0	0,0	0,0	0,0	65,7	72,8	0,0	0,0	0,0
Sardegna	509,6	573,6	644,4	134,7	172,2	168,3	0,0	0,0	0,0	22,0	58,9	100,1
Sicilia	2.156,3	2.413,0	2.440,1	18,5	13,7	16,1	0,0	0,0	0,0	21,8	0,0	0,0
<b>Totale Sud e Isole</b>	<b>8.002,6</b>	<b>8.910,3</b>	<b>8.833,9</b>	<b>173,3</b>	<b>185,9</b>	<b>184,4</b>	<b>0,0</b>	<b>79,9</b>	<b>98,5</b>	<b>217,5</b>	<b>236,6</b>	<b>310,4</b>
<b>Totale</b>	<b>21.275,2</b>	<b>21.744,7</b>	<b>21.917,4</b>	<b>1.746,7</b>	<b>2.120,8</b>	<b>2.321,6</b>	<b>899,1</b>	<b>1.360,2</b>	<b>1.898,7</b>	<b>1.642,9</b>	<b>2.209,0</b>	<b>3.118,7</b>

**Tabella 7b**

Destinazione e trattamenti per regione di rifiuti urbani in Italia

Fonte: Elaborazioni ENEA su dati: Federambiente<sup>16</sup>, APAT ONR<sup>15</sup> e GEA<sup>17</sup>

Anche il decreto legislativo 22/97 introduce precise prescrizioni per l'incenerimento dei rifiuti; in particolare l'art. 5 comma 4 prescrive che, dal 1° gennaio 1999, "la realizzazio-

ne e la gestione di nuovi impianti di incenerimento possono essere autorizzate solo se il relativo processo di combustione è accompagnato da recupero energetico con una

**Tabella 8a**

Produzione di energia dalla combustione di rifiuti urbani in Italia

Descrizione	Unità	1997	1998	1999	2000	2001
Impianti operativi	N°	38	41	42	43	43
Impianti con recupero energetico	N°	23	26	27	32	34
Impianti senza recupero energetico	N°	--	--	--	10	8
Impianti con recupero di energia elettrica	N°	--	--	--	31	35
Impianti con recupero di energia termica	N°	--	--	--	9	10
Impianti con recupero di energia elettrica e termica	N°	--	--	--	7	10
Rifiuti trattati totali	Mt	1,75	1,98	2,13	2,32	2,59
Rifiuti trattati in impianti con recupero	Mt	1,18	1,41	1,77	2,14	2,44
Energia elettrica prodotta	GWh	281,9	394,6	421,9	797,0	1.211,4
Energia termica prodotta	GWh	152,8	166,0	200,0	853,6	1.139,2

Fonte: Elaborazione ENEA su fonti: ANPA ONR<sup>14</sup> e APAT ONR<sup>15</sup>

N.	Regione	Prov.	Comune	Rifiuti urbani (t/anno)	Tecnologia	N. linee	Trattamento fumi	Potenz. (t/giorno)	Recupero energetico		Stato
									Elettrico MWh/anno	Termico MWh/anno	
1	Piemonte	VB	Mergozzo	28.487	Griglia		EP, WS	120	6.787	0	o
2	Piemonte	VC	Vercelli	68.281	Griglia	3	EP, WS	166	14.112	0	o
3	Lombardia	BG	Bergamo	28.597	Griglia	2	EP, WS	150	12.383	0	o
4	Lombardia (1)	BG	Dalmine	7.720	Griglia	2	EP,FF, WS, DND	400	3.262	0	o
5	Lombardia	BS	Brescia	335.497	Griglia	2	DN, DAS, FF	914	378.000	264.000	o
6	Lombardia	CO	Como	69.069	Griglia	2	EP, WS	208	7.500	116.072	o
7	Lombardia	CR	Cremona	31.999	Griglia	2	SD, FF, WS, DN	85	4.545	26.945	o
8	Lombardia	LC	Valmadrera	58.899	Griglia	2	EP, WS	240	22.008	0	o
9	Lombardia	MI	Abbiategrasso	14.018	Rotante	1	EP, WS	52	0	0	o
10	Lombardia	MI	Desio	54.165	Griglia	2	EP, WS	200	11.600	0	o
11	Lombardia	MI	Milano (Silla 1)	36.782	Griglia	2	EP, WS	454	13.339	0	o
12	Lombardia	MI	Milano (Silla 2)	252.847	Griglia	3	--	775	178.834	3.612	o
13	Lombardia (2)	MI	Milano (Zama)	66.013	Griglia	2	EP, WS	385	24.786	0	c
14	Lombardia (3)	MI	Sesto S. Giovanni	15.522	Griglia	3	EP, WS, FF	245	7.923	0	o
15	Lombardia	PV	Parona	137.734	Letto fluido	1	DN+EP,WS, FF	400	118.386	357.461	o
16	Lombardia	VA	Busto Arsizio	111.859	Griglia	2	DN, FF, SD, WS	500	50.406	0	o
17	Lombardia	MI	Trezzo d'Adda	0	Griglia	2	--	0	0	0	i
18	Trentino A.A.	BZ	Bolzano	61.519	Griglia	2	FF,SD, FF	300	21.159	0	o
19	Veneto	PD	Padova	59.538	Griglia	1	DAS, EP, WS	300	25.229	0	o
20	Veneto	VE	Venezia	48.080	Griglia	2	--	175	12.599	0	o
21	Veneto	VI	Schio	31.143	Letto fluido	2	EP, WS	96	7.978	0	o
22	Veneto	VR	Verona	0	Rotante	1	--	0	0	0	i
23	Friuli V.Giulia	GO	Gorizia	14.392	Rotante	1	EP	58	0	0	o
24	Friuli V.Giulia	GO	Morato/Gradisca	8.044	Griglia	2	EP	34	0	0	o
25	Friuli V.Giulia	TS	Trieste	109.042	Griglia	3	--	408	32.058	0	o
26	Emilia R.	MO	Modena	104.017	Griglia	3	EP, WS	250	33.907	276.667	o
27	Emilia R.	BO	Granarolo dell'Emilia	138.144	Griglia	3	EP, WS	400	41.054	53.297	o
28	Emilia R.	FE	Ferrara (Conchetta)	19.856	Griglia	1	EP, WS	80	0	0	o
29	Emilia R.	FE	Ferrara (Canal Bianco)	35.279	Griglia	1	DN,SD, FF, WS	130	9.338	20.300	o
30	Emilia R.	FO	Forlì	34.148	Griglia	2	DAS, EP, DN,	200	8.820	12.071	o
31	Emilia R.	PR	Parma	68.220	Rotante	2	EP, WS	176	0	0	o
32	Emilia R.	RA	Ravenna	2.952	Letto fluido	2	--	479	24.005	0	o
33	Emilia R.	RE	Reggio Emilia	56.044	Griglia	2	EP, DAS, FF	175	23.217	8.869	o
34	Emilia R.	RN	Coriano	107.375	Griglia	3	EP, DAS, FF	350	41.306	0	o
35	Emilia R.	PC	Piacenza	0	Griglia	2	EP, FF	0	0	0	i
<b>Totale Nord</b>	<b>Nr. 31 impianti operativi</b>			<b>2.215.282</b>				<b>8.905</b>	<b>1.134.541</b>	<b>1.139.294</b>	<b>o</b>
36	Toscana	PT	Montale Agliana	30.703	Rotante	2	EP, WS	85	3.122	0	o
37	Toscana	LU	Castelnuovo di Garfagnana	11.665	Griglia	1	DAS, FF	36	3.066	0	o
38	Toscana	FI	Rufina Pontassieve	6.165	Griglia	1	DAS, FF	31	0	0	o
39	Toscana	SI	Poggibonsi	18.242	Griglia	2	DAS, FF, DN	67	1.406	0	o
40	Toscana	GR	Massa M. Valpiana	300	Griglia	2	DAS, FF,	50	0	0	i
41	Toscana	AR	Arezzo	43.010	Griglia	1	--	120	n.d.	0	o
42	Toscana	LI	Livorno	42.343	Griglia	2	DAS, FF	180	11.615	0	o
43	Umbria	TR	Terni	29.360	Griglia	2	SD, FF	200	12.688	0	o
44	Marche	MC	Tolentino/Pollenza	18.000	Griglia	1	EP, WS, SD	65	5.670	0	o
<b>Totale Centro</b>	<b>Nr. 8 impianti operativi</b>			<b>199.788</b>				<b>834</b>	<b>37.567</b>	<b>0</b>	<b>o</b>
45	Sicilia	ME	Messina 2	16.624	Griglia	2	DAS,FF,WS	125	0	0	o
46	Sardegna	CA	Capoterra	136.317	Griglia	3	SD, FF	278	37.676	0	o
47	Sardegna	NU	Macomer	26.432	Letto fluido	2	SD, FF	140	1.658	0	o
<b>Totale Sud</b>	<b>Nr. 3 impianti operativi</b>			<b>179.373</b>				<b>543</b>	<b>39.334</b>	<b>0</b>	
<b>Totale Italia</b>	<b>Nr. 42 impianti operativi</b>			<b>2.594.443</b>				<b>10.282</b>	<b>1.211.442</b>	<b>1.139.294</b>	

(1) L'impianto è operativo dal novembre 2001. - (2) L'impianto ha cessato l'attività nel dicembre 2001. - (3) L'impianto è operativo dall'ottobre 2001

Legenda: CT = conto terzi; CP = conto proprio; n = in costruzione; o = operativo; i = inattivo o in ristrutturazione; c = cessata attività; trattamento fumi; EP = elettrofiltro; FF = filtro a maniche; SD = reattore a semisecco; WS = scrubber ad umido; DAS = reattore a secco; DN = abbattimento NO<sub>x</sub> non catalitico; DND = abbattimento NO<sub>x</sub> catalitico

**Tabella 8b**

Impianti d'incenerimento di rifiuti urbani operativi in Italia (2001)

Fonte: APAT ONR<sup>15</sup>

quota minima di trasformazione del potere calorifico dei rifiuti in energia utile". Tutta la normativa dovrà subire ulteriori modifiche per adeguarsi alle disposizioni comunitarie introdotte dalla direttiva 2000/76/ CE del 4 dicembre 2000 che, essendo un testo unico in materia di incenerimento, sostituirà ed abrogherà a partire dal 28 dicembre 2005 le disposizioni attualmente vigenti.

## Recupero dei materiali

### *Ceneri pesanti*

Nel processo d'incenerimento dei RU, vengono originate le CP classificate nel Codice CER 19 01 01 (Punto 13.3 del Suballegato 1 dell'Allegato 1 al DMA 5.02.1998), che, secondo la legislazione attuale, sono destinate allo smaltimento in discarica controllata, con costi (comprensivi di trasporto) dell'ordine dei 77-100 €/t.

La normativa italiana (decreto legislativo 22/97 e DMA 5.02.1998) individua come unica soluzione in procedura semplificata il recupero delle CP presso i cementifici. Tale semplificazione amministrativa non ha

**Tabella 9**  
Andamento immesso al consumo imballaggi in acciaio

Anno	1998	1999	2000	2001	2002
t/anno	600.000	618.000	600.000	554.000	560.000*

Fonte: CNA<sup>20</sup>

\* previsione

**Tabella 10a**  
Riciclo imballaggi in acciaio (2001)

Imnesso al consumo (t)	Operatore	Quantità (t)
554.000	CNA	165.211
	Altri operatori extra CNA	94.274
<b>Totale recupero</b>		<b>259.485</b>

Fonte: CNA<sup>20</sup>

**Tabella 10b**  
Corrispettivi ed oneri di smaltimento delle frazioni estranee

Frazioni estranee	Corrispettivo	Oneri di smaltimento
Fino al 5%	68,21	CNA
> 5% al 10%	58,36	Convenzionato
> 10% al 15%	49,58	Convenzionato
> 15% al 20%	32,02	Convenzionato
Oltre 20,1%	--	Convenzionato facoltà per CNA di respingere

Fonte: CNA<sup>21</sup>

avuto come risolto la destinazione di flussi interessanti a tale forma di recupero. Infatti solo il 2% delle CP viene attualmente recuperata nei cementifici.

### *Acciaio*

Il Consorzio Nazionale Acciaio (CNA) è stato costituito il 18 novembre 1997 in ottemperanza alle disposizioni di cui all'art. 40 del decreto legislativo 22/97.

In Italia vengono prodotte mediamente ogni anno circa 600.000 tonnellate<sup>20</sup> di rifiuti da imballaggi in acciaio (tabella 9), di cui poco più della metà nei RU.

Il fabbisogno di rottame ferroso da parte dell'industria siderurgica italiana è di 19 Mt/anno, di cui 14 Mt/anno da recupero e 5 Mt/anno d'importazione.

Gli obiettivi del CNA indicati nel Programma Specifico di Prevenzione 2001<sup>18</sup> consistono nel raggiungimento di un tasso di riciclaggio/recupero del 50%, vale a dire 233.000 tonnellate alla scadenza dei 5 anni previsti dalla legge (entro il 2002), attraverso le seguenti attività:

- la raccolta differenziata – preferibilmente da effettuarsi congiuntamente ad altri materiali (alluminio e vetro in particolare);
- il recupero degli imballaggi in acciaio – dagli impianti di incenerimento mediante estrazione magnetica, a monte o a valle dell'incenerimento;
- il recupero nei centri di raccolta per i fusti e gli altri imballaggi industriali – a tale proposito si intende sfruttare l'esperienza acquisita da Fusteco.

Il CNA nel 2001<sup>20</sup> ha superato l'obiettivo prefissato. Infatti i quantitativi recuperati e riciclati hanno raggiunto le 259 kt (tabella 10a). A seguito della stipula dell'accordo con ANCI<sup>21</sup>, il Consorzio, deve provvedere ad una verifica del rifiuto ferroso all'atto del conferimento presso la piattaforma, applicando i corrispettivi riportati nella tabella 10 b.

Per quanto riguarda l'incenerimento dei RU, è necessario sottolineare che gli imballaggi in acciaio possono essere intercettati nelle operazioni di selezione e nelle CP.

Infatti a seguito dell'Accordo stipulato con Federambiente e Assoambiente<sup>18</sup>, il CNA nel corso del 2000 ha eseguito un monitoraggio degli impianti d'incenerimento nazionali relativamente alla presenza di tecnologie di selezione del ferro ed ai quantitativi trattati, da cui emerge che il contenuto stimato di materiali ferrosi presenti nelle scorie sia di circa 31.000 t/anno.

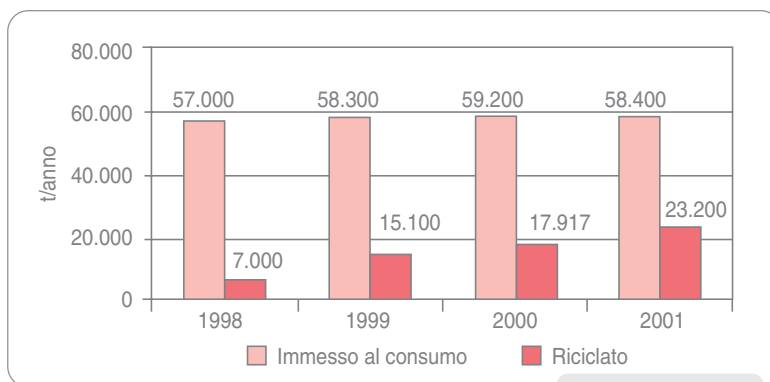
### Alluminio

Con il decreto legislativo 22/97 sono stati recepiti i contenuti della direttiva europea 94/62 sugli imballaggi ed i rifiuti di imballaggio, con particolare riguardo ai materiali derivanti dal post-consumo. L'art. 38 di tale decreto prevede che per adempiere agli obblighi previsti i produttori di imballaggio possono:

- organizzare autonomamente la raccolta, il riutilizzo, il riciclaggio ed il recupero dei rifiuti di imballaggio;
- aderire ad uno dei consorzi di cui all'art. 40 del decreto legislativo 22/97;
- mettere in atto un sistema cauzionale.

Per rispondere agli scopi sopra elencati è stato costituito il Consorzio Imballaggi Alluminio (CIAL), che raggruppa le maggiori società produttrici di alluminio e delle sue trasformazioni in imballaggio.

L'entità dell'alluminio utilizzato negli imballaggi è pari a circa 59.000 tonnellate annue ed attraverso CIAL sono raggruppati i soggetti convenzionati che per garantire la gestione degli imballaggi post-consumo sono dotati di impianti idonei alla separazione dell'alluminio e, ove ciò non sia possibile, attraverso processi di ossidazione con re-



Fonte: CIAL<sup>22</sup>

**Figura 5**  
Riciclaggio d'imballaggi d'alluminio in Italia

cupero di energia.

Dall'esame della figura 5, si può osservare che le quantità di rifiuti da imballaggio in alluminio recuperate dal CIAL, nell'anno 2001<sup>22</sup>, al netto degli scarti di selezione, ammontano a circa 23.200 tonnellate (39,7%).

Nella tabella 11 a si riporta una classificazione per tipologie dei quantitativi d'imballaggio in alluminio immessi al consumo negli anni 2000 e 2001, estratta dalle dichiarazioni relative al contributo ambientale.

Il CIAL ha apportato nel corso del 2001 modifiche al *corpus* degli accordi relativi alla RD ed al recupero degli imballaggi in alluminio post-consumo, aggiungendo un accordo per il ritiro dei tappi e capsule in alluminio ed ampliando il campo di applicazione dell'accordo sul recupero energetico al CDR ed alla frazione secca, effettivamente recuperati in impianti autorizzati, che vengono di seguito esposti sinteticamente:

- a) *raccolta differenziata di qualità o selettiva* – In data 27 luglio 2001 il Comitato di Verifica, di cui al punto 6 dell'accordo ANCI-CONAI, ha determinato l'indice

Tipologia	Caratteristica	Anno 2000		Anno 2001	
		t	%	t	%
Lattine, bombole aerosol, scatole food	Rigido	29.600	50	29.300	50,2
Vaschette food, tubetti, capsule a vite	Semirigido	14.000	23,3	13.300	23,3
Flessibile food, poliacc. base alluminio	Flessibile	6.800	11,5	7.200	12,3
Altri imball., non classificato, import pieni	Non definito	9.900	16,7	9.400	16,1
Conguagli	Non definito	- 1.100	- 1,8	- 1.100	- 1,9
<b>Totale</b>		<b>59.200</b>	<b>100</b>	<b>58.400</b>	<b>100</b>

**Tabella 11a**  
Imballaggi immessi al consumo per tipologia

Fonte: CIAL<sup>22</sup>

Fascia di qualità %	Corrispettivo 2000 €/t	Corrispettivo 2001 €/t
Sino al 3%	361,52	381,15
> 3% sino al 5%	193,15	203,48
> 5% sino al 15%	165,78	175,08

**Tabella 11b**

Corrispettivi per raccolta differenziata per l'alluminio

Fonte: CIAL<sup>22</sup>

percentuale di adeguamento sulla base del punto 9 dell'allegato tecnico CIAL. Tale indice è stato determinato pari al 5,47%, pertanto i nuovi corrispettivi adeguati al 31 dicembre 2000 sono riportati in tabella 11b, lo stesso indice di aggiornamento è stato applicato al corrispettivo di pressatura che raggiunge così 40,80 €/t;

b) *alluminio da scorie d'incenerimento* – In merito all'accordo che prevede l'impegno di CIAL a ritirare e sottoporre l'alluminio estratto dalle scorie d'incenerimento alle opportune operazioni di va-

**Tabella 11c**

Corrispettivi per l'alluminio da scorie d'incenerimento

Fascia di qualità %	Corrispettivo €/t
Sino al 15%	175,43
> 3% sino al 30%	154,94
> 30% sino al 50%	139,44

Fonte: CIAL<sup>22</sup>

**Tabella 11d**

Corrispettivi la raccolta tappi e capsule in alluminio

Impurità %	Corrispettivo €/t
dal 5 al 15	175,08
dal 16 al 20	131,27
dal 21 al 25	122,56
dal 26 al 30	113,84
dal 31 al 35	105,13

Fonte: CIAL<sup>22</sup>

lorizzazione garantendo l'avvio a riciclo, CIAL si riconoscono corrispettivi come riportato in tabella 11c;

c) *raccolta tappi e capsule in alluminio* – Il CIAL riconosce ai recuperatori del vetro un corrispettivo, variabile a copertura dei costi sostenuti per la raccolta dei tappi e capsule in alluminio, determinato sulla base delle quantità di impurità presenti nel materiale conferito e comunque con frazione di vetro inferiore al 10%, secondo la tabella 11d;

d) *recupero energetico* – L'accordo attivo in

questo settore riguarda il recupero degli imballaggi contenuti sia nei RU avviati all'incenerimento, sia nel CDR/frazione secca. Il corrispettivo a fronte del recupero energetico del rifiuto di imballaggio in alluminio è pari a 51,61 €/t. Durante il processo di combustione l'alluminio sottile (ad esempio quello dei poliaccoppiati) si ossida e restituisce l'energia in esso contenuta pari a 31 MJ/kg<sup>19</sup>; tuttavia la maggior parte dell'alluminio presente nei rifiuti uscirà, miscelata alle ceneri, sottoforma di noduli, recuperabili tramite un dispositivo a correnti indotte.

Gli imballaggi in alluminio post-consumo conferiti al CIAL sono avviati al riciclo nelle fonderie (capacità di lavorazione circa 700.000 t/anno) unitamente ai rottami d'alluminio pari a circa 350.000 t/anno (50% della capacità di lavorazione), pertanto ciò rende evidente la capacità di assorbimento di considerevoli quantità d'imballaggi.

L'energia necessaria per produrre alluminio di prima fusione è pari a circa 60 MJ/kg; con il recupero di materiali, come componenti d'auto, imballaggi, lattine ecc. nel processo di rifusione sono necessari 3 MJ/kg.

## Conclusioni

La possibilità di riutilizzo delle ceneri pesanti, e delle matrici in esse contenute recuperabili (ferro e alluminio), merita di essere esaminata soprattutto in relazione alle potenzialità d'assorbimento delle stesse da parte dei principali settori industriali interessati al recupero ed in un contesto di migliore compatibilità ambientale.

A tal fine debbono essere affrontati tutti gli aspetti di natura tecnica ed economica relativi al recupero di tale materiale, quali:

- l'accettazione delle CP richiede che per qualsiasi soluzione debba essere verificata la compatibilità con la normativa vigente per quanto riguarda gli aspetti chimico-fisici, i trasporti, nonché i vincoli di carattere ambientale delle attività di produzione alle quali sono destinabili;

- la fattibilità del processo di recupero delle CP è condizionata dal soddisfacimento contemporaneo degli aspetti economici, tecnici e normativi per ciascun campo d'impiego;
- l'affidabilità tecnica deve verificare che le caratteristiche chimico-fisiche delle CP dopo eventuali trattamenti siano tali da essere idonee alla soluzione progettuale di destinazione;
- la convenienza economica sussiste quando i costi relativi al trasporto e al conferimento in discarica risultano superiori a quelli di trasporto e riutilizzo delle ceneri, tenuto conto dei costi dell'impianto di trattamento.

La soluzione tecnicamente più appropriata sembra essere la realizzazione di sistemi di trattamento, in cui le sinergie di diverse tecnologie impiantistiche tra loro integrate diano luogo ad una riduzione complessiva dell'impatto ambientale. In questo contesto anche i trattamenti per il recupero delle CP, in luogo del loro smaltimento in discarica, possono comportare svariati benefici ambientali e minore depauperamento del territorio.

A tal proposito l'ENEA, tenuto conto dei risultati soddisfacenti ottenuti oltralpe negli impianti di valorizzazione delle CP, ha elaborato un rapporto<sup>23</sup> riguardo la fattibilità tecnico-economica di un impianto per il trattamento/recupero delle CP. L'analisi economica a fronte dei costi (ammortamento, gestione, personale, manutenzione ecc.) portano alla definizione di un costo unitario di recupero delle CP, valutabile in circa 34 €/t.

Va evidenziato, non in ultimo, che riveste particolare importanza il valore aggiunto delle CP, in quanto esse condizionano pesantemente la convenienza economica dell'investimento necessario per il loro recupero, rispetto al costo associato con il loro smaltimento.

## Bibliografia

1. Decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 – Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti,

- 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio.
2. La decisione 2000/532/CE del 3 maggio 2000 e successive decisioni di modifica hanno definito il nuovo Catalogo Europeo dei Rifiuti e le regole per il suo utilizzo. La decisione è entrata in vigore l'1.1.2002.
3. The European Commission – *EUROSTAT Yearbook 2001*.
4. The European Commission – *EUROSTAT – General statistics* (12-04-2002).
5. ANPA ONR – *Rapporto Rifiuti 2001*.
6. ASSURRE (ASsociation for the Sustainable Use and Recovery of Resources in Europe) – *Incinération in Europe* – Prepared for ASSURRE by Juniper, ottobre 2000.
7. ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) – *Déchets Municipaux: les Chiffres clés – 2<sup>e</sup> édition (Avril 2000) – Données et références*.
8. ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) – *1975-2000 Evolution de la gestion des déchets ménagers*.
9. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement – *Le parc des usines d'incinération d'ordures ménagères. Etax des lieux* (30 Janvier 2002).
10. Ministère de l'Environnement, Direction de la prévention des pollutions des risques – Service de l'environnement industriel – Circulaire DPPR/SEI/BPSIED n. 94-IV-1 du 9 Mai 1994 relative à l'élimination des mâchefer d'incinération des résidus urbains.
11. Office Parlementaire d'Évaluations des Choix Scientifiques et Technologiques – *Récyclage et valorisation des déchets ménagers* – Rapport 415 (98-99).
12. ADEME-BRGM – *Quel avenir pour les MIOM? – Premier colloque sur le sujet organisé par l'ADEME et le BRGM au BRGM à Orléans* (Les 16, 17 et 18 Octobre 2001).
13. Cercle Récyclage – *Quel devenir pour les mâchefer d'incinération d'ordures ménagères*.
14. ANPA ONR – *Secondo rapporto sui Rifiuti Urbani e sugli imballaggi e rifiuti di imballaggio* (febbraio 1999).
15. APAT ONR – *Rapporto rifiuti 2002* (ottobre 2002).
16. Sito web Federambiente.
17. Il Consorzio Italiano Compostatori – GEA (n. 32/02) del 6 maggio 2002.
18. Consorzio Nazionale Acciaio – *Programma specifico di prevenzione* (2001).
19. PRUVOST F. *France Aluminium recyclage* (Atti del Seminario CIAL, *Scorie da combustione, rifiuti e riciclaggi*, 24 ottobre 2000 Roma).
20. Consorzio Nazionale Acciaio – *Programma specifico di prevenzione* (2002).
21. Consorzio Nazionale Acciaio – *Convenzione per la gestione dei rifiuti di imballaggi ferrosi*.
22. Consorzio Imballaggi Alluminio – *Programma specifico di prevenzione* (2002).
23. ENEA, UTS Protezione e Sviluppo dell'Ambiente e del Territorio, Tecnologie Ambientali, Sezione Sviluppo Tecnologie Trattamento Rifiuti – V. laboni P. De Stefanis – *Separazione e recupero dei metalli e valorizzazione delle scorie dei combustione dei rifiuti urbani* (10-12-2002).

# Il **clima** prossimo venturo

## Evoluzione del clima ed impatti dei cambiamenti climatici in Italia



Le attività umane stanno cambiando le capacità termiche dell'atmosfera, del suolo ed anche degli oceani. Se non intervengono nel prossimo futuro azioni di inversione di queste tendenze, l'equilibrio del sistema climatico è destinato a cambiare in tempi relativamente brevi rispetto alle naturali variazioni. Il timore è che i tempi entro cui i temuti cambiamenti climatici possano avvenire siano troppo ristretti perché gli ecosistemi viventi e l'ambiente possano adattarsi a tali cambiamenti

**VINCENZO FERRARA**

ENEA  
Progetto Speciale Clima Globale



La possibile minaccia di un cambiamento climatico globale nasce dalla osservazione di alcuni sintomi di una malattia del pianeta che è la crescita dell'effetto serra, ovvero del sommarsi di un effetto serra "non naturale", provocato dalle attività umane, all'effetto serra "naturale" dovuto alla presenza stessa dell'atmosfera (se non ci fosse l'atmosfera la temperatura media del nostro pianeta sarebbe di ben 19 °C sotto zero, mentre in realtà è di 15 °C sopra lo zero). L'aumento dell'effetto serra "non naturale" è collegato all'aumento di concentrazione in atmosfera di gas e composti provenienti dalle attività umane, alcuni dei quali sono chiaramente identificabili perché non esistenti in natura (ad esempio i clorofluorocarburi) ed altri che si sommano, invece, a quelli già esistenti in natura (ad esempio l'anidride carbonica).

Le attività umane stanno cambiando le capacità termiche dell'atmosfera, del suolo ed anche degli oceani, introducendo fattori di perturbazione energetica capaci di spostare l'equilibrio naturale esistente e le naturali fluttuazioni di questo equilibrio. In altre parole, le attività umane stanno generando un effetto serra aggiuntivo a quello naturale, che tende a spostare tutti gli equilibri del sistema climatico.

I principali sintomi di questa interferenza sono di due tipi: sintomi direttamente collegabili alle attività umane, più evidenti a partire dall'inizio dell'era industriale (collocabile attorno al 1800) fino ad oggi quali la crescente emissione in atmosfera di gas ad effetto serra, e sintomi desumibili indirettamente in base ai risultati delle osservazioni sperimentali sul clima globale, quali gli andamenti e le variazioni climatiche che finora sono state misurate e studiate.

Gli andamenti attualmente osservati nello sviluppo economico, nella crescita della popolazione, nell'uso dell'energia e delle risorse naturali, sono tali che, se non intervengono nel prossimo futuro azioni di inversione di queste tendenze, l'equilibrio del sistema climatico è destinato a cambia-

re in tempi relativamente brevi rispetto alle naturali variazioni. La preoccupazione maggiore, infatti, non riguarda tanto il fatto che il clima possa cambiare a causa delle attività umane, quanto, invece, i tempi entro cui i temuti cambiamenti climatici possano avvenire: tempi troppo ristretti perché gli ecosistemi viventi e l'ambiente, compreso l'ambiente antropico, possano naturalmente adattarsi a tali cambiamenti.

Per quanto riguarda i sintomi collegati alle attività antropiche, è stato accertato quanto segue.

- 1) Le concentrazioni atmosferiche dei gas serra, fra cui l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), il metano ( $\text{CH}_4$ ) ed il protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ), sono aumentate in modo significativo a partire dall'inizio della rivoluzione industriale (databile intorno agli anni 1750-1800); in particolare la  $\text{CO}_2$  è passata da circa 280 a quasi 370 ppmv (parti per milione in volume), il  $\text{CH}_4$  da 700 a circa 1750 ppbv (parti per miliardo in volume) e il  $\text{N}_2\text{O}$  da 275 a circa 315 ppbv. Gli idrocarburi fluorurati e clorurati (CFC), che non esistevano fino a circa la metà del ventesimo secolo, sono cresciuti in modo talmente rapido in questi ultimi 50 anni che, oltre a costituire una minaccia aggiuntiva all'effetto serra naturale, hanno minacciato (e distrutto sopra l'Antartide) l'integrità della fascia di ozono stratosferico. Anche le concentrazioni di altri gas serra antropogenici, presenti in traccia nell'atmosfera, sono di pari passo aumentate. Molti di tali gas serra permangono lungamente nell'atmosfera (centinaia di anni), influenzando il clima per i secoli futuri.
- 2) L'attuale concentrazione di anidride carbonica in atmosfera è la più alta che si sia mai verificata negli ultimi 420 mila anni e molto probabilmente (le verifiche sono in corso) anche degli ultimi 20 milioni di anni. La velocità di crescita del-

l'anidride carbonica in atmosfera (32% in 250 anni di cui ben 8% negli ultimi 20 anni) è il più alto tasso di crescita degli ultimi 20 mila anni. Il 70% circa dell'aumento di anidride carbonica in atmosfera è causato dalla combustione di combustibili fossili, il rimanente 30% è dovuto ad altre cause tra cui la deforestazione, l'uso del suolo e l'agricoltura.

- 3) Le concentrazioni atmosferiche di metano, che hanno avuto un tasso di crescita medio del 250% in 250 anni, pur continuando ad aumentare mostrano una flessione nel tasso di crescita di questi ultimi decenni, mentre gli idrocarburi alogenati (tra cui i famosi CFC), che avevano avuto una velocità di crescita delle loro concentrazioni atmosferiche molto sostenuta negli ultimi 50 anni, sono in fase di diminuzione, grazie anche all'attuazione del Protocollo di Montreal per la protezione dell'ozono stratosferico.
- 4) La distruzione, soprattutto nella fascia intertropicale, di boschi e foreste è cresciuta ad un ritmo vertiginoso: boschi e foreste, infatti, attraverso i processi di fotosintesi, sottraggono anidride carbonica dall'atmosfera e la trasformano in biomassa e, quindi, costituiscono di fatto la principale fonte di assorbimento e di riciclo dell'anidride carbonica atmosferica. Si valuta che negli anni più recenti, anche se ora sembra vi sia un certo rallentamento, sono state disboscate, ogni anno, superfici medie territoriali di estensione complessiva paragonabile a quella del territorio della Svizzera.
- 5) Il ritmo di trasformazione della superficie terrestre da parte degli esseri umani, sia a causa della crescita demografica, sia per lo sviluppo delle attività economiche e industriali, è in forte aumento e ciò è causa di variazione del bilancio energetico complessivo del sistema climatico. In particolare, l'intensa ed estesa urbanizzazione, che sta aumentando in modo vertiginoso soprattutto nei Paesi in via di sviluppo, gli usi intensivi del suolo per l'agricoltura, l'inquinamento terrestre e marino e le altre attività umane sono stati, in quest'ultimo secolo, tali da aver modificato sia le capacità di assorbimento terrestre dell'energia solare incidente e le capacità di riflessione (albedo) verso lo spazio della radiazione solare, sia anche la capacità di emissione termica del suolo e di irraggiamento terrestre verso lo spazio.
- 6) Attualmente l'effetto riscaldante complessivo indotto come effetto serra "non naturale" è pari a circa 2,8 watt/m<sup>2</sup>, di cui: anidride carbonica pari a +1,5 watt/m<sup>2</sup>; metano pari a +0,5 watt/m<sup>2</sup>; protossido di azoto pari a +0,1 watt/m<sup>2</sup>; idrocarburi alogenati pari a +0,4 watt/m<sup>2</sup>; ozono stratosferico pari a -0,2 watt/m<sup>2</sup>; ozono troposferico pari a +0,4 watt/m<sup>2</sup>; emissioni inquinanti da aerei di linea pari a +0,1 watt/m<sup>2</sup> (il segno + indica riscaldamento, il segno - indica raffreddamento).
- 7) L'aumento degli aerosol troposferici e degli inquinanti urbani e industriali prodotti dall'uso di combustibili fossili, dalla combustione di biomasse e da altre fonti hanno prodotto, invece, una retroazione negativa, vale a dire una diminuzione dell'effetto serra, diminuzione che è, comunque, di modesta entità. Il contributo negativo all'effetto serra (raffreddamento) è pari complessivamente a circa -0,3 watt/m<sup>2</sup>, di cui -0,5 watt/m<sup>2</sup> sono dovuti agli inquinanti atmosferici di origine antropica, +0,2 watt/m<sup>2</sup> sono dovuti ad aerosol carboniosi (fuliggine, nerofumo, incombusti ecc.) e -0,2 watt/m<sup>2</sup> ad altri tipi di aerosol atmosferici (il segno + indica effetto riscaldante, il segno - indica effetto raffreddante). L'inquinamento atmosferico e gli aerosol antropogenici

hanno una vita media piuttosto breve nell'atmosfera, a differenza dei gas serra che hanno di norma una vita media molto lunga; pertanto, questo contributo negativo all'effetto serra varia velocemente in funzione degli aumenti o delle riduzioni delle relative emissioni.

- 8) Esistono altri fattori che fanno oscillare le precedenti valutazioni e sono legate alla variabilità dell'intensità della radiazione solare (che è risultata in aumento soprattutto nella prima parte del ventesimo secolo) ed alla variabilità dell'albedo terrestre globale (anche l'albedo complessiva terrestre è aumentata in quest'ultimo secolo). Poiché queste due variabilità, che sono dell'ordine del 10-20% dell'effetto serra "non naturale", tendono a compensarsi, non cambiano in definitiva i bilanci totali sopradetti. Di conseguenza tra effetto riscaldante dei gas di serra ed effetto raffreddante di inquinanti ed aerosol antropogenici, il risultato complessivo di riscaldamento globale dovuto alle attività umane è valutato attorno ai  $2,5 \text{ watt/m}^2$ , un valore che è all'incirca pari all'1% dell'effetto serra naturalmente presente nell'atmosfera terrestre.

