

ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE

ANNO 49 MAGGIO-GIUGNO 2003

Il contenuto degli articoli pubblicati è di esclusiva responsabilità degli autori.
La riproduzione di articoli o parte di essi deve essere autorizzata dall'ENEA.

Finito di stampare nel mese di giugno 2003

Direttore responsabile Sergio Ferrari

Comitato di redazione Maria Antonietta Biancifiori, Fausto Borrelli, Gilberto Busuoli, Marco Martini, Pietro Metalli, Emilio Santoro

Redattore capo Alida La Croce

Redazione Giuliano Ghisu

Collaboratori Daniela Bertuzzi, Gabriella Martini, Paolo Monaci, Elisabetta Pasta

Responsabile editoriale Diana Savelli

Redazione ENEA

Lungotevere Thaon di Revel 76, 00196 Roma, Tel. 06-36272401, Fax 06-36272720
E-mail/lacroced@sede.enea.it, Sito web/www.enea.it

Progetto grafico Bruno Giovannetti (ENEA)
Ada Cerrato, Nicoletta Troncon (Litografia Fabiano)

In copertina Riproduzione *Frammenti*, E. Guglielminetti

Stampa Litografia Fabiano, Reg. San Giovanni 2/b, 14053 Canelli (AT)

Registrazione Tribunale Civile di Roma
Numero 6047 del 2 dicembre 1957 del Registro Stampa. Modifiche in corso

Pubblicità Fabiano srl

Abbonamento annuale Italia € 21,00, Estero € 26,00; una copia € 4,20
C.C.P. n. 12439121 intestato a Fabiano srl
12058 S. Stefano Belbo (CN), Tel. 0141-822557, Fax 0141-822669
E-mail: nicole@fabianogroup.com

www.enea.it

www.enea.it

4 **UNIVERSALITÀ E DIMENSIONE INTERNAZIONALE DELLA SCIENZA**
THE UNIVERSALITY AND THE INTERNATIONAL DIMENSION OF SCIENCE

Carlo Rubbia

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

Italy should seek to attract scientific quality and skills, to create the conditions that enable a scientific community – one open to contributions from all researchers – to produce new knowledge and skills

12 **LA NANOTECNOLOGIA: PREMESSA PER UNA NUOVA RIVOLUZIONE SCIENTIFICA?**
NANOTECHNOLOGY: PREMISE FOR A NEW SCIENTIFIC REVOLUTION?

Antonio Nobili, Salvatore Scaglione

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

After microelectronics and biotechnology, a new scientific and technological paradigm is coming to the fore, heralding far-reaching developments in all applications sectors in the next decade. Physics, chemistry and biology all contribute to this new discipline. Among the vanguard nations, many confirmations and some surprises

21 **CALORE AD ALTA TEMPERATURA DALL'ENERGIA SOLARE**
HARNESSING SOLAR ENERGY AS HIGH TEMPERATURE HEAT

ENEA, Grande Progetto Solare Termodinamico

Una tecnologia innovativa dell'ENEA per una energia pulita, disponibile continuamente e ad un costo competitivo come contributo per la diversificazione delle fonti e la riduzione del problema delle emissioni

An innovative technology developed by ENEA for clean, continuously available energy at competitive costs as a contribution to the diversification of energy sources and the reduction of hazardous emissions

36 **PROTOCOLLI DI SPERIMENTAZIONE PER LA PRODUZIONE BIOLOGICA IN AZIENDE PILOTA DELLE REGIONI MERIDIONALI**

EXPERIMENTATION PROTOCOLS FOR BIOLOGICAL PRODUCTION AT PILOT FARMS IN SOUTHERN ITALY

Damiano Petruzzella, Enrico Raso, Maurizio Desantis, Carmelo Sigliuzzo, Agostino Letardi

Una ricerca comunitaria per definire nuove forme di agricoltura sostenibile e multifunzionale, alternativa ma non conflittuale con quella convenzionale, ha portato alla definizione di una metodologia semplice, fondata sul coinvolgimento diretto degli agricoltori e messa a punto in aziende pilota a differente orientamento produttivo

EU-sponsored research to define new forms of sustainable and multifunctional agriculture – alternative to but not conflicting with conventional farming – has led to the definition of a simple methodology based on the direct involvement of farmers and fine-tuned at pilot farms oriented towards different kinds of produce

47 **IL PARCO DELL'ENERGIA: MOSTRA DELLE TECNOLOGIE ENERGETICHE RINNOVABILI**
THE ENERGY PARK EXHIBITION ON RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES

Alessandra Scognamiglio, Marco Citterio

Realizzazione di una mostra permanente, presso l'area sperimentale di Monte Aquilone in Puglia, nel settore della ricerca sulle tecnologie energetiche rinnovabili. L'obiettivo della mostra è, in particolare, quello di contribuire alla diffusione delle conoscenze nel campo dell'energia solare

Creation of a permanent exhibition at the Monte Aquilone experimental area in Puglia, devoted to research on renewable energy technologies. The overall objective is to disseminate knowledge on solar energy

57 **CALCOLATORI QUANTISTICI**
QUANTUM COMPUTERS

Fabrizio Cleri

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

A story about the computing machines of the future, with an account of the real length of numbers, of the entropy of computers, and of what can and what cannot be calculated

75

BLOB CERVELLO (2)

a cura di *Fausto Borrelli*

SCIENZA, TECNICA, STORIA & SOCIETÀ

Gli anni 90 dello scorso secolo – detti anche “decennio del cervello” – hanno visto fiorire una gran quantità di pubblicazioni sugli sviluppi delle neuroscienze e della filosofia della mente. Questo palinsesto di citazioni d'autore si concentra sul rapporto “mente-cervello”. Un tema cruciale che da oltre due millenni costituisce il luogo privilegiato in cui convergono speculazione filosofica, pensiero scientifico e fede religiosa. Nonostante gli straordinari risultati della ricerca contemporanea, il groviglio di ambiguità, oscurità e incertezze – che da sempre ha caratterizzato questo ineludibile problema – sembra aumentato piuttosto che diminuito. Il palinsesto va dal canone buddista (IV sec. a.C.) ad Agostino di Tagaste (V sec. d.C.), da Averroè (1190) a Cartesio (1641), da Leibniz (1714) a Hegel (1807), da Nietzsche (1887) a Freud (1917), da Einstein (1936) a Erwin Schroedinger (1950), da Richard Feynman (1978) a Francis Crick (1994), a Erich Kandel (1997), da John Searle (1997) a Gerald Edelman (2000), da Igor Aleksander (2001) a Edoardo Boncinelli (2002), a Roth (2003)

The 1990s – dubbed the “Brain Decade” – saw a flowering of publications about developments in neuroscience and philosophy of the mind. This selection of quotations focuses on the relationship between mind and brain, a subject that has intrigued philosophers, scientists and religious thinkers for more than two thousand years. Despite the extraordinary results of research in our own day, the tangle of ambiguities, obscurities and uncertainties that has always characterised this inescapable issue seems to be growing larger rather than smaller. The quotations range from the Buddhist canon (4th cent. B.C.) to Augustine (5th cent. A.D.), Averroës (1190), Descartes (1641), Leibniz (1714), Hegel (1807), Nietzsche (1887), Freud (1917), Einstein (1936), Schroedinger (1950), Feynman (1978), Crick (1994), Kandel (1997), Searle (1997), Edelman (2000), Aleksander (2001), Boncinelli (2002) and Roth (2003)