## Le tendenze climatiche in atto a livello globale

I recenti studi sul sistema climatico hanno messo in evidenza che il clima del nostro pianeta sta subendo, soprattutto in questi ultimi decenni, alcuni cambiamenti che potrebbero portare, se le attuali tendenze di sviluppo socio-economico e di uso delle risorse naturali non venissero modificate, a variazioni profonde ed irreversibili sia dell'ambiente sia della stessa società umana nei prossimi 50-100 anni. Allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e sulla base dei più recenti risultati acquisiti da IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) abbiamo il seguente quadro di variazioni accertate.

## Cambiamenti della temperatura del pianeta

La temperatura media globale del nostro pianeta è aumentata di un valore compreso fra  $0,4$  e  $0,8$  °C a partire dalla fine del 1800. I più rilevanti aumenti di temperatura sono avvenuti principalmente in due periodi:

- a) nel periodo compreso fra il 1910 ed il 1945;
- b) nel periodo attuale che va dal 1976 ai giorni nostri.

Il riscaldamento globale del primo periodo (1910-45) è stato concentrato, in modo molto marcato, soprattutto nella regione del nord Atlantico (inclusa Europa e nord America). In questa regione ha fatto però seguito, tra il 1946 ed il 1975, un persistente raffreddamento non riscontrato in altre parti del pianeta. Nel secondo periodo (tra il 1976 ed oggi) il maggior riscaldamento ha riguardato complessivamente tutto l'emisfero nord, ma in particolare le medie ed alte latitudini delle zone continentali. Il riscaldamento dell'emisfero sud si è manifestato, invece, in modo molto meno marcato. Tuttavia, complessivamente, il tasso di riscaldamento in quest'ultimo periodo è stato particolarmente elevato e pari a circa  $0,2$  °C per decennio. Se si analizzano in dettaglio gli andamenti delle temperature minime e massime (giornaliere, mensili ed annuali) si nota che il riscaldamento globale del nostro pianeta non era dovuto tanto all'aumento delle temperature massime, ma dovuto essenzialmente all'aumento delle temperature minime il cui tasso di crescita è stato doppio di quello delle temperature massime.

## Scioglimento dei ghiacci

Per quanto riguarda i ghiacci della calotta antartica, non appare evidente alcuna correlazione tra aumento della temperatura globale e scioglimento dei ghiacci antartici, a partire dal 1970, da quando cioè si hanno dati attendibili in proposito. I dati esistenti mostrano che i ghiacci antartici sono rimasti

piuttosto stabili. Per quanto riguarda i ghiacci artici, invece, è stata notata una certa riduzione in questi ultimi decenni, una riduzione che ha interessato anche il ghiaccio marino delle alte latitudini. Infine, per quanto riguarda i ghiacciai delle medie latitudini la tendenza è una riduzione delle dimensioni e delle estensioni dei ghiacciai. Questa tendenza è particolarmente evidente nei ghiacciai alpini e in quelli delle catene montuose delle medie e basse latitudini dell'emisfero nord (Himalaia, Ande, Kilimangiaro ecc.).

### Precipitazioni e siccità

Le precipitazioni, intese come precipitazioni totali annue, sono in aumento soprattutto nell'emisfero nord e particolarmente nelle regioni delle medie ed alte latitudini. Nell'emisfero sud, invece, non si notano variazioni significative, né si osservano tendenze in atto. Infine, nelle regioni subtropicali vi è una chiara tendenza alla diminuzione, tendenza che coinvolge anche le regioni limitrofe delle medie latitudini. In effetti, i fenomeni di aumento della siccità sono particolarmente evidenti nella regione del Sahel (dove a partire dal 1970 si è sempre di più aggravata), nell'Asia orientale e nel sud Africa. Aumento dei fenomeni siccitosi si sono avuti anche in aree limitrofe, quali la parte più estrema del sud Europa (Spagna, Italia meridionale, Grecia, Turchia) e la parte meridionale degli Stati Uniti. Tuttavia, in tutte queste aree, molti dei fenomeni siccitosi derivano anche dal comportamento anomalo di "el niño", di cui si parlerà successivamente.

### Circolazione atmosferica ed oceanica

Esistono due fenomeni periodici e ricorrenti della circolazione atmosferica ed oceanica che negli ultimi decenni hanno subito delle modifiche: il fenomeno di ENSO (El Niño Southern Oscillation), detto più brevemente "el niño", ed il fenomeno della NAO (North Atlantic Oscillation). Per

quanto riguarda "el niño", va rilevato che il suo comportamento è particolarmente insolito a partire dal 1970. Non sono ancora chiare le cause di tale insolito comportamento. In ogni caso si è osservato che sia la frequenza sia la intensità di "el niño" sono in aumento, mentre vi è una diminuzione (in frequenza ed intensità) dei fenomeni opposti di "la niña". Per quanto riguarda la NAO, pur essendo meno evidente di "el niño", va rilevato che essa è accoppiata con la circolazione delle correnti oceaniche del nord Atlantico e con la circolazione generale dell'atmosfera della zona artica. Tale accoppiamento in questi ultimi anni ha dato luogo con maggior evidenza ad un rafforzamento sia della ciclogenese dei cicloni extratropicali, sia delle correnti aeree, delle burrasche e dell'intensità dei venti associati alle perturbazioni meteorologiche di origine atlantica.

### Eventi meteorologici estremi

In questo contesto è necessario distinguere tra precipitazioni estreme (piogge alluvionali), temperature estreme (sia calde sia fredde) e tempeste (quali cicloni, tornado ecc.). Per quanto riguarda le precipitazioni estreme, le valutazioni IPCC mostrano che nelle regioni del pianeta dove le precipitazioni totali annue sono in aumento, risultano in aumento anche la frequenza delle piogge a carattere alluvionale. In particolare, in queste zone le piogge tendono in generale ad avere una intensità maggiore e una durata minore. Tuttavia, ci sono anche delle eccezioni come le regioni dell'Asia orientale dove, pur essendo le precipitazioni totali annue in diminuzione, sono invece in aumento i fenomeni di precipitazioni estreme o a carattere alluvionale.

Per quanto riguarda le temperature estreme i dati attuali mostrano che non sembra esserci un aumento della frequenza delle temperature massime (estremi di caldo) ma appare, invece, evidente una diminuzione della frequenza delle temperature minime (estremi di freddo). Ciò, comun-

que, non esclude il fatto che, indipendentemente dalla frequenza, i singoli picchi di caldo o di freddo possano talvolta raggiungere anche valori record. Infine, un discorso a parte va fatto per le tempeste. A livello globale non appare evidente che in questi ultimi decenni vi siano stati aumenti nella frequenza dei cicloni tropicali (e delle tempeste ad essi associati: gli uragani, i tifoni, i tornado ecc.), né nella frequenza di quelli extratropicali, anche se i danni derivanti da tali tempeste appaiono in aumento. Pertanto, pur non essendo variata la frequenza, sembrerebbe aumentata l'intensità o la violenza di tali tempeste. Tuttavia, non essendo disponibili informazioni complete e attendibili sulla intensità di questi eventi estremi, non è del tutto certo se i maggiori danni siano dovuti ad una aumentata intensità a parità di frequenza oppure ad una aumentata, per le zone colpite, vulnerabilità ambientale e territoriale, a parità di intensità. Se si analizzano i fenomeni a livello regionale si osserva che:

- a) il fenomeno di "el niño" ha portato ad un aumento della frequenza e dell'intensità dei cicloni tropicali originati sul Pacifico e ad una diminuzione dei cicloni extratropicali generati sull'Atlantico per gli anni successivi al 1970 e fino ai nostri giorni;
- b) la frequenza e l'intensità dei cicloni di origine atlantica è oscillante (periodi in cui appare un aumento, alternati a periodi in cui appare una diminuzione), a seconda dei decenni oggetto di osservazioni, ma sul lungo periodo non si osservano tendenze certe;
- c) la frequenza e l'intensità dei cicloni originati sull'Oceano Indiano è molto variabile senza alcuna tendenza né all'aumento, né alla diminuzione.

## Le tendenze climatiche in atto in Italia

L'Italia dispone di un rilevante patrimonio di documentazione storica sulle caratteri-

stiche meteorologiche di molte località italiane. Dati ed informazioni, opportunamente interpretate ed elaborate hanno permesso di realizzare un quadro dell'evoluzione del clima e valutare i cambiamenti in atto in una prospettiva di lungo periodo. Le serie secolari più lunghe ed affidabili (1865-2000) provengono dalle stazioni UCEA e dai Servizi Idrografici, mentre quelle decennali (1951-2000) rilevate secondo gli "standard" internazionali della World Meteorological Organization sono dell'Aeronautica Militare.

### Variazioni di temperatura in Italia

Le analisi delle serie storiche italiane, che sono circa 40, relative al periodo 1865-1996 indicano che:

- le temperature massime e minime mensili sono aumentate in modo diverso nelle diverse regioni, ma soprattutto fra Italia settentrionale ed Italia centro-meridionale;
- la temperatura massima è aumentata nel periodo di osservazione (1865-2000) di circa 0,6 °C nelle regioni del nord Italia e di 0,8 °C nelle regioni del centro-sud;
- la temperatura minima è aumentata di circa 0,4°C nelle regioni del nord e 0,7° nel centro-sud;
- l'inverno è la stagione nella quale le temperature massime e minime sono aumentate maggiormente in tutte le regioni italiane.
- per le regioni dell'Italia centro-meridionale, a partire dal 1930, si riscontra inoltre una tendenza al progressivo aumento della evapotraspirazione e, di conseguenza, dei processi di aridità, a causa della concomitanza sia dell'incremento delle temperature, sia della progressiva riduzione delle precipitazioni, anche se le informazioni sulle precipitazioni sono da ritenersi meno affidabili nel periodo compreso fra il 1930 ed il 1950.

Il quadro generale degli andamenti delle temperature osservate in Italia mostra caratteristiche analoghe a quelle medie os-

servate a livello globale, ma con accentuazione dei fenomeni di riscaldamento e dei processi di aridità per le regioni centro-meridionali.

### Variazioni di precipitazioni in Italia

Le serie storiche italiane più affidabili in questo campo non risalgono al secolo scorso, come nel caso della temperatura, ma sono più recenti e riguardano settantacinque serie di precipitazioni giornaliere relative al periodo dal 1951-1996, dalle quali si evidenzia che in questi ultimi 50 anni circa:

- le precipitazioni totali sono diminuite in tutto il territorio nazionale con maggiori riduzioni nelle regioni centro-meridionali, rispetto a quelle settentrionali;
- il numero complessivo dei giorni di pioggia in tutto il territorio nazionale è diminuito di circa 14% senza significative variazioni fra regioni settentrionali e regioni centro-meridionali;
- a livello stagionale si riscontra, in generale e per tutte le regioni, che la riduzione dei giorni di pioggia è molto più elevata nella stagione invernale rispetto alle altre stagioni;
- a livello stagionale si riscontra inoltre una tendenza, generale e per tutte le regioni, all'aumento dell'intensità delle precipitazioni e ad una diminuzione della loro durata;
- l'aumento dei fenomeni siccitosi riguarda tutte le regioni italiane, ma la persistenza dei periodi di siccità è diversamente distribuita: nelle regioni settentrionali la persistenza è maggiore in inverno, mentre nelle regioni meridionali la persistenza è maggiore in estate.

Gli andamenti osservati in Italia sono solo parzialmente analoghi con gli andamenti osservati a livello globale. Ciò è dovuto alla particolare climatologia della regione mediterranea e all'evoluzione a più grande scala che sta subendo tale climatologia. Infatti, gli studi in corso mostrano una variazione della frequenza e della persistenza

dei cicloni extratropicali sul bacino del Mediterraneo ed una accelerazione della velocità e della intensità del ciclo idrologico complessivo mediterraneo.

### Variazione del livello del mare

Quantunque a livello globale, a partire dal 1900, il livello medio del mare è andato progressivamente aumentando (circa 0,2 mm/anno) con un'accentuazione della crescita in questi ultimi anni (circa 0,7 mm/anno), tuttavia il mar Mediterraneo (e quindi anche i mari italiani), presenta comportamenti anomali rispetto agli oceani. Dopo una fase iniziale di innalzamento progressivo del livello, analogo a quello osservato a livello globale, sono apparse anomalie nei tassi di crescita, particolarmente evidenti negli ultimi 30 anni, ma soprattutto in questi ultimi 15 anni durante i quali il livello marino è rimasto stazionario o ha mostrato addirittura sintomi di diminuzione. Questo andamento recente, se paragonato con quello della media degli oceani implicherebbe necessariamente la formazione in atto di una sorta di "scalino" che dovrebbe formarsi presso lo stretto di Gibilterra e che gli studi in corso stanno cercando di verificare e spiegare. Attualmente le ipotesi in esame sono le seguenti:

- il livello del mar Mediterraneo non cresce come quello degli oceani a causa delle anomalie nella dinamica dell'atmosfera, che hanno colpito in modo particolare il Mediterraneo: infatti, poiché è variata la frequenza e l'intensità dei cicloni extra tropicali e sono aumentate in numero ed intensità le situazioni anticicloniche sul Mediterraneo (alte pressioni), la pressione atmosferica sulla superficie del mare è mediamente più alta, e questo comporterebbe, per un mare chiuso come il mediterraneo uno "schacciamento" non trascurabile verso il basso della superficie marina stessa;
- il livello del Mar Mediterraneo non cresce come quello degli oceani a causa delle anomalie del ciclo idrologico com-

pressivo del bacino mediterraneo: infatti, da una parte è aumentata l'evaporazione delle acque mediterranee (a causa del riscaldamento globale) e dall'altra è diminuito l'apporto idrico dei fiumi e delle acque interne (a causa della riduzione delle precipitazioni): tutto ciò porta sia ad una crescita della salinità del Mediterraneo, sia ad una diminuzione del livello marino. Gli apporti di acqua atlantica attraverso lo stretto di Gibilterra non riescono a compensare le perdite per evaporazione e minor apporto fluviale, perché la maggior acqua salata presente nel Mediterraneo, e che dal Mediterraneo tende a riversarsi nell'Atlantico (acqua più pesante), impedirebbe all'acqua atlantica meno salata (e più leggera) di penetrare attraverso la sezione, alquanto angusta, dello stretto di Gibilterra nel Mediterraneo a flussi sufficienti per compensare le perdite.

### Risorse idriche

Le stime più recenti (campagne di studio della Conferenza Nazionale delle Acque) valutano che l'apporto complessivo delle piogge sul territorio nazionale è di circa 300 miliardi di metri cubi per anno e si distribuisce in modo disomogeneo fra nord (41%), centro (26%), sud (20%) ed isole (6%). L'evapotraspirazione riduce drasticamente questo apporto tanto che la risorsa netta effettivamente disponibile viene stimata essere di poco superiore ai 50 miliardi di metri cubi per anno suddivisa in acque sotterranee (per circa 10-25%) e acque superficiali (75-90%): un quarto circa delle acque superficiali viene raccolto in invasi naturali ed artificiali.

Gli utilizzatori delle risorse idriche disponibili sono fondamentalmente le regioni settentrionali (per il 65%), mentre le regioni centrali e meridionali ne hanno a disposizione molto meno (il 35%). Il principale consumatore di acqua in tutte le regioni è il settore agricolo, le cui esigenze vengono soddisfatte al nord utilizzando direttamente

le acque superficiali, mentre al sud e nelle isole utilizzando soprattutto gli invasi artificiali. L'uso potabile ai fini civili viene soddisfatto utilizzando prevalentemente acque sotterranee ma al sud acquista importanza fondamentale l'uso delle acque di invasi artificiali. Questo bilancio idrologico, tracciato a grandi linee, sta subendo delle modifiche perché gli apporti complessivi che vengono dalle precipitazioni meteoriche mostrano la tendenza alla diminuzione, più accentuata nell'Italia meridionale rispetto al nord Italia, mentre gli utilizzi dell'acqua da parte delle attività umane sono in costante aumento, con una situazione di crescente criticità nelle regioni meridionali e nelle isole.

### Variazione qualità dei suoli e rischio desertificazione

Le analisi complessive sui suoli della regione mediterranea mostrano che molte delle aree più meridionali dell'Europa e gran parte di quelle del nord Africa sono, già da tempo, soggette ad una crescente pressione antropica sulle risorse naturali, alla quale si aggiungono ora anche i cambiamenti del clima: tutto ciò sta determinando una riduzione della produttività biologica ed agricola e ad una progressiva perdita di biodiversità degli ecosistemi naturali. In Italia, il fenomeno è particolarmente evidente nelle regioni meridionali ed insulari, dove l'aridità dei suoli è aumentata a partire dal 1900, ma soprattutto in questi ultimi decenni, sia in termini di estensione delle aree interessate, sia in termini di intensità. Le aree aride, semi-aride e sub-umide secche, che si trasformano poi in aree degradate, interessano attualmente il 47% della Sicilia, il 31,2% della Sardegna, il 60% della Puglia, ed il 54% della Basilicata. Tuttavia, al degrado del suolo hanno contribuito anche le modalità di uso del suolo ed i cambiamenti di uso del suolo, come ad esempio politiche a sostegno dell'agricoltura non sempre adatte alle specificità territoriali, l'impiego irriguo di risorse idriche

non sempre idonee, il disboscamento e la crescita degli incendi boschivi, la concentrazione dell'urbanizzazione nelle aree costiere.

Fattori derivanti da cambiamento del clima e fattori di origine antropica hanno complessivamente innescato alcuni processi che sono stati identificati come principale causa del degrado del suolo italiano, e di rischio di desertificazione nell'Italia meridionale; tali processi sono: l'erosione, la salinizzazione, la perdita di sostanza organica e l'impermeabilizzazione.

### Gli scenari futuri per l'Europa e il Mediterraneo

Le valutazioni degli scenari di cambiamento climatico e di conseguenze dei cambiamenti climatici in Europa ed in particolare nell'area mediterranea non sono allo stato attuale delle conoscenze, abbastanza dettagliate da renderle sicuramente affidabili, essendo affette da errori che dipendono sia dai modelli e dalle metodologie utilizzate sia dagli scenari di evoluzione dello sviluppo socio economico e delle emissioni antropiche di gas di serra.

Tenendo conto delle incertezze, vengono di seguito riportate le tendenze future più probabili in relazione alla sensibilità dei sistemi ambientali e socioeconomici europei ed alle capacità di adattamento di tali sistemi alle variazioni climatiche.

L'Europa ed in particolare l'area mediterranea sia a causa della complessità dei sistemi ambientali, umani, sociali ed infrastrutturali, sia a causa della peculiarità delle caratteristiche degli ecosistemi naturali e del patrimonio storico, artistico e culturale, possiede già attualmente una vulnerabilità accentuata verso gli eventi estremi non solo di tipo meteorologico (alluvioni, inondazioni, siccità ecc.), ma anche di tipo naturale (terremoti, stabilità geologica ed idrogeologica ecc.).

I futuri cambiamenti climatici prevedibili modificheranno tale vulnerabilità e porte-

ranno conseguenze che, rispetto alla situazione attuale, in alcuni casi si aggraveranno, in altri si attenueranno.

I problemi prioritari che dovranno affrontare i Paesi dell'Europa meridionale, ed in particolare i Paesi del Mediterraneo, sono così sintetizzabili:

- a) gli eventi meteorologici ed idrologici estremi ed in particolare la differenza fra abbondanza e scarsità d'acqua fra nord e sud Europa e, per l'Italia, fra nord e sud Italia. Questo problema non è semplicemente una questione di bilancio idrologico, ma ha profonde implicazioni sull'agricoltura, la produzione industriale, l'urbanizzazione, il turismo, la salute e non ultimo il settore assicurativo;
- b) lo spostamento verso nord di tutti i sistemi ecologici ed ambientali naturali che potrebbe portare a profonde modifiche, anche del paesaggio, in tutta Europa con effetti positivi nel nord Europa ed effetti negativi nel sud Europa ed in Italia, soprattutto nei settori dell'agricoltura, del turismo e tempo libero, nel settore residenziale;
- c) le ripercussioni secondarie connesse con le conseguenze dei cambiamenti climatici, quali la perdita della biodiversità e i rischi di desertificazione che interesserebbero soprattutto il sud Europa e l'area mediterranea. Ripercussioni non trascurabili si avrebbero anche nel campo economico a causa delle modifiche delle opportunità di sviluppo per i vari Paesi europei, ma anche fra le varie regioni italiane, soprattutto per quanto riguarda le iniziative economiche, l'occupazione e la distribuzione della ricchezza, opportunità che, a loro volta, coinvolgerebbero anche problemi di equità fra le popolazioni europee.

Per quanto riguarda i possibili cambiamenti, la situazione che si prospetterebbe viene qui di seguito sintetizzata in dettaglio in relazione ai vari fattori climatici ed ai principali impatti prevedibili.



## Temperatura

La temperatura media annuale tenderà a crescere ad un ritmo compreso fra 0,1° e 0,4 °C per decennio e tale crescita risulterà più marcata sull'Europa nord orientale (in particolare la penisola scandinava e la Russia occidentale) e sul Mediterraneo (in particolare Spagna, Italia e Grecia), ma meno marcata nell'Europa nord occidentale (in particolare: isole britanniche e Francia). A livello stagionale, invece, il riscaldamento invernale sarà più accentuato lungo una direzione ovest-est che va dall'Europa centrale a quella orientale (dalla Francia alla Russia), mentre il riscaldamento estivo sarà più marcato lungo una direzione nord sud che va dalla Scandinavia all'Italia. Inoltre tenderà a diminuire sia la lunghezza della stagione invernale, sia la frequenza degli estremi di freddo in inverno. Viceversa, tenderà ad aumentare sia la lunghezza della stagione estiva, sia la frequenza degli estremi di caldo in estate.

## Precipitazioni

L'andamento generale previsto per le precipitazioni annue future mostra:

- un aumento delle precipitazioni ad un ritmo compreso fra 1 e 2% per decennio per quanto riguarda il nord Europa;
- una diminuzione delle precipitazioni ad un ritmo pari a circa 1% per decennio per quanto riguarda il sud Europa ed in particolare l'area mediterranea;
- un carattere ambiguo per quanto riguarda il centro Europa ed in particolare l'area compresa fra Francia ed Ungheria.

L'andamento stagionale delle precipitazioni mostra una differenziazione ancor più marcata nelle varie regioni europee. In particolare:

- la maggior parte dell'Europa diventerà più piovosa in inverno (ad eccezione dei Balcani e della Turchia che viceversa diventano più secchi) e più secca in estate (ad eccezione della Scandinavia che viceversa diventa più piovosa);

- in inverno la maggiore piovosità si concentrerà soprattutto lungo le zone prospicienti l'asse centrale europeo che va da ovest ad est (dalla Francia alla Russia);
- in estate invece si manifesterà un forte gradiente lungo un asse nord-sud (dalla Scandinavia all'Italia) con forte aumento siccità nell'area mediterranea (diminuzione delle piogge estive del 5% per decennio), e con un discreto aumento delle precipitazioni nel nord Europa (aumento delle piogge del 2% per decennio).

## Eventi estremi

La previsione dell'intensità e della frequenza futura degli eventi meteorologici estremi è molto difficile ed i risultati vanno considerati come indicativi. È quindi molto probabile che aumenti sia la frequenza che l'intensità di molti fenomeni estremi ed in particolare:

- delle onde di calore in estate su tutta l'Europa;
- delle precipitazioni estreme (alluvioni) su tutta l'Europa, soprattutto d'inverno;
- della mancanza prolungata di precipitazioni (siccità) sull'Europa meridionale, soprattutto d'estate.

Il probabile aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi porterà ad un aumento dei danni economici e sociali sulle strutture ed infrastrutture residenziali e produttive, la cui entità dipende sia dalla vulnerabilità delle singole strutture ed infrastrutture, sia dalla vulnerabilità ambientale e territoriale complessivamente esistente. La crescita di eventi estremi, potrebbe incidere anche direttamente sulle attività produttive modificando le opportunità di alcuni mercati e la domanda di alcuni prodotti.

## Risorse idriche

L'attuale pressione antropica sulle risorse idriche, ed in particolare il loro uso e la loro gestione, tenderà a diventare più acuta con i cambiamenti climatici. I rischi da alluvioni

e da inondazioni tenderanno ad aumentare, e aumenteranno anche i rischi di disponibilità di adeguate risorse idriche, in particolare nel sud Europa e nell'area mediterranea. I cambiamenti climatici tenderanno ad aumentare le differenze tra nord e sud Europa (eccesso di acqua nel nord Europa, mancanza d'acqua nel sud Europa).

### La qualità dei suoli

La qualità dei suoli tenderà a deteriorarsi in tutta l'Europa. In particolare, nel nord Europa il deterioramento potrà essere provocato principalmente dal maggior dilavamento dei suoli a causa della crescita delle precipitazioni e dei maggiori rischi di alluvione, mentre nel sud Europa, al contrario, il deterioramento potrà essere provocato dal degrado dei suoli da erosione e perdita di nutrienti a causa dalla diminuzione delle precipitazioni e dai maggiori rischi di siccità. Il degrado a sua volta accrescerà il rischio di desertificazione. Con l'aumento della temperatura saranno probabili fenomeni di deglaciazione in alta montagna. I suoli, ma soprattutto i pendii e versanti liberi da ghiacci perenni, saranno più soggetti a processi franosi.

### Ecosistemi

L'aumento della temperatura media e la crescita delle concentrazioni di anidride carbonica in atmosfera sono in grado di cambiare gli equilibri degli ecosistemi naturali con modifiche anche nel paesaggio. Pertanto, la vegetazione e gli ecosistemi naturali più tipici dell'area mediterranea tenderanno a spostarsi verso il centro Europa, così come le foreste di conifere e quelle tipiche boreali delle medie latitudini potrebbero prendere il posto della tundra, presente attualmente alle più alte latitudini dell'Europa.

Nell'area mediterranea, invece, tenderanno sia ad aumentare gli incendi boschivi, sia a crescere i rischi di perdita degli ecosistemi e della biodiversità attuale. Le conseguenze si ripercuoteranno anche sulla fauna e

soprattutto su quella migratoria.

Si valuta che complessivamente la produttività primaria tenderà a crescere (maggiore presenza di biomassa), ma, salvo una fase transiente (espansione verso nord delle foreste), non cresceranno le riserve complessive di carbonio (*carbon sinks and carbon stocks*).

### Agricoltura

L'aumento di anidride carbonica in atmosfera tenderà ad aumentare la produttività agricola soprattutto del nord e del centro Europa. Nel sud Europa, invece, la riduzione della disponibilità d'acqua e l'aumento della temperatura tenderanno a portare, invece, ad un effetto opposto.

Complessivamente, l'Europa non subirebbe modifiche significative nella produttività agricola totale, ma solo una sua diversa distribuzione. Infatti, dai cambiamenti climatici il nord Europa riceverebbe degli effetti positivi, mentre il sud Europa degli effetti negativi, che tenderebbero complessivamente a bilanciarsi.

### Foreste

La risposta delle foreste ai cambiamenti climatici presenterà due tendenze opposte, una di diminuzione del patrimonio forestale causata dalla riduzione della disponibilità idrica nelle aree del sud Europa e del Mediterraneo, e l'altra di espansione della flora arborea e di allungamento del periodo vegetativo nel nord Europa, dove ci saranno più favorevoli condizioni di temperatura ed umidità dei suoli, oltre alla maggiore disponibilità di anidride carbonica per la fotosintesi.

Nell'area mediterranea, ed in particolare nel sud Italia, in gran parte di Spagna, Grecia e Turchia, l'aumento previsto dell'aridità renderà le foreste più vulnerabili ai fattori di disturbo biotici (attacchi batterici, parassitari ecc.) ed abiotici (siccità, incendi ecc.) riducendone la resistenza e soprattutto compromettendone la resilienza. Ciò

## Che cos'è il clima

Il "clima" nell'opinione pubblica è percepito come una serie di statistiche meteorologiche. In realtà, il clima è l'equilibrio energetico tra il flusso totale di energia entrante sul nostro pianeta, che è quasi totalmente l'energia solare, ed il flusso totale di energia uscente dal nostro pianeta, che è in parte radiazione solare riflessa dall'atmosfera, dal suolo e dalle nubi, ed in parte energia emessa o irraggiata dalla terra nel suo insieme. Prima di essere riemessa verso lo spazio, l'energia solare viene anche trasformata (per esempio: in calore e dinamica dell'atmosfera, dagli oceani) e rielaborata in varie forme (comprese le forme organiche). Pertanto, il clima è l'equilibrio di un sistema (detto sistema climatico) costituito dalle seguenti componenti: atmosfera, oceano, biosfera e geosfera (inclusa la criosfera ed i sistemi idrogeologici continentali). Tali componenti interagiscono incessantemente fra loro scambiandosi flussi di calore, flussi di energia, e flussi di materia attraverso due cicli fondamentali: quello dell'acqua e quello del carbonio. L'equilibrio a scala globale costituisce il clima globale, l'equilibrio a scala regionale o locale costituisce rispettivamente il clima regionale o locale. Attualmente, le attività umane sono capaci di modificare le capacità di assorbimento o di emissione dei flussi energetici e quindi sono in grado di modificare il clima.

### Che cosa sono vulnerabilità e resilienza ai cambiamenti del clima

La vulnerabilità è la potenzialità o la possibilità che un determinato sistema (ambientale o umano) possa essere danneggiato rispetto ad una variazione del clima, possibilità determinata dall'incapacità di tollerare quella variazione. Ciò porta come conseguenza a modifiche anche irreversibili e a danni, la cui entità dipende dalla sensibilità ai cambiamenti del clima del sistema suddetto. La resilienza, invece, è la potenzialità o la possibilità che un determinato sistema possa resistere ad un danno, possibilità determinata dalle sue proprie capacità di elasticità o di recupero rispetto alla variazione del clima, la resilienza è, quindi, l'opposto della vulnerabilità. Vulnerabilità e resilienza rappresentano, infatti, le due facce di una stessa medaglia.

### Che cosa è l'adattamento ai cambiamenti del clima

L'adattamento rappresenta gli aggiustamenti che i sistemi naturali e quelli umani effettuano, o sono in grado di effettuare, in relazione ad una variazione del clima, al fine di riequilibrarsi alle mutate condizioni, o agli effetti di tali mutate condizioni. Si tratta di aggiustamenti, che da una parte tendono a minimizzare le conseguenze negative della variazione climatica e, dall'altra parte, a sfruttare le opportunità positive di tale variazione, aggiustamenti che nei sistemi ambientali naturali, in assenza di intervento umano, sono per lo più di tipo omeostatico. L'adattamento dipende dalle intrinseche capacità che i sistemi considerati hanno di raggiungere un nuovo equilibrio più o meno analogo al precedente, ma adeguato alla nuova situazione. Le capacità di adattamento sono tanto maggiori quanto maggiore è la resilienza del sistema considerato (o quanto minore è la sua vulnerabilità), e sono tanto maggiori quanto minore è la sensibilità di tale sistema alla variazione del clima. Di conseguenza, aumentare o favorire l'adattamento di un sistema ai cambiamenti climatici significa prioritariamente diminuire la vulnerabilità di tale sistema agli stessi.

comporterà, in tali aree, anche una perdita di habitat e quindi di biodiversità.

### Benessere umano

L'aumento della temperatura tenderà a modificare anche l'uso del tempo libero della popolazione ed in particolare tenderà a stimolare maggiori attività turistiche e ricreative all'aria aperta nel nord Europa ed a ridurle, invece, nel sud Europa. Nell'area mediterranea in particolare, le più frequen-

ti ondate di calore e di siccità, insieme alla minore disponibilità di acqua, potrebbero modificare le attuali abitudini turistiche concentrate soprattutto in estate, così come il minor innevamento e la progressiva ritirata dei ghiacciai potrebbe modificare e ridurre l'abituale turismo invernale alpino.

### Ambiente marino-costiero

L'aumento del livello del mare comporterà maggiori rischi per le zone costiere euro-

pee del mediterraneo. In particolare, si valuta che i maggiori problemi siano nella perdita di zone umide alla foce dei fiumi, nell'invasione di acqua salata nelle falde costiere di acqua dolce con conseguenze sull'agricoltura e sulla disponibilità di acqua dolce, ed infine, nella maggiore e più rapida erosione delle spiagge basse e delle spiagge ottenute con opere di difesa idraulica delle coste o di zone bonificate. Nell'Europa settentrionale, le zone costiere più esposte a rischio di inondazione sarebbero quelle del mar Baltico ed in particolare della Polonia.

### Problemi di maggiore criticità per l'Italia

Gli scenari futuri di cambiamento climatico per l'Europa ed il Mediterraneo, sopra descritti, contengono le indicazioni sui possibili impatti che riguardano anche l'Italia nel contesto dell'area mediterranea e del sud Europa. Tuttavia, sono da evidenziare alcuni problemi critici che si porranno in Italia a seguito dei prevedibili cambiamenti climatici, problemi che riguardano soprattutto le conseguenze sull'ambiente marino costiero in relazione all'innalzamento del livello del mare, le conseguenze sul suolo, ecosistemi ed agricoltura in relazione alle variazioni di temperatura, precipitazioni ed umidità e gli eventuali potenziali rischi aggiuntivi in relazione all'acutizzarsi di eventi estremi.

#### Innalzamento del livello del mare

All'innalzamento del livello del mare contribuiscono diverse cause, ma l'espansione termica degli oceani sarà la fondamentale causa di innalzamento del livello marino globale. Tuttavia, su base regionale l'innalzamento del livello del mare sarà diverso a seconda delle diverse regioni del globo. Nel Mediterraneo tale innalzamento dovrebbe essere contenuto, secondo IPCC, tra i 18 cm ed i 30 cm al 2090, senza ovviamente considerare i fattori di subsidenza

naturale che sono diversi per le diverse zone costiere italiane.

Assumendo come riferimento le valutazioni IPCC e senza tener conto dei movimenti verticali del suolo a cui è soggetto per sua natura geologica il territorio italiano, risulterebbero a rischio inondazione circa 4.500 chilometri quadrati di aree costiere e pianure distribuite nel modo seguente:

- 25,4% nel nord dell'Italia (soprattutto alto Adriatico);
- 5,4% nell'Italia centrale (soprattutto medio Adriatico ed alcune zone del medio Tirreno);
- 62,6% nell'Italia meridionale (soprattutto Golfo di Manfredonia e zone del Golfo di Taranto);
- 6,6% in Sardegna (soprattutto zone della parte occidentale e meridionale).

Anche se per il momento l'area mediterranea non appare tra le più critiche per problemi di popolazioni a rischio di inondazione, è, comunque fra quelle mondiali a più alta vulnerabilità in termini di perdita di zone umide ed in particolare degli ecosistemi e della biodiversità marino-costiera. Inoltre, l'invasione marina delle aree costiere basse e delle paludi costiere, accompagnata da minori capacità di ripascimento delle spiagge da parte dei detriti solidi dai fiumi (fiumi con portate medie più ridotte a causa della riduzione delle precipitazioni), accelera l'erosione delle coste, aumenta la salinità negli estuari e nei delta a causa dell'ingresso del cuneo salino, produce una maggiore infiltrazione di acqua salata negli acquiferi della fascia litorale.

Le coste basse sarebbero in ogni caso maggiormente esposte alle inondazioni in caso di eventi meteorologici estremi accompagnati da forti mareggiate, che, tra l'altro, impediscono il deflusso dei fiumi nel mare, causando maggiori probabilità di straripamenti e di alluvioni.

Va osservato, comunque, che i maggiori rischi valutati per l'Italia sono in realtà rischi aggiuntivi di quelli già esistenti a causa della attuale pressione antropica e dell'uso

dei territori costieri. Infatti, almeno per quanto riguarda l'Italia, i cambiamenti climatici non tendono a creare nuovi rischi, ma tendono ad accentuare ed amplificare (con effetti talvolta non prevedibili) i rischi già esistenti derivanti dalla urbanizzazione, la produzione industriale, la pesca, il turismo, i trasporti marittimi ecc.

Secondo uno studio dell'ENEA, sono a possibile rischio di inondazione e/o erosione costiera non solo l'area veneziana e tutta la costa dell'alto Adriatico compresa grosso modo tra Monfalcone e Rimini, ma anche altre aree costiere quali quelle alla foce dei fiumi (Magra, Arno, Ombrone, Tevere, Volturno, Sele), quelle a carattere lagunare (Orbetello, laghi costieri di Lesina e Varano, stagno di Cagliari), coste particolarmente basse o già soggette ad erosione (costa prospiciente Piombino, tratti della costa pontina e del Tavoliere delle Puglie ecc.).

L'entità del rischio non è, comunque, lo stesso per tutte le coste sopra menzionate, ma è maggiore là dove esistono già problemi di subsidenza e problemi di erosione e di instabilità dei litorali, problemi che riguardano soprattutto l'alto Adriatico e l'alto Tirreno.

### Suolo e agricoltura

Nell'Italia meridionale, già attualmente afflitta da scarsità di acqua e da problemi di degrado dei suoli a causa di molteplici fattori derivanti dalle attività antropiche e dall'uso del territorio, i cambiamenti climatici prevedibili indurranno ulteriori fattori di rischio inclusi i rischi di desertificazione per i quali sono in corso opportuni studi nell'ambito dell'Annesso IV della Convenzione per la lotta contro la desertificazione. La possibilità di ulteriore degrado a causa dei cambiamenti climatici è legata alla concomitanza di due fattori che gli attuali scenari di cambiamento climatico non stimano con certezza ma indicano come probabili, e cioè: la diminuzione delle precipitazioni totali annue al di sotto della soglia di circa 600 mm/anno che, con temperature medie

crescenti, implica un rischio permanente di aridificazione; l'estensione dei periodi di siccità per periodi prolungati di molti mesi, soprattutto se questo periodo coincide con il semestre caldo (evapotraspirazione molto alta e aridificazione acuta). Anche se irrigati, i suoli possono ugualmente degradare se le attività umane sul territorio (ed in primo luogo l'agricoltura) sono tali da indurre cambiamenti insostenibili nei terreni, ridurre la biodiversità e rendere non permanente qualsiasi tipo di equilibrio ecosistemico. Nell'Italia settentrionale, dove invece gli equilibri idrologici potrebbero essere cambiati per la maggiore disponibilità d'acqua, il problema del degrado è legato alle condizioni di maggior ruscellamento (o *run-off*) a cui sono sottoposti i suoli, ma soprattutto i pendii e le zone collinari.

Secondo le più recenti stime condotte da ENEA, l'incremento di temperatura media prevista da IPCC alle nostre latitudini potrà influenzare sia la vegetazione naturale sia le coltivazioni. In particolare, nell'Italia meridionale potrebbe prodursi un effetto particolarmente negativo sui sistemi locali, poiché sia la vegetazione sia i terreni si trovano già in un regime di disponibilità idrica marginale. Le regioni italiane settentrionali potrebbero avere invece maggiori problemi di franosità e di erosione da *run-off*, ma meno problemi sulla vegetazione complessiva. Ciò nonostante, terreni bassi nella zona del delta del Po potrebbero essere colpiti in maniera significativa da fenomeni di innalzamento del livello del mare e di intrusioni di acque salmastre. In ogni caso, i previsti aumenti di temperatura e di variazione delle precipitazioni e gli effetti sul ciclo idrologico richiederanno cambiamenti di gestione in molte regioni.

### Eventi estremi

Le tendenze previste da IPCC a livello globale avranno ripercussioni anche a livello nazionale. In particolare è possibile che aumenti la frequenza, ma soprattutto l'intensità di fenomeni estremi quali siccità, al-

luzioni ed di altri fenomeni meteorologici particolarmente violenti (come le trombe d'aria, le burrasche, i groppi ecc.).

Tuttavia alcuni di questi fenomeni estremi, quali le alluvioni, interesseranno maggiormente l'Italia settentrionale, mentre altri, quali la siccità, soprattutto il meridione d'Italia.

La recrudescenza soprattutto dell'intensità dei fenomeni estremi porterà come conseguenza ad una variazione, probabilmente significativa, degli esistenti rischi di catastrofi naturali e della vulnerabilità del territorio nazionale, la cui valutazione di dettaglio è attualmente soggetta ad attente analisi da parte dell'ENEA.

## Bibliografia

ANTONIOLI F., 1999. Measuring Holocene sea-level rise in the Mediterranean, in state e pressure on Mediterranean Sea Environment. Joint report of the Topic Centre on Marine Coastal Environment. EEA – European Environment Agency.

ANTONIOLI F., Silenzi S., 2001. Sea Surface Temperature and Sea Level Variations in the Tyrrhenian Sea during the Last 2000 and 500 yr. Invited paper at Accademia dei Lincei. Workshop on "Global climate changes during the late quaternary".

ANTONIOLI F., LEONI G., MARGOTTINI C., 2001. The risk of sea flooding in 33 Italian coastal plains. Accademia dei Lincei. Workshop on "Global climate changes during the late quaternary", Roma 4-5 maggio 2001. Abstract volume.

BRUNETTI M., BUFFONI L., MAUGERI M., NANNI T., 2000c. "Precipitation intensity trends in northern Italy". *International Journal of Climatology* 20: 1017-1031.

BRUNETTI M., COLACINO M., MAUGERI M., NANNI T., 2001. "Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996". *International Journal of Climatology* 21: 299-316.

BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., 2000a. "Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995". *Theoretical and Applied Climatology* 65: 165-174.

BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., 2000b. "Trends of minimum and maximum daily temperatures in Italy from 1865 to 1996". *Theoretical and Applied Climatology* 66: 49-60.

BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., NAVARRA A., 2002. "Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series", *Int. J. Climatol.*, in press.

BUFFONI L., MAUGERI M., NANNI T., 1999. "Precipitation in Italy from 1833 to 1996". *Theoretical and Applied Climatology* 63: 33-40.

CAMINITI N. M., LA MALFA S. (a cura di), 2002. *Incontrare Johannesburg 2002. Rapporto ENEA sullo*

*stato di attuazione del Patto per l'Energia e l'Ambiente*, ENEA.

CAMUFFO D., JONES P. (eds.), 2002. *Improved understanding of past climatic variability from early daily European instrumental sources*, Kluwer Academic Publisher.

CLINE W.R., 1992. *The Economics of Global Warming*. Institute of International Economics, Washington, DC.

COLACINO M., CONTE M., 1993. "Greenhouse effect and pressure pattern in the Mediterranean basin". *Il Nuovo Cimento*, 16C, 67-76.

COMITATO NAZIONALE PER LA LOTTA CONTRO LA DESERTIFICAZIONE – Comunicazione nazionale per la lotta alla siccità e alla desertificazione.

CORPO FORESTALE DELLO STATO (MIPAF) – Rapporto sulla salute delle foreste italiane 2001.

EASTERLING W.E., CROSSON P.R., ROSENBERG N.J., MCKENNEY M.S., KATZ L.A., LEMON K.M., 1993. "Agricolturel impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region". *Climatic Change* 24(1/2) 23-62.

ENEA, 2003. Terza Comunicazione Nazionale dell'Italia alle Nazioni Unite (UNFCCC), Capitolo 6, Ministero dell'Ambiente e del Territorio, Roma.

ENEA FEEM, 2003. La risposta al cambiamento climatico in Italia, Rapporto ENEA-Ministero Ambiente e Territorio, Roma.

EUROPEAN COMMISSION, 1999. Weather Impacts on Natural, Social and Economic Systems (WISE), DG XII (Environment and Climate Research Programme) - Framework IV.

EUROPEAN COMMISSION (ongoing) Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health in Europe (cCASHh), DG Research Environment and Sustainable. Development Programme), Framework V.

FANKHAUSER S., 1995. Valuing Climate Change. The Economics of the Greenhouse, Earthscan, London.

FANKHAUSER S., SMITH J.B., TOL R.S.J., 1999. "Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions", *Ecological Economics* 30, 67-78.

FEENSTRA J.F., BURTON I., SMITH J.B., TOL R.S.J. (eds.), 1998. *Handbook on Methods of Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, pp. 4.1-4.20, United Nations Environment Programme and Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Nairobi and Amsterdam.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, New York.

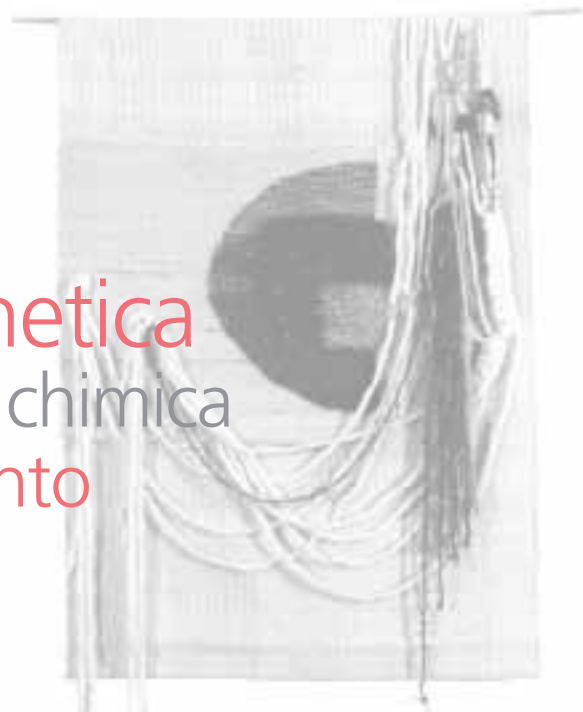
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, New York.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001. *Climate Change 2001: Mitigation*, Cambridge University Press, New York.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 1998. *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*, Cambridge University Press, New York.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 1996. *Impacts, adaptation and mitigation of climate change: scientific-technical analyses*, IPCC-WG2, Cambridge Univ. Press, pp. 773-797.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 1995. *Radiative Forcing of Climate Change: An Evaluation of the Emission Scenarios*, Geneva.
- LAMBECK K., BARD E., 2000. "Sea-level change along the French Mediterranean coast since the time of the Last Glacial Maximum". *Earth Planetary Science Letter* 175 (3-4), 202-222.
- LAMBECK K., JOHNSTON P., 1995. "Land subsidence and sea-level change: contributions from the melting of the last great ice sheets and the isostatic adjustment of the Earth". In: BARENS F.J., BROUWER F.J.J., SCHRODER F.H. (eds.), *Land Subsidence. Proc. Fifth Int. Symp. Land Subsidence*, The Hague, 16-20 October 1995. Rotterdam, 3-18.
- LAMBECK K., CHAPPEL J., 2001. "Sea level change through the last glacial cycle", *Science*, 292, 679-686.
- MAUGERI M., BAGNATI Z., BRUNETTI M., NANNI T., 2001. "Trends in Italian total cloud amount, 1951-1996", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4551-4554.
- MINISTERO DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA SCIENTIFICA E TECNOLOGICA, Programma Nazionale della Ricerca – Approvato dal CIPE il 21.12.00.
- MOBERG A., JONES P.D., BERGSTROM H., CAMUFFO D., COCHEO C., DAVIES T.D., DEMARÉE G., MAUGERI M., MARTIN-VIDE J., VERHOEVE, T., 2000. "Day-to-day Temperature Variability Trends in 160- to 275-year-long European Instrumental Records". *J. Geophys. Res. – Atmospheres*, Vol 105: D18, 22849-22868.
- NAVARRA A. (a cura di). *Linee Guida del Piano Nazionale di Ricerca per la Protezione del Clima*, Ministero dell'Ambiente, 1998.
- NICHOLIS R.J., HOOZEMANS F.M.J., MARCHNAD M., 1999. "Increasing flood risk and wetland losses due to sea level rise". *Global Environmental Change*, n. 9, pp. 69-87).
- PEISTER C., BRAZDIL R., GLASER, R., BARRIENDOS M., CAMUFFO D., DEUTSCH, M., DOBROVOLNY P., ENZI S., GUIDOBONI E., KOTYZA O., MILITZER S., RACZ L., RODRIGO F.S., 1999. "Documentary Evidence on Climate in the Sixteenth-Century Europe". Special Issue: Climatic Variability in Sixteenth-Century Europe and Its Social Dimensions, *Climatic Change*, 43:1, 55-110.
- PIRAZZOLI P.A., 1997. *Sea-Level Changes, the last 20.000 years*. Wiley, 211 p.
- PIRAZZOLI P.A., TOMASIN A., 2000. "L'evoluzione recente delle cause meteorologiche dell'acqua alta". *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti*, CLVII, 317-342.
- PIRAZZOLI P.A., 1993. "Global sea-level changes and their measurement". *Global and Planetary Changes*, 8 135-148.
- SCIORTINO M. ET AL., 2000. "La lotta alla desertificazione in Italia e nel bacino del Mediterraneo", in *Complessità e sviluppo*, ENEA 2000, pp. 37-46.
- SHIMEL D.S. ET AL., 1996. *The global carbon cycle*, IPCC-SR, Cambridge Univ. Press, pp. 76-86.
- VALENTINI R. ET AL., 2000. "Accounting for carbon sinks in the biosphere", in *European Perspective*, Horhold, Jena.

# La **risonanza magnetica** nella caratterizzazione chimica di **materiali di riferimento**



Analisi delle potenzialità della spettroscopia di risonanza magnetica nucleare come tecnica analitica per la valutazione dell'omogeneità e per la caratterizzazione di materiali di riferimento a matrice alimentare

**VINCENZO ALTAMURA**  
**MARIA ANTONIETTA BIANCIFIORI**  
**FRANCESCO INTROCASO**  
**RAFFAELE LAMANNA**  
**MARIA LUCIA MIGLIETTA**  
**ILARIO PISCIONERI**

ENEA  
UTS Biotecnologie,  
Protezione della Salute e degli Ecosistemi



## Misure e materiali di riferimento

### La misura

È grandissima, nella società attuale, l'importanza economica e sociale delle attività legate alla misura: quasi tutti i segmenti dell'economia, infatti, ne sono in vario modo influenzati.

Nei processi produttivi, le tecniche di misura acquisiscono un peso sempre maggiore, in quanto la crescente complessità delle nuove tecnologie e l'introduzione dell'automazione anche nei comparti maturi richiedono metodi di misura e di controllo sempre più sofisticati e sempre più integrati nei diversi stadi dei processi di fabbricazione. Le misure giocano un ruolo fondamentale anche nella ricerca di nuovi materiali, nuovi processi e nuove tecnologie, ed è sulla base dei risultati di vari tipi di misure che vengono prese decisioni di carattere legale, amministrativo e sanitario, di grande importanza per l'individuo e per la società.

Si stima che le attività legate alla misura incidano oggi per qualche unità percentuale sul prodotto nazionale lordo dei paesi industrializzati. Le analisi chimiche, in particolare, hanno un peso notevole sull'economia: solo negli Stati Uniti, ogni anno vengono eseguite dai laboratori pubblici e privati varie decine di miliardi di analisi chimiche nei campi più diversi (dall'ambiente alle biotecnologie, dalle analisi cliniche a quelle di materiali ad alta purezza ecc.). Ne consegue che le implicazioni economiche e sociali di dati analitici non accurati possono essere molto pesanti ed è per questo che diventa sempre più necessario lo sviluppo di metodologie atte a migliorare la qualità dei risultati analitici e garantirne l'affidabilità.

Particolarmente importante è la ricaduta economica e sociale di misure affidabili nel settore agro-alimentare. L'attenzione dei consumatori e, con essi, quella delle istituzioni nazionali e internazionali è focalizzata sui temi della sicurezza, della autenticità e della tipicità degli alimenti; anche l'Unione

Europea impone regole sempre più stringenti per l'etichettatura dei prodotti alimentari, in favore di una maggiore informazione sulle loro proprietà nutrizionali, sulla loro qualità ed origine.

L'attenzione generale sulla sicurezza alimentare è rivolta principalmente alla presenza di sostanze usate nella produzione e lavorazione dei prodotti agricoli, come i pesticidi, e la presenza di sostanze nocive derivanti dall'inquinamento ambientale. Recenti e importanti casi di malattie provocate da alimenti, come quelle dovute alla contaminazione da diossine o alla infezione del bestiame affetto da encefalopatia spongiforme bovina (BSE), hanno ingigantito la preoccupazione dell'opinione pubblica sulla sicurezza alimentare. Desti inoltre preoccupazione l'uso di organismi geneticamente modificati (OGM) la cui sicurezza per la salute umana non è stata ancora completamente accertata e rispetto ai quali esistono forti riserve in merito al rischio che possono costituire per la biodiversità.

In merito alla autenticità e tipicità degli alimenti, sempre più spesso assistiamo a vere e proprie battaglie politiche per proteggere sul mercato mondiale i nostri prodotti tipici dai numerosi tentativi di contraffazione e/o dall'uso non corretto della denominazione di un prodotto per aggirare i marchi di protezione (DOP, IGP), basti pensare alla recente battaglia per l'uso della denominazione "Parmesan", come richiesto da alcuni paesi, in cui è stato chiamato a dare un giudizio il Codex Alimentarius (organo della FAO e della Organizzazione Mondiale della Sanità).

Rispondere a queste richieste di controllo sulla qualità degli alimenti vuol dire eseguire determinazioni analitiche, la cui affidabilità deve essere garantita.

### Le analisi chimiche e l'accuratezza

Sfortunatamente, a differenza delle misure di grandezze fisiche come massa, lunghezza, temperatura ecc., i cui strumenti di misura possono essere tarati direttamente dai

laboratori di metrologia nazionale o comunque, con campioni a loro volta verificati su campioni nazionali, le misure chimiche non hanno una tracciabilità<sup>1</sup> dello stesso tipo. Infatti, un procedimento di analisi chimica richiede un numero variabile di trasformazioni chimiche e chimico-fisiche del campione, ciascuna delle quali può essere fonte di contaminazione, perdita di analiti<sup>2</sup>, errori.

Perché i risultati siano attendibili, le misure chimiche devono avere due importanti proprietà: precisione ed accuratezza.

La precisione è la riproducibilità della misura e può essere valutata semplicemente per mezzo di misure ripetute sullo stesso campione.

L'accuratezza è stata definita dall'International Organization for Standardization (ISO)<sup>3</sup> come "l'accordo tra il valore vero ed i risultati medi ottenibili applicando la procedura sperimentale un numero di volte molto grande". La valutazione dell'accuratezza, così come il riconoscimento e l'eliminazione degli errori, è un processo complesso che richiede l'uso delle seguenti procedure possibilmente combinate insieme:

- a) l'effettuazione di misure per mezzo di differenti tecniche analitiche, metodi e analisti: se queste misure sono in accordo tra loro, si può assumere che il risultato sia accurato; tuttavia, capita frequentemente il caso in cui un laboratorio abbia a disposizione un solo metodo o una sola tecnica analitica;
- b) la partecipazione ad intercomparazioni. L'accuratezza dei risultati riportati da un laboratorio per una specifica determinazione può essere valutata dall'accordo con i valori raccomandati, ottenuti da una rigorosa valutazione statistica dei risultati di tutti i laboratori partecipanti al-

l'intercomparazione. Il campione per l'intercomparazione dovrebbe essere il più possibile simile, come composizione e concentrazioni, ai campioni da analizzare nella normale routine analitica;

- c) l'uso di materiali di riferimento simili, per composizione quali-quantitativa, ai campioni da analizzare.

La capacità di ottenere gli stessi risultati, entro i limiti concordati, da parte di tutti i laboratori che effettuano la stessa analisi (cioè la compatibilità delle misure) è di estrema importanza: essa può essere raggiunta quando la rete di misura è basata sull'accuratezza.

In figura 1 è illustrato un modello di sistema di misura accurato e compatibile, costituito da un sistema gerarchico di metodi di misura e di materiali di riferimento<sup>[1]</sup>.

Gli elementi del sistema sono:

#### 1) *Unità di misura di base e derivate*

Nel sistema internazionale di unità (SI), attualmente adottato dalla maggior parte dei paesi del mondo e dagli organismi di unificazione a livello internazionale, a tutte le grandezze corrispondono delle unità: le unità di base sono scelte con il criterio che devono essere definite esattamente in modo "assoluto", senza cioè ricorrere, se possibile, al confronto con campioni artificiali o con altre unità.

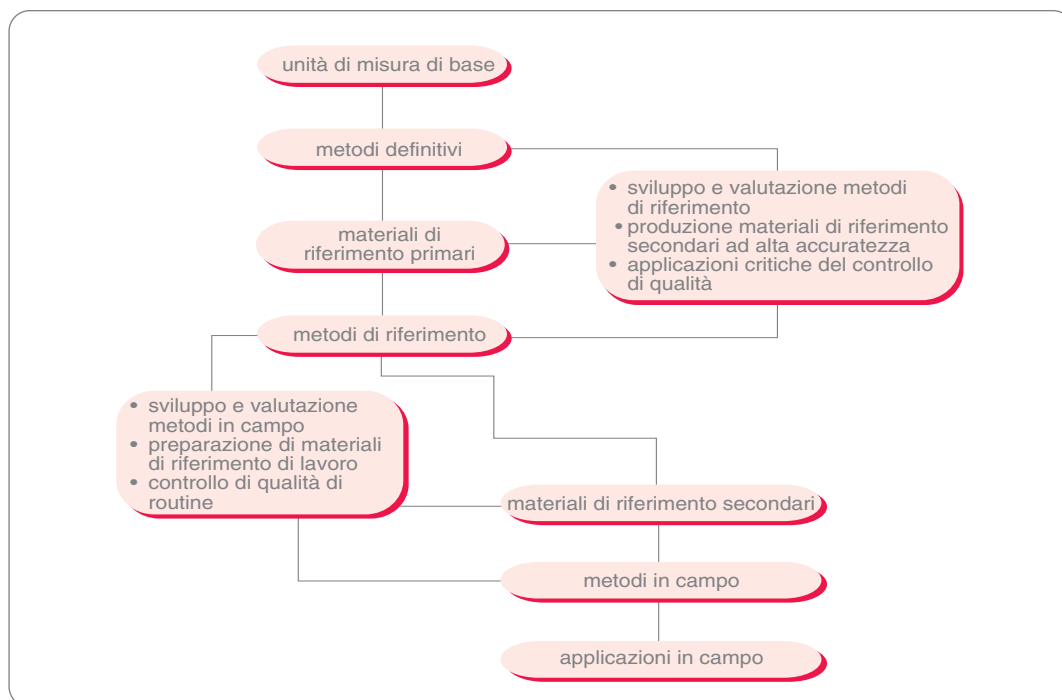
#### 2) *Metodi definitivi*

Sono quei metodi che misurano quantità chimiche o fisiche direttamente in unità di base o che sono legati ad esse indirettamente da relazioni matematiche esatte. Questi metodi devono avere elevata riproducibilità, devono essere privi di errori sistematici e deve essere conosciuto in maniera esauriente il processo che sta alla base del metodo.

<sup>1</sup> Tracciabilità: "Proprietà del risultato di una misura o del valore di uno standard che può essere correlato con riferimenti stabiliti, generalmente standard nazionali o internazionali, attraverso una catena ininterrotta di confronti che abbiano ciascuno una incertezza stabilita." (Guida ISO 30 1992).

<sup>2</sup> Analita: sostanza oggetto dell'indagine analitica.

<sup>3</sup> ISO è una federazione internazionale di enti di normazione nazionali, non governativa, istituita nel 1947. La missione della ISO è di promuovere lo sviluppo della standardizzazione e delle attività correlate allo scopo di agevolare gli scambi internazionali di beni e servizi e di sviluppare cooperazioni nell'ambito di attività scientifiche, tecnologiche ed economiche.

**Figura 1**

Modello di sistema di misura accurato e compatibile, costituito da un sistema gerarchico di metodi di misura e di materiali di riferimento

### 3) *Materiali di riferimento*

Nello schema citato, i materiali di riferimento sono solo una parte di un disegno più vasto; essi sono inseriti in due livelli diversi, a seconda del grado di accuratezza e di definizione.

Un materiale di riferimento primario, essendo un materiale puro, prodotto attraverso procedimenti lunghi e costosi, non può essere usato ogni volta che nella realtà sperimentale si renda necessario un materiale di riferimento, ma va usato soprattutto nella messa a punto di metodi di riferimento, in controlli di qualità e per la produzione di materiali di riferimento secondari (detti anche di laboratorio). Questi ultimi, caratterizzati per mezzo dei primi, possono a loro volta essere usati nella normale routine.

### 4) *Metodi di riferimento*

Per metodi di riferimento si intendono quei metodi, di accuratezza provata e dimostrata, che hanno le seguenti funzioni:

- calibrare e verificare i metodi in campo;
- calibrare i materiali di riferimento secondari;
- permettere l'effettuazione di programmi di controllo di qualità.

Lo sviluppo di un metodo di riferimento è un processo complesso, per certi aspetti simile al processo di certificazione di un materiale di riferimento.

### 5) *Metodi in campo*

Poiché molti metodi di riferimento non possono essere usati in pratica a causa della loro complessità o del costo elevato, vengono usati dei metodi più accessibili, in grado di fornire una quantità di risultati maggiore, in meno tempo e/o con costo minore. Questi metodi, pur non essendo dotati a volte della massima riproducibilità, devono avere comunque un'accuratezza adeguata rispetto alla necessità analitica. Per la calibrazione ed il controllo di questi metodi, l'impiego di materiali di riferimento è essenziale.

## I materiali di riferimento

I materiali di riferimento, da quanto risulta anche dal paragrafo precedente, sono quindi lo strumento a disposizione dell'analista per attuare il controllo di qualità sui procedimenti analitici adottati e per garantire l'affidabilità dei risultati ottenuti mediante il confronto fra un campione reale ed

un campione a composizione nota. Detti materiali hanno lo stesso ruolo dei campioni di riferimento metrologici e permettono, al laboratorio che li impiega, di ottenere risultati tracciabili rispetto al sistema internazionale di unità di misura e confrontabili con quelli dei laboratori che lavorino con le stesse modalità.

I materiali di riferimento nel laboratorio analitico hanno diverse funzioni:

- 1) contribuiscono allo sviluppo di nuovi metodi di analisi o di controllo ed alla modifica di quelli già esistenti;
- 2) contribuiscono a controllare la produzione di materiali di riferimento secondari (detti anche di laboratorio) o la qualità di una riedizione di un materiale di riferimento primario;
- 3) come materiale incognito (all'analista) servono a verificare, validare o controllare una procedura analitica o i vari laboratori di una rete di misura;
- 4) forniscono punti di calibrazione per gli strumenti usati in una procedura analitica;
- 5) all'interno di un metodo di riferimento o standardizzato, sono usati come materiale calibrante o di controllo;
- 6) assicurano il controllo statistico di qualità a lungo termine di un processo di misura.

I materiali di riferimento usati in un procedimento analitico devono avere la composizione della matrice e la concentrazione degli analiti ricercati il più simile possibile a quella dei campioni da analizzare. Quanto più la composizione del materiale di riferimento approssima quella del campione reale da analizzare, tanto più la correttezza della sua misura implica anche la correttezza della misura del campione reale (da qui la necessità di disporre di molti materiali di riferimento anche preparati da matrici reali). Ciò diventa particolarmente importante per i materiali di riferimento da impiegare nel controllo di qualità nel settore agro-alimentare dove bisogna tener conto non solo della moltitudine delle matrici alimentari possibili ma anche della variabilità naturale nella composizione di uno stesso

prodotto dovuta a differenze nella varietà e nelle condizioni e metodi di produzione.

L'importanza della certificazione di un materiale di riferimento sta soprattutto nel fatto che l'organizzazione certificante fornisce all'utilizzatore la garanzia che il valore certificato è la migliore approssimazione possibile al valore "vero" della grandezza e, nello stesso tempo, rende noto come tale approssimazione è stata ottenuta.

La produzione e la certificazione di materiali di riferimento sono dei processi complessi e dispendiosi, che richiedono per di più tempi molto lunghi, in quanto prevedono la partecipazione di numerosi laboratori ben attrezzati e di grande esperienza, oppure l'esistenza di una struttura permanente di elevatissima qualificazione; per tale motivo i materiali disponibili non sono in numero tale da coprire tutte le necessità, mentre, d'altra parte, è sempre crescente la richiesta di materiali di riferimento in tutte le aree della scienza e della tecnologia. Tutto ciò ha reso sempre più necessaria la cooperazione internazionale.

La disponibilità di materiali di riferimento per un mercato mondiale, invece che nazionale, consente infatti notevoli economie, in quanto rende possibile la produzione di un numero maggiore di materiali di riferimento, utilizzando al meglio le competenze di ogni singola nazione.

Fino al 1969<sup>[2]</sup> non c'era mai stato nessun tentativo di coordinare le attività sui materiali di riferimento tra le organizzazioni del settore dei diversi paesi industrializzati o tra agenzie internazionali. Ciò può essere attribuito principalmente al fatto che fino a quel tempo quasi tutti i materiali di riferimento prodotti erano indirizzati verso applicazioni industriali, e, di conseguenza, la salvaguardia degli interessi delle industrie nazionali era la considerazione prioritaria.

A partire dalla fine degli anni 60 divenne sempre più evidente che i materiali di riferimento erano destinati a giocare un ruolo fondamentale non solo nell'aumento della produttività industriale, ma anche in alcune

aree di enorme interesse, a livello internazionale: la sanità, la protezione dell'ambiente, l'energia nucleare, ed infine la protezione e la sicurezza del consumatore.

Ciò ha fatto sì che, negli anni 70 e 80, ci sia stata una forte crescita nelle attività sui materiali di riferimento in molti paesi e presso organizzazioni internazionali. L'aumentato interesse ha portato a riconoscere la necessità di istituire un organismo internazionale in grado di innescare delle iniziative di cooperazione sui materiali di riferimento che si sono concretizzate nella costituzione, all'interno dell'International Organization for Standardization (ISO), di un Comitato sui Materiali di Riferimento (REMCO), con i compiti principali di:

- proporre azioni sui materiali di riferimento;
- stabilirne definizioni, categorie, livelli e classificazioni.

Tutti i principali paesi industrializzati hanno inoltre attivato iniziative sui materiali di riferimento, a supporto delle necessità nazionali nel campo della produzione industriale e della protezione dell'ambiente e della salute. Oltre ad assicurare l'uniformità del sistema di misura in ambito nazionale, scopo di tali iniziative è spesso quello di svolgere funzioni normative. Le soluzioni organizzative scelte, pur variando in maniera sensibile da un paese all'altro, a causa delle differenti realtà nazionali, prevedono in ogni caso un ruolo di guida, coordinamento e riferimento per le strutture pubbliche. Le ragioni di un intervento pubblico nella preparazione e distribuzione di materiali di riferimento, sono diverse:

- evitare un'inutile duplicazione di sforzi da parte delle singole industrie;
- dotare i materiali di riferimento prodotti di quella autorità, derivante da un ente neutrale tecnicamente competente, che non avrebbero se fossero prodotti da un privato;
- produrre i materiali di riferimento necessari per applicazioni diverse.

In Italia, come in tutti i paesi più avanzati,

esiste una struttura metrologica finalizzata a rendere affidabile ed economica l'attività industriale. Le attività metrologiche primarie (tecnico-scientifiche) sono svolte da istituzioni diverse e principalmente da:

- Istituto Metrologico G. Colonnati (IMGC) del CNR;
- Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris (IENGF);
- ENEA;
- Istituto Superiore di Sanità.

Esistono inoltre centri di taratura secondari (tra cui alcuni laboratori dell'ENEA), che svolgono la maggior parte delle tarature, lasciando agli istituti primari principalmente la realizzazione dei campioni primari e l'attività di confronto a livello internazionale.

Tuttavia, questa struttura metrologica non include, se non in misura ridotta, fra le proprie attività la metrologia chimica ed i materiali di riferimento; manca quindi attualmente una sede istituzionale in cui vengano affrontate tali problematiche, e, di conseguenza, manca completamente, a differenza di tutti gli altri paesi più industrializzati, una attività autonoma di produzione e certificazione di materiali di riferimento.

Una iniziativa nazionale in questo settore è da considerarsi di grande significato strategico, al di là del valore puramente economico, in quanto l'esistenza di una attività in questo campo può essere considerata un indice della maturità tecnologica, oltre che dell'indipendenza commerciale, del Paese.

Essendo i materiali di riferimento strettamente legati allo sviluppo dei processi produttivi ed alla esportazione dei prodotti, essi concorrono in maniera notevole ad affermare l'affidabilità tecnologica del Paese, che a sua volta è non solo un elemento di prestigio, ma anche uno strumento di penetrazione tecnico-commerciale di notevole efficacia.

Infine, i materiali di riferimento costituiscono un elemento di garanzia nell'applicazione di norme e controlli derivanti dalla legislazione nazionale e dalle direttive comunitarie, principalmente nei settori dell'ambiente, della sicurezza e della sanità.

La International Organization for Standardization (ISO) si occupa sin dagli anni 70 dei materiali di riferimento e attraverso il Comitato Tecnico sui MR (REMCO), istituito nel 1975, ha elaborato le seguenti definizioni:

**Materiali di Riferimento (RM):** materiale o sostanza di cui uno più valori relativi alle sue proprietà sono sufficientemente omogenei e ben stabiliti da poter essere utilizzati per la calibrazione di uno strumento, la valutazione di un metodo di misura o per assegnare valori ai materiali (Guida ISO 30, 1992)<sup>[3]</sup>.

Quando i valori delle proprietà sono certificati attraverso una procedura che stabilisce la sua tracciabilità ad un valore accurato avente una sua incertezza ben definita, si parla di Materiale di Riferimento Certificato.

**Materiale di Riferimento Certificato (CRM):** materiale di riferimento provvisto di certificazione, di cui una o più valori relativi alle sue proprietà sono certificati per mezzo di una procedura che stabilisce la loro riferibilità ad una realizzazione accurata dell'unità nella quale i valori delle proprietà sono espressi e per la quale ogni valore certificato è accompagnato da incertezza ad un livello di confidenza esplicitamente indicato (Guida ISO 30, 1992)<sup>[3]</sup>.

Le Guide cui si fa riferimento sono alla base della normativa relativa ai Materiali di Riferimento e, infatti, l'ISO è un organismo riconosciuto, a livello internazionale, a svolgere attività normativa così come l'EN a livello europeo, e l'UNI a livello nazionale. L'osservanza di tali norme non è obbligatoria. Spesso, però, l'argomento trattato dalle norme ha un impatto così determinante sulla sicurezza del lavoratore, del cittadino o dell'ambiente che le Pubbliche Amministrazioni fanno riferimento ad esse richiamandole nei documenti legislativi e trasformandole, quindi, in documenti cogenti.

L'uso dei Materiali di Riferimento Certificati CRM è riservato alla verifica della accuratezza delle misure effettuate e alla validazione dei metodi analitici adottati<sup>[4]</sup> mentre i Materiali di Riferimento non certificati, spesso indicati come Materiali di Riferimento di Laboratorio (LRM), sono destinati ad un uso routinario per i programmi di controllo di qualità del laboratorio (carte di controllo), ovvero alla verifica sul lungo periodo delle prestazioni analitiche e alla determinazione della riproducibilità dei risultati ottenuti.

## Preparazione di materiali di riferimento

Il processo di preparazione di un materiale di riferimento certificato può essere suddiviso in diverse fasi:

- 1) definizione del materiale da produrre e delle grandezze da certificare, e, conseguentemente, scelta dei laboratori e dei metodi da impiegare;
- 2) preparazione del lotto (batch) e verifica dell'omogeneità e della stabilità;
- 3) determinazione analitica dei parametri da certificare, raccolta e confronto dei risultati ed eventuali test supplementari per l'eliminazione di dati non accurati;
- 4) certificazione, attraverso l'elaborazione e il trattamento statistico dei dati ottenuti;
- 5) stesura del documento finale e distribuzione del materiale certificato.

### Preparazione del lotto

La parte preliminare del processo è la pre-

parazione di un lotto di materiale di qualità adeguata dal punto di vista della stabilità e dell'omogeneità. Ciò richiede spesso più lavoro di quello richiesto dalla parte di certificazione vera e propria.

Un materiale di riferimento è usato di solito nell'arco di diversi anni, per cui è di grande importanza che sia stabile: se varia nel tempo, infatti, i valori veri delle sue proprietà potranno non essere più in accordo con i valori certificati. La valutazione della stabilità può richiedere studi preliminari, in particolare per materiali di origine biologica, che possono degradarsi ed essere attaccati da batteri, funghi ecc. (anche in forma liofilizzata), o in molti casi subire variazioni nelle concentrazioni o nei legami chimici a seguito di volatilizzazione (per elementi volatili come Hg, As) o di reazioni chimiche con agenti contaminanti.

Il metodo di conservazione influenza ovviamente il periodo di validità di un MR; un

condizionamento speciale è necessario per materiali sensibili all'alterazione da parte dell'aria o dell'umidità e in alcuni casi è raccomandata la conservazione a temperature tra i 10 e i 30 °C in essiccatore al buio. Per questi motivi deve essere stabilita una data oltre la quale il certificato non è più valido.