87

COLONNINE E PLUTEI IN STUCCO PROVENIENTI DA SUTRI

STUCCO COLUMNS AND PLUTEI FROM SUTRI

Francesco Cardellini, Giolj Francesco Guidi, Fabrizio Pierdominici

STUDIO IDROGEOLOGICO PER LA DEFINIZIONE DI UNA RETE DI MONITORAGGIO DELLE ACQUE E DI INDICATORI PER LA CERTIFICAZIONE ECOLOGICA

HYDROGEOLOGICAL STUDY AIMED AT DEFINING A WATER MONITORING NETWORK AND INDICATORS FOR ECOLOGICAL CERTIFICATION

Divo Vincenzi, Antonio Gnes

CAMPAGNA SPERIMENTALE DI TERMOVALORIZZAZIONE DEI RIFIUTI URBANI

EXPERIMENTAL CAMPAIGN ON EXTRACTING HEAT FROM URBAN WASTE

Stefano Cassani, Andrea Corti, Luana Frassinetti

NOTE TECNICHE

98

NOTIZIE DAL MONDO, DALL'UNIONE EUROPEA, DALL'ITALIA, DALL'ENEA. INCONTRI E LETTURE

NEWS FROM THE WORLD, THE EUROPEAN UNION, ITALY AND ENEA. INFORMATION ABOUT MEETINGS AND RECENTLY PUBLISHED WORKS

CRONACHE

- dal Mondo
 - Nuova macchina per la fusione nucleare **98**
 - Case a consumo zero **98**
 - Foreste tropicali e CO₂ **98**
- dall'Unione Europea
 - Emissioni di gas di serra in Europa **99**
 - Carbone e sviluppo energetico **99**
- dall'Italia
 - Progetti di mobilità sostenibile **100**
 - XIII Settimana della Cultura Scientifica e Tecnologica **100**
 - Consorzio per l'attuazione del PNRA **100**
- dall'ENEA
 - Mitigazione della desertificazione in Sicilia **101**
 - Adeguamento sismico degli edifici **101**
- Incontri
 - Produzione e riciclo del vetro **102**
 - Premio “Oscar Masi” 2002 **102**
 - Giornata mondiale dell'acqua **102**
- Letture
 - Antartide: ai confini del mondo **103**
 - Combustibili legnosi **103**
 - World Energy, Technology and Climate Policy Outlook **103**
 - Pianificazione e controllo di gestione **104**

Universalità e dimensione internazionale della **scienza**

CARLO RUBBIA
Commissario Straordinario
ENEA

primo piano

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

*The universality and the international dimension of **science***

Italy should seek to attract scientific quality and skills, to create the conditions that enable a scientific community – one open to contributions from all researchers – to produce new knowledge and skills

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 dell'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, comple-

mentare 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.

*un nuovo
metodo di
cooperazione
scientifica su
scala globale*

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 risollestando 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'inestimabile 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 evidente, 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

*nella scienza,
dietro alle
personalità
di grande
successo
troviamo
il talento*

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 pronom-

la scienza va
incoraggiata
e non
imbrigliata
dalla
burocrazia

pente 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 sanno 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.

*realizzare
attività
scientifiche
fondate sulla
cooperazione
dei differenti
patrimoni
culturali*

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 spoliazione 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 arretrare 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?

ANTONIO NOBILI*
SALVATORE SCAGLIONE**

ENEA,

*Senior Board

**UTS Tecnologie e Fische Avanzate

spazio aperto

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

Nanotechnology: premise for a new scientific revolution?

After microelectronics and biotechnology, a new scientific and technological paradigm is coming to the fore, heralding far-reaching developments in all applications sectors in the next decade. Physics, chemistry and biology all contribute to this new discipline. Among the vanguard nations, many confirmations and some surprises

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"¹ nel quale ci si chiede la ragione per cui un piano di sviluppo tecnologico di tipo governativo (National Nanotechnology Initiative - NNI) necessita 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 insieme². 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 scientifica che porta 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 monoteliche 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 nanoscienze³, si evince che l'obiettivo primario di quest'area tematica è quello di fa-

**nanoscienza
come nuova
branca della
conoscenza**

¹ "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.....".

² 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.....".

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

vorire 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 tematica³.

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
nano-
tecnologia
non è
semplice e
neanche
univoca

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 diverse⁴. Le attività vere e proprie sulle nanotecnologie possono essere fatte risalire a circa 15 anni fa⁵ 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. Franks⁶, “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.,⁵ 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 disotto 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 (miniaturizzazione sempre più spinta) siano alla ricerca di un prodotto “vin-

⁴ 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.

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

⁶ A. FRANKS, “Nanotechnology”, *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, 20 (1987), pp. 1442-1451.

cente" 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 Feynman⁷, 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 biologia⁸.

- 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.

controllo diretto di materiali su scala atomica e molecolare

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 fasi⁹. La fase I si riferisce al lavoro iniziale di esplorazione scientifica, la fase II comprende sia l'incremento

⁷ "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."

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

⁹ R. COMPANÓ, A. HULLMANN, *Nanotechnology*, 13 (2002) 243-247.

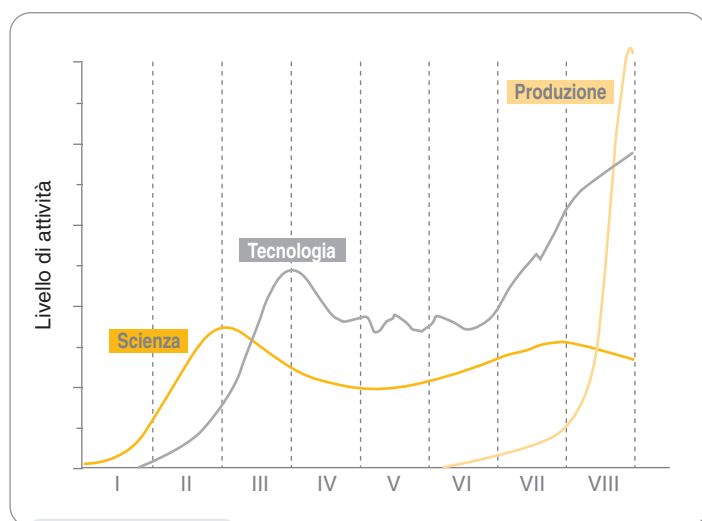


Figura 1
Modello dell'attività scientifica e tecnologica elaborato da H. Grupp. Le attività dalla scienza alla produzione sono state suddivise in otto fasi

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

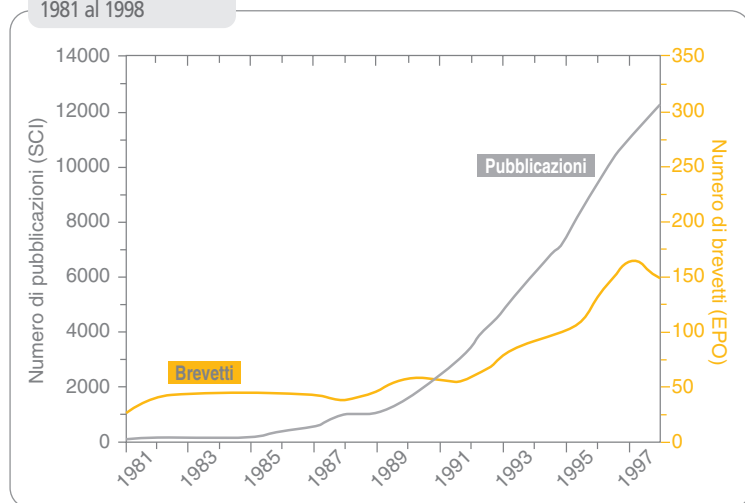
In figura 2 è illustrato l'andamento dei brevetti e delle pubblicazioni scientifiche sulle nanotecnologie⁹ nell'intervallo temporale che va dal 1981 al 1998. Applicando questi dati al modello sviluppato da H. Grupp, risulta che le nanotecnologie si trovano nella fase II o nella parte iniziale della fase 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 interdisciplinare, o meglio ancora trans-disciplinare⁵ 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 diagnosi medica non invasiva o trattamenti per il cancro ecc.

Nella tabella 1 viene riportato il numero di arti-

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



| 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 |
| Totale | 274 | 447 | 684 | 1045 | 1364 | 1602 | 5416 | | |

* Distribuzione degli articoli per disciplina

Tabella 1
Numero di articoli scientifici pubblicati negli anni che vanno dal 1991 al 1996

coli scientifici pubblicati negli anni che vanno dal 1991 al 1996¹⁰. 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 inter-disciplinare 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 massivi¹¹.

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 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 con-

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

¹¹ 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.

trolo 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 interdisciplinari nel campo della nanostrutturazione è eccitante e diventa sempre più importante, è proprio nella intersezione tra le varie discipline che risiede la vera novità¹².

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 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

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 Index¹⁰

| 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 |
| Totale | 4869 | 2053 | 2,37 |

¹² 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.

| 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 pubblicato⁹

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

| 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 | |

Tabella 4

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

le conoscenze dal mondo della ricerca a quello applicativo-industriale. 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 nano-
tecnologia
hanno
superato
le ristrette
cerchie degli
specialisti**

Nanoscienza e nanotecnologia costituiscono un binomio il cui impetuoso sviluppo ha ormai superato le ristrette cerchie degli 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"¹³: "...Man mano che nuove ricette 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 dimostrare 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.

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

Calore ad alta temperatura dall'energia solare

ENEA
Grande Progetto Solare
Termodinamico

Una tecnologia innovativa dell'ENEA per una energia pulita, disponibile continuamente e ad un costo competitivo come contributo per la diversificazione delle fonti e la riduzione del problema delle emissioni

studi & ricerche

Harnessing solar energy as high temperature heat

Abstract

In the absence of technological breakthroughs, the expected large increases in energy demand will be met by growing use of fossil fuels plus a very small contribution from non-hydroelectric renewable sources (photovoltaics, wind, biomass, etc.). If this scenario does not change, it is bound to increase climate changes and the insecurity of energy supplies, and to exacerbate problems of poverty around the world. An innovative R&D programme undertaken by ENEA less than three years ago aims to produce a new technology for thermodynamic solar power plants. The ENEA project uses simple low-cost mirrors to concentrate direct solar radiation and convert it efficiently into high-temperature heat. The heat is then stored and becomes a source of energy available upon demand. This technology can be used in multiple industrial applications, in particular to generate electricity at costs competitive with those of fuel oil and natural gas, and without producing CO₂ emissions.

Lo sviluppo energetico è sostenibile?

L'energia è necessaria

La disponibilità energetica è stata sempre una componente essenziale della civiltà umana. Nel corso dei tempi, il consumo energetico pro capite è cresciuto fino a diventare 100 volte superiore all'energia del metabolismo corporeo basato sull'alimentazione. Nei paesi maggiormente sviluppati, mediamente ogni individuo necessita giornalmente di 0,9 GJ (gigajoule), un'energia equivalente a quella ottenibile dalla combustione di 32 kg di carbone.

Il consumo energetico planetario è cresciuto stabilmente negli ultimi 150 anni ad un tasso costante pari a +2,3% per anno.

L'energia prodotta dall'uomo, principalmente mediante combustibili fossili, è aumentata fino a superare la somma dell'energia geotermica, proveniente dal nucleo terrestre, e delle maree indotte dal Sole e dalla Luna. Le attività umane hanno quindi pressoché raddoppiato l'energia endogena del pianeta Terra. Il consumo complessivo legato alle attività dell'uomo è comunque solo 1/10000 dell'energia incidente sulla superficie terrestre proveniente dal Sole.

Il consumo energetico è direttamente correlato alla ricchezza prodotta: l'intensità energetica, ovvero il rapporto tra i consumi energetici ed il PIL, benché leggermente

decescente con il progresso tecnologico, è all'incirca la stessa per i paesi poveri e per quelli più sviluppati.

Energia e povertà

Il "World's Energy Outlook 2002" dell'IEA (International Energy Agency) evidenzia che ben 1,6 miliardi di persone – un quarto della popolazione mondiale – sono oggi sprovviste di energia elettrica, il che preclude loro inevitabilmente lo sviluppo di una qualsiasi attività industriale e i relativi risvolti occupazionali (figura 1).

La maggioranza (4/5) di queste popolazioni vive in aree rurali dei Paesi in via di sviluppo, principalmente in Asia e in Africa. Circa 2,4 miliardi di persone fanno affidamento quasi esclusivamente sulle biomasse tradizionali come sorgente di energia primaria. Peraltro, in molti di questi paesi, il livello di radiazione solare è considerevole e potrebbe quindi divenire per essi la fonte primaria di energia, naturalmente purché utilizzabile con tecnologie semplici ed a basso costo. È quindi responsabilità dei Paesi più avanzati, come l'Italia, il compito di sviluppare nuove tecnologie ed il *know-how* corrispondente, al fine di permettere un tale progresso.

Lo scenario energetico prevalente di "business as usual"

Gran parte delle previsioni energetiche, basate sulle proiezioni economiche per i prossimi decenni, ci assicurano che gli approvvigionamenti di combustibili fossili saranno largamente sufficienti a coprire le richieste. In assenza di grandi innovazioni tecnologiche, i previsti e consistenti aumenti della domanda energetica saranno coperti da un sempre più intenso utilizzo dei combustibili fossili, con una leggera flessione del contributo relativo all'energia nucleare e il mantenimento di un apporto molto ridotto da parte delle energie rinnovabili non idroelettriche (fotovoltaico, eolico, biomasse ecc.).

La percentuale di penetrazione di queste

Figura 1
Situazione energetica nei Paesi in via di sviluppo



Fonte: Studio IEA

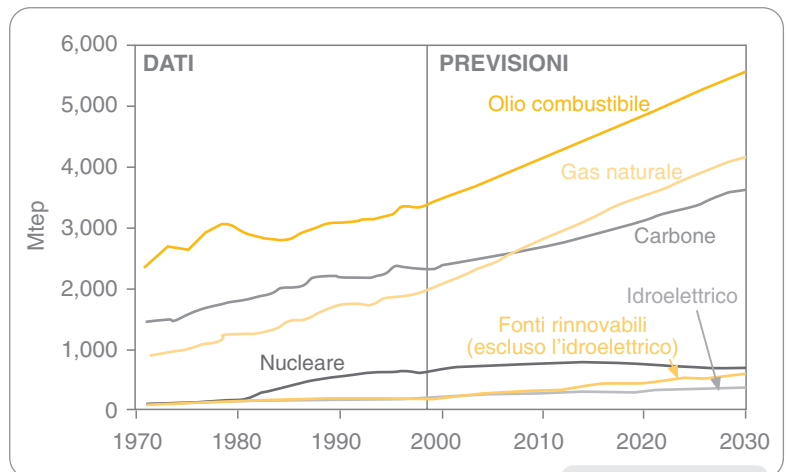
nuove energie rinnovabili, riferita al totale, si colloca con solamente un modesto incremento nei prossimi trenta anni, da circa il 2% a circa il 3%. Sempre secondo l'analisi dell'IEA, tra il 2000 ed il 2030 è prevedibile un raddoppio dei consumi mondiali di elettricità, principalmente a causa dell'aumento della domanda nei Paesi in via di sviluppo. Gli investimenti corrispondenti sono stimati in ben 4300 miliardi di US\$. Malgrado un incremento dell'uso di gas naturale, la principale fonte primaria per la produzione di elettricità rimarrà, almeno fino al 2030, il carbone. A parità di energia elettrica prodotta, le emissioni di CO₂ da carbone sono 2,5 volte maggiori di quelle da gas naturale. Al fine di alterare questa previsione "business as usual", è necessario un vigoroso impulso allo sviluppo di tecnologie innovative.