Poiché l'obiettivo nelle preparazioni di MR in molti casi è la produzione di campioni "naturali", simili in composizione della matrice e concentrazioni degli analiti ai campioni reali, il materiale di partenza è un materiale naturale e la preparazione del *batch* richiede una sequenza di processi base realizzati con metodi e tecniche che dipendono di volta in volta dalle caratteristiche della matrice da trattare, dal livello di concentrazione degli analiti di interesse e dalla dimensione e dal numero di unità da produrre<sup>[5]</sup>. In particolare, nel caso di materiali solidi in polvere, i processi fondamentali sono: la disidratazione, la macinazione, la setacciatura, l'omogeneizzazione, il confezionamento ed infine i controlli per l'omogeneità e la stabilità.

La disidratazione ed il confezionamento sono fondamentali per garantire la stabilità rispetto alle condizioni di conservazione, trasporto e stoccaggio.

La disidratazione è uno dei metodi più antichi per la conservazione di un alimento. L'eliminazione dell'acqua riduce drasticamente l'attività enzimatica e microbica aumentando la stabilità del prodotto nel tempo. L'acqua in un alimento si trova in due fasi termodinamiche distinte: una frazione d'acqua con proprietà simili all'acqua pura, detta acqua libera, e una frazione che interagisce con le molecole che costituiscono l'alimento, detta acqua legata, con proprietà fisiche molto diverse dall'acqua pura. Una delle caratteristiche dell'acqua legata è che al suo interno i processi enzimatici e di proliferazione batterica, alla

base della degradazione di un alimento, sono fortemente inibiti. Per poter ottenere un buon grado di conservabilità di un alimento è quindi sufficiente estrarre l'acqua libera<sup>4</sup>, considerando che le proprietà termodinamiche dell'acqua legata ne rendono l'estrazione difficile e costosa.

Macinazione, setacciatura e omogeneizzazione sono tutte operazioni che mirano a ridurre la variabilità di composizione del materiale fino all'ottenimento di un prodotto in cui le proprietà che si intendono misurare sono omogenee in tutti i punti dell'intera massa.

Il confezionamento deve avvenire in unità campione rappresentative del lotto di produzione. La scelta della forma, delle dimensioni e dei materiali che costituiscono la confezione è un passaggio importante nella definizione del protocollo di produzione di un materiale di riferimento. I materiali costitutivi della confezione devono assicurare, infatti, una totale inerzia nei confronti del contenuto ed essere compatibili con le condizioni di conservazione.

### Rischi di contaminazione del materiale

Durante tutte le fasi di lavorazione è importante tenere sotto controllo il rischio di contaminazione del materiale: uno dei maggiori rischi durante la lavorazione è infatti la perdita o l'aggiunta accidentale di analiti alla massa di materiale. Il rischio deriva dal fatto che la contaminazione non è mai riproducibile e oltretutto influenza negativamente l'omogeneità del materiale.

L'analisi dei rischi di contaminazione, degradazione della matrice e/o degli analiti e di tutti quei fattori che potrebbero rendere il materiale non idoneo all'uso è uno strumento che permette di individuare le migliori strategie di produzione con un conseguente aumento dell'affidabilità del processo e della qualità del prodotto finale.

<sup>4</sup> Un parametro che permette di valutare il rapporto tra acqua libera ed acqua legata è la cosiddetta attività dell'acqua,  $a_w$ . Valori di  $a_w < 0,3$  garantiscono un buon livello di disidratazione, sufficiente alla conservazione su lungo periodo di una matrice alimentare.

Le fonti di contaminazione possono essere molteplici: sostanze esogene, i materiali di fabbricazione di utensili e macchine che vengono in contatto con il campione, diffusione dalle taniche di stoccaggio o dalle bottiglie ecc.

È possibile minimizzare i rischi di contaminazione attraverso una opportuna scelta dei materiali che sono a diretto contatto con la massa di materiale in lavorazione. L'acciaio è un ottimo materiale per la maggior parte delle applicazioni ma non va bene quando gli analiti di interesse sono elementi metallici in traccia. In questo caso sono più opportuni materiali come Teflon, polietilene, polipropilene, poliuretano, vetro. Per elementi macinanti o lame possono essere utilizzati lo zirconio, il carburo di tungsteno o altri materiali contenenti metalli che raramente sono di interesse analitico e non sono perciò oggetto d'interesse per il materiale di riferimento.

Altri tipi di contaminazione che possono condurre alla degradazione della matrice e degli analiti sono le contaminazioni batteriche ed enzimatiche. Per far fronte a questo tipo di contaminazione è importante creare condizioni che inibiscano la proliferazione batterica o l'attività enzimatica, avendo cura di minimizzare i tempi e le temperature dei processi di lavorazione e, quando particolarmente indicato, operare in atmosfera di gas inerte.

Infine, dopo il confezionamento del materiale nelle singole unità e prima della distribuzione e della caratterizzazione chimica, si eseguono i test sulla omogeneità fra unità e all'interno della singola unità<sup>[6,7,8]</sup>.

### Verifica dell'omogeneità e spettroscopia NMR

Il requisito dell'omogeneità e la sua verifica sta diventando sempre più importante, in quanto le tecniche di misura sono diventate più precise e le analisi possono essere eseguite su quantità più piccole di materiale. L'omogeneità deve essere perciò controllata molto attentamente prima di intraprendere il lavoro di certificazione.

Quando si prevede la certificazione di un materiale per diverse proprietà, l'omogeneità rispetto ad una di queste proprietà non implica necessariamente l'omogeneità rispetto a tutte le altre.

Affinché il materiale di riferimento sia utilizzabile nelle comuni applicazioni analitiche, è essenziale che la differenza tra i campioni sia minore dell'incertezza delle misure; ogni porzione di un dato lotto deve essere identica entro i limiti di incertezza stabiliti, e quindi il valore certificato della proprietà di interesse deve valere per ogni porzione.

L'omogeneità deve essere valutata attraverso un'apposita campagna, condotta in genere da un solo laboratorio, con un metodo di precisione adeguata.

I metodi analitici usati nella valutazione dell'omogeneità di un materiale di riferimento devono essere rapidi e accurati ma soprattutto altamente riproducibili così da poter apprezzare la variabilità dovuta alla disomogeneità. Infatti, a questo stadio, non è importante determinare il valore "vero" della proprietà quanto piuttosto la dispersione dei valori misurati per quella stessa proprietà fra campioni raccolti dal lotto.

La spettroscopia di Risonanza Magnetica Nucleare (NMR) può fornire una valida alternativa ai metodi analitici tradizionali in virtù della sua alta selettività e velocità. La spettroscopia NMR è una tecnica che trova oggi numerose applicazioni nel campo della chimica degli alimenti<sup>[9,10,11]</sup>.

Tale tecnica, infatti, permette di analizzare matrici complesse come tessuti animali e vegetali e quindi è particolarmente adatta per la caratterizzazione di prodotti agro-alimentari. Mediante NMR è possibile la determinazione quantitativa e simultanea di diversi composti caratteristici della matrice. A tale scopo è necessario aver descritto completamente lo spettro NMR della matrice<sup>[12,13]</sup>, assegnato tutti i set di righe  $^1\text{H}/^{13}\text{C}$  (*chemical shift*  $\delta$ , costanti di accoppiamento  $J$ ) e aver quindi, individuato le



## Il laboratorio per la preparazione di materiali di riferimento

Il Laboratorio per la Preparazione di Materiali di Riferimento del Centro Ricerche ENEA Trisaia è stato progettato appositamente per la produzione di materiali a matrice agro-alimentare. Le apparecchiature di cui dispone consentono di trattare vegetali da molli a medio duri e sono realizzate con materiali che minimizzano i rischi di contaminazione da metalli e sostanze organiche.

Per la fase preliminare di riduzione della dimensione delle particelle del campione (triturazione) si dispone di una macchina trituratrice con vasca in PVC da 40 l e coltelli in teflon, collegata ad una centrifuga con filtro in teflon per la separazione di eventuali parti fibrose, semi ecc.

Per le matrici vegetali ad alto tenore di acqua, è prevista una successiva fase di concentrazione per allontanamento dell'acqua con evaporatore rotante. Questo sistema, lavorando a pressione ridotta, provoca l'abbassamento del punto di ebollizione del solvente e di conseguenza consente la distillazione a temperature in cui non avviene alcuna alterazione termica della matrice. Il distillato contiene le frazioni volatili evaporate insieme al componente principale e può essere utilizzato per ricostituire l'eventuale prodotto essiccato giungendo ad un prodotto finale che è molto prossimo alla matrice reale.

L'evaporatore rotante è costituito da un pallone di distillazione in vetro pyrex della capacità di 100 litri, inserito in un bagno termostatico; la serpentina di raffreddamento e i palloni di raccolta dell'estratto (20 l) sono sempre in vetro pyrex; i tubi usati per l'immissione, il recupero del prodotto e il lavaggio del pallone sono in teflon. L'apparecchio è gestito da computer interno che permette di impostare i parametri di pressione, la temperatura del bagno, il numero di giri del pallone (1-50 rounds per minutes - rpm), di visualizzare la temperatura del prodotto e identificare il ciclo di lavorazione, la data e la durata dell'operazione (figura 2).

Per il processo di essiccamento si dispone di due tipologie di attrezzature: un liofilizzatore ed una stufa termo-ventilata ad azoto. La liofilizzazione è un processo di essiccamento particolarmente indicato per le matrici agro-alimentari ed è quello che fornisce prodotti disidratati di migliore qualità dal momento che è il processo con il minor impatto sulla struttura del prodotto. Inoltre, i prodotti disidratati mediante liofilizzazione sono quelli che meglio riacquistano le loro caratteristiche originarie dopo reidratazione.

Il liofilizzatore Virtis SL 35 a disposizione ha una camera di liofilizzazione composta da sette ripiani in acciaio inossidabile (per un totale di 0,84 m<sup>2</sup> disponibili) su cui trovano posto i vassoi contenenti il prodotto da liofilizzare. La temperatura di liofilizzazione viene seguita da quattro termocoppie di tipo T in rame-costantana distribuite uniformemente nei vassoi. Il vuoto nella camera viene assicurato da una pompa da vuoto Leybold della capacità di 25 litri/ora. L'acqua di liofilizzazione viene raccolta in un condensatore tenuto alla temperatura di circa -45 °C, avente capacità di 35 l, e che può essere reso indipendente dalla camera di liofilizzazione. I vassoi in acciaio inossidabile che contengono il prodotto hanno dimensioni 24 × 50 × 5 cm e vengono riempiti formando strati inferiori ai 2 cm di prodotto per permettere una efficace liofilizzazione (figura 3).

L'apparecchio è gestito, in locale, da un computer interno su cui è possibile impostare tutte le fasi del processo, oppure da remoto con un computer esterno posto in una sala controllo appositamente preparata.

La macinazione viene effettuata per mezzo di un mulino (*vibro-energy*) a palle con vasca in poliuretano e mezzi macinanti in zirconio collegato ad un vibro-vaglio equipaggiato con setacci in nylon (o metallo).

Il sistema di mescolamento delle polveri per l'omogeneizzazione è costituito da un fusto in PET della capacità di 180 l posizionato su un carrello rotante. Tale sistema sfrutta i principi cinematici della rotazione e dell'inversione. Difatti, l'asse del fusto è allineato con la diagonale del cilindro delineato dal carrello, consentendo così l'inversione durante il moto di rotazione.

L'imbottigliamento viene realizzato con una macchina dosatrice per polveri. La macchina è costituita da un tavolo rotante per l'alimentazione delle bottiglie, il

**Figura 2**  
Evaporatore rotante



**Figura 3**  
Liofilizzatore

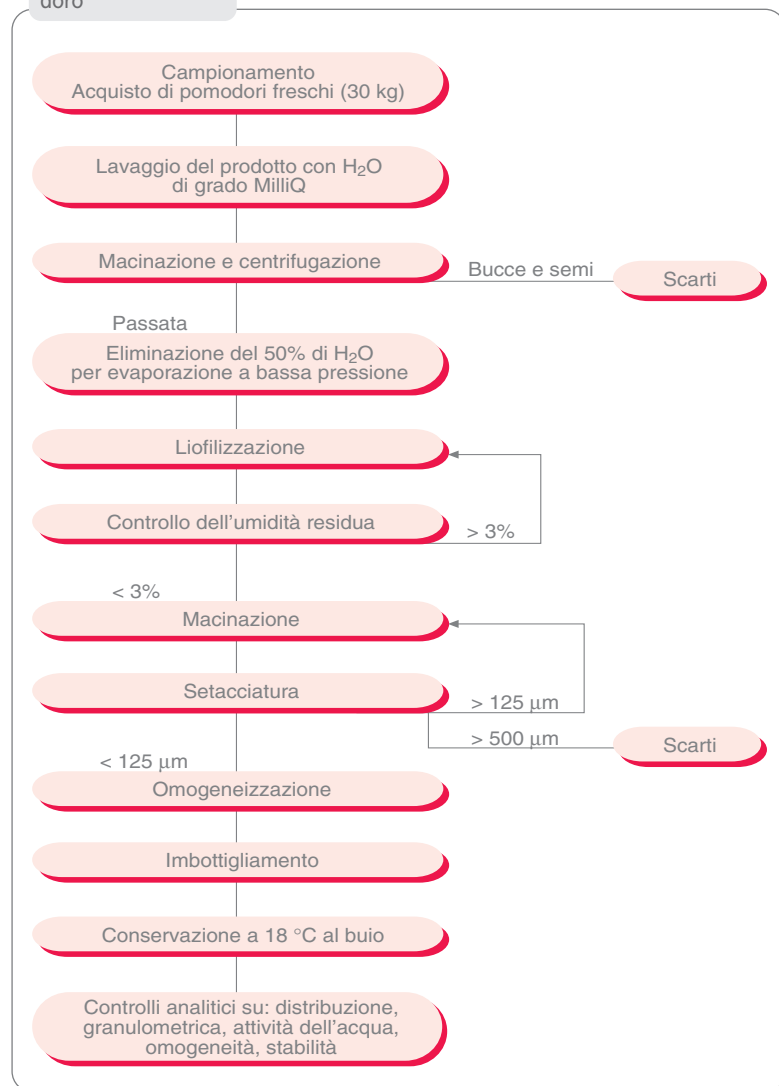
posizionamento sotto la dosatrice e lo scarico delle bottiglie piene al termine del ciclo produttivo. La dosatrice dispensa le polveri secondo programmi di pesatura definiti dall'utente e può essere tarata da 1 a 1000 g.

Il prodotto viene trasferito alla cella di carico tramite coclea o nastro trasportatore a seconda della natura delle polveri. Queste operazioni possono essere eseguite in atmosfera anidra di azoto o aria operando all'interno di una cabina predisposta opportunamente dalla cui sommità viene distribuito il gas voluto. La chiusura ultima delle bottiglie in atmosfera controllata viene effettuata all'interno della camera del liofilizzatore, laddove la possibilità di evacuare precedentemente l'atmosfera sovrastante il prodotto nelle bottiglie, consente di garantire la presenza del solo gas desiderato all'interno della bottiglia chiusa.

sostanze che, al tempo stesso, meglio rappresentano la matrice e dispongono delle righe di risonanza più idonee alla quantificazione. La sensibilità analitica, la precisione e la selettività della tecnica la rendono

particolarmente adatta al tipo di determinazione offrendo, inoltre, il vantaggio di una manipolazione ridottissima del campione analitico e di tempi di analisi contenuti.

**Figura 4**  
Schema di preparazione di un materiale a matrice "Pomodoro"



## Un caso studio: preparazione di un materiale di riferimento a matrice "pomodoro"

### Il processo

Le fasi di produzione e di controllo del processo, le macchine da utilizzare e l'individuazione dei punti critici sono state pianificate in dettaglio con l'ausilio di un diagramma di flusso rappresentato in figura 4. Il campionamento del materiale di partenza è stato fatto scegliendo bacche a grado di maturazione simile perché la concentrazione di zuccheri, che sono fra gli analiti scelti per lo studio dell'omogeneità mediante NMR, dipende fortemente dal grado di maturazione.

La fase di pre-trattamento prevede l'eliminazione delle parti estranee (foglie, peduncoli ecc.), il lavaggio del materiale per il controllo della contaminazione esogena e la macinazione del materiale, seguita da centrifugazione, per una prima, grossolana omogeneizzazione.

A questo punto il materiale è pronto per la fase di disidratazione. Nella preparazione del materiale a matrice "pomodoro" l'essiccazione avviene per liofilizzazione dopo una preliminare distillazione a pressione ridotta.

La distillazione a pressione ridotta permette di separare parte dell'acqua contenuta nella matrice vegetale e recuperare con essa alcuni dei componenti volatili che caratterizzano l'aroma dell'alimento.

Questo distillato si rivela utile nella ricostituzione del materiale liofilizzato, apportando parte di quei composti volatili che sarebbero altrimenti andati completamente persi con la liofilizzazione.

Successivamente il materiale solido disidratato è stato ridotto in polvere a granulometria controllata, omogeneizzato ed infine confezionato. Il prodotto è stato confezionato in bottiglie di vetro scuro e conservato a 18 °C (figura 5)<sup>[14]</sup>.

Durante il processo di preparazione, sono



**Figura 5**  
Materiale di riferimento a matrice "Pomodoro"

## Dati sperimentali

Sono stati selezionati 30 kg di pomodori della varietà "ciliegino", lavati con acqua a grado di purezza milliQ, macinati e centrifugati.

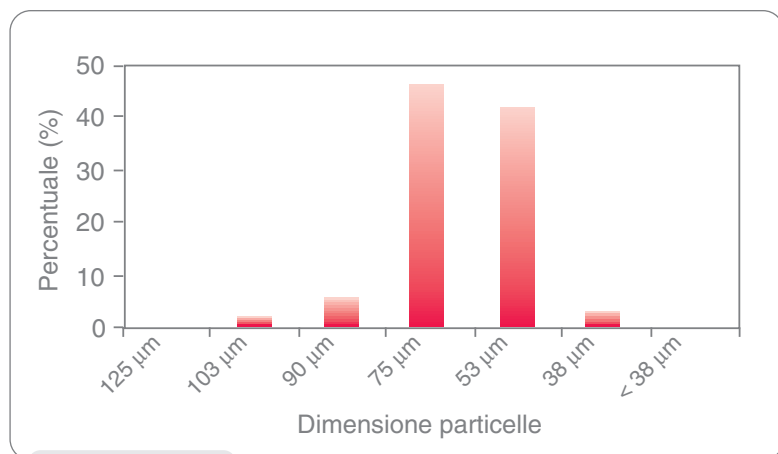
La purea di pomodoro è stata concentrata per allontanamento dell'acqua in essa contenuta mediante evaporazione a bassa pressione, secondo le seguenti condizioni operative: temperatura del bagno 60 °C, RPM = 15, pressione = -920 mbar. La temperatura del prodotto durante l'evaporazione si è mantenuta costante intorno a 35 °C, tempo di evaporazione circa 5 h. Il distillato è stato raccolto e conservato a 4 °C in tanica di PE. L'essiccamento è stato eseguito per liofilizzazione. Il prodotto concentrato è stato distribuito nei vassoi del liofilizzatore, rivestiti con fogli di polietilene, formando strati inferiori ai 20 mm e sistemati nel liofilizzatore VIRTIS SL 35.

A completamento del processo di liofilizzazione il campione, che presentava una attività residua dell'acqua pari  $a_w = 0,185$  a  $t = 20,6$  °C, è stato raccolto in una busta di polietilene. I risultati del processo di disidratazione sono riassunti nella tabella sottostante.

Il liofilizzato è stato macinato in un mulino a palle nella cui camera di macinazione sono stati aggiunti circa 20 kg di mezzi macinanti in zirconio. L'operazione è durata circa 15 minuti, al termine dei quali la polvere è stata convogliata ad un vibrovaglio dove sono state separate tre frazioni a 500, 125 e < 125  $\mu\text{m}$ . La frazione superiore a 500  $\mu\text{m}$  è stata scartata (il 2% del totale), quella compresa fra 500 e 125  $\mu\text{m}$  è stata riunita alla frazione inferiore e macinata nuovamente per 15 minuti. Infine, è stata raccolta la sola frazione a granulometria inferiore ai 125  $\mu\text{m}$ . La polvere di pomodoro liofilizzato è stata omogeneizzata in fusto rotante per circa 8 ore. Dopo l'omogeneizzazione sono state riempite 38 bottiglie da 25 g con l'apposita macchina dosatrice per polveri.

Le bottiglie sono state chiuse in atmosfera controllata. L'operazione si conduce all'interno del liofilizzatore grazie ad un particolare sistema di movimentazione dei ripiani. Nello specifico, le bottiglie sono state tenute in condizioni di vuoto inferiore a 20 mTorr ad una temperatura di 30 °C per 24 h. Questo passaggio consente una ulteriore disidratazione del prodotto e garantisce l'eliminazione di eventuale umidità riassorbita dal liofilizzato durante le fasi di lavorazione precedenti la chiusura delle bottiglie. Infine le bottiglie sono state chiuse e sigillate in atmosfera di aria anidra.

Massa prima della concentrazione con evaporatore rotante (kg)	Massa concentrata prima della liofilizzazione (kg)	Massa dopo la liofilizzazione (kg)	Resa in prodotto secco (%)
23,41	14,86	1,1	4,7



**Figura 6**  
Distribuzione granulometrica MR "Tomodoro"

stati previsti dei punti di controllo con raccolta di campioni dalla massa di materiale sottoposto a lavorazione per valutarne il contenuto di acqua libera residua, la granulometria, l'omogeneità.

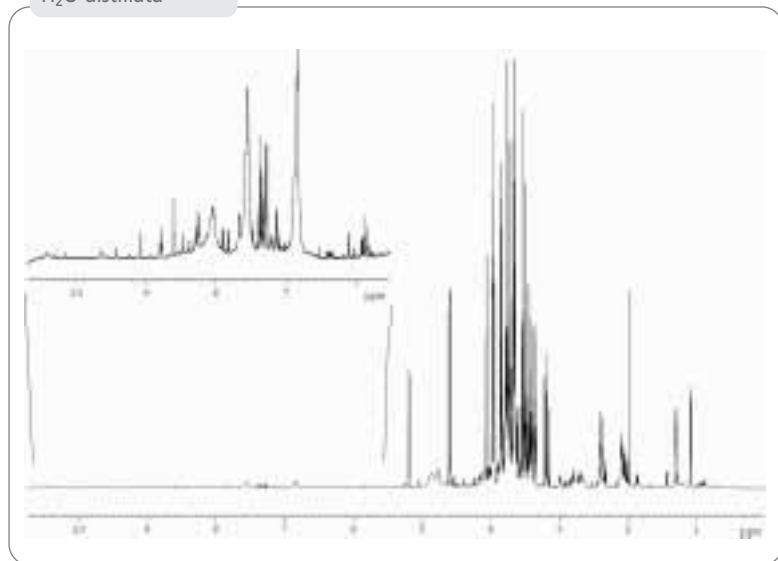
Dopo il confezionamento nelle singole unità sono stati eseguiti i controlli analitici sulla omogeneità fra unità.

## Controlli analitici

### Granulometria

Sul prodotto finale è stata misurata l'attività residua dell'acqua con uno strumento di misura che sfrutta la tecnica del punto di rugiada (Aqualab) e ne è stata determinata la distribuzione granulometrica. I dati di di-

**Figura 7**  
Pomodoro liofilizzato ricostituito con H<sub>2</sub>O distillata



stribuzione granulometrica sono riportati in figura 6.

Dai dati di distribuzione granulometrica riportati in figura 6, si evince che circa il 90% del materiale prodotto con questo metodo ha granulometria compresa fra 53 e 75 µm, con un massimo di distribuzione intorno a 75 µm.

### Caratterizzazione NMR della matrice

I campioni di passata e di liofilizzato di pomodoro e l'acqua estratta durante il processo di concentrazione della passata sono stati analizzati mediante NMR.

La caratterizzazione analitica di una sostanza naturale mediante NMR richiede un'assegnazione univoca delle righe dello spettro alle sostanze contenute nel campione. Per quanto riguarda il pomodoro una parziale assegnazione dello spettro <sup>1</sup>H NMR è stata effettuata da A. Sobolev et al.<sup>[15]</sup> e costituisce un primo passo per la realizzazione di un protocollo di analisi NMR di materiali di riferimento di pomodoro.

Gli esperimenti NMR sono stati eseguiti su campioni allo stato liquido. Allo scopo sono stati preparati degli estratti liquidi dei campioni di purea e liofilizzato di pomodoro per centrifugazione a 14000 rpm per 10 min. Agli estratti è stata aggiunta, in rapporto 1:2, una soluzione tampone di fosfato in D<sub>2</sub>O (600 mM, pD 6,5), contenente DSS 0,1% come standard interno. I campioni sono stati posti in tubi standard per NMR da 5 mm e analizzati utilizzando un probe TXI.

Nelle figure 7 e 8 sono riportati, rispettivamente, gli spettri protonici del liofilizzato di pomodoro ricostituito con acqua distillata e con l'acqua ottenuta dal processo di concentrazione

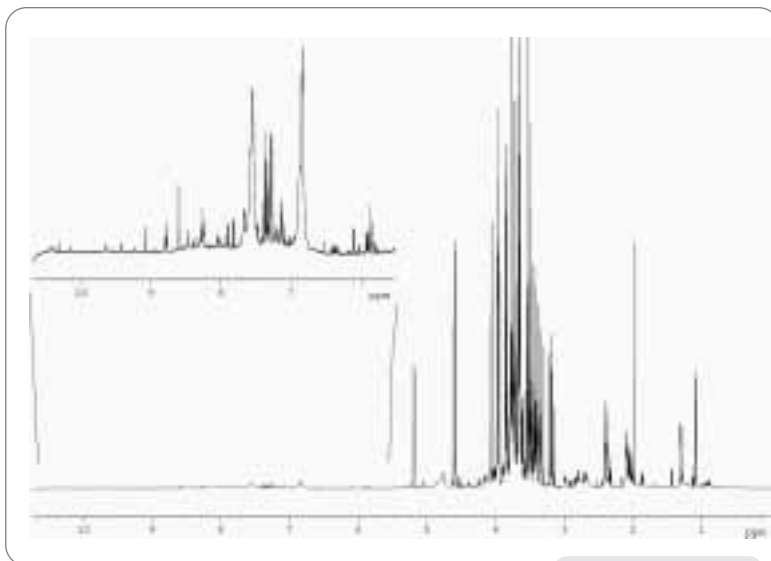
I due spettri sono abbastanza simili e differiscono solo per alcuni segnali. In figura 9 sono riportate in scala espansa le regioni dello spettro in cui tali differenze sono evidenti. Nella figura gli spettri ottenuti dal liofilizzato ricostituito con due diversi tipi di acqua sono messi a confronto con lo spet-

tro dell'acqua proveniente dal processo di distillazione a pressione ridotta. Da tale confronto emerge che le differenze fra i due spettri sono imputabili alla semplice aggiunta delle sostanze contenute nell'acqua estratta.

Dall'analisi dello spettro  $^1\text{H}$  NMR dell'acqua estratta si evince la presenza di metanolo, etanolo, 1-metossietanolo e di alcune sostanze aromatiche che sono responsabili dell'aroma. Tali sostanze sono state identificate nello spettro mediante alcuni esperimenti bidimensionali in particolare COSY ed Eterocorrelata che sono mostrati rispettivamente nelle figure 10a e 10b.

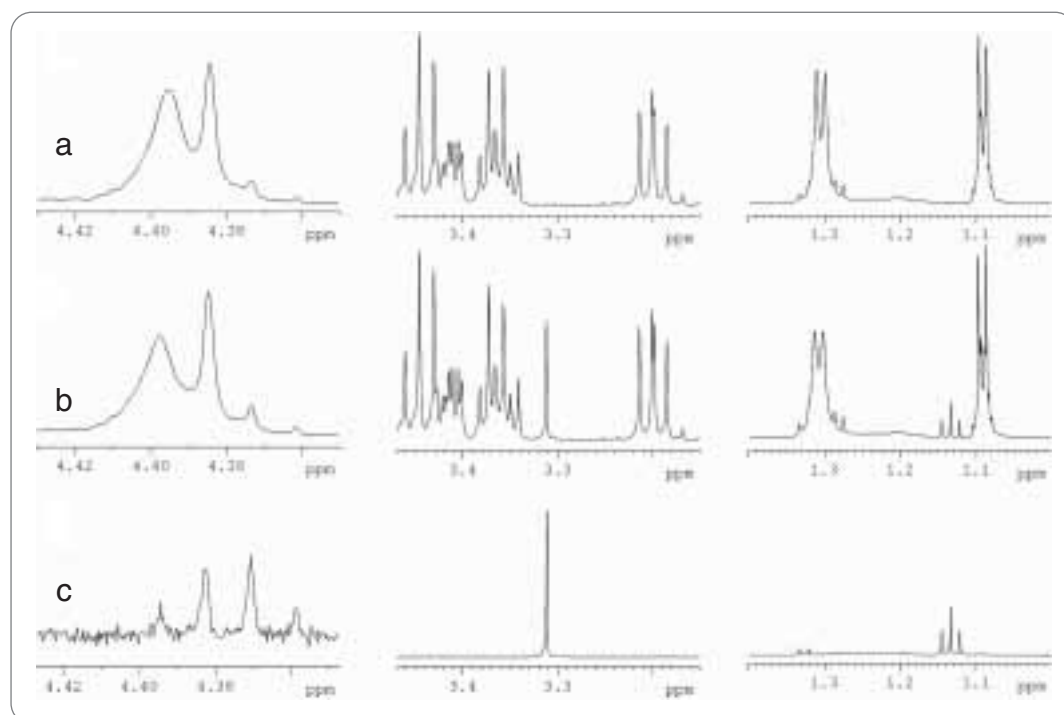
Dal confronto con gli spettri di purea di pomodoro fresco, emerge la sostanziale coincidenza con lo spettro del campione di pomodoro liofilizzato ricostituito con l'acqua estratta dai pomodori stessi. Lo spettro del pomodoro fresco, infatti, contiene riconoscibili i segnali del metanolo e dell'etanolo mentre i segnali di altre molecole, presenti nell'acqua estratta, sono nascosti dalle righe di risonanza più intense dei costituenti principali del pomodoro.

L'analisi NMR rivela pertanto la qualità del

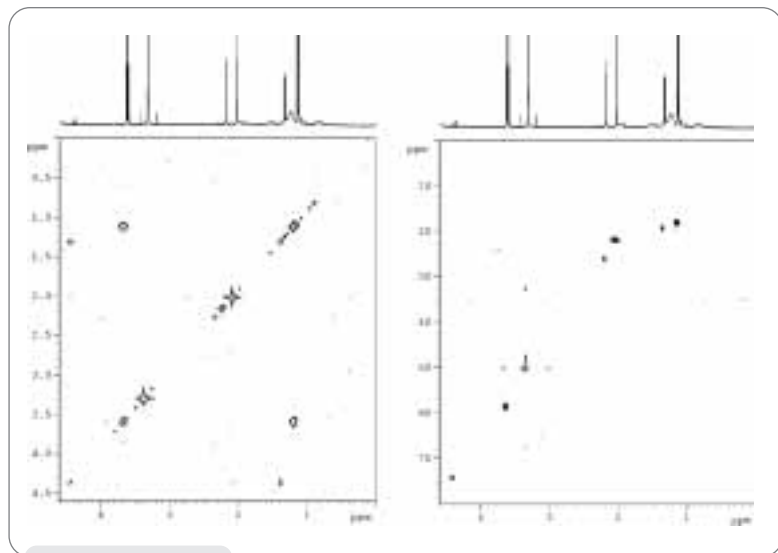


**Figura 8**  
Pomodoro liofilizzato ricostituito con il distillato dalla matrice

processo di liofilizzazione del pomodoro. Infatti, non ci sono variazioni sostanziali nel profilo molecolare di quest'ultimo rispetto a quello registrato per il pomodoro fresco e questo ci garantisce di aver preservato la matrice. Inoltre, le trascurabili differenze fra il prodotto fresco e quello liofilizzato vengono ulteriormente ridotte andando a ricostituire il liofilizzato con l'acqua estratta dalla matrice stessa con il processo di evapora-



**Figura 9**  
Espansioni degli spettri di: a) pomodoro liofilizzato ricostituito con  $\text{H}_2\text{O}$  distillata; b) pomodoro liofilizzato ricostituito con il distillato dalla matrice; c) distillato estratto dalla matrice



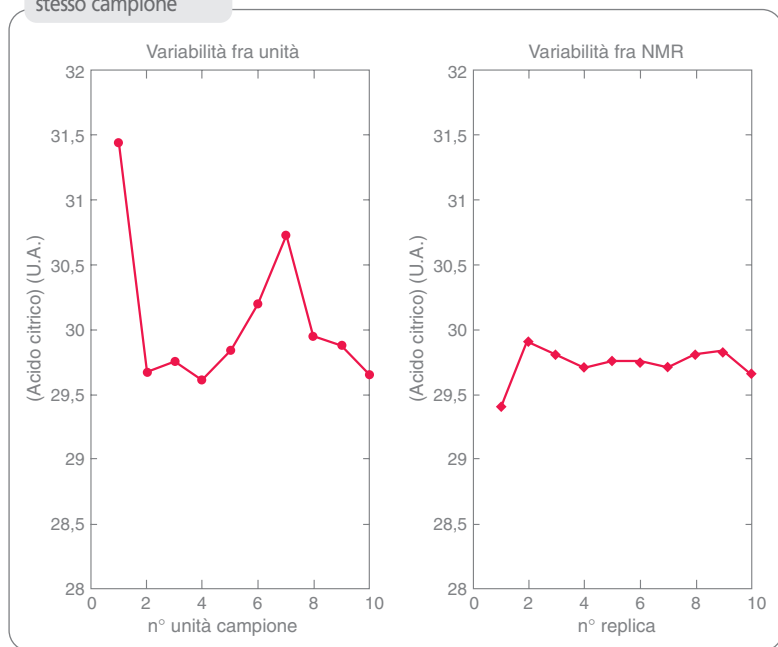
**Figura 10**  
Spettri bidimensionali del distillato estratto dalla matrice

zione a pressione ridotta. Questo aspetto della conservazione delle proprietà della matrice è particolarmente importante nel settore dei materiali di riferimento, dal momento che essi servono a garantire agli utilizzatori di avere un prodotto che, stabile ed omogeneo, riproduce al meglio le caratteristiche chimiche e fisiche della matrice reale "fresca" oggetto di indagine.

**Figura 11**  
L'omogeneità del MR pomodoro è confrontata con la variabilità intrinseca del metodo di misura, ricavata dall'analisi di 10 ripetizioni dello stesso campione

#### Valutazione dell'omogeneità

Per lo studio della omogeneità sono stati



registrati gli spettri protonici del succo estratto dal pomodoro liofilizzato prelevato da 10 bottiglie campione (circa 17 mg di materiale solido in polvere per ogni estratto). La durata totale del singolo esperimento è di circa 10 minuti. La serie di 10 spettri contiene informazioni sull'omogeneità di tutti i metaboliti principali contenuti nei campioni. L'estrazione di tale informazione richiede l'analisi numerica dello spettro ed in particolare il calcolo dell'area delle righe corrispondenti agli analiti di interesse. In questo lavoro sono stati quantificati quattro metaboliti ( $\alpha$ -glucosio,  $\beta$ -glucosio, acido lattico, acido citrico) che presentano righe ben risolte nello spettro NMR. Questa non è una condizione vincolante per la quantificazione dello spettro anche se righe risolte presentano minori difficoltà di valutazione. Il calcolo dell'area di ciascuna riga relativa ai quattro metaboliti è stata effettuata mediante la simulazione dello spettro con una sovrapposizione di Lorentziane.

In figura 11 l'omogeneità del MR pomodoro è confrontata con la variabilità intrinseca del metodo di misura, ricavata dall'analisi di 10 ripetizioni dello stesso campione. La variabilità del metodo è stata valutata dell'ordine dello 0,6% per tutti gli analiti considerati (è da sottolineare che uno dei vantaggi della NMR è quello di fornire determinazioni analitiche di più metaboliti con errori di misura confrontabili). Un coefficiente di variazione medio del 2% è stato rilevato nei campioni provenienti da diverse bottiglie.

## Conclusioni

L'aumento nel volume degli scambi commerciali a livello internazionale ha reso evidente, oggi più che in passato, la necessità di migliorare l'accuratezza delle misure, a causa delle conseguenze economiche degli errori e delle dispute originate dal disaccordo nei risultati. Tale necessità è resa ancora più pressante dall'accentuato interesse per il controllo dell'ambiente e per la protezione dei consumatori.

Un'adeguata verifica degli strumenti e dei metodi usati nella pratica analitica può contribuire notevolmente a migliorare tale situazione.