Una serie di disastri preannunciati

Il precedente scenario "business as usual" comporta infatti preoccupanti conseguenze, vale a dire:

1. cambiamenti climatici di ampie proporzioni appaiono come inevitabili, con conseguenze particolarmente gravi nei Paesi in via di sviluppo, meno preparati ad affrontarne gli effetti;
2. uno sviluppo sostenibile potrebbe essere ostacolato da problemi correlati alla sicurezza degli approvvigionamenti di petrolio e gas naturale;
3. i problemi della povertà mondiale non saranno risolti, ma verranno amplificati dall'inevitabile aumento del prezzo dei combustibili fossili, causato dall'aumento della domanda, e dall'esigenza di massicci investimenti, soprattutto per il gas naturale.

Questo scenario può essere evitato solo modificando alcune delle ipotesi di base, in particolare la previsione che nessuna tecnologia veramente innovativa e più accettabile sarà disponibile nei prossimi decenni ad un livello tale da avere un impatto sostanziale. L'energia solare è la candidata ideale per rompere un tale circolo vizioso



Fonte: Studio IEA

Figura 2
Scenario "business as usual" delle fonti energetiche a livello mondiale

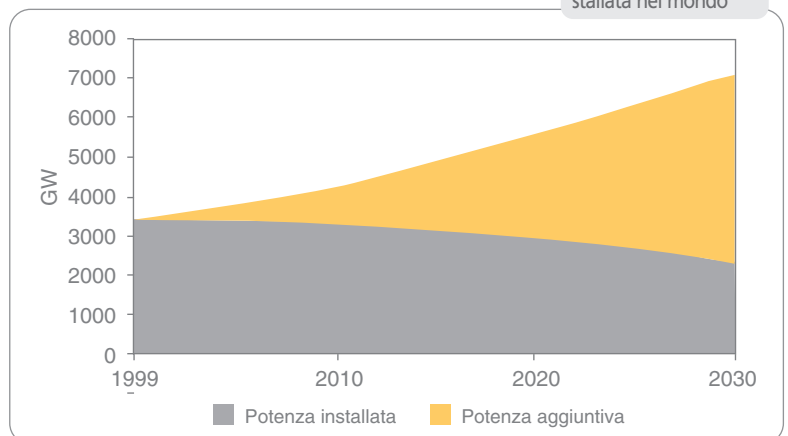
tra il progresso economico e il conseguente effetto serra.

Un nuovo approccio all'energia solare

Come già menzionato, le tecnologie rinnovabili odierne, ad eccezione dell'energia idroelettrica, coprono solo il 2% circa della domanda di energia primaria. Quasi tutte le previsioni IEA, basate sulla situazione di mercato attuale e sulla sua evoluzione a livello mondiale, indicano che esse potranno raggiungere al massimo il 3% al 2030. Le ragioni di una penetrazione così modesta sono ben note:

1. il costo dell'energia prodotta, al netto degli incentivi, deve essere competitivo con i combustibili fossili: *la migliore energia è quella più economica;*

Figura 3
Potenza elettrica installata nel mondo



Fonte: Studio IEA

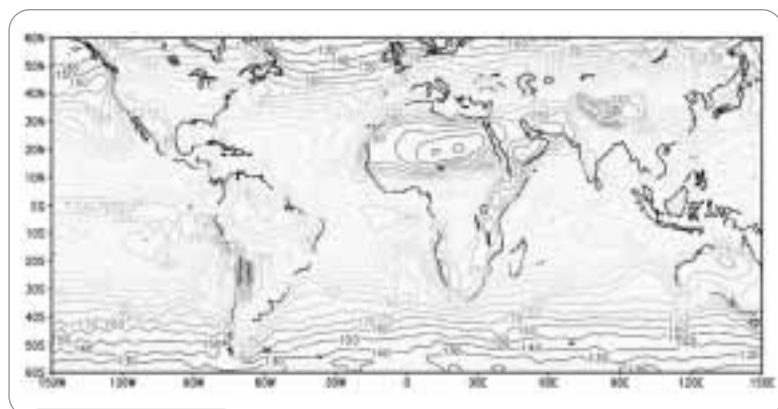


Figura 4
Media annuale della
radiazione solare di-
retta (W/m²)

Fonte: NASA

2. la tecnologia di produzione energetica deve ovviare al problema della "discontinuità", fattore oggi associato all'energia solare ed eolica: *l'energia deve essere disponibile quando è richiesta dall'utente.*

Tali limitazioni vanno quindi rimosse, all'interno di una ragionevole tempistica determinata dall'urgenza del problema, con l'aiuto di tecnologie innovative.

Un nuovo e importante programma di ricerca e sviluppo, sostenuto da appropriati finanziamenti pubblici, è stato quindi lanciato meno di tre anni fa all'ENEA. Questo programma punta allo sviluppo di una nuova tecnologia, basata sull'utilizzo di semplici specchi a basso costo per la concentrazione della radiazione diretta, al fine di convertire in modo efficiente l'energia solare in calore ad alta temperatura. Per ovviare alla variabilità indotta dal ciclo giorno/notte, l'energia solare è immagazzinata sotto forma di calore con l'ausilio di sali fusi

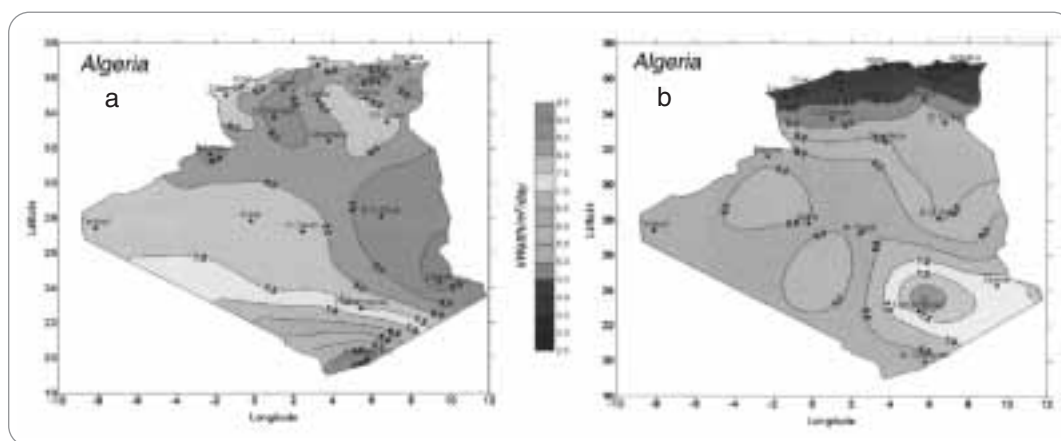
a 550 °C. L'accumulo termico ha una capacità sufficiente per erogare potenza in modo completamente disaccoppiato e indipendente dalla presenza dell'irraggiamento solare, dunque anche di notte o in condizioni di cielo coperto.

Questa nuova tecnologia ENEA sarà in grado, qualora sviluppata su scala sufficiente, di produrre calore di processo ad alta temperatura per una grande varietà di applicazioni industriali, ed in particolare per la produzione di energia elettrica, ad un costo competitivo con quello relativo al gasolio o al gas naturale, rispetto ai quali costituisce una valida alternativa, ma senza emissioni di gas inquinanti e di CO₂.