Anche i materiali di riferimento possono dare un valido contributo, in quanto lo sviluppo di nuovi materiali e la loro disponibilità su vasta scala sono dei momenti della massima importanza per stabilire e mantenere la qualità nelle analisi chimiche, sia dei costituenti principali, sia degli elementi in traccia. Quanto detto è particolarmente vero per la caratterizzazione chimica degli alimenti per la quale i materiali di riferimento forniscono un significativo contributo al controllo della loro qualità e sicurezza.

In questo lavoro è stato descritto il processo di produzione e di caratterizzazione analitica preliminare di un materiale di riferimento di lavoro a matrice "pomodoro".

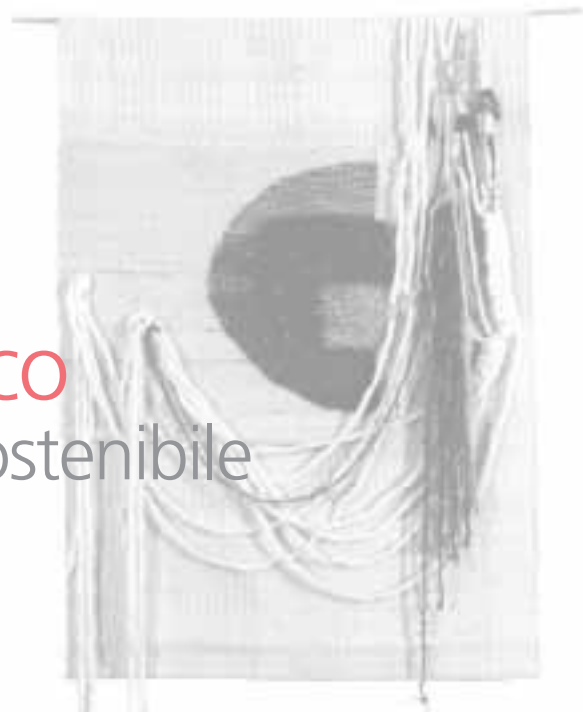
L'omogeneità e qualità del materiale sono stati valutati con una tecnica analitica innovativa quale la NMR che ha mostrato l'alto grado di coincidenza con la matrice iniziale fresca, soprattutto laddove il liofilizzato venga ricostituito con l'acqua estratta dalla stessa matrice, e la soddisfacente omogeneità del materiale ottenuto in accordo con la misura della distribuzione granulometrica.

L'attività di preparazione e di caratterizzazione può risultare estremamente utile considerando che non solo c'è bisogno di nuovi materiali, che soddisfino una maggiore varietà di necessità analitiche, ma anche di dati migliori, per quanto riguarda accuratezza e precisione, nei materiali di riferimento esistenti.

## Bibliografia

1. URIANO G.A., GRAVATT C.C., *CRC Crit. Rev. Anal. Chem.*, 6, 361, 1977.
2. BIANCIFIORI M.A., MADARO M., *Reference Materials - An assessment of the present situation*, ENEA RT/INN/90/13.
3. ISO Guide 30, 1992. *Terms and definitions used in connections with reference materials*.
4. ISO Guide 32, 1997. *Calibration in analytical chemistry and use of certified reference materials*.
5. KRAMER K.J.M. KRAMER G.N., MUNTAU H., *Practical Manual for the Production of Laboratory Reference Material*, Mermayde - Bergen (NL), 2001.
6. PAUWELS J., LAMBERTY A., SCHIMMEL H., "Homogeneity testing of reference materials", *Accred. Qual. Assur.*, 3 : 51-55, 1998.
7. LISINGER T.P.J., PAUWELS J., VAN DER VEEN A.M.H., SCHIMMEL H., LAMBERTY A., "Homogeneity and stability of reference materials", *Accred. Qual. Assur.*, 36 : 20-25, 2001.
8. VAN DER VEEN A.M.H., LISINGER T.P.J., PAUWELS J., "Uncertainty calculations in the certification of reference materials. 2. Homogeneity study", *Accred. Qual. Assur.*, 6 : 26-30, 2001.
9. PFEFFER P.E., GERASIMOWICZ W.V., *Nuclear Magnetic Resonance in Agriculture*, CRC Press, 1989.
10. BELTON P.S., HILLS B.P., WEBB G.A. (editors), *Advances in Magnetic Resonance in Food Science*, RSC, 1999.
11. BIANCIFIORI M.A., LAMANNA R., MANNINA L., SEGRE A., "La Risonanza Magnetica Nucleare nel campo agro-alimentare", *Energia, ambiente e innovazione*, 2/2001, 46-58.
12. PAULI G.F., "qNMR - A versatile concept for the validation of natural product reference compounds", *Phytochem. Anal.* 12, 28-42, 2001.
13. MANIARA G., RAJAMOORTHY K., SRINIVASAN R., STOCKTON G.W., "Method performance and validation for quantitative analysis by  $^1\text{H}$  and  $^{31}\text{P}$  NMR spectroscopy. Application to analytical standards and agricultural chemicals", *Anal. Chem.* 70, 4921-4928, 1998.
14. GIOVANNELLI G., PARADISO A., "Stability of dried and intermediate mixture tomato pulp during storage", *J. Agric. Food Chem.* 2002, 50, 7277-7281.
15. SOBOLEV A., SEGRE A., LAMANNA R., "Proton high-field NMR study of tomato juice", *Magnetic Resonance in Chemistry*, 41 : 237-245, 2003.

# Il solare fotovoltaico per una architettura sostenibile



Il solare fotovoltaico svolge un ruolo sempre più diffuso in architettura. Sta diventando una reale necessità per chi progetta e costruisce, e stimola tecnici e ricercatori a realizzare soluzioni innovative efficaci e di pregio

**FRANCESCO PAOLO VIVOLI**  
**ALESSANDRA SCOGNAMIGLIO**

ENEA  
UTS Fonti Rinnovabili  
e Cicli Energetici Innovativi



## Le premesse per il successo di una nuova tecnologia

La tecnologia fotovoltaica sta oggi vivendo un momento particolarmente felice. Tra le energie alternative a quelle fossili oltre che rinnovabili, che tendono in prospettiva a garantire una fonte inesauribile di approvvigionamento energetico, l'energia solare è quella che meglio risponde al requisito sempre più pressante di soddisfacimento dei bisogni energetici dell'uomo in maniera compatibile con l'ambiente. L'energia elettrica prodotta dai moduli fotovoltaici può essere utilizzata:

- per alimentare strutture impiantistiche di servizio isolate e stoccata in batterie: è questo il caso di impianti "ad isola", lontani dalla rete pubblica di distribuzione;
- per l'immissione in rete, è il caso degli impianti funzionanti in parallelo alla rete di distribuzione, con cui scambia energia, cedendola nei momenti in cui la produzione eccede i consumi, e recuperandola nelle ore di bassa produzione;
- per alimentare la rete interna e gli apparecchi elettrici di edifici unifamiliari; oppure, nel caso di edifici destinati ad uffici, ad integrazione della richiesta energetica nei momenti di picco di consumo elettrico.

L'industria energetica sta sviluppando la ricerca di impianti e componenti di avanguardia, che tendono a consentirne uno sfruttamento efficace ed economico. In tal senso i sistemi fotovoltaici che possono essere integrati negli involucri edilizi, o che possono trovare applicazione nell'ambito delle infrastrutture urbane – quali barriere antirumore, lampioni, pensiline delle fermate della rete dei trasporti di superficie o dei parcheggi – giocano un ruolo significativo.

La varietà delle modalità di integrazione dei sistemi fotovoltaici in architettura fa capo alla possibilità di impiegare componenti speciali o sistemi di montaggio estremamente diversificati per le varie applicazioni quali coperture inclinate, coperture

piane, coperture curve, facciate, frangisole. È utile notare che, pur ricorrendo ad una stessa tipologia di applicazione, i livelli di integrazione possono essere diversi. Infatti, in via del tutto generale, si può dire che le applicazioni possibili vanno dalla semplice sovrapposizione dei sistemi fotovoltaici sui componenti edili tradizionali, alla loro parziale integrazione in essi, alla totale integrazione (con la conseguente completa sostituzione dei componenti edili tradizionali).

## Fotovoltaico ed architettura, un interessante binomio

Ciò che ha indubbiamente frenato la diffusione delle applicazioni fotovoltaiche fino ad oggi è stato l'elevato costo di questa tecnologia. Con i programmi di incentivazione pubblica recentemente lanciati in diversi paesi, oltre all'abbattimento immediato dei costi dovuto ai contributi economici, si conta di dare avvio a quelle economie di scala e a quelle innovazioni di processo e di prodotto che dovrebbero rendere le aziende che operano in questo settore un po' meno dipendenti dall'aiuto pubblico e consentire loro, in un futuro non lontano, di diventare competitive sul mercato. È ormai chiaro come a rappresentare il segmento di mercato più interessante siano gli impianti di piccola taglia connessi alla rete elettrica di distribuzione (denominati anche impianti per generazione diffusa connessa a rete) e, specialmente, quelli integrati in architettura.

I vantaggi derivanti dall'impiego di sistemi fotovoltaici di questo tipo sono di diversa natura. In primo luogo il ricorso a sistemi fotovoltaici connessi alla rete elettrica, nel caso di una considerevole generazione diffusa, consente di sopperire ai picchi di domanda che si verificano nelle ore diurne a causa dei forti consumi dovuti al funzionamento degli esercizi commerciali o degli ambienti di lavoro, sulla cui domanda grava l'impiego di potenti sistemi di condizionamento dell'aria (si tenga conto che l'ener-

già consumata nelle fasce orarie di punta risulta essere la più costosa); e di produrre energia elettrica nel luogo in cui viene consumata, modulandola sulle esigenze dell'utenza, con una conseguente minore necessità di potenziare le linee di trasformazione. A ciò si aggiunga che la possibilità di impiego di superfici marginali degli edifici o la completa integrazione nelle strutture edili consente di evitare l'occupazione di suolo da parte del sistema (si pensi alla notevole estensione delle grandi centrali fotovoltaiche); e che, inoltre, si evitano perdite di energia dovute alla distribuzione, in quanto l'energia elettrica viene utilizzata nello stesso luogo in cui viene prodotta.

Sul fronte strettamente inerente il campo della progettazione architettonica e delle costruzioni di involucri è da dire che:

- l'impiego di sistemi fotovoltaici integrati negli involucri edilizi si coniuga con l'elaborazione di soluzioni progettuali ispirate ai principi della progettazione bioclimatica, che intende massimizzare gli apporti solari e ridurre al minimo il consumo di energia legato al raggiungimento e mantenimento del comfort termico degli involucri;
- mediante una corretta progettazione l'utilizzo multifunzionale del componente foto-

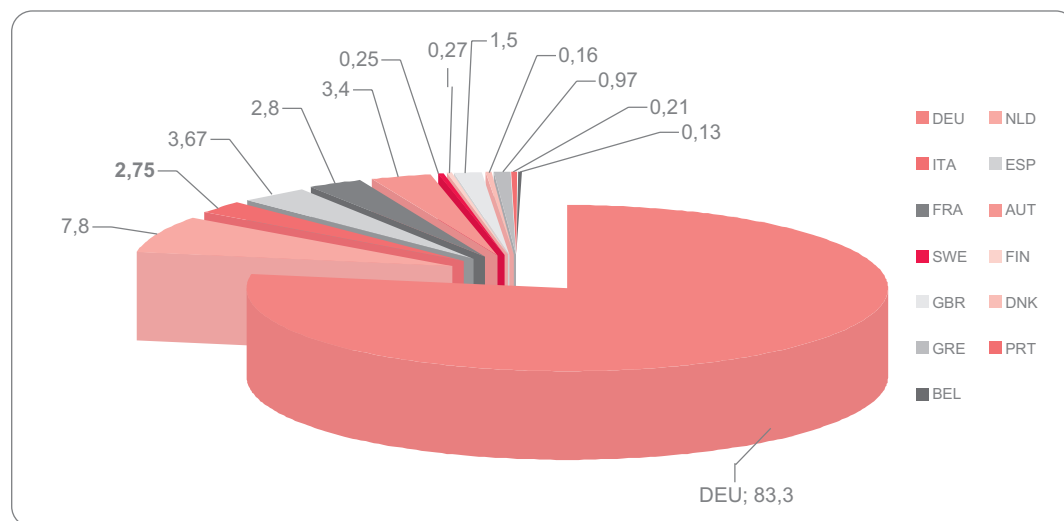
voltaico può incidere favorevolmente sulle prestazioni termiche dell'involucro, ed è possibile, anche, prevedere modalità di recupero dell'energia termica prodotta dal surriscaldamento del retro dei moduli;

- si possono ridurre, in una certa misura, i costi di costruzione (risparmio sulle strutture di supporto e risparmio sui materiali da costruzione), e quelli di installazione dei sistemi fotovoltaici;
- i componenti fotovoltaici possiedono caratteristiche di modularità e di alta integrabilità (compatibilità con tecnologie edilizie tradizionali), pertanto il loro impiego è compatibile con i moderni processi di produzione e costruzione;
- i tempi di ritorno energetico ed economico dei sistemi fotovoltaici sono compatibili con i tempi di vita degli edifici.

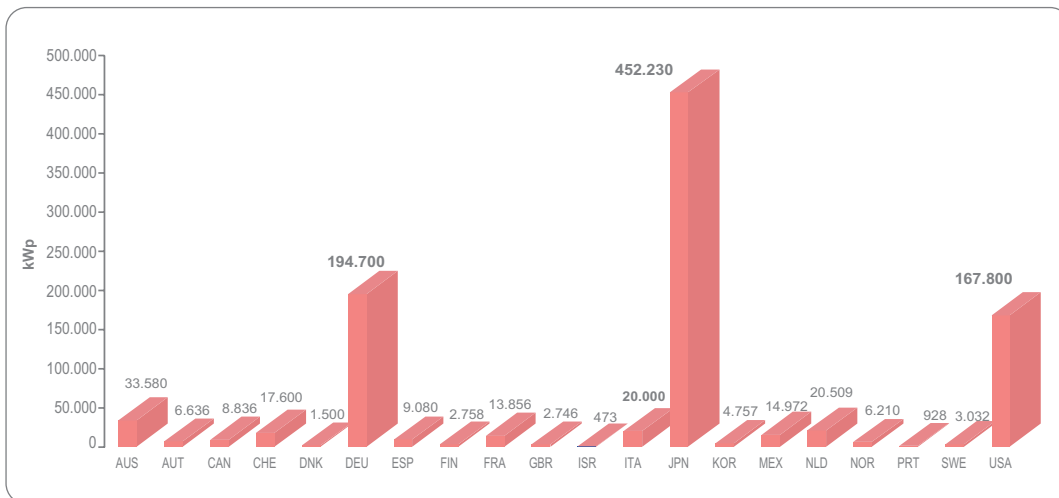
Relativamente a quest'ultimo punto, esperienze ed analisi condotte da autorevoli organismi mostrano che la durata dei sistemi fotovoltaici è compatibile e paragonabile alla durata degli edifici ed ai loro intervalli di tempo di manutenzione. A questo proposito, è da evidenziare che la rapida evoluzione tecnica e industriale degli ultimi anni ha determinato il mutamento dei requisiti e delle caratteristiche dei manufatti edili. Si valuta oggi che, dopo circa 50-60 anni, per

**Grafico 1**

Potenza totale degli impianti solari fotovoltaici installati in 13 paesi dell'Unione Europea nel 2002 (in MWp)



<sup>1</sup> I primi sistemi realizzati a scopo sperimentale hanno già, pur realizzati con tecnologie ormai superate, una vita di almeno 25 anni e continuano a fornire la stessa energia di cui ai primi anni di vita.

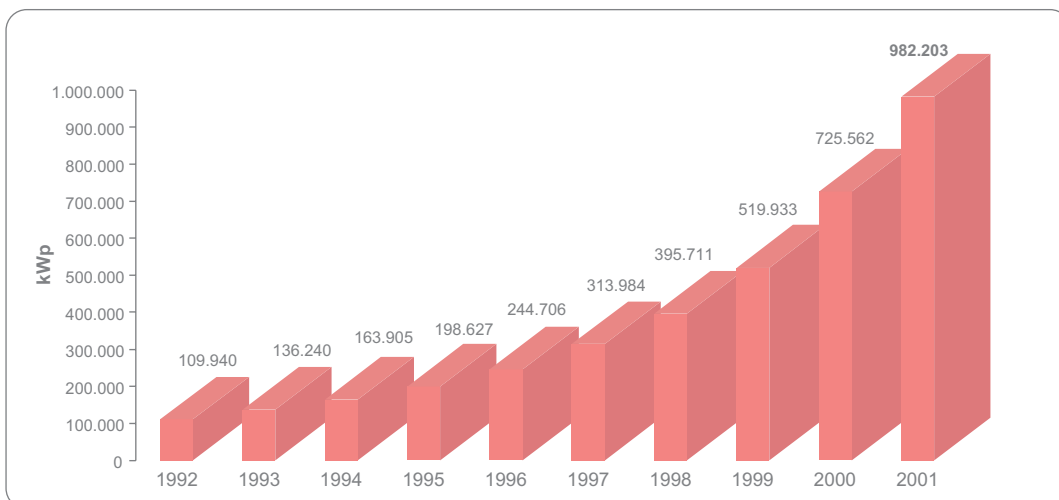


**Grafico 2**  
Potenza cumulata degli impianti solari fotovoltaici installati nei paesi OCSE al 2001 (in kWp)

edifici particolarmente complessi e dall'alto contenuto tecnologico, il costo di manutenzione sarebbe superiore al costo di demolizione e riciclaggio delle sue parti componenti. Questo se confrontato con la durata di circa 30 anni finora stimata dei moduli fotovoltaici in silicio cristallino<sup>1</sup>, farebbe coincidere i cicli della manutenzione straordinaria, o addirittura della demolizione e sostituzione dell'edificio, con quelli di vita del materiale fotovoltaico. Infatti la durata di vita del fotovoltaico potrebbe essere anche maggiore dei 30 anni, perché dal punto di vista fisico non esiste alcun motivo per cui il silicio od il vetro debbano degradarsi prima.

Nell'ottica dello sviluppo sostenibile del pianeta, il fotovoltaico potrebbe giocare un

ruolo di tutto rispetto, consentendo di fornire energia elettrica pulita a partire da una fonte rinnovabile sufficiente per i consumi di miliardi di esseri umani. Al modello attuale di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica ne subentrerebbe uno nuovo basato su una decentralizzazione molto spinta del sistema di generazione, in cui la produzione ed il consumo possono essere l'una vicina all'altro. Molti argomenti giocano a favore di questa ipotesi: la riduzione delle perdite di energia dovute alle linee elettriche, la limitazione delle linee ad altissima tensione, a rilevante inquinamento visivo ed elettromagnetico, la liberalizzazione del mercato elettrico che offre nuove possibilità di vendita ed acquisto libero di elettricità, così come avviene per la



**Grafico 3**  
Potenza totale degli impianti solari fotovoltaici installati nei paesi OCSE dal 1992 al 2001 (in kWp)

maggior parte degli altri beni di consumo. In un tale scenario, è molto probabile che la produzione d'elettricità a partire dalla conversione fotovoltaica, in piccole unità distribuite, ma collegate alla rete elettrica, avrà un ruolo importante da giocare, e che per la gran parte le applicazioni saranno costituite da sistemi integrati negli involucri edilizi. In concomitanza alla creazione di un vero mercato è, a breve termine, previsto lo sviluppo di nuovi prodotti con requisiti tecnici migliorati e costi sempre più competitivi, e, inoltre si moltiplicherà la disponibilità di componenti innovativi specificamente pensati per l'integrazione in architettura, come ad esempio elementi fotovoltaici realizzati su supporti flessibili, su supporti policromatici riflettenti o trasparenti, su supporti in materiali naturali.

### Ricerche per la diffusione del fotovoltaico in architettura

A grandi linee, le ricerche finora condotte nell'ambito dell'applicazione e della diffusione di sistemi fotovoltaici in architettura attengono principalmente a due filoni: il primo incentrato sulla prefabbricazione, il secondo orientato a migliorare l'accettabilità del fotovoltaico, curandone la valenza estetica (intesa anche come valore aggiunto). È, ovviamente, comune a entrambi i filoni di ricerca l'esigenza di attuare una progressiva riduzione dei costi, senza la quale non sarà possibile un'apprezzabile diffusione di questa tecnologia.

Le ricerche sulla prefabbricazione indagano la possibilità di inserire il fotovoltaico nei normali processi di produzione edilizia, in modo da ridurne i costi di produzione. Esse si concentrano sulla ricerca e sperimentazione di sistemi innovativi altamente funzionali a bassa tecnologia realizzabili in

processi industriali (rispondenza a requisiti edili), e sulla messa a punto di kit per interventi retrofit e BIPV (compatibilità con tecnologie e sistemi costruttivi tradizionali).

Le ricerche sull'accettabilità dei sistemi fotovoltaici, relativamente agli aspetti visivi, indagano la possibilità di impiegare i moduli fotovoltaici per l'edilizia come elementi che siano in grado di migliorare l'aspetto degli edifici: esse si concentrano, in linea di massima, sulla sperimentazione di componenti innovativi, cosiddetti "ad alta valenza estetica" e sull'individuazione degli elementi peculiari della tecnologia fotovoltaica che, opportunamente disegnati, possano concorrere a migliorare l'aspetto dei componenti (moduli e celle).

In ambito europeo molteplici sono i progetti di ricerca orientati in tal senso; a titolo di esempio, se ne possono citare due sviluppati nel corso degli ultimi anni, il primo incentrato sulla prefabbricazione (PRIDE), il secondo sullo sviluppo di componenti fotovoltaici ad alta valenza estetica (BIMODE).

Il progetto PRIDE (Prefabrication of Roof Integrated PV systems), iniziato nell'aprile del 1997 e conclusosi nel febbraio del 2000, si era posto come obiettivo l'inserimento del fotovoltaico nei normali processi di produzione edilizia a bassa tecnologia mediante lo sviluppo di un componente prefabbricato per l'integrazione in coperture inclinate<sup>2</sup>. I partner erano una compagnia di ricerca e consulenza, la Ecofys; un produttore di elementi per tetti, la Unidek; una compagnia elettrica, la RWE; l'ENEL; un contraente associato, la Ove Arup & Partners, con funzione di consulenza sull'ingegnerizzazione; un consulente sull'industrializzazione edilizia designato dalla Ecofys, la Hullmann Willkomm & Partners; un consulente sull'integrazione di sistemi solari nel costruito, sempre designato dalla

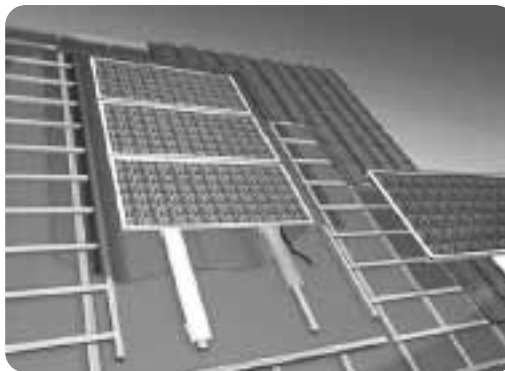
<sup>2</sup> Molto interessante, nel campo delle ricerche sullo sviluppo e sperimentazione di componenti fotovoltaici prefabbricati per l'edilizia, è anche un altro progetto europeo, denominato *PV Starlet*, incentrato sullo sviluppo e produzione di una lastra piana fotovoltaica adatta ad un buon numero di tegole differenti diffuse in Europa. Partner del progetto sono nove società, costituite da produttori di tegole e materiali per tetti e produttori di strutture metalliche. Al momento sono stati messi a punto due prototipi adatti, rispettivamente, all'impiego con tegole piane e tegole curve. Si veda B. Gaiddon: *PV-Starlet The development of a PV tile at a European level*, presentato alla conferenza "PV in Europe - From PV technology to energy solutions" (Roma, 7-11 ottobre 2002).

Ecofys, la Roy Gelders Architects.

Il maggiore risultato del progetto PRIDE è stato la messa a punto di un prodotto commerciale denominato UniSole, caratterizzato da bassi costi ed alta qualità, caratteristiche che gli hanno fatto meritare apprezzamenti sia da parte degli utenti che delle imprese edili (figura 1).

Sul fronte della valenza estetica, il progetto BIMODE (DEvelopment of BI-functional photovoltaic MOdules for building integration), iniziato nel dicembre del 1997 e conclusosi nel novembre 1999, si poneva come obiettivo quello di sviluppare una gamma di moduli fotovoltaici adatti all'integrazione in facciata, che dessero un utile contributo in termini di energia elettrica all'edificio, e fossero disegnati in modo da valorizzarne anche l'aspetto (è in questo senso che si trattava di moduli bifunzionali: generatori elettrici ed elementi decorativi della facciata). Per rispettare la prima condizione era stato stabilito un limite minimo di rendimento elettrico dei moduli da sviluppare pari all'8% (in realtà tutti i prototipi realizzati, ad eccezione di quello esagonale, hanno un'efficienza compresa tra il 6,3 ed il 12,1%). Particolarmente interessante è stata la composizione del team di ricerca, che testimonia la necessità di un approccio multidisciplinare al tema dell'integrazione del fotovoltaico in architettura. Partner del progetto erano: la BP Solarex, con funzione di coordinamento del progetto; la Kunsthochschule für Medien di Colonia, per il design; l'Atmoinstitut of the Austrian Universities, per l'ottimizzazione del *design* delle celle ai fini del rendimento energetico; la Ove Arup & Partners, per la consulenza architettonica; la TFM (Teulades y Façades Multifunctionales) di Barcellona per la produzione dei moduli; la Bayer AG per la fornitura dei *wafers*; la IES (Universidad Politecnica de Madrid) per le simulazioni teoriche.

Nell'ambito di questo progetto sono stati messi a punto sei differenti prototipi, rapportabili a due tipologie. La prima di esse



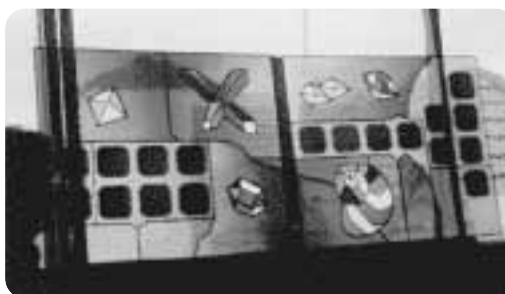
**Figura 1**

UniSole, sistema fotovoltaico prefabbricato per integrazione in copertura inclinata messo a punto nell'ambito del Progetto PRIDE

ha indagato la possibilità di ibridare due differenti processi produttivi, quello del fotovoltaico e quello dell'arte vetraia, realizzando come prodotto finale alcuni pannelli vetriati decorati fotovoltaici. La seconda, invece, ha indagato i gradi di libertà offerti ai designer dal fotovoltaico (colore e forma delle celle, aspetto delle griglie e dei contatti elettrici).

Relativamente alla prima tipologia, per il primo prototipo l'idea era integrare due elementi tra di loro completamente differenti ed estranei, quali i pannelli in vetro decorati (risultato dell'interazione tra l'arte della lavorazione del vetro e la pittura su vetro), e moduli fotovoltaici; è stato disegnato un tradizionale pannello vetrato per finestra con elementi ornamentali figurativi, nel quale sono state integrate delle celle fotovoltaiche standard con connessioni standard (figura 2). In un altro caso è stata combinata la tecnologia del vetro fuso con quella fotovoltaica; sono stati realizzati due moduli colorati in vetro fuso che integrano celle fotovoltaiche standard (figura 3).

In riferimento alla seconda tipologia di moduli, sono stati realizzati: un modulo trian-

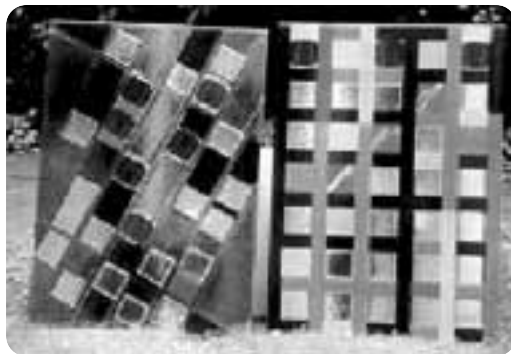


**Figura 2**

Modulo fotovoltaico in pannello vetrato progettato nell'ambito del Progetto BIMODE (design del prof. Jürgen Claus)

**Figura 3**

Modulo fotovoltaico in pannello in vetro fuso progettato nell'ambito del progetto BIMODE (design del prof. Hellmuth Costard)



golare composto da celle triangolari di colori blu scuro, blu acciaio, oro e magenta, disposte in modo da ottenere un motivo geometrico decorativo; un modulo rettangolare allungato con strisce di celle alternate di forma rettangolare e quadrata, di colore magenta ed oro; un modulo "cubico" composito realizzato con tre laminati fotovoltaici romboidali ognuno con celle monocristalline di colore differente (blu scuro, blu acciaio ed oro), che, assemblati insieme, contribuiscono a conferire al modulo l'effetto tridimensionale di un cubo; un modulo con celle monocristalline esagonali di colore verde e pattern dei contatti elettrici sinusoidale (i contatti elettrici seguono la forma del confine tra le celle).

A ben vedere, fermo restando l'interesse di questa ricerca, non poche perplessità suscitano gli esperimenti di ibridazione tra la tecnologia fotovoltaica e quella dell'arte vetraria, in primo luogo per la penalizzazione eccessiva arrecata agli aspetti energetici e, inoltre, per ragioni legate alla scarsa ripetibilità dell'esperienza ed all'approccio metodologico.

**Figura 4**

Componente vetrato frangisole SGG-PROSOL con celle ERSOL rot



In particolare, prendendo a prestito le parole di Adolf Loos, si potrebbe obiettare che "ogni materiale possiede un linguaggio formale che gli appartiene e nessun materiale può avocare a sé le forme che corrispondono a un altro materiale. Perché le forme si sono sviluppate a partire dalle possibilità di applicazione e dal processo costruttivo propri di ogni singolo materiale, si sono sviluppate con il materiale e attraverso il materiale. Nessun materiale consente una intromissione nel proprio repertorio di forme"<sup>3</sup>.

In tal senso, ben più interessanti, almeno dal nostro punto di vista, si presentano i prototipi della seconda tipologia in quanto, come anticipato, hanno consentito di indagare le possibilità formali (estetiche, per così dire), intrinseche alla tecnologia fotovoltaica. Infatti, se sperimentazioni sulla valenza estetica del fotovoltaico di questo tipo si collocano, evidentemente, in un ambito proprio della ricerca, ancora distante dal campo delle realizzazioni usuali, il crescente interesse mostrato da istituzioni scientifiche e da produttori di celle verso il tema della valenza estetica fa supporre che in un futuro abbastanza prossimo vi saranno ulteriori possibilità di scelta per i progettisti.

Allo stato attuale tra le differenti tipologie di moduli esistenti i componenti che sembrano più flessibili rispetto alle tematiche proprie della progettazione architettonica e del design sono i moduli del tipo vetro-vetro (realizzati mediante l'incapsulamento con resina trasparente delle celle fotovoltaiche tra due pannelli in vetro), i quali offrono una grande libertà progettuale grazie alla possibilità di variare alcuni parametri quali, la dimensione e la forma dell'elemento vetrato, il sistema tecnologico costruttivo di facciata o di copertura nella quale integrare il sistema fotovoltaico, lo schema distributivo e la distanza tra le celle, il tipo di cella, le modalità di cablaggio.

In tale direzione, nell'ambito delle ricerche

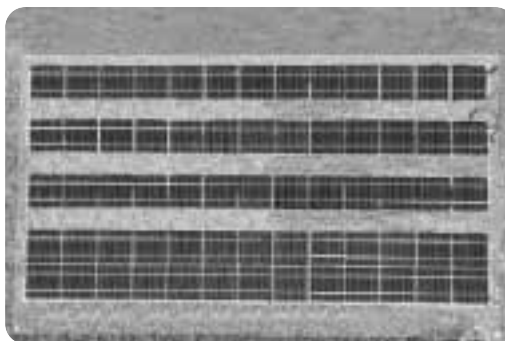
<sup>3</sup> ADOLF LOOS, *Il principio del rivestimento* (1898), in *Parole nel vuoto*, Milano 1990, p. 80.

condotte dall'Unità Tecnico Scientifica Fonti Rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi dell'ENEA, durante lo scorso anno si è indagata la possibilità di realizzare una tipologia di componente edilizio con modulo fotovoltaico vetro-vetro che, per caratteristiche tecniche e funzionali (compatibilità con tecnologie edilizie esistenti, funzioni aggiunte al fotovoltaico), oltre che di ordine estetico, si prestasse ad una larga applicazione; il fine era verificare le possibilità di impiego di moduli fotovoltaici in edifici esistenti o di nuova realizzazione, caratterizzati dall'uso di linguaggi architettonici contemporanei.

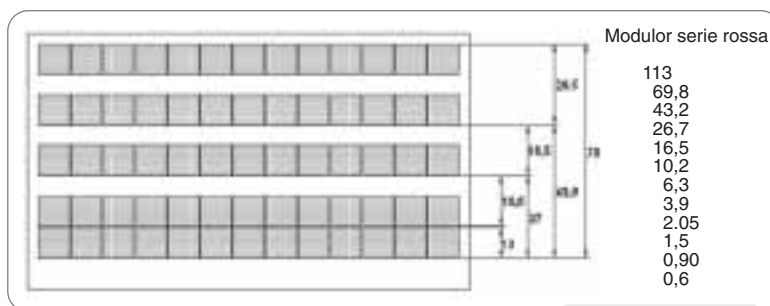
Sono state sperimentate le possibilità composite offerte dalla tipologia di modulo fotovoltaico vetro-vetro (di uso oramai piuttosto diffuso), individuando i parametri progettuali che ne caratterizzano la flessibilità di impiego in architettura e, in special modo, nelle facciate; per questo scopo si è realizzato un componente vetrato fotovoltaico con funzione di frangisole per un sistema di serramento apribile.

Particolare attenzione è stata rivolta alle fasi di progettazione del componente, e ne sono state elaborate dieci varianti (mantenendo fissa la dimensione del pannello di cm 83,5 x 143), differenti per tipologia di celle (dimensioni, colore) e per disposizione (pattern e interspazi), al fine di verificarne, oltre che la riuscita formale, anche la funzionalità rispetto alla funzione schermante dal sole. Per otto campioni si è fatto ricorso all'impiego di celle colorate con disposizione spaziale uniforme, a densità differente, al fine di valutare le possibilità cromatiche del fotovoltaico (figura 4); per gli altri due campioni, invece, la distribuzione delle celle è stata studiata in modo da disegnare un motivo geometrico armonico.

A tal fine si è fatto uso di misure derivanti dalla serie rossa del Modulor (figure 5 e 6), il sistema di proporzionamento ideato da Le Corbousier, basato sulla regola della sezione aerea e su alcune misure del corpo umano.



**Figura 5**  
Componente vetrato frangisole SGG-PROSOL con celle ASE TE 16 SF



**Figura 6**  
Schema del modulo con celle ASE TE 16 SF proporzionato con il Modulor

## Conclusioni

In conclusione, è possibile dire che la cultura progettuale contemporanea è sempre più orientata verso un'interazione positiva tra il manufatto costruito e l'ambiente circostante, che si attua anche attraverso il ricorso alle fonti rinnovabili di energia, ed alle moderne tecnologie. In tal senso l'integrazione di sistemi fotovoltaici in architettura non va vista esclusivamente come una possibilità per la diffusione e lo sviluppo del fotovoltaico, ma come una reale necessità di un certo modo di progettare e costruire, rispetto alla quale il mondo della ricerca può fornire delle risposte, che sono sia gli approfondimenti scientifici, che la diffusione delle conoscenze.

A riprova di questo interesse da parte del mondo della cultura progettuale verso le fonti rinnovabili in generale, e verso il ricorso alle tecnologie solari nello specifico, in un articolo pubblicato su una delle più importanti riviste nazionali di architettura, ed intitolato "Vi dispiacerebbe smettere di costruire come avete fatto finora?", Werner Sobek, successore di Frei Otto dal 1995 all'Università di Stoccarda, sostiene:

“L'architettura di oggi, in base ai propri obiettivi concettuali e di progettazione, si autodefinisce come radicata nel terzo millennio: un'architettura che ritiene di esprimere atteggiamenti tipici della nostra epoca e di quella futura, che trova le sue forme non ricorrendo a progetti e materiali tradizionali, ma basandosi su processi integrali di pianificazione e organizzazione che tengono conto degli attuali stili di vita e di quelli futuri. Questo tipo di architettura ha un rapporto radicalmente diverso e positivo con l'ambiente naturale, i suoi utenti e la relativa tecnologia.