L'energia verde: un mercato europeo in rapida espansione

In gran parte dei paesi europei, alle società di distribuzione dell'energia elettrica è richiesta la fornitura di energia elettrica con un contributo percentuale minimo garantito proveniente da fonti rinnovabili. Questo crea un mercato con due prodotti indipendenti, eliminando la concorrenza tra essi. In Italia, per esempio, il prezzo dell'elettricità verde è oggi prossimo ai 12 c€/kWh e la quota da rinnovabili fissata al 2%. Inoltre è previsto l'aumento graduale della quota obbligatoria, per agevolare una progressiva riduzione della dipendenza dai fossili. I consumi elettrici nell'Europa dei 15 è 2600 TWh/a (terawattora per anno), estrapolabili a 2900 TWh/a nel 2010. Un contributo del

Figura 5
Irraggiamento solare
diretto giornaliero nei
mesi di luglio (a) e di-
cembre (b)



Fonte: CEDR - Algeria

22% di elettricità verde in Europa, obiettivo a medio termine raccomandato dalla Commissione Europea, aprirebbe un nuovo mercato al 2010 di 640 TWh/a, corrispondente ad una potenza "verde" totale installata di 73 GW. Come vedremo in seguito, una frazione considerevole della richiesta di una tale entità potrebbe essere realisticamente soddisfatta con la tecnologia innovativa ENEA, installata per esempio nell'Africa del nord, ad un costo paragonabile a quello dei combustibili fossili e quindi competitivo con le altre fonti concorrenti, ad eccezione dell'idroelettrico, quali ad esempio l'eolico, il geotermico e il fotovoltaico.

Elettricità solare dall'Africa

Molte aree del Sahara hanno sia una favorevole esposizione alla radiazione solare sia un'escursione stagionale piuttosto ridotta, con una variazione che va da circa 9 kWh/m² per giorno in luglio a circa 7 kWh/m² per giorno in dicembre.

L'integrale annuale della radiazione diretta normale (DNI) è di circa 2900 kWh/m² (10,4 GJ/m²), circa il doppio di quello nelle località più favorevoli nel sud Italia. Con un'efficienza di raccolta di circa il 65%, un chilometro quadrato di collettori è in grado di trasferire ogni anno all'accumulo termico un'energia equivalente a 1,2 milioni di barili di petrolio (BOL) ovvero – nei circa 25 anni di vita dell'impianto – 30 milioni di BOL. Al prezzo attuale di circa 25 US\$/BOL, essi equivalgono a circa 750 milioni di dollari, vale a dire un ricavo totale di 750 dollari per ogni metro quadrato di collettori. Il costo stimato dell'intero sistema solare ENEA, rapportato alla superficie di captazione, è dell'ordine di 100 US\$/m², per un congruo volume di produzione.

Considerando un'efficienza tipica di conversione da energia solare diretta a energia elettrica pari al 29%, ottenibile a questi livelli di irraggiamento, ogni chilometro quadrato di collettori produce annualmente circa 800 GWh di energia elettrica.

Questa quantità è equivalente alla produzione annuale di una centrale convenzionale a carbone o a gas di circa 100 MW (elettrici). Quindi per produrre l'energia elettrica erogata da una centrale di 1 GW (elettrici) è richiesta un'area di circa 10 km² di specchi, ovvero un quadrato di circa 3,3 chilometri di lato. L'area globalmente occupata dall'impianto è in realtà doppia rispetto a quella citata a causa della spaziatura tra gli specchi.

Il trasporto elettrico su lunghe distanze: fattibile ed economico

Il vastissimo potenziale dell'energia solare attraverso tale tecnologia non potrà essere completamente sfruttato qualora resti inquadro solamente nella logica di una domanda locale e regionale. Ma qualora esportato a regioni con maggiore domanda e minore insolazione, le potenzialità della tecnologia solare potrebbero essere fortemente incrementate, offrendo la possibilità di contribuire in maniera significativa alla stabilizzazione del clima globale.

Grazie a tecnologie di trasmissione oggi disponibili, il trasporto di energia elettrica rinnovabile da lontane regioni desertiche è infatti fattibile sia dal punto di vista tecnologico che economico. A oggi, quasi 60 GW di potenza elettrica sono trasportati a grande distanza in 80 progetti attualmente operativi, basati su linee di trasmissione elettriche in corrente continua ad alta tensione (HVDC). Tra questi, ricordiamo quello che porta l'energia elettrica alla città di New York dal Canada, su una distanza maggiore di tremila chilometri. Questi progetti, con una potenza tipica che va da 2 a 10 GW, superano, con l'ausilio di cavi marini, anche gli ostacoli dovuti all'attraversamento di tratti di mare (Giappone, Alaska).

Il costo della trasmissione di potenza tramite linee HVDC può essere stimato con la relazione $[0,3 + (0,2 \div 0,6)L_0]$ US\$/kWh dove con L_0 è indicata la lunghezza della linea in migliaia di chilometri. L'incidenza dei tratti di trasmissione marini è all'incirca

dieci volte maggiore per unità di lunghezza rispetto a quella sopra citata. La perdita di potenza nel trasporto è contenuta, circa 0,03 L₀. A titolo di esempio, il costo del trasporto per una distanza di 1000 km su terra e 100 km in mare – la distanza necessaria per trasportare in Sicilia l'energia prodotta nel Sahara vicino – è dell'ordine di 0,6 ÷ 1,0 US¢/kWh, un costo addizionale sicuramente accettabile.

L'energia elettrica prodotta nel nord Africa potrebbe essere quindi trasferita alla rete elettrica europea per mezzo di linee HVDC marine, due delle quali sono già in fase di realizzazione, tra l'Algeria e l'Italia (2000 MW) e tra il Marocco e la Spagna (3000 MW).

Il trasporto elettrico è più economico di

quello del gas naturale, poi utilizzato per la produzione di elettricità. Sarebbe quindi ipotizzabile un'eventuale produzione a bocca di pozzo metanifero locale diretta di energia elettrica, ad un costo stimato di circa 1,5 US¢/kWh, a cui va aggiunto il trasporto. Tuttavia, va sottolineato, l'energia verde è una necessità, con un mercato indipendente e i suoi propri prezzi di mercato.

I costi stimati sono altamente competitivi

I parametri complessivi e i costi stimati sia dell'energia termica che dell'energia elettrica prodotta per una serie di moduli da 400 MW, riassunti nella tabella 1, sono stati calcolati ipotizzando i valori-obiettivo della tecnologia ENEA.

Tabella 1

Parametri principali relativi ad un impianto per la produzione di energia elettrica basato sulla tecnologia ENEA