Risulta quindi ovvio che tale tipo di architettura possa sfruttare anche le tecnologie moderne generalmente accettate ed applicate. In altre parole, ciò significa che un edificio residenziale costruito oggi potrebbe, e dovrebbe, essere del tutto non inquinante e capace di funzionare esclusivamente ad energia eolica e/o solare. Una costruzione simile dovrebbe essere collocata nell'ambiente naturale con interferenze minime. (...) È inoltre superfluo ribadire che questo tipo di architettura richiede processi differenti di progettazione e di costruzione. Per realizzare sistemi modulari e altamente integrati sono necessarie non solo conoscenze scientifiche e una buona dose di fantasia durante la fase di progettazione, ma anche una stretta cooperazione tra progettisti e costruttori.”<sup>4</sup>

Questo testo appare di particolare interesse per diversi aspetti. In primo luogo è testimonianza di come negli ultimi anni il tema della sostenibilità, dibattuto precedentemente in ambiti quasi esclusivamente scientifici, sia diventato un riferimento costante nella progettazione e costruzione degli edifici e degli ambienti contemporanei.

In secondo luogo, relativamente al tema dell'integrazione del fotovoltaico in architettura, definisce una posizione di diritto

per la tecnologia fotovoltaica (inclusa nel più generale tema delle tecnologie solari) accanto alle altre tecnologie moderne impiegate nella costruzione degli edifici.

Gli aspetti evidenziati si coniugano perfettamente con la consapevolezza maturata da tempo in ambito scientifico, e cioè che l'integrazione del fotovoltaico in architettura rappresenti uno dei campi più promettenti rispetto alla diffusione di questa tecnologia, grazie anche ai molti ed indubbi vantaggi che tale tipo di applicazione offre rispetto alla realizzazione di grandi centrali isolate. Come è noto tale consapevolezza ha fatto sì che sul versante tecnico si indagassero le problematiche (elettriche e normative) legate alla connessione in rete degli impianti, e all'impiego del modulo fotovoltaico come componente edile (e questo sforzo è stato condiviso anche dai costruttori e dai produttori sia di componenti fotovoltaici sia di componenti edili tradizionali). A questo punto, ciò che emerge è che sembra giunto il momento di mettere in atto una connessione tra pratica, progettazione, realizzazione e ricerca, poiché nella cultura progettuale contemporanea si delinea un ruolo del fotovoltaico non più solo “possibile”, ma “dovuto”. L'auspicio è che l'interesse e le nuove conoscenze dei progettisti e dei tecnici possano consentire la sperimentazione di soluzioni innovative e di pregio sia per la progettazione architettonica che per la diffusione e la qualità del fotovoltaico.

## Bibliografia

- C. ABBATE (a cura di), *L'integrazione architettonica del fotovoltaico: esperienze compiute*, Roma 2002.
- N. ASTE, *Il fotovoltaico in architettura*, Napoli 2002.
- R. THOMAS, *Photovoltaics and Architecture*, Londra 2002.
- AA. VV., *La città del Sole - Guida al fotovoltaico nelle aree urbane*, Firenze 2001.
- AA. VV., PRIDE-Publishable Report, 2002.
- AA. VV., BIMODE-Publishable Report, 1999.

<sup>4</sup> W. SOBEK, “Vi dispiacerebbe smettere di costruire come avete fatto finora?”, in *Casabella*, 694, novembre 2001, p. 19.



# Una **modellistica** dell'inquinamento da traffico veicolare in area urbana



La mobilità privata, non sempre accompagnata da un adeguato sviluppo delle infrastrutture di supporto, è divenuta il problema più importante per la qualità dell'aria nelle aree urbane. Il presente lavoro affronta questa tematica, illustrando la costruzione e l'applicazione di una metodologia modellistica che può costituire un valido supporto alla pianificazione della mobilità e un efficace strumento di valutazione della qualità dell'aria

**GABRIELE ZANINI**  
**FABIO MONFORTI**  
**ELISIA NARDINI**

ENEA  
Unità Tecnico-Scientifica Protezione  
e Sviluppo dell'Ambiente  
e del Territorio Tecnologie Ambientali

La composizione dell'atmosfera viene continuamente alterata, sia a livello locale sia, nel tempo, su scala globale dall'insieme delle sostanze, di origine naturale o antropica, che in essa sono rilasciate

In questi ultimi anni la qualità dell'aria, principalmente degli agglomerati urbani, è diventata oggetto di grande attenzione sia da parte dell'opinione pubblica sia del legislatore. Le città costituiscono un sistema ad alta antropizzazione, caratterizzate da un'elevata concentrazione di abitanti in uno spazio che solitamente si contraddistingue per un notevole accentramento di attività umane. Attività che inevitabilmente vanno ad influire negativamente sulla qualità dell'aria. In questo contesto gli impianti finalizzati alla trasformazione dell'energia costituiscono un massiccio apporto di sostanze inquinanti di origine antropica.

L'impatto ambientale di tali attività non è limitato solo al rilascio di sostanze in atmosfera, ma interessa altri aspetti, come la qualità delle acque di scarico, il rilascio di calore all'esterno, il livello delle emissioni sonore, che però esulano dal contesto del presente lavoro. Fra di esse spiccano, nelle aree urbane, le attività legate al trasporto, privato o collettivo, all'interno delle città o

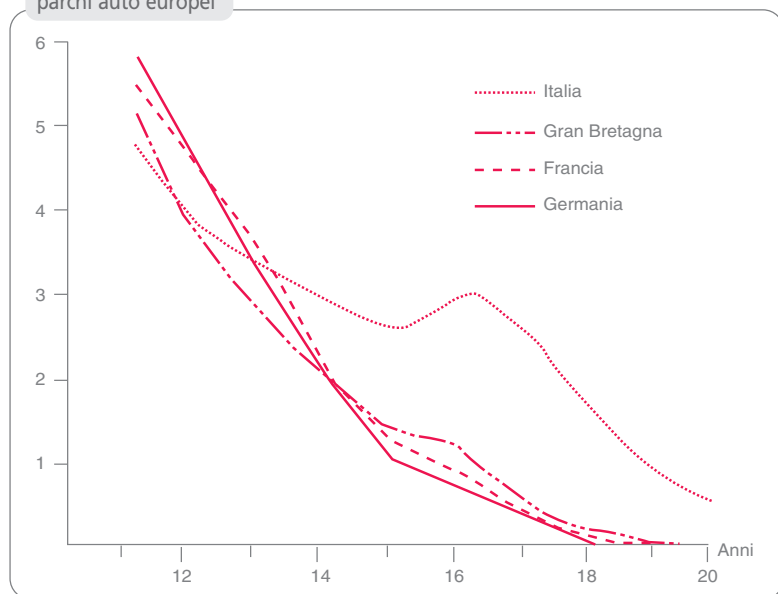
da/verso le aree urbane stesse. Il ruolo del sistema dei trasporti sta assumendo un'importanza crescente nelle società moderne, e di conseguenza sono sempre più evidenti e rilevanti i problemi connessi con la sua gestione. La mobilità ha notevoli ripercussioni sul piano socio-economico di ogni paese: in particolare l'ottimizzazione della gestione e della efficienza del trasporto, e la riduzione del suo impatto sull'ambiente circostante, sono tematiche di primo piano del dibattito politico<sup>1</sup>.

In Italia si è osservata la crescita continua del numero di veicoli circolanti, cui però non è corrisposta una sufficiente crescita delle infrastrutture urbane. Se a ciò si aggiunge una diffusa inadeguatezza del servizio del trasporto pubblico, pur in via di miglioramento in molte aree, si comprende facilmente come nelle città italiane il problema sia particolarmente sentito.

Purtroppo l'Italia si contraddistingue, nell'ambito dell'Unione Europea, per un parco circolante piuttosto vetusto che presenta una notevole presenza di auto con età media superiore a 10 anni ed in stato manutentivo scadente; inoltre la percentuale dei veicoli con oltre 16 anni è molto maggiore in Italia di quella media calcolata a scala europea (figura 1). Come ovvio, questo tipo di veicoli è caratterizzato da maggiori emissioni e consumi, oltre che da minore sicurezza (figura 2).

La situazione italiana è ulteriormente aggravata dalla stessa conformazione dei centri urbani, che risente della loro evoluzione storica: le strade, in genere di piccole dimensioni, sono spesso intasate dal traffico e sono percorse a velocità basse con frequenti *stop and go* che provocano un maggior rilascio di inquinanti rispetto a condizioni di traffico scorrevole. Inoltre nelle città si presenta sempre più pressante il problema della sosta dei veicoli e spesso l'automobilista deve compiere una lunga ricerca per trovare uno spazio libero adibito al parcheggio, provocando un notevole incremento dei consumi e delle emissioni

**Figura 1**  
Percentuali di auto di età superiore ai 10 anni in alcuni parchi auto europei



Fonte: Di LORENZO A., *Carburanti, autoveicoli e ambiente: gli attori e i registi*, Energia, 3/94, pag. 57.

che si aggiungono a quelle dovute al traffico vero e proprio<sup>2</sup>.

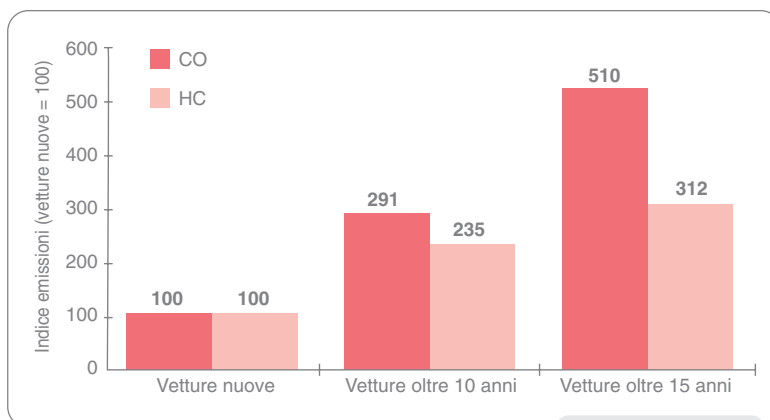
Diventa quindi urgente fornire ai manager ambientali degli strumenti che possano supportare le decisioni e che, in particolare, consentano di valutare gli effetti, a breve e medio termine, delle disposizioni normative sull'effettivo stato della qualità dell'aria. Per questo motivo, nell'ambito dell'Unità Tecnico-Scientifica Protezione e Sviluppo dell'Ambiente e del Territorio, la Sezione di Metodi di Progettazione Innovativi dell'ENEA ha dato vita, a partire dal 2001, ad una struttura modellistica che, a partire dalla richiesta di mobilità potesse permettere di valutare l'impatto delle emissioni da traffico sulla qualità dell'aria urbana.

Tale suite modellistica sarà descritta nei prossimi paragrafi, dopo un excursus sui principali temi coinvolti nello studio della qualità dell'aria in area urbana.

## L'inquinamento atmosferico e la qualità dell'aria urbana

Nell'atmosfera di un centro urbano è possibile rintracciare tutte le numerose sostanze attualmente definite inquinanti, siano esse in forma gassosa o di aerosol, cioè di particelle (liquide o solide) in sospensione. L'azione nociva di una sostanza inquinante sugli organismi viventi o sui manufatti esposti all'atmosfera o più in generale sull'ambiente, è strettamente connessa con l'*esposizione* del bersaglio all'inquinante medesimo, grandezza che a sua volta è funzione della *concentrazione* e del tempo di contatto.

Essenzialmente si distinguono due tipi di esposizione: *acuta* (a concentrazioni elevate per un tempo breve) e *cronica* (a concentrazioni relativamente basse, ma per lunghi periodi di tempo). Fatti salvi alcuni episodi di particolare gravità, l'esposizione nei grandi centri urbani e delle zone industriali appartiene solitamente alla seconda categoria. A una data esposizione possono corrispondere *effetti* differenti secondo le caratteristiche del bersaglio (ad esempio,



Fonte: DI LORENZO A., *Carburanti, autoveicoli e ambiente: gli attori e i registi*, Energia, 3/94, pag. 57.

**Figura 2**

Emissioni relative di CO e idrocarburi per autovetture nuove, di età compresa fra i 10 e 15 anni e di età superiore ai 15 anni

per un essere umano, la condizione fisica, l'età, la presenza di un'eventuale patologia polmonare o cardiaca e così via). Inoltre in atmosfera non si ha la presenza isolata di singoli composti inquinanti, ma di miscele degli stessi, all'interno delle quali le sostanze possono interagire in varia maniera tra loro e con il bersaglio<sup>3</sup>.

## Inquinamento atmosferico da motori termici

I combustibili fossili costituiscono attualmente la maggior fonte di energia utilizzata per realizzare la mobilità urbana pubblica e privata. Questi combustibili sono di origine organica, provenendo da una lentissima trasformazione di resti di sostanze vegetali ed animali intrappolate nel sottosuolo e contengono prevalentemente carbonio (C) e idrogeno (H), cui si aggiungono in minori quantità ossigeno (O), zolfo (S), azoto (N), sostanze solide incombustibili, dette anche ceneri, ed una percentuale di umidità variabile.

Il contenuto energetico di tali combustibili viene convertito in una forma utilizzabile attraverso la combustione, processo che richiede un combustibile e un comburente: il comburente o ossidante utilizzato è in genere l'ossigeno contenuto nell'aria che deve essere miscelato con il combustibile. La stragrande maggioranza dei veicoli circolanti in Italia è alimentata a benzina e a

gasolio, mentre gli altri combustibili, detti alternativi, quali il gas naturale, il GPL, il BioDiesel e i cosiddetti "gasoli bianchi", di recente nascita, hanno ancora una limitata diffusione, sebbene in crescita.

#### *La classificazione delle emissioni veicolari*

L'attività di analisi e di studio delle emissioni associate al settore del trasporto in Europa è iniziata negli anni 70. Oggigiorno essa è principalmente condotta dall'European Topic Centre of Air Emissions (ETC/AE), Centro di studio che è in stretta comunicazione con le autorità governative delle varie nazioni europee, il cui obiettivo principale è redigere degli inventari annuali delle emissioni antropiche, sia totali che suddivise per tipologie di sorgente (progetto CORINAIR: CORE INventory of AIR Emissions). Nell'ambito CORINAIR, come si è visto all'inizio del paragrafo, le emissioni dei veicoli a motore sono raggruppate in tre tipologie<sup>18</sup>:

- A. *Hot emissions*: le emissioni del veicolo in moto, funzione della velocità, dell'accelerazione e di numerosi altri parametri;
- B. *Cold-start extra emissions*: le emissioni liberate durante la fase di riscaldamento del motore, dopo una partenza a freddo, spesso espresse come frazione delle emissioni a caldo, in base alla porzione del tragitto interessato dal riscaldamento del motore rispetto a quello complessivo;
- C. *Evaporative emissions*: le emissioni di tipo evaporativo, la cui composizione è legata a quella del combustibile e costituite per la maggior parte da VOC (Volatile Organic Compounds – Composti Organici Volatili). A loro volta suddivise in *diurnal losses*, dovute all'innalzamento giornaliero della temperatura esterna, *hot soak losses*, emissioni di arresto del veicolo, dovute al raffreddamento del motore, *running losses*, perdite evaporative durante la marcia del veicolo, per effetto del calore prodotto dal

motore in moto e *filling losses*, perdite di vapori di combustibile durante le operazioni di riempimento del serbatoio.

Le perdite diurne e le *Hot Soak* costituiscono la parte preponderante delle perdite evaporative totali. Per contenerne l'entità, i veicoli di più recente produzione sono muniti di canister a carboni attivi, atti a adsorbire i vapori che tendono a fuoriuscire dal serbatoio e dai sistemi di alimentazione quando il motore è caldo. Inoltre, nei centri di distribuzione dei combustibili per i veicoli si va via via adottando l'uso di manichette a recupero vapori.

#### *Composizione delle emissioni veicolari*

Nel seguito si riassumerà brevemente l'origine dei principali composti inquinanti (gassosi e particolati) emessi dai veicoli mossi da motori a combustione interna.

*Anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)* – Durante la combustione gli atomi di carbonio vengono ossidati producendo CO<sub>2</sub>, che viene rilasciata in tempo breve. La concentrazione di CO<sub>2</sub> nei gas di scarico è un importante indice dell'efficienza con cui avviene il processo: il rendimento di combustione è, infatti, direttamente proporzionale alla quantità di CO<sub>2</sub> emessa. La CO<sub>2</sub> è un gas stabile con una permanenza in atmosfera non trascurabile, valutata vicina ai 15 anni. Poiché questo gas viene prodotto in quantità sempre crescenti, se ne sta osservando un accumulo in atmosfera con possibili ripercussioni sul clima globale<sup>4</sup>.

*Monossido di carbonio (CO)* – Gas incolore e inodore, che si sviluppa in caso di combustione imperfetta e incompleta di sostanze contenenti carbonio. Il CO è molto reattivo, per cui la sua permanenza nell'atmosfera è limitata a qualche ora. Il parametro che condiziona l'entità delle emissioni del CO è il rapporto  $\alpha = \text{aria}/\text{combustibile}$ . Il monossido di carbonio è infatti prodotto in rilevanti quantità nelle combustioni di miscele ricche (cioè in eccesso di combustibile rispetto all'apporto di ossigeno), nelle quali scarseggia l'ossigeno libero.

*Ossidi di azoto* ( $\text{NO}_x$ ) – Comprendono l'ossido ( $\text{NO}$ ) ed il biossido ( $\text{NO}_2$ ): nella combustione viene prodotto in massima parte il primo (che è più stabile ad alta temperatura), che successivamente si ossida nell'atmosfera. La formazione di questi ossidi è legata alla presenza dell'azoto nel combustibile e nell'aria comburente<sup>5</sup>. In particolare sono stati individuati tre meccanismi che portano alla formazione di  $\text{NO}_x$ <sup>6</sup>:  $\text{NO}_x$  termici (meccanismo di Zel'dovich), Prompt  $\text{NO}_x$ , Fuel  $\text{NO}_x$ . In camera di combustione il monossido di azoto si ossida a  $\text{NO}_2$  man mano che ci si allontana dalla zona di fiamma, poiché la temperatura si abbassa. Nel complesso si può osservare come l'andamento della concentrazione degli  $\text{NO}_x$  emessi in un processo di combustione dipenda principalmente dalla concentrazione di ossigeno molecolare e dalla temperatura, e quindi dal rapporto  $\alpha$  (rapporto aria di alimentazione/combustibile)<sup>7</sup>.

*Idrocarburi (HC) e composti organici volatili (VOC)* – Comprendono un numeroso gruppo di alcune centinaia di sostanze organiche presenti in atmosfera in forma di gas o di particelle liquide. Si tratta di composti generalmente presenti nel combustibile che sopravvivono alla combustione nelle zone in cui la composizione e le condizioni fisiche della miscela impediscono l'ossidazione di parte del combustibile (spegnimento o *quenching*), soprattutto quando la combustione è condotta in regime magro (ovvero in situazioni in cui prevale l'aria immessa sul combustibile introdotto). A causa della loro volatilità, gli idrocarburi e i VOC costituiscono inoltre la maggior parte delle emissioni di tipo evaporativo, emissioni la cui intensità viene ovviamente a dipendere dalle condizioni climatiche dell'ambiente, con un massimo nei mesi estivi. Fra di essi spiccano il benzene, l'1-3 butadiene e gli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici)<sup>8</sup> per la loro tossicità e per la loro accertata cancerogenicità.

*Benzene* ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) – Il benzene è un gas in-

colore, caratterizzato da un tipico odore: tra gli idrocarburi aromatici ha la composizione più semplice. È molto volatile e infiammabile: la sua molecola è costituita per il 92,3% in peso di carbonio e per la restante parte da idrogeno, e possiede una tipica struttura anulare planare. Rispetto agli altri idrocarburi, il benzene è poco reattivo ed è stabile dal punto di vista fotochimico. Permane in atmosfera mediamente qualche giorno prima di venire rimosso. Esistono numerosi processi industriali che presentano come sottoprodotto il benzene, ma la sua fonte antropica più rilevante è data dai processi di manipolazione, lavorazione e combustione dei combustibili fossili, tramite i quali può venire liberato nell'atmosfera per fenomeni evaporativi, oppure insieme ai gas di scarico sia come incombusto sia come prodotto vero e proprio del processo di combustione. La presenza del benzene all'interno dei carburanti non dipende solo dalla loro composizione originaria. Esso viene infatti addizionato alle benzine con lo scopo di sostituire i composti del piombo con altre sostanze antidetonanti mantenendo sempre sufficientemente elevato il numero di ottano, come nella benzina senza piombo (detta comunemente benzina verde) comparsa in Italia negli anni 80 del secolo scorso, che poteva contenere fino al 5% in volume di benzene (CEE 85/210). Con la scoperta della pericolosità del benzene e l'accertamento della sua cancerogenicità, i limiti massimi per questo composto si sono fatti sempre più restrittivi e oggi il valore massimo consentito in Italia è 1% in volume (legge 413). Per mantenere ugualmente alto il livello ottanico e nello stesso tempo contenere la quantità di idrocarburi aromatici presenti, negli ultimi tempi si sta prendendo in considerazione l'aggiunta di composti ossigenati come MTBE e ETBE, che però possono essere immessi nelle benzine in quantità limitata e a costi maggiori rispetto agli idrocarburi aromatici.

*1-3 butadiene* ( $C_4H_6$ ) – A temperatura ambiente è anch'esso un gas, incolore, facilmente infiammabile, e con un tipico aroma pungente e anche per esso è stata dimostrata la capacità cancerogena. Questa sostanza è più reattiva del benzene, e la sua degradazione in aria dà origine ad altre sostanze tossiche. L'1-3 butadiene proviene principalmente da fenomeni di combustione incompleta di combustibili fossili, mentre nel suo caso le emissioni di tipo evaporativo sono trascurabili poiché, per esigenze tecnologiche e motoristiche, i combustibili liquidi sono ricavati in modo da minimizzarne la quantità. La maggior parte di 1-3 butadiene liberata in atmosfera è da attribuire alle partenze a freddo del veicolo<sup>8</sup>. Esso può essere facilmente rimosso dai gas di scarico per mezzo di un efficiente catalizzatore trivalente. Non sono conosciute fonti naturali che ne provocano il rilascio.

*Idrocarburi policiclici aromatici* (IPA) – Sono idrocarburi con due o più anelli aromatici. Provengono da un'incompleta combustione delle sostanze organiche e sono estremamente affini con il particolato carbonioso, che ne può accrescere la pericolosità e gli effetti (comportamento sinergico).

*Piombo* (Pb) – Il piombo è una sostanza che viene liberata nell'atmosfera combinata spesso con altri elementi. La più rilevante tra le fonti antropiche è la combustione di combustibili fossili, in particolare benzine additivate. In passato per elevare le caratteristiche antidetonanti delle benzine e quindi il numero di ottano, si è intervenuto aggiungendo ad esse quantità di piombo tetraetile e piombo tetrametile (composti piombo-alchilici). Per abbattere le emissioni in atmosfera di questa sostanza si sono adottate benzine prive di piombo, con l'uso di additivi antidetonanti di altro genere<sup>9</sup>.

*Particolato sospeso totale* (PST) – Con tale denominazione si indica usualmente l'insieme di tutte le particelle, solide o liquide,

che si trovano in sospensione nell'atmosfera (aerosol). La composizione, le sorgenti e le caratteristiche di tali particelle sono molteplici, ivi incluse numerose sorgenti naturali che, tuttavia, liberano in aria particelle meno pericolose rispetto a quelle liberate dalle attività antropiche<sup>10</sup>. Tra queste ultime predominano il settore dei trasporti e i processi di combustione in genere<sup>8</sup>. Nella combustione, la formazione di particolato è un processo indesiderato che avviene in zone con carenza di ossigeno e quindi è sintomo di una combustione incompleta. Il processo fisico-chimico che origina tali particelle (pirolisi) consiste nella deidrogenazione degli idrocarburi che tendono, successivamente, ad aggregarsi in piccoli nuclei solidi, che a loro volta si accrescono attraverso reazioni di condensazione ed addizione arrivando a contenere fino a migliaia di atomi di C. Questo fenomeno è favorito dalla presenza di alte temperature, di un ambiente riducente (cioè privo di ossigeno) e dall'uso di combustibili complessi. Dal punto di vista sanitario sono molto pericolose le particelle fini  $PM_{10}$ , ovvero con diametro  $< 10 \mu m$ , e  $PM_{2,5}$  con diametro  $< 2,5 \mu m$ .

*Biossido di zolfo* ( $SO_2$ ) – È un gas incolore che si forma nei processi di combustione esclusivamente a causa della presenza di zolfo nel combustibile impiegato. L'apporto associato ai trasporti su strada risulta minore rispetto a quello dovuto ad altre fonti antropiche. Inoltre, l'andamento della concentrazione degli ossidi di zolfo in atmosfera, osservato in questi ultimi anni, è decrescente grazie alla sempre maggiore diffusione di combustibili a basso tenore di zolfo o desolforati.

*Ozono* ( $O_3$ ) – L'ozono è un ossidante estremamente reattivo, presente principalmente nella stratosfera, ove si genera per fenomeni di dissociazione fotochimica dell'ossigeno molecolare ed assolve il delicato compito di proteggere la terra dai raggi ultravioletti.

letti che provengono dal sole. L'ozono troposferico è un inquinante secondario, prodotto cioè da reazioni chimiche cui partecipano emissioni antropogeniche e sostanze che sono naturalmente presenti in atmosfera<sup>11</sup>. In atmosfera in presenza di ossigeno libero e di ossidi di azoto si innesca naturalmente un ciclo di reazioni che coinvolgono tali sostanze e che ha come prodotto intermedio l'ozono e che si chiuderebbe con la distruzione dell'ozono per opera del monossido di azoto. Se però nell'aria sono presenti alcune sostanze appartenenti alla categoria dei VOC (Volatile Organic Compounds), in presenza di radiazione solare, il ciclo si chiude con la reazione tra queste sostanze ed il monossido di azoto, con conseguente accumulo di ozono. Tra tutte le attività umane, il traffico veicolare è uno dei maggiori responsabili della produzione dei precursori dell'ozono. È possibile valutare il potenziale di formazione dell'ozono (PFO, definito come [mg] di O<sub>3</sub> formato per [mg] di VOC presente), che possiedono alcune sostanze organiche volatili. Alcuni esempi sono riportati nella tabella 1.

### Caratteristiche emissive dei motori termici

I motori termici si distinguono principalmente in base a come viene attivato il processo di combustione, tra *motori ad accensione comandata* (o a benzina, in cui l'innescò viene fornito da una scintilla) e *ad accensione spontanea* (o Diesel, in cui si sfrutta la proprietà di autoaccensione di un combustibile). Essi presentano caratteristiche costruttive diverse ed in particolare, poiché si realizzano due diversi processi di combustione, sono caratterizzati da emissioni differenti<sup>12</sup>.

#### *Motori ad accensione comandata*

In questo tipo di motori si immette nella camera di combustione una miscela aria-benzina, in genere stechiometrica e molto omogenea, che viene compressa dall'azione del pistone e poi accesa mediante una

Composto	PFO
Propano	0,48
N-butano	1,02
1,3 butadiene	10,89
Benzene	0,42
Toluene	2,73

Fonte: POLJIZI V., DESERTI M., FUZZI S., *Ozono e smog fotochimico*, Maggioli editore, ARPA, 1998, pag. 27.

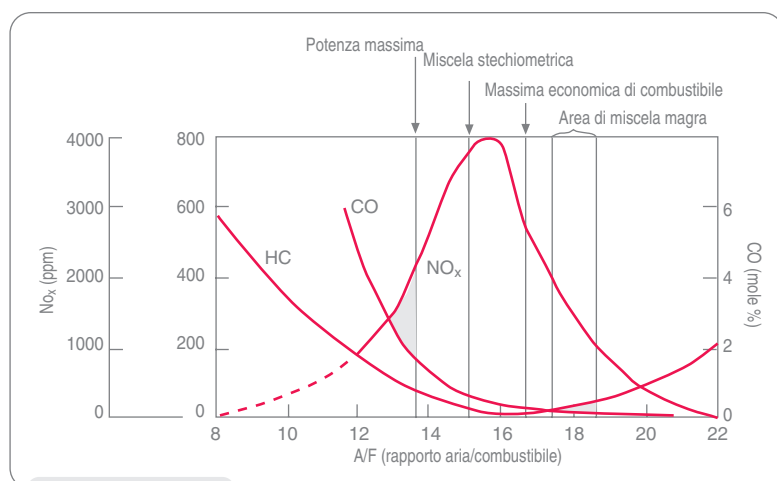
**Tabella 1**

Potenziale di formazione dell'ozono di alcuni principali composti organici volatili

scintilla prodotta dalla candela. Poiché la combustione viene attivata dall'esterno, nella fase di compressione la miscela non deve raggiungere pressioni e temperature di autoaccensione.

In un processo di combustione premiscelata si può osservare come sulle pareti della camera si verificano fenomeni di *quencing*, ovvero di estinzione della fiamma e di spegnimento. Infatti le pareti, per varie esigenze, devono essere costantemente raffreddate e parte del calore che si sprigiona nella combustione risulta disperso all'esterno per fenomeni di conduzione e di convezione. In prossimità delle pareti si osserva quindi un rilevante abbassamento della temperatura, con conseguente accumulo di idrocarburi incombusti o parzialmente ossidati e di monossido di carbonio. Anche se il regime di moto nella camera di combustione viene reso altamente turbolento, lo straterello di spegnimento non può mai essere eliminato del tutto e nei gas di scarico è sempre rilevabile la presenza di composti incombusti.

Nei motori ad accensione comandata, oltre al *quencing*, esistono altri fenomeni che causano la presenza di sostanze incombuste allo scarico. Esse raggiungono le concentrazioni massime in fase di decelerazione o in regime di minimo, in cui si innesca un processo di ricircolo interno dei gas di scarico. Se tale fenomeno assume eccessive proporzioni si ha una diminuzione dell'efficienza della combustione, con conseguente incremento degli incombusti. I motori a benzina inoltre producono notevoli emissioni di NO<sub>x</sub>, dato che operano, generalmente, con valori del rapporto aria/com-

**Figura 3**

Andamento di CO, HC, NO<sub>x</sub> nelle emissioni di un veicolo a benzina in funzione del rapporto a = aria/combustibile

Fonte: UCCELLI R., LOMBARDI C.C., MAURO F., *Impatto ambientale e sanitario dei carburanti per autotrazione*, Energia, ambiente e innovazione, 4-5/96, pag. 19.

bustibile vicini al valore in cui se ne osserva la massima produzione (regime stechiometrico)<sup>12</sup>.

Per gli ossidi di azoto, gli idrocarburi incombusti e il monossido di carbonio si può rappresentare efficacemente l'andamento delle emissioni in funzione del rapporto a come nella figura 3.

### Motori Diesel

In questi motori si realizza l'accensione spontanea del combustibile, e non è necessario regolare la portata di aria comburente. Il combustibile, spruzzato da appositi iniettori direttamente nella camera di combustione, in cui l'aria immessa è stata precedentemente portata in particolari condizioni di pressione e temperatura, viene ridotto in goccioline fini in modo da massimizzarne il contatto con l'aria e garantire l'avvio della combustione.

All'interno della camera di combustione la composizione della miscela varia da punto a punto: il processo si avvia nei punti in cui il rapporto aria/combustibile rientra nel campo di accendibilità e si propaga man mano che la temperatura e il miscelamento tra combustibile e comburente all'interno del cilindro progrediscono.

Nei motori Diesel l'emissione inquinante più significativa, anche e soprattutto dal

punto di vista dell'impatto ambientale, è costituita dal particolato, detto anche fumo, distinguibile in fumo bianco, composto sostanzialmente da gocce incombuste di gasolio liberate in fase di avviamento, e in fumo nero, costituito da particelle solide, prevalentemente di natura carboniosa, la cui origine è intrinseca alle modalità con cui avviene la combustione nei cilindri.

Tale particolato è costituito da atomi di carbonio aggregati in macromolecole, che si formano a seguito di fenomeni pirolitici. Tali particelle, inoltre, nel flusso di gas di scarico possono aggregarsi tra di loro per fenomeni di collisione comportandosi come dei piccoli nuclei di condensazione. La loro superficie è, infatti, sede di processi fisici che coinvolgono la frazione leggera dei gas presenti (identificata con la sigla SOF: Soluble Organic Fraction), come l'evaporazione, la condensazione, l'adsorbimento<sup>12</sup>. Il campo di variazione delle dimensioni di tali corpuscoli solidi è molto ampio, compreso tra 0,1 μm e 10 μm, ma da un'analisi delle emissioni solide dei motori Diesel si è notato come buona parte del particolato carbonioso abbia diametro inferiore a 0,5 μm, e come la distribuzione dimensionale di esso sia strettamente dipendente dalle condizioni di funzionamento del motore. Più questo opera a carichi elevati e più la frazione fine è rilevante all'interno della distribuzione granulometrica delle emissioni di particolato<sup>7</sup>.

Nei gas esausti dei motori Diesel un altro importante prodotto inquinante è dato dagli ossidi di azoto, generati in notevole quantità, poiché la combustione è realizzata in eccesso d'aria.

### Struttura e caratteristiche dell'atmosfera

Un'approfondita conoscenza dello stato meteorologico (locale e generale) e dei moti dell'aria è basilare per studiare i fenomeni di inquinamento atmosferico.

L'atmosfera agisce sugli inquinanti emessi, causandone la dispersione o l'accumulo



secondo un insieme di meccanismi legati alla reattività chimica delle emissioni, alle condizioni meteorologiche ed alla configurazione topografica del territorio in cui esse hanno luogo.

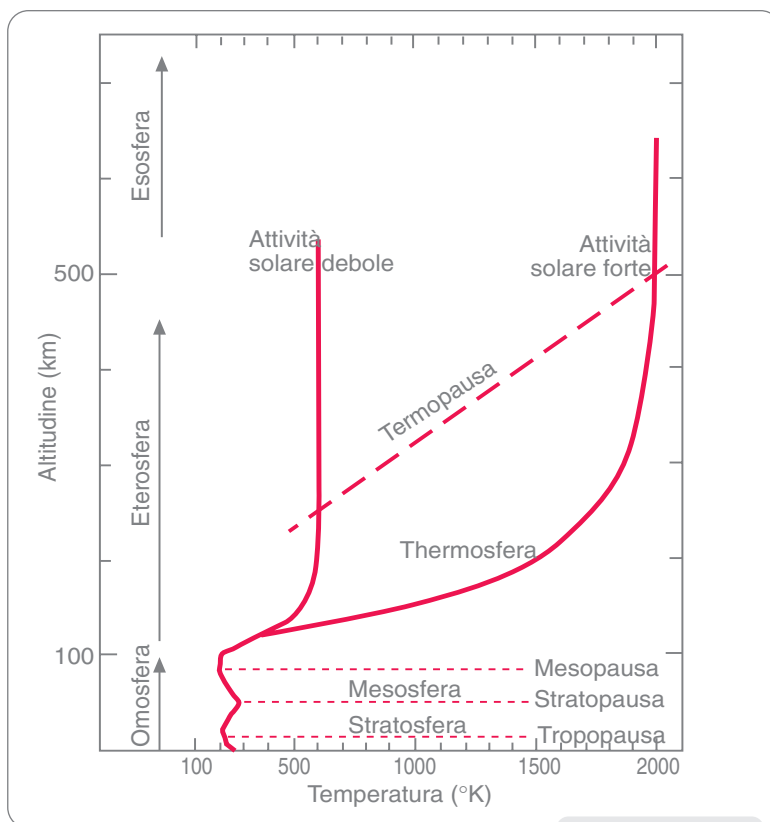
Le principali caratteristiche chimiche e fisiche del sistema atmosfera presentano una dipendenza tipica dalla quota  $z$  che, al di là di variazioni locali e stagionali, permettono di descrivere l'atmosfera come una struttura fortemente stratificata. In figura 4 è riportato ad esempio l'andamento della temperatura in funzione della quota verticale nei diversi strati. Nello studio dei fenomeni di inquinamento tipici dell'ambiente urbano ci si focalizza solamente sui primissimi chilometri di atmosfera: lo strato limite planetario (Planetary Boundary Layer).

#### Il Planetary Boundary Layer

La quasi totalità degli esseri viventi e una buona parte della massa complessiva dell'aria sono comprese all'interno dello strato atmosferico più a contatto con la superficie terrestre, detto troposfera, che si estende fino a circa 10 km in altezza, con forti differenze in funzione della latitudine e della stagione.