| Parametri radiazione solare | | |
|---|-------------------------------|----------------------------|
| Localizzazione dell'impianto | Sito ottimale, deserto Sahara | |
| Irraggiamento diretto, luglio | 9,0 | kWh/m ² /giorno |
| Irraggiamento diretto, dicembre | 7,0 | kWh/m ² /giorno |
| Irraggiamento diretto, integrale annuo | 2900 | kWh/m ² /a |
| | 10,44 | GJ/m ² /a |
| Prestazioni campo solare | | |
| Efficienza captazione termica | 72 | % |
| Temperatura nominale di funzionamento | 550 | °C |
| Fattore di carico medio | 0,9 | |
| Energia termica accumulata | 6,79 | GJ/m ² /a |
| Costi produzione calore | | |
| Costi obiettivo ENEA campo solare | 100 | US\$/m ² |
| Quota ammortamento costo capitale (*) | 0,1152 | anno ⁻¹ |
| Costo obiettivo energia termica | | |
| – Investimenti | 1,70 | US\$/GJ |
| – O&M | 0,15 | US\$/GJ |
| Totale (obiettivo) | 1,85 | US\$/GJ |
| Generazione elettrica: singolo blocco | | |
| Potenza elettrica nominale | 400 | MW |
| Fattore di carico | 0,8 | |
| Efficienza di conversione elettrica | 45 | % |
| Energia elettrica prodotta | 2,80 | TWh/a |
| Energia termica richiesta | 2244 x 10 ⁶ | GJ/a |
| Area collettori solari | 3,30 | km ² |
| Costi generazione elettrica | | |
| – Investimento impianti conv. | 0,70 | US¢/kWh |
| – Calore solare, valori obiettivo | 1,48 | US¢/kWh |
| – Fixed O&M | 0,23 | US¢/kWh |
| – Variable O&M | 0,15 | US¢/kWh |
| Totale | 2,56 | US¢/kWh |
| Emissioni CO₂ evitate, rispetto a | | |
| – Carbone, PCSE con FDG (33,5% eff.) | 0,69 x 10 ⁶ | t/a |
| – Carbone, CIGCC (43,8% eff.) | 0,56 x 10 ⁶ | t/a |
| – Gas naturale, NGCC (54,1% eff.) | 0,25 x 10 ⁶ | t/a |

(*) I costi, calcolati assumendo un tasso del 10%, una vita dell'impianto di 25 anni, un'assicurazione annuale pari a 0,5% e trascurando le tasse, comportano un tasso di ammortamento annuo di 0,1152.

Si evince che si potrebbe produrre calore solare ad alta temperatura ad un costo di circa 2 US\$/GJ, da confrontarsi con i costi estrapolati (IEA) al 2020 del gas naturale pari a 3,07 US\$/GJ (*Net-back*) e del carbone pari a 0,88 US\$/GJ. Va tuttavia fatto presente che i costi del gas naturale sono variabili e dominati dal trasporto e a bocca di pozzo hanno il prezzo imbattibile di circa 0,5 US\$/GJ.

Conseguentemente il costo di produzione di energia elettrica, per una grande serie di impianti modulari da 400 MW, risulta essere pari a 2,56 US¢/kWh, a cui va aggiunto il costo del trasporto elettrico dell'ordine di 0,6 US¢/kWh, del tutto comparabile con quello relativo ad impianti con tecnologia "Pulverised Coal Steam Electric" (PCSE) con desulfurazione (FDG) da 500 MW e con impianti a ciclo combinato a gas naturale (NGCC) da 400 MWatt, che producono elettricità al tipico costo di 3,0 ÷ 3,3 US¢/kWh, ma con emissioni di gas inquinanti e di CO₂.

L'innovazione nelle tecnologie solari: un contributo alla sostenibilità

La nuova tecnologia ENEA, nei paesi a forte insolazione, è in grado di ridurre i consumi delle risorse fossili e la necessità di importazioni energetiche, diffondendo l'uso di una straordinaria risorsa naturale, ben distribuita nel mondo e largamente accessibile. Essa potrà contribuire alla diversificazione delle fonti energetiche e alla riduzione del problema delle emissioni.

Essa non solo potrà creare opportunità di lavoro e dare un impulso all'economia, ma al tempo stesso potrà ridurre i rischi di conflitto correlati alle forniture energetiche e ai cambiamenti climatici.

Le emissioni mondiali di CO₂ derivanti dalla produzione di energia elettrica ammontano storicamente (1990) a 1,6 GtC_{eq}/a, con un incremento annuo pari a circa l'1,5%. Il gruppo di lavoro "Intergovernmental Panel on Climate Changes" (IPCC) ha raccomandato per il 2020 una riduzione di almeno 0,7 GtC_{eq}/a. Essa potrebbe essere total-

mente realizzata a partire da circa 3600 chilometri quadrati di collettori (un quadrato di 60 chilometri di lato).

La metà delle previste nuove installazioni mondiali per la produzione di energia elettrica al 2020 – corrispondenti ad una potenza di circa 3500 GW – richiederebbero una superficie di collettori dell'ordine di 35.000 km² (un quadrato di 190 chilometri di lato), solamente una minuscola frazione delle aree desertiche potenzialmente utilizzabili. Benché l'area in questione sia considerevole in termini assoluti, non c'è nessuna ragione per la quale tale soluzione debba essere considerata utopica, purché essa sia attraente dal punto di vista economico. Si ricorda che la superficie mondiale dedicata all'agricoltura ammonta a circa un milione di chilometri quadrati!

Al fine di arrivare allo sviluppo su di una così grande scala di tali tecnologie innovative, è necessario stimolare un processo "virtuoso" di avvio, grazie al quale si realizzi una riduzione dei costi grazie all'aumento della produzione e, nello stesso tempo, la penetrazione nel mercato sia amplificata dalla riduzione dei costi.

Il supporto pubblico allo sviluppo tecnologico deve essere mantenuto solo finché questa diffusione "epidemica" del prodotto non sia stata attivata. Le considerazioni precedenti mostrano come la nicchia di mercato, una volta raggiunta la competitività con i fossili, sia estremamente vasta, pari a molte migliaia di gigawatt di potenza installata.

Poiché il tempo di costruzione di tali impianti, che richiedono tecnologie semplici, è relativamente rapido, il tasso di crescita del mercato può essere relativamente veloce, al necessario fine di una tempestiva presa di controllo degli incombenti cambiamenti climatici.

Lo scenario futuro è prevedibile anche dall'esperienza del passato

L'evoluzione delle forniture di energia primaria negli ultimi 150 anni ha seguito un andamento relativamente semplice. Mar-

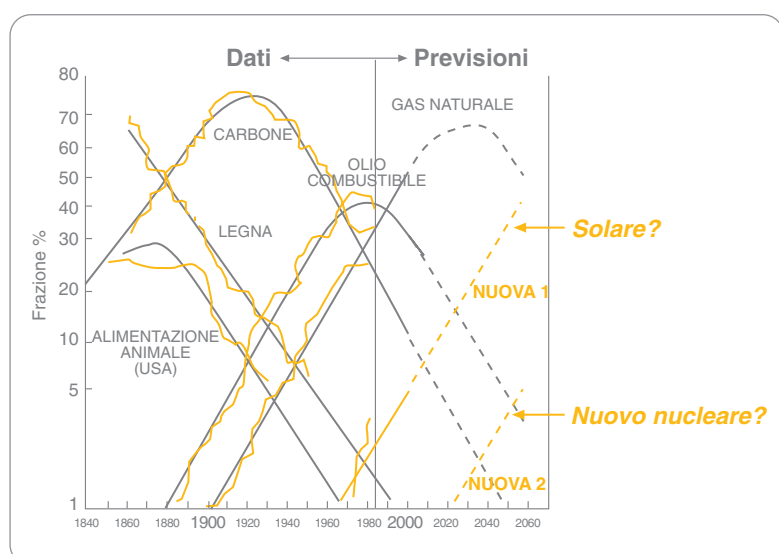


Figura 6
Scenario "evoluzione epidemica" delle fonti di energia a livello mondiale

Fonte: Marchetti

chetti (Cesare, fisico italiano, IIASA, Austria, ndr) ha dimostrato come le equazioni epidemiche possono essere usate per predire lo sviluppo di molti aspetti dell'attività umana, e dell'energia in particolare. L'idea di base è che la penetrazione di una nuova tecnologia ha un andamento simile a quello dell'evoluzione biologica, nella quale nuove specie cacciano via le specie preesistenti dalla propria nicchia. Quasi tutte le nuove concezioni tecnologiche si impongono sul mercato con andamenti simili a quelli epidemici. La loro evoluzione temporale segue analoghe semplici equazioni.