Questo strato, interessato da continui spostamenti di masse d'aria, per effetto della distribuzione non uniforme, nello spazio e nel tempo, dell'energia radiante solare assorbita dall'aria e dal suolo si suddivide ulteriormente in due strati, in base all'influenza della rugosità del suolo sui moti atmosferici: quello più vicino al suolo, maggiormente interessato dalle azioni di attrito viscoso, è detto *Planetary Boundary Layer* (PBL). È in esso che hanno luogo la stragrande parte delle emissioni di origine sia antropica sia naturale ed è in esso che avvengono i fenomeni di trasporto, dispersione, rimescolamento o accumulo degli inquinanti<sup>13</sup>.

Ai fini dell'inquinamento atmosferico urbano, lo studio dell'atmosfera si riconduce quindi sostanzialmente allo studio del PBL. L'altezza del PBL, che rappresenta in parte



Fonte: WALLACE J. M., HOBBS P.V., *Atmospheric science: an introductory survey*, Academic Press, California, 1977, pag. 25.

**Figura 4**  
Distribuzione verticale della temperatura in atmosfera

l'altezza fino alla quale vanno a disperdersi gli inquinanti emessi al suolo, prende il nome di altezza di mescolamento, e varia in funzione dello stato atmosferico.

La diffusione degli inquinanti nel PBL è determinata principalmente da tre parametri: la stabilità dello strato, l'intensità della turbolenza e quella del vento, cui si può aggiungere l'effetto di rimozione esplicato dalle precipitazioni<sup>14</sup>.

#### Stabilità del Planetary Boundary Layer

La stabilità di uno strato atmosferico dipende dall'importanza del rimescolamento dell'aria lungo la direzione verticale. In un'atmosfera stabile i moti spontanei verticali delle masse d'aria tendono a smorzarsi, mentre in un'atmosfera instabile essi si amplificano. La stabilità atmosferica ha importanti effetti sui fenomeni di inquinamento: situazioni di stabilità in assenza di vento, in particolar modo fenomeni di inversione

Classi di stabilità	Gradiente reale
A	Molto instabile $\gamma > 1,9 \text{ }^\circ\text{K}/100 \text{ m}$
B	Instabile $1,7 \leq \gamma \leq 1,9 \text{ }^\circ\text{K}/100 \text{ m}$
C	Debolmente stabile $1,5 \leq \gamma \leq 1,7 \text{ }^\circ\text{K}/100 \text{ m}$
D	Neutrale $0,5 \leq \gamma \leq 1,5 \text{ }^\circ\text{K}/100 \text{ m}$
E	Debolmente stabile $-1,5 \leq \gamma \leq 0,5 \text{ }^\circ\text{K}/100 \text{ m}$
F	Stabile $\gamma < -1,5 \text{ }^\circ\text{K}/100 \text{ m}$

**Tabella 2**  
Classificazione delle classi di stabilità atmosferica secondo Pasquill

Fonte: ZANNETTI P., *Air pollution modelling*, Computational Mechanics Publication, Gran Bretagna, pag. 148.

termica provocano il ristagno in prossimità della superficie di tutte le sostanze ivi immesse. Al contrario, in caso di forte instabilità, di precipitazioni e di elevata turbolenza atmosferica si hanno intense azioni di rimozione e dispersione degli inquinanti: in particolare le piogge o le precipitazioni nevose consentono un efficace abbattimento delle particelle in sospensione e di sostanze gassose che si combinano con le molecole dell'acqua.

La stabilità dipende da numerosi fattori, in particolare dall'andamento  $T(z)$  della temperatura al variare della quota  $z$ . Definito il valore del gradiente  $\Gamma = \partial T / \partial z$  all'equilibrio, in assenza di umidità, pari a circa  $-1/100 \text{ }^\circ\text{K}/\text{m}$ , come gradiente adiabatico secco, si possono verificare le seguenti situazioni<sup>15</sup>:

- *equilibrio stabile*, se la temperatura reale dell'atmosfera diminuisce con l'altezza in misura minore rispetto al caso adiabatico: in particolare, in caso di inversione termica la temperatura cresce con la quota;
- *equilibrio indifferente*, se il gradiente reale e quello adiabatico coincidono;
- *equilibrio instabile*, quando si ha una di-

**Tabella 3**  
Altezze di rugosità di suoli urbanizzati

Terreno		$z_0$ [m]
Con asperità isolate	Alberi, colline, fattorie	0,2 ÷ 0,6
Suburbano	A bassa densità	0,4 ÷ 1,2
	Ad alta densità	0,8 ÷ 1,8
Urbano	A densità molto alta	1,5 ÷ 2,5
	Densità altissima	2,5 ÷ 10

Fonte: OKE T. R., *Boundary Layer Climates*, Methuen, pag. 298.

minuzione della temperatura reale maggiore del gradiente adiabatico secco.

Nel primo caso una massa d'aria secca che si sposta verticalmente verso l'alto subendo una trasformazione adiabatica viene a trovarsi più fredda e quindi più densa dell'aria circostante e tende perciò a ridiscendere. Al contrario, in casi di equilibrio instabile, la stessa massa d'aria si trova ad essere più calda, cioè meno densa, dell'atmosfera a lei circostante e tende quindi a proseguire nel suo moto ascensionale.

La stabilità dell'atmosfera dipende anche da altri parametri, determinanti anche sullo stato della turbolenza dell'aria: la velocità orizzontale del vento  $u$ , le condizioni della superficie del terreno (rugosità del suolo), il grado di insolazione, e così via. Per sintetizzare la stabilità atmosferica sono molto utilizzate le 6 categorie di stabilità atmosferica di Pasquill riassunte in tabella 2.

#### *La velocità del vento e lo Urban Boundary Layer*

Il vento, movimento ordinato delle masse d'aria, è responsabile del trasporto degli inquinanti, in particolare la sua componente orizzontale  $u$ <sup>16</sup>, solitamente maggiore di due o tre ordini di grandezza rispetto alla componente verticale. I venti all'interno del PBL sono profondamente influenzati dalle asperità del suolo (rugosità) e nelle aree urbane la circolazione atmosferica risente profondamente dell'urbanizzazione del territorio: gli edifici, nel loro insieme, conferiscono all'area occupata la propria lunghezza di rugosità, usualmente denotata con  $z_0$ . Tale valore determina la forma del profilo verticale del vento (l'intensità della componente orizzontale del vento, in prossimità del suolo è all'incirca proporzionale a  $\log(z/z_0)$ ) ed è tanto maggiore quanto più il suolo è irregolare.

Sono state definite, per diverse densità abitative, le rispettive altezze di rugosità, come ad esempio nella tabella 3.

Tali rugosità sintetizzano e mediano, prendendo come riferimento un'area urbana ti-

pica i fenomeni di induzione di turbolenza dovuti all'interazione del vento con gli edifici, interazione che causa il prodursi di vortici.

È utile osservare come l'atmosfera subisca un profondo cambiamento del proprio stato fisico nel passaggio dalle zone rurali ad aree maggiormente edificate e abitate. Per l'impatto provocato dalla presenza della città, infatti, si crea a volte una vera e propria superficie di confine, che delimita lo strato atmosferico a contatto con l'area urbana *Urban Boundary Layer*, e da essa direttamente influenzato, separandolo dagli altri strati atmosferici soprastanti, che invece non risentono così profondamente delle alterazioni locali.

All'interno di tale strato agiscono, a livello di singole strade, ulteriori processi di scala minore all'interno del volume d'aria compreso tra due schiere di edifici paralleli (identificato con il nome di Canyon). Tale geometria costituisce l'unità che si ripete all'interno del fenomeno urbano globale *Urban Canopy Layer*, il cui studio dettagliato risulta molto complesso.

### La turbolenza

Il moto di una massa d'aria costituente l'atmosfera può, a grandi linee appartenere a una delle seguenti due tipologie:

- *moto laminare*, se la massa d'aria coinvolta si muove organizzata in filetti fluidi, che si spostano con moti paralleli lungo le linee di flusso;
- *moto turbolento*, se la massa d'aria coinvolta è costituita da particelle che si spostano con moto disordinato e casuale, creando dei vortici rapidamente variabili nello spazio e nel tempo.

All'interno delle masse d'aria in moto laminare la dispersione degli inquinanti avviene sostanzialmente per diffusione molecolare, causata cioè dagli urti delle molecole d'aria con le molecole di inquinante. Al contrario, masse d'aria in moto turbolento disperdono gli inquinanti con un'efficienza maggiore di molti ordini di grandezza ri-

spetto alla diffusione molecolare. Lo studio delle caratteristiche della turbolenza atmosferica, e del PBL in particolare, riveste quindi un'importanza cruciale nell'analisi dell'inquinamento urbano.

In una massa d'aria in moto turbolento si osserva una continua trasformazione della energia interna in energia cinetica: i vortici, che si formano in aria, tendono poi a perdere, o meglio, a dissipare questa energia durante la stessa propagazione per fenomeni di attrito. Quindi, se non vengono continuamente riforniti di ulteriore energia dall'esterno, i vortici sono destinati a dissolversi rapidamente<sup>15</sup>.

La turbolenza atmosferica può avere due origini:

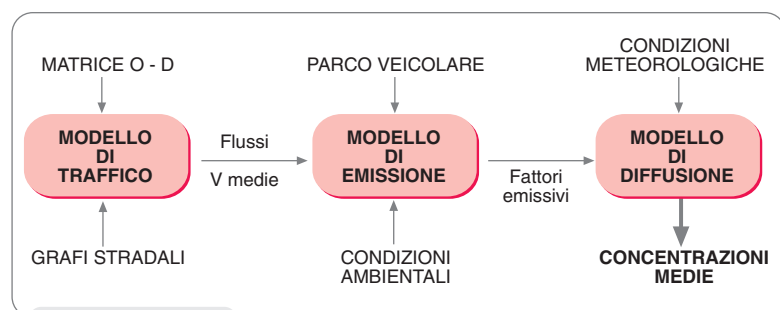
- *meccanica*, se è dovuta alle asperità del terreno (quindi a fenomeni di attrito) e al profilo verticale del gradiente della velocità del vento;
- *termica*, se è indotta da condizioni di instabilità atmosferica e/o una distribuzione dell'energia termica non uniforme all'interno dell'atmosfera.

I moti turbolenti, data la loro natura stocastica, sono impossibili da descrivere analiticamente, dato che le componenti della velocità e le traiettorie delle particelle variano casualmente nel tempo e vengono solitamente descritti per mezzo di grandezze statistiche come i momenti della distribuzione di probabilità della velocità del vento.

### Approccio modellistico all'inquinamento da traffico

Il complesso problema dell'inquinamento atmosferico causato dal traffico veicolare può essere affrontato per mezzo di un modello che, a partire dai dati caratterizzanti le sorgenti inquinanti considerate, presenti nell'area di indagine, e lo stato meteorologico del periodo di studio, simulino l'andamento della concentrazione degli inquinanti.

Nel caso specifico dell'inquinamento indotto da sorgenti veicolari si può articolare lo studio in tre passi per mezzo di una suite

**Figura 5**

Schema a blocchi di una tipica suite modellistica per lo studio dell'inquinamento urbano da traffico. Sono indicati i tipi di modelli impiegati, i gruppi di dati in input e i gruppi di dati forniti in cascata da ciascun modello al successivo

modellistica del tipo mostrato in figura 5.

Lo schema a blocchi riporta la tipologia generale di modelli e dati da impiegare. La scelta degli specifici modelli da utilizzare è legata alla scala temporale e spaziale in cui si vuole operare, al tipo di risultati che si desidera ottenere e a considerazioni pratiche di reperibilità e conoscenza dell'utilizzo dei modelli stessi.

Nei prossimi paragrafi si descriveranno brevemente i principi su cui si basano i diversi tipi di modelli, con particolare riferimento ai modelli effettivamente utilizzati per lo studio dell'inquinamento da traffico nell'area bolognese.

### I modelli di traffico

I modelli di traffico hanno come obiettivo quello di ottenere la distribuzione e la caratterizzazione del traffico sulla rete stradale oggetto di studio (o sulla rete logistica, in generale) a partire dai dati sulla richiesta ed offerta di mobilità<sup>17</sup>. Nel caso specifico della simulazione del traffico veicolare all'interno di una rete urbana, i dati in uscita sono costituiti dal flusso veicolare [*veicoli/h*] e la velocità media [*km/h*], definiti per ogni arco stradale.

All'interno della suite, si è scelto un modello di assegnazione del traffico denominato VISUM.

VISUM è un programma di calcolo nato per consentire una gestione ottimale del settore dei trasporti. Esso si basa sull'uso di una o più matrici OD (origine-destinazione) di spostamento, elaborate da specifici programmi che vengono utilizzati in connessione con VISUM.

Le matrici OD sono valutate a partire da interviste effettuate a campione sulla popolazione dell'area urbana e dei Comuni limitrofi e quantifica i poli di origine e di destinazione degli spostamenti periodici della popolazione. Il modello ripartisce quindi i flussi veicolari all'interno della rete stradale, a partire da nodi di origine verso i poli attrattivi di destinazione dei percorsi.

In particolare, possono essere definite due tipi di matrici OD e di flussi, in base alla modalità di trasporto che si intende pianificare, distinguendo tra privato e pubblico.

Il procedimento completo che permette di giungere al risultato si articola in tre passi: valutazione della generazione del traffico, elaborazione della sua distribuzione e ripartizione degli spostamenti all'interno della rete studiata. La definizione dei percorsi sistematici di spostamento è realizzata in base alla ricostruzione del comportamento dei gruppi omogenei individuati all'interno della popolazione censita e alla localizzazione delle attività attrattive nell'area di analisi unita a una serie di vincoli e criteri, quali la scelta del percorso di minimo tempo e la conservazione della somma dei flussi entranti e uscenti nei nodi.

### I modelli emissivi

Nel 1985, all'interno del progetto CORINAIR (vedi sopra "La classificazione delle emissioni veicolari"), è stato elaborato COPERT (Computer Programme for estimating Emissions from Road Transport), un programma software che stima le emissioni inquinanti da sorgenti mobili, diventato il modello standard europeo per le emissioni stradali. Non mancano naturalmente altre attività di ricerca che hanno portato ad altri modelli emissivi elaborati a livello delle singole nazioni. Questi altri modelli si basano su considerazioni e ipotesi diverse tra loro e da quelle del modello COPERT, rendendo i rispettivi risultati difficilmente confrontabili. Gli Stati Uniti, d'altro canto, hanno adottato un loro specifico modello, diverso ancora dai precedenti, denominato MOBI-

LE, che tiene conto della specificità dei combustibili e del parco circolante USA.

I modelli finora realizzati nei paesi dell'Unione Europea sono suddivisibili in tre grandi categorie, che si distinguono principalmente per le differenti ipotesi adottate per il loro sviluppo.

L'approccio modellistico europeo che ha l'origine più lontana nel tempo si basa sulla constatazione che le emissioni medie di un veicolo durante la marcia su un dato percorso sono funzione della velocità media. In particolare le concentrazioni raggiungono i massimi valori in corrispondenza di cicli a bassa velocità caratterizzati da frequenti arresti e partenze.

Questo tipo di modelli si basa su relazioni funzionali che legano velocità media e quantitativo di sostanza emessa per chilometro, ricavate interpolando molti dati sperimentali forniti da prove di emissione ripetute su un banco a rulli o banco motori. Il modello più diffuso, appartenente a questo filone, è proprio il COPERT, nel quale le curve di emissione sono basate sull'ipotesi che il veicolo percorra un ciclo di guida standard, come definito nelle direttive EURO.

Questo gruppo di modelli è però suscettibile di alcune critiche: in particolare il ciclo di guida descritto dalle norme EURO non è un ciclo rappresentativo delle reali condizioni di guida su strada, che possono variare notevolmente pur a parità di velocità media. Quindi un metodo di calcolo che tenga conto solo di tale parametro può essere considerato limitato e soggetto a notevoli incertezze.

Per una più realistica valutazione dei coefficienti emissivi i modelli più recenti introducono almeno un ulteriore parametro, da affiancare alla velocità media: in genere viene considerato l'andamento dell'accelerazione nel tempo, ovvero il prodotto *velocità \* accelerazione*. I modelli emissivi di questo tipo forniscono come risultati i valori istantanei delle emissioni e non i valori mediati su un percorso, come accade per i modelli descritti in precedenza, inoltre ge-

neralmente sono basati su misurazioni effettuate con riferimento a cicli di guida più realistici, costruiti a partire da dati raccolti durante cicli di guida condotti su strada.

Un ultimo gruppo di modelli, invece, assume come elemento di distinzione tra i vari cicli di guida un parametro difficilmente quantificabile: la condizione del traffico. L'obiettivo principale è quello di fornire il valore medio delle emissioni veicolari su un dato percorso. A ciascuna situazione definita viene attribuito un gruppo di fattori di emissione, specifico a seconda del tipo inquinante e di veicolo presi in considerazione<sup>18</sup>.

Qualunque sia il modello emissivo da applicare, esso necessita in ingresso delle seguenti informazioni:

- condizioni climatiche e periodo della simulazione;
- inquinanti e sorgenti oggetto di studio;
- descrizione delle sorgenti;
- informazioni caratterizzanti le modalità di emissione.

Parallelamente in uscita si otterrà la quantificazione delle emissioni e dei consumi di combustibile in forma aggregata o in modo specifico per ciascuna categoria veicolare e per ciascun arco stradale.

#### *Il modello emissivo TEE (Traffic Emissions and Energetics)*

TEE è un modello finalizzato alla stima delle emissioni veicolari e dei consumi di combustibile sia a livello microscopico (strade) sia macroscopico (città), realizzato dall'ENEA nel 1991, in continuo perfezionamento ed ampliamento.

Esso eredita da COPERT (in accordo con le convenzioni CORINAIR) la classificazione delle categorie veicolari del parco circolante in Europa in microcategorie, in base a combustibile impiegato, cilindrata e normativa CEE di riferimento, che possono essere incluse in macrocategorie definite dall'utente come ad esempio due ruote, auto, veicoli leggeri e pesanti.

TEE utilizza curve di emissione provenienti da due database, ottenute per veicolo e in-

quinante nell'unità di tempo, in condizioni standard definite da CORINAIR; il primo database coincide con quello di COPERT, mentre il secondo è stato ricavato nell'ambito del progetto europeo denominato Drive-Modem.

TEE si differenzia da altri prodotti perché è in grado di offrire all'utente tre opzioni di calcolo delle emissioni. Il primo metodo è basato sulla velocità media: le emissioni sono funzioni polinomiali della velocità media tenuta dal veicolo durante il tragitto percorso.

Le altre due opzioni vogliono invece costituire un superamento della trattazione classica, fornendo degli approcci validi ed avanzati allo studio dell'impatto dei veicoli in area urbana e portano alla precisazione dell'ampio margine di variabilità emissiva a parità di velocità media in differenti condizioni di traffico e di guida.

L'opzione di maggior interesse offerta da TEE è sicuramente quella della "velocità media corretta", in cui le emissioni sono calcolate a partire dall'usuale approccio in velocità media inserendo però alcuni fattori correttivi:

$$KCF = KCF0 * d(D) * g(G) * l(L) * v(V)$$

I diversi fattori tengono conto di grandezze che condizionano l'entità delle emissioni effettive, i cui effetti non possono essere considerati attraverso la velocità media: densità veicolare  $D$  [veicoli/km], lunghezza effettiva dell'arco considerato  $L$ , e tempo del verde  $V$  dei semafori eventualmente presenti (espresso come percentuale del totale tempo di un ciclo semaforico), in modo da poter considerare le fermate e le partenze indotte dalla presenza dei semafori.

Per la densità veicolare TEE pone un limite massimo, per strade a una corsia, di 200 veicoli/km escludendo in questo modo situazioni praticamente impossibili, ma che qualche volta i modelli di traffico erroneamente prevedono.

Nella versione attuale di TEE i fattori correttivi sono stati elaborati solo per alcuni in-

quinanti (CO, benzene e PM10) e per alcune microcategorie veicolari (auto alimentate a benzina e a gasolio).

La terza opzione si basa sulla conoscenza della velocità istantanea dei veicoli e permette una fedele valutazione delle emissioni su percorsi abbastanza brevi e conosciuti. Questo metodo proposto si è rivelato molto efficace per confrontare a livello emissivo diverse soluzioni per la regolamentazione degli incroci in ambito urbano (semafori, rotoarie ecc.).

TEE persegue l'obiettivo di offrire all'utente un'alta flessibilità nei dati in ingresso. Nell'impostazione dello scenario della simulazione, infatti, si può assegnare a ciascun arco stradale della rete in esame una composizione del flusso veicolare transiente a scelta fra 11 tipologie definibili dall'utente, superando in tal modo la tradizionale suddivisione dei flussi in urbano/extraurbano/autostradale. Inoltre è possibile intervenire sul parco veicolare introducendo nuove microcategorie, purché ne siano noti i fattori emissivi a priori, e aggiornando i parametri qualitativi medi del parco stesso (età media, peso, livello manutentivo, combustibile impiegato e così via) con grandezze specifiche del parco effettivo della rete studiata.

Completano il quadro dei dati di ingresso, il periodo della simulazione, le temperature medie ambientali (orarie), la pendenza delle strade, l'altezza rispetto al livello del mare.

Infine TEE permette di prendere in considerazione i flussi parcheggiati il cui apporto risulta essere molto rilevante, essendo associato ai fenomeni di volatilizzazione del combustibile, nella fase di raffreddamento del motore, e alle partenze a freddo.

### I modelli diffusivi

Lo studio della diffusione atmosferica delle sostanze liberate da fonti sia naturali sia antropiche si avvale dell'applicazione di modelli che possono essere o delle vere e proprie riproduzioni in scala del fenomeno

indagato (modelli fisici) o algoritmi che descrivono matematicamente gli aspetti fisici e chimici che caratterizzano il processo (modelli teorici).

I modelli teorici si distinguono a loro volta in statistici e in deterministici.

I modelli deterministici si basano su equazioni che descrivono il moto della sostanza in atmosfera: essi riproducono il destino delle sostanze emesse in atmosfera e forniscono una relazione fra sorgenti emissive e concentrazioni stimate. In base ai risultati forniti, si può procedere ulteriormente con la stima dei danni da essi arrecati all'ecosistema. Inoltre i modelli deterministici consentono di valutare degli scenari di controllo e riduzione delle emissioni dal punto di vista dei reali benefici ottenuti, come nel caso presentato nel successivo paragrafo.

I modelli deterministici si raggruppano in tre grandi classi, in cui poi sono stati sviluppati vari filoni modellistici:

- *modelli euleriani*: essi descrivono l'andamento delle concentrazioni degli inquinanti assumendo una griglia spaziale di riferimento fissa. Utilizzano il sistema di equazioni differenziali derivanti dalla teoria della diffusione. La loro applicazione permette in particolare lo studio dei fenomeni di trasferimento di massa e di calore all'interno dell'atmosfera;
- *modelli lagrangiani*: assumono a priori andamenti di tipo probabilistico delle grandezze fisiche e descrivono la traiettoria delle masse inquinanti in atmosfera che si muovono in atmosfera;
- *modelli gaussiani*: sono i modelli analitici più semplice da applicare e da comprendere. In essi si presume che la concentrazione in aria dell'inquinante emesso da una sorgente puntiforme e continua abbia un andamento gaussiano con una larghezza dipendente dalle condizioni di turbolenza dello strato limite planetario<sup>19</sup>. Con opportune modifiche possono essere applicati al caso di sorgenti lineari, aerali o volumetriche e sono oggetto di studio e affinamento ormai trentennale.

#### *Il modello diffusivo ADMS-Urban (Atmospheric Dispersion Modelling System)*

Il modello ADMS Urban permette la simulazione e lo studio dei fenomeni di inquinamento associati a sorgenti industriali, domestiche e stradali situate all'interno di una area delle dimensioni tipiche di una città. Il programma è stato elaborato dalla società CERC (Cambridge Environmental Research Consultants) ed è in continua evoluzione: la versione utilizzata sull'area bolognese è la 1.6 del 2002.

L'algoritmo alla base di ADMS è di tipo gaussiano avanzato, con varianti sviluppate per permetterne l'applicazione a diverse sorgenti nelle più differenti condizioni climatiche.

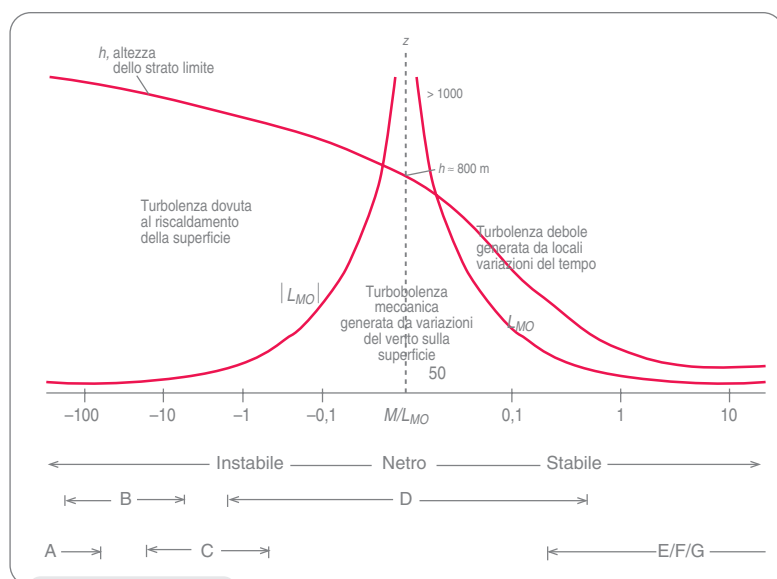
Tale versione di ADMS permette di trattare CO, VOC, PM (ovvero PST), SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Inoltre è prevista la possibilità di considerare nella simulazione le reazioni chimiche, qualora fossero rilevanti, tra gli ossidi di azoto e i VOC con l'ozono.

Per quanto riguarda le sorgenti da traffico urbano, ADMS Urban tratta gli archi stradali come sorgenti lineari, identificate dalle coordinate dei due estremi e caratterizzate dai seguenti dati<sup>21</sup>:

- larghezza in  $[m]$ ;
- altezza media degli edifici lungo la strada in  $[m]$ ;
- flusso veicolare in  $[n^\circ \text{veicoli}/h]$  per ciascuna tipologia (*light duty* e *heavy duty*);
- velocità media dei veicoli, distinguendo tra le due tipologie, in  $[km/h]$ .

In questo ambito, è possibile affinare la modellazione del fenomeno diffusivo utilizzando, nei casi opportuni, uno specifico algoritmo di Street Canyon che considera la situazione diffusiva particolare che si verifica quando la strada ha una larghezza inferiore all'altezza degli edifici ai suoi fianchi. In questo caso si crea un vortice interno alla via e una conseguente condizione di ricircolo e di ristagno degli inquinanti emessi all'interno del canyon stesso.

A differenza di altri programmi di simula-



**Figura 6**  
Legame tra stabilità  
atmosferica, rappor-  
to  $h/L$  e altezza  $h$   
dell'UBL

Fonte: CERC User Guide, ADMS Urban - Version 1.6, Cambridge, 2000, p. 177.

zione dei fenomeni diffusivi in atmosfera, ADMS Urban non fa ricorso alle classi di stabilità di Pasquill-Gifford, che consentono una descrizione solo approssimativa dell'Urban Boundary Layer. Gli algoritmi di calcolo si basano invece principalmente su due grandezze: il reciproco della lunghezza  $L$  di Monin Obukhov e l'altezza  $h$  dello strato limite, che permettono una più rigorosa e realistica rappresentazione della struttura (figura 6).

Il risultato del modello consiste nelle concentrazioni degli inquinanti, concentrazioni che possono essere ottenute in singoli punti, alle quote desiderate, o su griglie bi- o tri-dimensionali.

Il modello assume due scale temporali<sup>20</sup>: a breve termine (short term) calcolando le concentrazioni medie sull'intervallo temporale di riferimento, normalmente di una o più ore, e a lungo termine (long term) per ottenere concentrazioni confrontabili con i valori limite e i valori guida stabiliti dalle leggi nazionali e dalle direttive europee (come le medie orarie, giornaliere, annuali o i valori dei percentili).

L'utilizzo di ADMS Urban è estremamente

efficace quando esso viene connesso con programmi di rappresentazione geografica del territorio della famiglia dei GIS (Geographical Information System).

Grazie a questa estensione si possono trasferire informazioni da un programma all'altro in entrambe le direzioni. Arcview GIS permette la visualizzazione grafica di mappe cui possono essere associati vari tematismi, quali il grafo stradale e i rispettivi carichi di traffico oppure le concentrazioni al suolo degli inquinanti. Attraverso questa correlazione è stato possibile introdurre i dati relativi agli archi stradali della mappa di Bologna da Arcview direttamente in ADMS Urban e, grazie all'interconnessione con Spatial Analyst, visualizzare le mappe di concentrazione risultanti.

## Conclusioni

Si sono illustrati i principi alla base della costruzione di una suite modellistica finalizzata alla valutazione dell'impatto del traffico sulla qualità dell'aria di una zona urbana. La catena modellistica è stata messa effettivamente in funzione e ha fornito risultati interessanti, sia per quanto riguarda la valutazione di operatività del piano generale del traffico urbano, elaborato dal Comune di Bologna nel 2001<sup>22</sup>, sia quando si è utilizzata in raffronto coi dati delle centraline della rete urbana di Bologna in una giornata invernale<sup>23</sup>.

Vari raffinamenti sono possibili. Dal punto di vista dell'efficienza sarà ad esempio opportuno prevedere un metodo maggiormente automatizzato per il passaggio dei dati fra le varie componenti del modello, oggi realizzato mediante opportune tabelle in formato Excel.

Dal punto di vista delle applicazioni pratiche, è necessario reperire dati migliori sui flussi di traffico e sulla loro evoluzione nel corso del tempo per migliorare il già pur buon accordo fra previsioni modellistiche e misure.



## Bibliografia

1. MALOSTI D., ROMANAZZO M., *Mobilità, trasporto, traffico: come controllare l'entropia?*, Energia, ambiente e innovazione, 1/98, pp. 31-46.
2. OKE T.R., *Boundary Layer Climates*, II<sup>a</sup> ed., Methuen, Cambridge, 1987.
3. MEET report: *Calculating transport emissions and energy consumption*, dal sito internet: <http://www.eea.eu.int>, 1999.
4. WALLACE J.M., HOBBS P.V., *Atmospheric science an introductory survey*, Academic Press, California, 1977.
5. UCCELLI R., *Fonti, livelli ed effetti dell'inquinamento atmosferico*, Energia, ambiente e innovazione, 1/97, pp. 58-70.
6. CORNETTI G., *Macchine termiche*, II<sup>o</sup> volume, ed. Il Capitello, Torino, 1996.
7. UCCELLI R., LOMBARDI C.C., MAURO F., *Impatto ambientale e sanitario dei carburanti per autotrazione*, Energia, ambiente e innovazione, 4-5/96, pp. 19-32.
8. ORTOLANI C., *Combustione*, III<sup>a</sup> ed., Città Studi Edizioni, 1994.
9. GIACOSA D., *Motori endotermici*, XIV<sup>a</sup> ed., Hoepli, Milano, 1995.
10. MONTALI M., *La risposta tecnologica IVECO ai problemi ambientali*, parte I, ATA Ingegneria automobilistica, vol. 49, 1996, pp. 271-278.
11. MONTALI M., *La risposta tecnologica IVECO ai problemi ambientali*, parte II, ATA Ingegneria automobilistica, 50, 1997, pp. 11-23.
12. GAMBINO M., MIGLIACCIO M., *Combustibili alternativi per l'autotrazione*, Liguori editore, Napoli, 1993.
13. STULL R.B., *An introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publisher, Belgio, 1988.
14. EPA Report, tratto dal sito internet: <http://www.epa.gov>.
15. SANTODIMAURO L., *Dinamica dell'inquinamento atmosferico da impianti industriali*, Calderini, Milano, 1975.
16. SEINFELD J.H., PANDIS S.N., *Atmospheric chemistry and physics*, John Wiley & Sons, Canada, 1998.
17. SARTORE M., *Rappresentazioni della mobilità. Costruzione di un osservatorio intra-irregionale*, dal sito internet: <http://www.mondogis.it>.
18. MEET report: *Calculating transport emissions and energy consumption*, dal sito internet: <http://www.eea.eu.int>, 1999.
19. AUTORI VARI, *Handbook of applied meteorology*, Wiley – Interscience, Canada, 1985.
20. CERC User Guide: *ADMS Urban – Version 1.6*, Cambridge, 2000.
21. MCHUGH C.A., CARRUTHERS D.J., EDMUNDS H.A., *ADMS Urban: an air quality management system for traffic, domestic and industrial pollution*, dal sito internet: [www.cerc.co.uk](http://www.cerc.co.uk).
22. NARDINI E., *Sviluppo ed applicazione in area urbana di un modello integrato emissione-dispersione sui principali inquinanti da traffico*, tesi di laurea, Università degli studi di Bologna, facoltà di Ingegneria.
23. PIERSANTI A., *Il particolato atmosferico in area urbana: strumenti modellistici per l'analisi di scenario*, tesi di laurea, Università degli studi di Bologna, facoltà di Ingegneria.



# Effetti del **cambiamento tecnologico** sullo sviluppo economico: un'analisi econometrica "panel" sui sei maggiori paesi OCSE

Gli effetti del cambiamento tecnologico sullo sviluppo economico sono indagati a partire dalle importanti trasformazioni strutturali che hanno interessato le maggiori economie industrializzate nel corso degli ultimi trenta anni. L'analisi, condotta su base econometrica, è tesa a catturare il ruolo della componente tecnologica nei processi di sviluppo evidenziandone l'articolazione e la complessità sempre più accentuate

**DANIELA PALMA**  
**GAETANO COLETTA**  
**ALESSANDRO ZINI**

ENEA  
Unità di Agenzia – Advisor

**N**ell'ultimo scorcio di secolo il ruolo del cambiamento tecnologico sui processi di sviluppo economico si è straordinariamente accentuato, rivelando al contempo dinamiche sempre più complesse.

In un precedente studio<sup>1</sup> è stato evidenziato, in particolare, come l'emergere di una base sempre più diffusa e consistente di produzioni ad elevato contenuto tecnologico nelle aree più industrializzate abbia trovato corrispondenza sia in un generale potenziamento degli investimenti in R&S, sia in una progressiva concentrazione di tali investimenti proprio all'interno dei comparti ad alta tecnologia, e come a ciò abbia fatto riscontro il consolidarsi di nuovi vantaggi competitivi ai quali il processo di globalizzazione economica ha fatto da cassa di risonanza. La rilevanza di questo scenario si è qualificata anche sulla base di processi innovativi sempre più differenziati a livello di paese, traducendo specificità competitive sempre più significative a livello internazionale. Sono stati riscontrati, infine, fenomeni di tendenziale coerenza tra i processi innovativi dei diversi paesi, le conseguenti dinamiche competitive e l'andamento del reddito pro capite, assunto quale misura di sintesi dello sviluppo in accordo con alcune tra le più influenti valutazioni dell'analisi economica<sup>2,3</sup>.

Al fine di indagare come la dinamica del cambiamento tecnologico si sia riflessa sulla dinamica di sviluppo delle economie industrializzate, il presente studio, effettuato nell'ambito delle attività dell'Osservatorio ENEA sull'Italia nella Competizione Tecnologica Internazionale, propone un modello interpretativo della dinamica del reddito pro capite in relazione alla dinamica di variabili macroeconomiche rilevanti associate al cambiamento tecnologico.

L'analisi è stata condotta su base storica in un arco di tempo che va dalla seconda metà degli anni 60 alla fine degli anni 90, un periodo sufficientemente lungo per cogliere indicazioni sui cambiamenti strutturali oggetto dello studio.

È stata così impostata una stima econometrica su dati panel relativi ai sei maggiori paesi industrializzati (Stati Uniti, Giappone, Francia, Germania, Regno Unito, Italia). In tal senso si è inteso non solo catturare le direzioni della dinamica strutturale dei sistemi economici, ma anche effettuare una valutazione appropriata delle specifiche relazioni tra le variabili indagate. Pur riconoscendo le difficoltà che nascono dal dover disporre di un congruo numero di osservazioni ai fini della significatività della stima statistica, è infatti evidente che analisi che si avvalgono di osservazioni su sistemi economici con caratteristiche strutturali eccessivamente diverse non possano che dare luogo a conclusioni poco più che generiche se non addirittura distorte.

La scelta sopra indicata dei sei maggiori paesi industrializzati intende, quindi, eliminare questi inconvenienti. Nonostante ciò, la tendenza ad intraprendere studi caratterizzati dall'aggregazione di soggetti-paese alquanto disomogenei si è, in varia misura, relativamente diffusa.

Nel portare alla luce significative evidenze per quanto riguarda il più forte rilievo assunto dal processo di cambiamento tecnologico sulla dinamica dello sviluppo economico, questi studi hanno fatto così emergere approssimazioni importanti su aspetti relativi sia all'interazione tra variabili macroeconomiche e stato della tecnologia, sia al peso specifico, sempre più rilevante, assunto dalle diverse economie paese.