Negli ultimi 150 anni, in particolare, il mix delle fonti primarie ha mostrato un andamento in perfetto accordo con le curve "epidemiche", indipendentemente dagli eventi della società. Il fatto che ci sia stato un così buon accordo nel passato, suggerisce la possibilità di estrapolare questo metodo per gli avvenimenti futuri e, in particolare, all'affermazione di una nuova sorgente energetica. La robustezza del metodo è basata sul fatto che i parametri che governano la forma della curva epidemica sono già definiti fin dagli stati iniziali dell'evoluzione (figura 6).

Si noti che la catena di sostituzioni "storiche", cibo per animali → legno → carbone → petrolio → gas naturale è stata dettata

dal mercato e non dalla disponibilità di risorse. Le sostituzioni avvengono sempre all'incirca ogni 55 anni, in corrispondenza dei massimi dei cosiddetti "cicli di Kondratiev", che regolano l'evoluzione dei cicli economici. È da notare che la successiva crescita di nuove fonti di energia ha presentato, almeno per il passato, un tasso di crescita del contributo frazionario percentuale che è pressoché lo stesso.

È ragionevole attendersi che anche nel futuro permangano andamenti analoghi nell'evoluzione del sistema energetico. Secondo tali ipotesi, nella nicchia creata dall'evoluzione epidemica delle tecnologie attuali, è prevista l'apparizione e la crescita di una nuova forma di energia, per la quale l'energia solare è la più accreditata candidata, eventualmente seguita da un'altra nuova ipotetica tecnologia, che potrebbe essere un nuovo nucleare (fissione o fusione). La conclusione è rafforzata dal fatto che nel futuro il sole e una rinnovata fonte di origine nucleare hanno soltanto potenzialità di contributo energetico tali da sostenere l'enorme domanda di energia primaria, aggiuntiva a quella dei combustibili fossili, i quali evidentemente dovrebbero continuare a seguire la loro curva epidemica.

Secondo questa ipotesi, la percentuale di penetrazione del solare tra le fonti primarie è prevista essere all'incirca dell'11% nel 2020, 27% nel 2040 e 40% nel 2060. Tali previsioni risponderebbero perfettamente alle raccomandazioni dell'IPCC per uno sviluppo sostenibile. Tuttavia sono in contrasto con le predizioni dell'IEA, dove si fa l'ipotesi che solamente le tecnologie esistenti e ormai relativamente mature continueranno a perfezionarsi – in assenza quindi di significative "mutazioni" che generino nuove "specie". Quindi concetti nuovi ed innovativi, come peraltro è sempre successo nel passato, sono assolutamente necessari al fine di alterare gli andamenti energetici dello scenario "business as usual", e specificatamente nella direzione ipotizzata da Marchetti.

Una tale sorgente di energia addizionale dal sole può essere evidentemente sia diretta (fotovoltaico, captazione di calore ecc.) che indiretta (energia idrica, eolica, biomasse ecc.).

Sulla base delle considerazioni sopra citate e nell'ottica di una sorgente di energia primaria adeguata a livello planetario, siamo del parere che una delle più promettenti tecnologie sia quella dell'utilizzo diretto della radiazione solare opportunamente concentrata per ottenere calore ad alta temperatura.

Va anche ricordato che l'ENEA, oltre all'iniziativa qui descritta, sta attuando un altro programma complementare, finalizzato alla produzione di idrogeno ad alta efficienza (pari circa al 50%) dall'energia termica solare tramite processi termo-chimici diretti.

L'idrogeno potrebbe diventare il sostituto del gas naturale virtualmente in tutte le sue applicazioni. A tal fine è da ricordare che il vecchio "gas di città", ampiamente usato in passato, era composto per circa il 50% da idrogeno.

Non c'è dubbio che, affinché l'energia solare sia in grado di raggiungere una quota importante dell'energia primaria, l'introduzione dell'idrogeno come vettore energetico, alla stregua dell'energia elettrica, sarà inevitabile.

Principali caratteristiche degli impianti solari a concentrazione ENEA

Il calore solare a costi competitivi con i combustibili fossili

Una volta che i sistemi di captazione ed accumulo dell'energia solare verranno prodotti su una scala sufficientemente grande, la produzione e l'erogazione di calore ad alta temperatura (550 °C) potrà essere fatta, in località ad elevata insolazione, ad un costo di circa 2 US\$/GJ, non superiore all'analogo costo previsto nel futuro per il gas naturale e il petrolio.

Un'energia disponibile secondo la domanda

L'uso dell'accumulo termico permette l'erogazione di energia su richiesta, indipendentemente dall'ora (giorno o notte). Le discontinuità della radiazione solare a breve termine (nuvole) e del ciclo notte/giorno sono completamente compensate, come pure le giornate senza Sole, purché non eccessivamente persistenti. In particolare la produzione di elettricità può prontamente seguire la variazione della domanda giornaliera.

La grande sostituzione

L'energia solare a concentrazione con produzione di calore ad alta temperatura consente di estendere, anche attraverso il *retro-fitting*, l'uso di energia pulita e rinnovabile in un gran numero di applicazioni industriali correnti. In queste applicazioni, come per esempio la produzione di elettricità, l'energia è tradizionalmente fornita dall'energia chimica contenuta nei combustibili fossili, trasformata in calore ad alta temperatura dalla combustione. In alternativa, per la stessa applicazione, l'energia solare può essere raccolta sotto forma di liquido caldo e accumulata in un contenitore termicamente isolato. A richiesta, questo calore ad alta temperatura è trasferito all'applicazione, in sostituzione del calore fornito dai fossili, nella forma più opportuna, ad esempio come vapore ad alta temperatura, grazie ad uno scambiatore di calore.

Un'energia solare sostitutiva per applicazioni tradizionali di potenza

L'energia solare può alimentare, sotto forma di calore ad alta temperatura, sistemi tradizionali e consolidati come turbine a vapore o a gas, cicli combinati o generatori stand alone per la produzione di energia elettrica o la cogenerazione di elettricità e calore. Il calore ad alta temperatura può essere anche fornito a molti altri processi termo-chimici industriali. Il sistema produce elettricità e calore di processo come un qualsiasi altro impianto convenzionale di

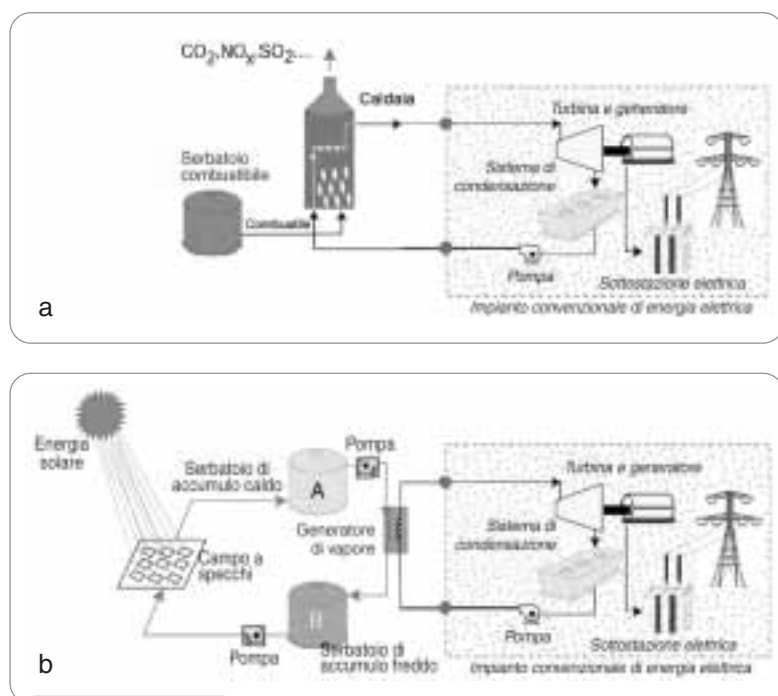


Figura 7
Produzione di energia elettrica: a. da combustibili fossili, b. da solare

potenza. L'energia solare può, inoltre, essere integrata con una parte fornita dai combustibili fossili, per esempio, qualora siano richieste temperature ancora maggiori per raggiungere efficienze termodinamiche ancora più elevate.