Lungo queste linee di analisi, il presente studio è strutturato come segue.

Il paragrafo è dedicato alla presentazione del modello e delle variabili di stima, nel quadro dei principali riferimenti analitici che hanno caratterizzato l'indagine economica dell'ultimo decennio sul tema oggetto di studio. Un ulteriore paragrafo presenta i risultati ottenuti da diverse specificazioni del modello in base agli obiettivi di studio. Infine, sono fornite alcune riflessioni conclusive anche in relazione alle ricerche in corso sul tema.

## Il contesto d'analisi, il modello, i dati

Gli sviluppi dell'analisi economica che nel corso degli ultimi venti anni hanno riguardato la teoria della crescita hanno dato anche luogo a numerosi studi di tipo empirico. In base alle maggiori indicazioni tratte dal dibattito teorico, tali analisi si sono particolarmente concentrate sulle questioni della convergenza dei sistemi economici e sul ruolo giocato dal cambiamento tecnologico di tipo endogeno<sup>4-6</sup>. Assegnando un ruolo preminente alle dinamiche del cambiamento tecnologico nella crescita di lungo periodo, tali studi hanno soprattutto sottolineato la complessità con cui questo processo si sviluppa. Le conclusioni emerse da queste riflessioni sottopongono all'attenzione essenzialmente due punti:

1. le dinamiche della convergenza economica sono fenomeni non univocamente definiti, ma ben caratterizzati a livello di periodo storico e di paese;
2. le differenze riscontrabili tra paesi diversi nei tassi di accumulazione di conoscenza (nella maggior parte dei casi rappresentata attraverso le *proxy* del "capitale umano", delle spese in R&S o dalle statistiche brevettuali) hanno una relazione con le differenze tra *performance* economiche a livello nazionale. Nell'ambito di tali punti interessa in particolare evidenziare il ruolo assunto da alcune componenti concettuali che tuttora continuano a rappresentare un riferimento di base dell'indagine.

Una posizione per così dire "preliminare" è costituita dalla verifica dell'ipotesi di *catching up*, in base alla quale il sentiero di crescita dei sistemi economici è significativamente influenzato da quello dei paesi con maggiori tassi di sviluppo, tipicamente leader nell'innovazione<sup>14</sup>. In secondo luogo appare rilevante il contributo dell'investimento *knowledge-based* valutato rispetto a quello relativo alla tradizionale variabile di "spesa di investimento"<sup>7</sup>. La specializza-

zione produttiva, in particolare in quei settori definibili "ad alto tasso di innovazione e/o di opportunità tecnologica", costituisce infine un terzo importante pilastro di riflessione e indagine che qualifica ulteriormente la componente di domanda aggregata del sistema economico in linea con il concetto più classico di "divisione del lavoro". In quest'ultimo caso le indicazioni sono prevalentemente tratte dalle posizioni di "vantaggio comparato" del singolo paese nel commercio internazionale, quale contesto in cui si traduce la forza competitiva della specializzazione produttiva.

È inoltre importante osservare come, nel complesso di tali studi, non vi sia un riferimento univoco alla variabile reddito, ma sia utilizzata, quasi in modo intercambiabile, la variabile produttività. A dispetto dello stretto legame presente tra le due variabili e del ruolo che questo riveste nella dinamica della crescita, è infatti opportuno considerare gli elementi per cui emergono precise distinzioni sia sotto il profilo concettuale sia, contestualmente, sotto il profilo specifico dell'indagine sul cambiamento strutturale del sistema economico. È evidente, infatti, come il concetto di produttività si leghi ad un particolare stato del sistema economico che comprende anche un particolare stato della tecnologia.

Per ogni dato stato del sistema, la produttività è certamente indicativa dei cambiamenti strutturali che con il tempo si delineano ma non per questo traduce in modo univoco la misura di tale cambiamento. Poiché l'indagine risulta correttamente impostata secondo i criteri dell'analisi dinamica<sup>8,3</sup>, e non della statica comparata, valori e variazioni della produttività incorporano non solo i contenuti specifici di diverse modalità produttive (che esprimono le alternative tra tecniche diverse) ma anche i contenuti, assai più complessi, del "mutamento tecnologico" del sistema rispetto al quale sono pure rilevanti aspetti adattivi di "entrata a regime". Non meraviglia, dunque, che molte tra le analisi che hanno in-

dagato lo sviluppo attraverso le misure di produttività non sempre abbiano dato luogo a risultati significativi o coerenti<sup>9</sup>.

La capacità esplicativa della variabile reddito non è invece soggetta a questo tipo di limitazioni non apparendo, al contempo, riduttiva rispetto al concetto, più esteso, di sviluppo economico. Relativamente alla osservazione in cui si puntualizza la distinzione tra crescita del reddito e dinamica dello sviluppo, è stato infatti replicato come un processo di crescita non possa aver luogo se non nell'ambito di un processo, più ampio, di sviluppo<sup>2</sup>. Se a tale osservazione si lega quella, più specifica, relativa al concetto di reddito pro capite e al corretto concetto di "ricchezza" che questo traduce, secondo il fondamentale chiarimento introdotto da Adam Smith ne "La Ricchezza delle Nazioni", è possibile concludere che il reddito pro capite può essere una variabile ben rappresentativa dell'analisi dello sviluppo economico e delle sue determinanti. Alle osservazioni che riguardano la specificazione della variabile reddito, quale *proxy* del processo di sviluppo, debbono essere infine aggiunte quelle che ne qualificano il "potenziale" di crescita alla luce della disponibilità delle risorse complessive del sistema e dell'influenza che su questa esercita la dipendenza dalle importazioni dall'estero. Il determinarsi di un "vincolo estero" alla crescita è fatto noto e consolidato in letteratura economica allorché si riconosce la sempre più elevata apertura dei sistemi economici agli scambi internazionali. Questo aspetto ha in particolare sollecitato il filone della economia postkeynesiana<sup>10,11</sup> che, ponendo l'attenzione sulle caratteristiche inerenti le diverse componenti di domanda, ha evidenziato nell'ambito di questa l'esistenza di una componente di vincolo estero.

La forte dinamica associata alla crescita dell'*import penetration* di prodotti ad alto contenuto tecnologico, determinato dalla dinamica stessa dello sviluppo tecnologico, ha vieppiù accentuato il carattere di

questa componente "specializzandola", per così dire, in funzione delle variazioni dinamiche delle esportazioni di prodotti ad alto contenuto tecnologico<sup>1</sup>. Sotto questo punto di vista l'ipotesi di esistenza di un vincolo estero alla dinamica di crescita del reddito sembra dunque assumere una forte rilevanza suggerendo l'introduzione di una componente di domanda più complessa di quella che, alla luce della riformulazione "post-keynesiana" delle equazioni di crescita, risulta individuata attraverso la "specializzazione" della domanda nei settori "giusti"<sup>12,13</sup>.

Nel presente studio la specificazione generica del modello di crescita da sottoporre a stima assume la seguente forma:

$$\hat{PIL}_{pc_{it}} = f\left(\frac{PIL_{pc}}{PIL_{pcUS}_{it}}, \frac{1}{2} \sum_{t=-1}^0 \frac{I\hat{N}V}{PIL_{it}}, \frac{1}{3} \sum_{t=-2}^0 \frac{B\hat{E}RD}{N_{it}}, \Delta \frac{BC_j}{PIL_{it}}\right)$$

$\hat{PIL}_{pc_{it}}$  = tasso di variazione percentuale del PIL pro capite del paese i-mo al tempo  $t$

$\frac{PIL_{pc}}{PIL_{pcUS}_{it}}$  = rapporto fra il PIL pro capite del paese i-mo e il PIL pro capite del paese leader (Stati Uniti) al tempo  $t$

$\frac{1}{2} \sum_{t=-1}^0 \frac{I\hat{N}V}{PIL_{it}}$  = media su due anni della variazione percentuale del rapporto fra investimenti fissi lordi e PIL del paese i-mo

$\frac{1}{3} \sum_{t=-2}^0 \frac{B\hat{E}RD}{N_{it}}$  = media su tre anni della variazione percentuale del rapporto fra BERD (Business Enterprise Research of Development) e numero di occupati del paese i-mo

$\Delta \frac{BC_j}{PIL_{it}}$  = variazione in punti percentuali del saldo della bilancia commerciale in rapporto al PIL nel comparto j-mo del paese i-mo

La prima delle variabili esplicative è rappresentativa dell'effetto *catching-up* al qua-

le si è sopra accennato. Essa esprime le potenzialità di crescita dovute al divario dal paese alla "frontiera" tecnologico-economica (gli Stati Uniti nel caso specifico così come anche altrove specificato, es. in 14) e alla conseguente opportunità di implementare nel proprio sistema socio-economico tecniche e modelli di produzione e di consumo già collaudati altrove. Il segno atteso di tale variabile è quindi negativo. È attesa, in altri termini, una relazione inversa fra il tasso di crescita di un paese e la prossimità del suo livello del reddito pro capite a quello del paese più sviluppato (ovviamente ciò si verifica solo in presenza di altre condizioni, non solo economiche).

La seconda variabile esplicativa, relativa alla spesa in investimenti fissi lordi, è stata costruita prendendo la media su due anni della variazione percentuale del rapporto fra investimenti e PIL per tenere conto sia di aspetti interpretativi, sia di più specifici problemi di stima. Come è largamente noto, quello degli investimenti è infatti l'aggregato macroeconomico del reddito nazionale più volatile ed è fortemente correlato alle fluttuazioni del PIL. Le decisioni di investimento riflettono, tra l'altro, le aspettative delle imprese circa l'evoluzione futura della domanda e dell'economia; è pertanto plausibile che la loro influenza sul PIL si protragga nel tempo. La considerazione di variabili ritardate degli investimenti accanto a quella contemporanea al reddito osservato avrebbe provocato, però, una perdita di gradi di libertà, un motivo, questo, che porta solitamente ad escludere i ritardi nei modelli di stima. La soluzione adottata nel presente lavoro è stata, quindi, quella di considerare una media mobile delle variazioni percentuali dell'indicatore su un intervallo di due anni. In questo modo, inoltre, si sono attenuati eventuali andamenti congiunturali.

La terza variabile esplicativa, la BERD, ossia la spesa in ricerca e sviluppo delle

imprese, rapportata al numero di occupati, è specifica dell'"investimento *knowledge based*". Rispetto alla usuale spesa in investimento, essa manifesta i suoi effetti in un periodo più lungo mentre esibisce una più forte e significativa volatilità nel breve periodo. Per tali motivi in questo caso è stata presa in considerazione una media mobile delle variazioni percentuali dell'indicatore su tre anni.

In definitiva, con la selezione della spesa per investimenti e della spesa in R&S delle imprese elaborate nella forma dei suddetti indicatori si è inteso introdurre una componente composita di spesa che consentisse di valutare l'effetto articolato della "spesa di investimento" in ragione dell'importanza assunta dal cambiamento tecnologico.

L'ultima variabile esplicativa del modello, relativa al commercio internazionale, è riferita al saldo della bilancia commerciale quale vincolo alle potenzialità di crescita del paese, come più sopra discusso. A tale riguardo sono state prese in considerazione tre diverse versioni del saldo commerciale, a seconda del suo riferirsi *a*) alla totalità dei beni e servizi scambiati, *b*) ai soli beni manufatti (con l'esclusione dei prodotti energetici), *c*) ai beni manufatti ad alta tecnologia<sup>(1)</sup>. L'inclusione di specifiche alternative del saldo commerciale è funzionale alla verifica dell'esistenza di un "vincolo estero" sempre più collegato alla competitività del paese nelle produzioni ad alta tecnologia. Infine, affinché l'ipotesi di vincolo abbia una sua propria consistenza, il segno atteso per i coefficienti di stima si assume negativo, dovendo esprimere, per ogni dato valore del PIL, variazioni negative del saldo commerciale, a sua volta determinate da una più elevata elasticità alle importazioni.

La standardizzazione delle diverse variabili, introdotta per limitare l'influenza della dimensione del paese, è stata infine operata

<sup>1</sup> Il comparto dei prodotti ad alta tecnologia è stato costruito sulla base della classificazione elaborata dall'Osservatorio ENEA sull'Italia nella Competizione Tecnologica Internazionale e da questo utilizzata per la redazione dei propri rapporti a cui si rimanda per una sua maggiore specificazione<sup>15-17</sup>.

in ragione del significato di ogni indicatore, ma anche della significatività statistica delle variazioni prese in esame. Nel caso della BERD, in particolare, è stato utilizzato il rapporto rispetto al numero di occupati, essendo quest'ultima una grandezza più stabile e significativa dell'usuale rapporto BERD/PIL.

Tutti i dati macroeconomici utilizzati nella costruzione delle variabili sono stati tratti dall'"Economic Outlook" del Sourceoecd Database dell'OCSE e, per consentire valutazioni su base intertemporale depurate dagli effetti inflazionistici a livello generale e a livello paese, sono stati considerati ai prezzi costanti (1995) e in dollari alla parità del potere di acquisto.

Nel caso dei dati relativi ai saldi commerciali le elaborazioni sono state effettuate a partire dalla specifica sezione dell'OCSE dedicata al commercio internazionale (ITCS) sulla base della classificazione del commercio internazionale SITC Rev. 2 (Standard International Trade Classification). La selezione delle serie storiche del commercio in base alla SITC Rev. 2, codifica aggiornata nel 1988 attraverso la SITC Rev. 3, ha consentito infatti di elaborare omogeneamente i dati per tutto il periodo considerato. D'altra parte, l'obiettivo di effettuare valutazioni intertemporali lungo un così lungo periodo comporta dei limiti quanto più l'aggregato di riferimento è specifico ed ha una sua storicità. È questo il caso dell'aggregato di beni definito "ad alta tecnologia", rappresentato nello studio dal paniere elaborato nell'ambito dell'Osservatorio ENEA sull'Italia nella competizione tecnologica internazionale, che caratterizza assai meglio il periodo che ha inizio con gli anni 80. È tuttavia vero che diverse valutazioni sull'importanza che le produzioni ad alta tecnologia hanno acquisito nel tempo<sup>18,12</sup>, depongono a favore di una rappresentatività dell'*high-tech* intrinseca proprio a quest'ultima fase storica, a prescindere da scelte di paniere.

Tutti i dati sono relativi ad una serie tempo-

rale di 30 anni, coprendo il periodo che va dal 1968 al 1997. Questo periodo è stato poi suddiviso in due sottoperiodi di 15 anni ciascuno (1968-1982 e 1983-1997). Il primo sottoperiodo cerca di catturare la fase finale del boom economico degli anni 60 e i successivi *shock* petroliferi con la crisi dei modelli produttivi di massa e dell'organizzazione fordista dell'impresa e della società; il secondo periodo intende comprendere la ripresa dell'economia mondiale, pur caratterizzata da una certa divergenza nella crescita delle economie industrializzate, il progressivo affermarsi della rivoluzione elettronica e più recentemente delle telecomunicazioni, e, più in generale, il principio di una "svolta tecnologica" nei processi di trasformazione delle economie avanzate.

Sul piano della elaborazione statistica, le serie storiche disponibili hanno richiesto alcuni interventi nel caso della Germania. A partire dal 1991 i dati si riferiscono infatti alla Germania unita, mentre, prima di quella data, risultano distinte Germania Federale e Repubblica Democratica Tedesca. Poiché in via di principio il riferimento alla sola Germania Federale anche negli anni 90, o all'aggregazione dei dati della DDR a quelli della Germania Federale per gli anni precedenti, sarebbe stata un'operazione di scarsa utilità interpretativa, si è proceduto nel trattare il dato tedesco del 1991 come un *outlier*, sostituendolo con una sua stima. Altri valori anomali su cui si è intervenuti sono infine quelli relativi alle variazioni del PIL pro capite registrate in corrispondenza degli *shock* petroliferi.

## I risultati della stima

Prima di procedere con la stima del modello, è stata verificata la stazionarietà delle variabili considerate. L'utilizzo di una serie avente radice unitaria in un modello che non presenta cointegrazione fra le sue variabili causa infatti il problema della regressione spuria<sup>19,20</sup>.

È possibile testare la stazionarietà di una

serie di dati panel testando ciascuna serie temporale individuale che la compone, attraverso l'impiego di test tradizionali quali lo *standard Dickey-Fuller test*. Questo test presenta, però, una "bassa potenza", ovvero può far commettere l'errore di accettare la presenza di radice unitaria anche se questa non è presente. In questo lavoro si è quindi ricorso ad un test per radici unitarie per dati panel sviluppato da Levin & Lin, i quali hanno mostrato come, raggruppando i dati, la potenza del test cresca considerevolmente <sup>21</sup>. L'ipotesi nulla del test di Levin & Lin è che ciascuna serie temporale individuale contenga una radice unitaria. Sotto l'ipotesi alternativa la serie presa come panel è stazionaria. Per effettuare il test, in primo luogo i dati della serie panel devono essere trasformati in modo da rimuovere gli effetti specifici legati al paese e al tempo:

$$y_{i,t} = Y_{i,t} - \bar{Y}_i \quad \text{dove} \quad \bar{Y}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Y_{i,t}$$

e

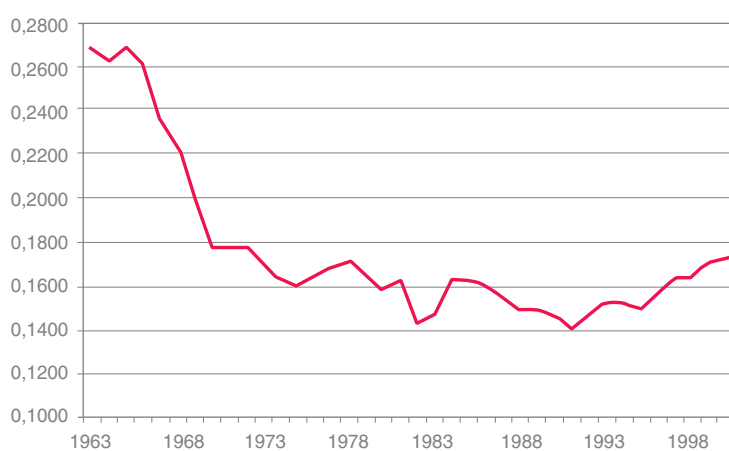
$$x_{i,t} = y_{i,t} - \bar{y}_t \quad \text{dove} \quad \bar{y}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{i,t}$$

Si procede quindi alla stima del "Panel Dickey Fuller model" per vedere se è possibile rifiutare l'ipotesi nulla:

$$x_{it} = \rho x_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t}$$

Nel presente lavoro, essendo risultate stazionarie tutte le variabili del panel, si è pro-

**Figura 1**  
Coefficiente di variazione del PIL pro capite (G6)



seguito con la stima del modello sui tre periodi precedentemente specificati.

Come si può notare dalle tabelle che espongono i risultati della stima per l'intero periodo osservato, il parametro della variabile che approssima l'effetto di *catching up* ha il segno negativo atteso e risulta altamente significativo. Tale risultato è, però, da imputarsi prevalentemente al primo sottoperiodo considerato. La fine degli anni 60 e gli anni 70 erano, infatti, ancora caratterizzati da un forte processo di convergenza del PIL pro capite fra i G6, mentre, a partire dagli anni 80, ma soprattutto nel corso degli anni 90, tale processo sembra aver invertito il *trend* (figura 1).

Questo fenomeno può essere un segnale dell'esaurimento graduale della forza propulsiva dei modelli produttivi e di consumo di massa che avevano caratterizzato l'espansione degli anni 60 e della progressiva affermazione dei nuovi modelli post-fordisti che si sono delineati nel contesto di scenari tecnologici sempre più complessi, a partire dalle ondate tecnologiche determinate dalla "rivoluzione" dell'elettronica e dell'informatica. Seguendo questa interpretazione, è possibile che i paesi considerati abbiano sperimentato una capacità di adattamento al nuovo contesto differenziata.

Nello specifico delle stime relative ai due sottoperiodi i risultati mostrano la significativa influenza esercitata dagli investimenti in R&S a partire dagli anni 80, mentre gli effetti relativi alla consueta spesa in investimento del settore privato appaiono più deboli e distribuiti nel tempo. Nel passaggio dal primo al secondo sottoperiodo si afferma, in altri termini, un nuovo modello di crescita delle economie industrializzate in base al quale da inseguitori tecnologici i diversi paesi si trasformano in competitori tecnologici di pari dignità e legano la propria *performance* economica alla forza in quanto competitori tecnologici. Si afferma, quindi, un modello di crescita in cui non esistono più "rendite" da inseguimento, ma i risultati sono determinati dalla capacità di



Variabile	a	b	c
<i>Catching-up</i>	-11.99326***	-13.08483***	-11.63043***
Investimenti	23.45601***	23.34188***	25.24909***
Spesa in R&S	8.50825***	9.79278***	10.82378***
Saldo comm. totale	-47.43699***		
Saldo comm. manif.		-53.97832***	
Saldo comm. high-tech			-61.61042
<b>Effetti fissi</b>			
Francia	11.14839***	11.89604***	10.75189***
Regno Unito	9.62562***	10.21822***	9.34053***
Germania	12.16647***	13.09103***	11.83668***
Italia	10.92747***	11.72886***	10.50427***
USA	13.92101***	14.95658***	13.51774***
Giappone	12.03909**	12.75794***	11.57132**
R <sup>2</sup> corretto	0.5485	0.5392	0.5110
F-value	25.02	24.28	21.79
Significato della F	(0.000)	(0.000)	(0.000)
F test per l'assenza di effetti fissi	(0.000)	(0.000)	(0.000)

Significatività delle statistiche t:  
 \* al livello del 10%  
 \*\* al livello del 5%  
 \*\*\* al livello dell'1%

**Tabella 1**

Risultati della regressione del panel per il periodo completo 1968-1997

Variabile	a	b	c
<i>Catching-up</i>	-25.52397***	-28.37686***	-25.24217***
Investimenti	26.63857***	26.75368***	27.14653***
Spesa in R&S	-3.07681	-1.50869	1.77867
Saldo comm. totale	-79.35596***		
Saldo comm. manif.		-88.93214***	
Saldo comm. high-tech			-21.563
<b>Effetti fissi</b>			
Francia	22.76605***	24.86282***	22.32688***
Regno Unito	18.59296***	20.08332***	18.15640***
Germania	24.96054***	27.50938***	24.50406***
Italia	21.42158***	23.24899***	20.81789***
USA	27.40340***	30.15467***	27.06666***
Giappone	22.72212***	24.56132***	21.90772***
R <sup>2</sup> corretto	0.6763	0.6585	0.5922
F-value	21.43	20.07	15.36
Significato della F	(0.000)	(0.000)	(0.000)
F test per l'assenza di effetti fissi	(0.000)	(0.000)	(0.000)

Significatività delle statistiche t:  
 \* al livello del 10%  
 \*\* al livello del 5%  
 \*\*\* al livello dell'1%

**Tabella 2**

Risultati della regressione del panel per il primo periodo 1968-1982

esprimere una competenza tecnologica<sup>22</sup>. Sotto questo profilo particolarmente significativo appare il parametro associato all'effetto del vincolo estero in quanto si segnala un aumento dello stesso nell'ambito del comparto manifatturiero e nell'alta tecnologia, mentre il saldo commerciale totale nel

secondo sottoperiodo perde addirittura di significatività statistica. L'interesse per tale risultato deriva peraltro, indirettamente, da evidenze relative alle elasticità all'*export* e all'*import* in diversi "regimi" di crescita<sup>23</sup>. In sistemi economici con tassi di crescita relativamente elevati è possibile infatti riscon-

**Tabella 3**

Risultati della regressione del panel per il secondo periodo 1983-1997

Variabile	a	b	c
Intercetta	1.46831*	1.56356*	1.51651*
Catching-up	0.49600	0.35053	0.43856
Investimenti	24.28984***	24.02990***	23.92335***
Spesa in R&S	9.67812***	9.82498***	8.76358***
Saldo comm. totale	-20.75978		
Saldo comm. manif.		-30.11291*	
Saldo comm. high-tech			-42.8301*
R <sup>2</sup> corretto	0.4824	0.4884	0.5030
F-value	21.74	22.24	23.52
Significato della F	(0.000)	(0.000)	(0.000)

Significatività delle statistiche t:  
 \* al livello del 10%  
 \*\* al livello del 5%  
 \*\*\* al livello dell'1%

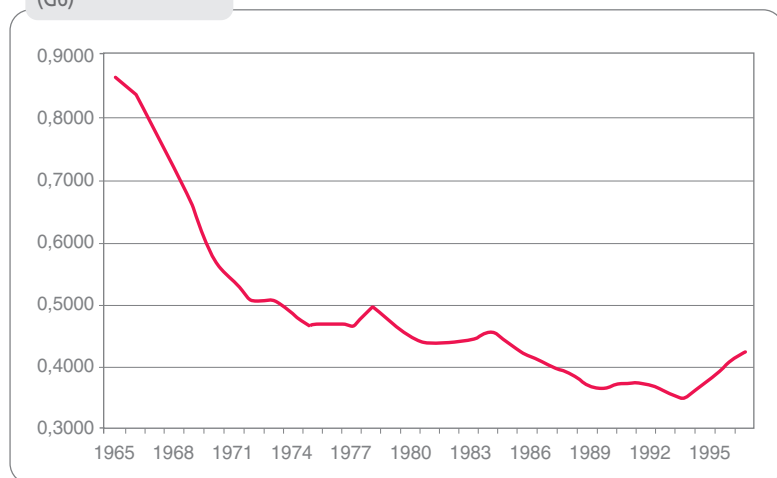
trare elasticità all'*export* relativamente più elevate ed elasticità all'*import* relativamente più ridotte.

Gli esiti della stima non devono inoltre mancare degli importanti riferimenti alla complessiva qualità esplicativa del modello. L'adattamento del modello (test R<sup>2</sup> corretto e test F) è infatti leggermente inferiore nel secondo sottoperiodo.

Particolarmente evidente è poi la diversità, specifica della stima panel, del cosiddetto "effetto paese". Il confronto tra un modello "ad effetti fissi", quale è quello che scaturisce dalla stima relativa al primo periodo osservato, ed un modello "ad effetti casuali", quale è quello indicato come significativo nell'ambito del secondo periodo in base al test di Hausman costruito per questo tipo di verifica<sup>24,25</sup>, mette in luce infatti

**Figura 2**

Coefficiente di variazione della spesa BERD per occupato (G6)



la maggiore complessità relativa al modo in cui l'importanza della specificità a livello nazionale gioca il proprio particolare ruolo. Tale complessità è attribuibile anche a fattori non spiegati nel modello, ivi inclusi quelli connessi alle diverse forme di specializzazione tecnologica che, proprio per la natura delle nuove dinamiche innovative ed economiche, assumono un ruolo preminente<sup>26</sup>. A questo proposito e analogamente a quanto esplicitato per la dinamica del reddito pro capite in figura 1, un fenomeno di tendenziale divergenza interessa sul finire degli anni 90 anche il rapporto tra spesa BERD e numero di occupati (figura 2). A ciò sembra parallelamente accostarsi un fenomeno di tendenziale "polarizzazione tecnologica" dei paesi – valutata in base alla quota di spesa BERD nei settori *high-tech* effettuata da ciascun paese rispetto al totale del G6 – dopo una lunga fase di convergenza (figura 3). La dinamica relativa alla media rispetto ai G6 delle quote BERD dei singoli settori *high-tech* rispetto al totale della BERD del manifatturiero, risulta, invece, rappresentativa di un processo di convergenza più accentuato rispetto a quello registrato lungo la dimensione dei paesi (figura 3) e, dunque, di una minore "polarizzazione". Prevale così una dinamica di emersione di più fronti tecnologici (non solo le tecnologie ICT, ma anche quelle dell'industria farmaceutica e degli stru-

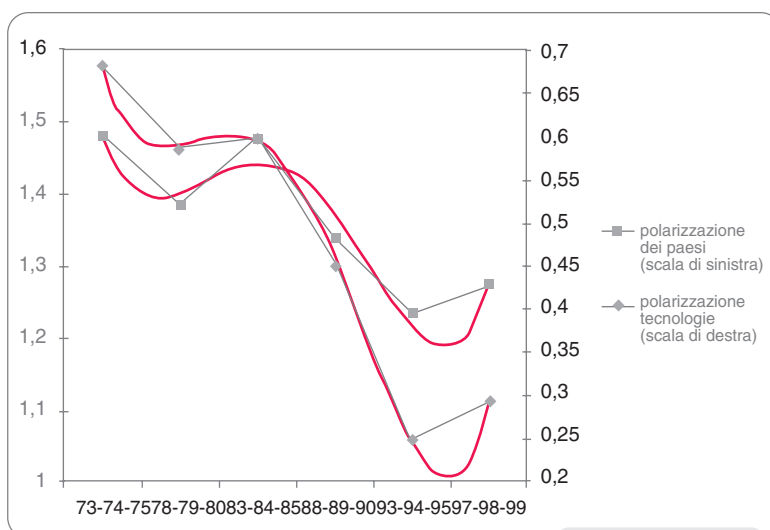
menti di precisione come mostrato già più in dettaglio in<sup>1</sup> e diversamente da quanto argomentato in<sup>27</sup> e, quindi, scenari tecnologici non solo più complessi di quelli che hanno dato avvio alla "parabola del *catching up*", ma anche di quelli di più recente origine.

In definitiva la più debole risposta dell'adattamento complessivo del modello nel secondo sottoperiodo, le indicazioni che possono essere tratte dalla stima di effetti "casuali" per quanto riguarda la componente paese e il forte rilievo delle componenti tecnologiche nel secondo sottoperiodo, sembrano sottolineare la necessità di dover comprendere ancora meglio nelle valutazioni di stima gli effetti della "componente tecnologica" (naturalmente, in senso lato) sulla dinamica dello sviluppo economico.

## Conclusioni

La prima conclusione che può trarsi dal lavoro presentato è costituita dalla rilevazione della profonda rottura, o meglio, dall'accentuato cambiamento strutturale che ha caratterizzato i modelli di crescita del reddito pro capite e quindi di sviluppo delle sei maggiori economie mondiali negli ultimi trenta anni. Il secondo risultato che va evidenziato è rappresentato dal crescente ruolo giocato nei nuovi modelli di sviluppo dalla conoscenza e dall'innovazione, indice della crescente sofisticazione raggiunta dalle soluzioni produttive adottate da tali sistemi economici. Sotto questo punto di vista il dato del cambiamento strutturale deve intendersi non già come un semplice accentuarsi della componente tecnologica nel processo di sviluppo, ma come l'avvio di un processo nel quale caratteristiche del sistema produttivo e soluzioni tecnologiche entrano in una corrispondenza sempre più articolata e complessa mettendo in risalto, proprio per questo, il ruolo sempre più decisivo del sistema paese.

I risultati del modello, insieme alla lettura che proviene dalla rilevazione, nell'ultimo



**Figura 3**  
Spesa BERD - Polarizzazione della specializzazione a livello di paese (gruppo G6) nell'aggregato *high-tech* e dei diversi "fronti tecnologici" in base alle quote (media G6) dei singoli comparti *high-tech* sulla spesa BERD manifatturiera

decennio, di una tendenza alla divergenza nelle dinamiche di crescita del PIL pro capite dei G6, sembrano indicare l'esaurimento di una fase di "crescita facile", basata sull'inseguimento del paese innovatore, e la crescente rilevanza delle capacità innovative su base nazionale ai fini del mantenimento e miglioramento dei livelli relativi di reddito pro capite. Sebbene tali indicazioni si esauriscano sul piano di variabili relativamente aggregate, la significatività dei risultati, inclusi quelli che evidenziano una maggiore problematicità del ruolo dei singoli paesi rispetto all'avvio di particolari traiettorie di sviluppo, tende a sottolineare l'importanza di una adeguata competitività tecnologica diffusa, in mancanza della quale il *gap* fra le dinamiche di crescita non può che ampliarsi.

## Bibliografia

1. PALMA D., COLETTA G., ZINI A., *Sviluppo Tecnologico e Dinamiche Economiche nei Paesi Industrializzati*, Energia, Ambiente e Innovazione, n. 5, 2003.
2. SYLOS LABINI P., Intervista in RONCAGLIA A., *Schumpeter - È Possibile una Teoria dello Sviluppo Economico?*, Banca Popolare dell'Etruria - Studi e Ricerche, 1987.
3. PASINETTI L., *Dinamica Economica Strutturale - Un'Indagine Teorica sulle Conseguenze Economiche dell'Apprendimento Umano*, Il Mulino, 1993.
4. FAGERBERG J., *Technology and International Differences in Growth Rates*, Journal of Economic Literature, v. 32, 1994.

5. VERSPAGEN B., *Convergence in the Global Economy. A Broad Historical Viewpoint*, Structural Change and Economic Dynamics, v. 6, 1995.
6. FAGERBERG J., VERSPAGEN B., *Technology – Gaps, Innovation-Diffusion and Transformation: an Evolutionary Interpretation*, Research Policy, v. 31, 2003.
7. MELICIANI V., SIMONETTI, R., *Specialization in Areas of Strong Technological Opportunity and Economic Growth*, in Eliasson, G. Green, C. and McCann, C. (eds), *Microfoundations of Economic Growth: A Schumpeterian Perspective*, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1998.
8. PASINETTI L., *Structural Change and Economic Growth – A Theoretical Essay on the Dynamics of the Wealth of Nations*, Cambridge University Press, 1981.
9. FAGERBERG J., *Technological Progress, Structural Change and Productivity Growth: a Comparative Study*, Structural Change and Economic Dynamics, v. 11, 2000.
10. Thirwall A.P., *The Balance of Payment Constraint as an Explanation of International Growth Rate Differences*, Banca Nazionale del Lavoro Quarterly Review, v. 128, 1979.
11. McCombie J.S.L., *Economic Growth, Trade Interlinkages, and the Balance-of-Payments Constraint*, Journal of Post Keynesian Economics, v. 15, n. 4, 1993.
12. FAGERBERG J., GUERRIERI P., VERSPAGEN B., *The Economic Challenge for Europe. Adapting to Innovation Based Growth*, Edward, Elgar Publishing, 1999.
13. VERSPAGEN B., *The Evolution of Productivity Gaps*, ECIS Wp., 2000.
14. LAURSEN K., *How Structural Change Differs and Why it Matters (for Economic Growth)*, DRUID Wp. N. 25, 1998.
15. AMENDOLA G., PERRUCCI A. (a cura di), *L'Italia nella Competizione Tecnologica Internazionale*, Franco Angeli, 1995.
16. FERRARI S., GUERRIERI P., MALERBA F., MARIOTTI S., PALMA D. (a cura di), *L'Italia nella Competizione Tecnologica Internazionale*. Secondo Rapporto, Franco Angeli, 1999.
17. FERRARI S., GUERRIERI P., MALERBA F., MARIOTTI S., PALMA D. (a cura di), *L'Italia nella Competizione Tecnologica Internazionale*. Terzo Rapporto, Franco Angeli, 2002.
18. GUERRIERI P., MILANA C., *L'Italia e il Commercio Mondiale – Mutamenti e Tendenze nella Divisione Internazionale del Lavoro*, Il Mulino, 1990.
19. GRANGER C.W.J., *Developments in the Study of Cointegrated Economic Variables*, Oxford Bulletin of Economics and Statistics, v. 26, 1986.
20. GRANGER C.W.J., ENGLE, R.F., *Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing*, Econometrica, v. 55, 1987.
21. BERNHARDSEN T., *The Relationship between Interest Rate Differentials and Macroeconomic Variables: a Panel Data Study for European Countries*, Journal of International Money and Finance, v.19, 2000.
22. ANTONELLI C., *Intervento al Convegno Una politica industriale contro il declino*, Atti del Convegno, Roma, 2003.
23. Krugman P., *Differences in Income Elasticities and Trends in Real Exchange Rates*, European Economic Review, v. 33, 1989.
24. HAUSMAN J.A., *Specification Tests in Econometrics*, Econometrica, v. 46, 1978.
25. HAUSMAN J.A., TAYLOR W.E., *Panel Data and Unobservable Individual Effects*, Econometrica, v. 49, 1981.
26. DALUM B., LAURSEN K., VERSPAGEN B., *Does Specialization Matter for Growth?*, Industrial and Corporate Change, v. 8, 1999.
27. VERSPAGEN B., *Growth and Structural Change: Trends, Patterns and Policy Options*, ECIS Wp., 2000.



ENEA  
Unità Comunicazione  
Lungotevere Thaon di Revel 76 - 00196 Roma

Fabiano Editore  
Reg. San Giovanni 2/b - 14053 Canelli (AT)

Novembre 2003