Un uso efficiente dell'energia solare

L'efficienza di captazione e di stoccaggio dell'energia solare è superiore al 65% della radiazione diretta normale incidente. Sistemi a concentrazione accoppiati a generatori elettrici a turbina, grazie a questa elevata efficienza, richiedono aree due o tre volte inferiori rispetto ai sistemi fotovoltaici, a parità di energia elettrica prodotta. In molte regioni del mondo ogni singolo metro quadrato di collettori può produrre annualmente la stessa quantità di energia contenuta in un barile di petrolio, evitando circa 400 kg per anno di emissioni di CO₂, se usato in sostituzione del gas naturale, e circa 1 t/a di CO₂, se usato al posto del carbone.

Potenzialità su una larga scala di applicazioni

La tecnologia è fortemente modulare e può soddisfare esigenze diverse.

L'energia solare può essere utilizzata sia per impianti di grandi dimensioni (dell'ordine dei gigawatt elettrici), connessi con la rete elettrica internazionale, sia per impianti più piccoli (tipicamente di pochi megawatt elettrici) per comunità isolate. Il suo potenziale è tale da rispondere, in modo economicamente accettabile, al mercato crescente dell'energia verde, fino ad una frazione sostanziale della futura richiesta di energia elettrica mondiale. In quanto la generazione di elettricità è realizzata grazie a turbo-alternatori convenzionali, la sua integrazione nella rete non richiede misure particolari di stabilizzazione o di *backup*.

Una tecnologia rispettosa dell'ambiente

Gli impianti solari producono energia senza emissioni né inquinamento.

Non sono impiegati materiali tossici, infiammabili o altrimenti pericolosi: l'intero sistema non è sorgente di rischio o di altri fastidi (rumore) per le popolazioni presenti nelle sue vicinanze. In particolare il liquido termo-vettore utilizzato è un comune fertilizzante, già ampiamente usato in agricoltura, ed eventuali fuoriuscite accidentali non hanno alcun impatto ambientale.

Non sono richieste strutture elevate e i collettori solari, posizionati in modo ordinato e seguendo il profilo del terreno, non deturpano il paesaggio. Il tempo di ritorno energetico del sistema è dell'ordine di solo sei mesi, meno del 2% dell'energia prodotta durante il periodo di funzionamento.

Ciò rappresenta una frazione molto inferiore rispetto ad esempio alla tecnologia fotovoltaica. Alla fine del periodo di utilizzazione, molti dei materiali possono essere o riciclati o ripristinati per ulteriori installazioni.

Tempi di costruzione brevi e lunga durata dell'impianto

Grazie alla semplicità progettuale, un impianto completo può essere realizzato in circa tre anni. Peraltro la vita attesa dell'impianto è approssimativamente di 25-30

anni. Oltre questo periodo l'utilizzo dell'installazione può essere ulteriormente esteso apportando le modifiche e i miglioramenti che si fossero resi disponibili nel frattempo. Lo smantellamento finale dell'area dell'impianto è semplice ed economico e il terreno è riutilizzabile senza limitazioni.

R&S avanzata e rapida commercializzazione successiva

Impianti per un totale 354 MW di picco, realizzati con tecnologie analoghe, ma di prima generazione, sono funzionanti a Kramer Junction (USA) da più di 15 anni e hanno raggiunto un'impressionante riduzione dei costi del chilowattora prodotto, che attualmente oscilla tra i 10 e i 15 US¢/kWh. L'attuale concezione innovativa ENEA, oltre ad una riduzione dei costi, offre una maggiore temperatura di esercizio, un nuovo liquido termovettore non infiammabile, e un ampio accumulo termico che consente di funzionare senza integrazione da fossili. Il fluido termovettore e l'accumulo termico sono stati provati con successo in una serie di progetti dimostrativi di scala significativa. Al termine di più di due anni di intensa attività di ricerca e sviluppo, l'ENEA ha in programma di realizzare per l'estate 2003 un circuito in dimensioni reali, costruito con l'industria, che incorpora tutti questi elementi innovativi. La realizzazione e opera-

zione di tale circuito aprirà la strada alla costruzione di una serie di impianti di potenza. Nel 2006, è prevista l'entrata in funzione di un impianto dimostrativo commerciale di 0,5 km² a Specchia, in Puglia. Altri impianti dimostrativi sono in fase di valutazione ed è ragionevole attendersi che in meno di quattro anni da oggi, impianti commerciali di grandi dimensioni potranno essere in via di realizzazione.

L'impianto solare a concentrazione ENEA

Il principio di funzionamento

Il progetto si è largamente ispirato alle installazioni SEGS (Solar Electric Generating Systems) che hanno operato con successo come impianti ibridi solare-gas per più di quindici anni a Kramer Junction, in California. I miglioramenti principali rispetto a tale tecnologia sono:

1. nuovi specchi parabolici per aumentare la robustezza e diminuirne il costo;
2. una più alta temperatura di funzionamento, circa 550 °C, che richiede conseguentemente un nuovo rivestimento selettivo del sistema che assorbe la luce concentrata;
3. l'uso di un liquido termovettore con minore impatto ambientale e non infiammabile;

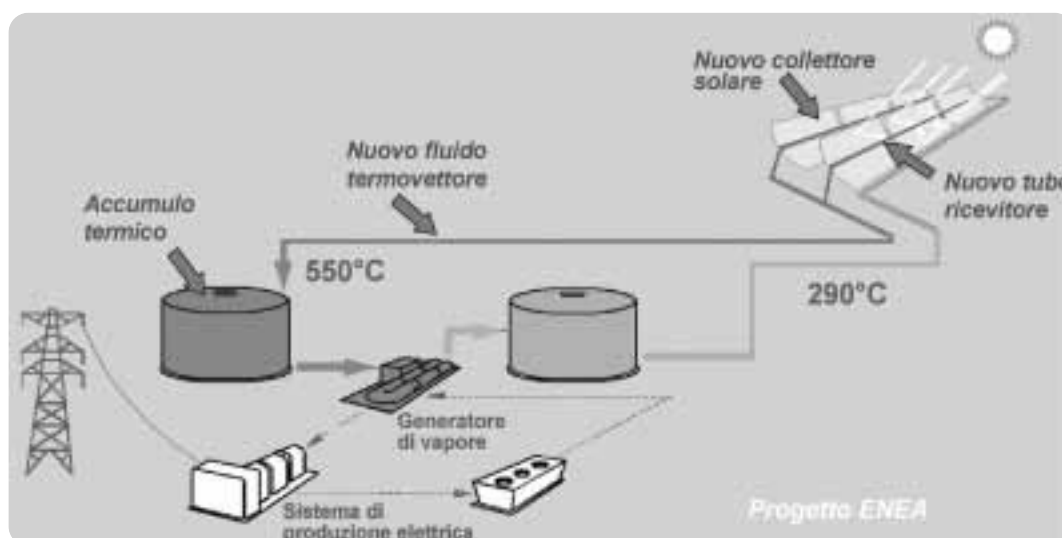


Figura 8
Il progetto ENEA di un impianto solare a concentrazione

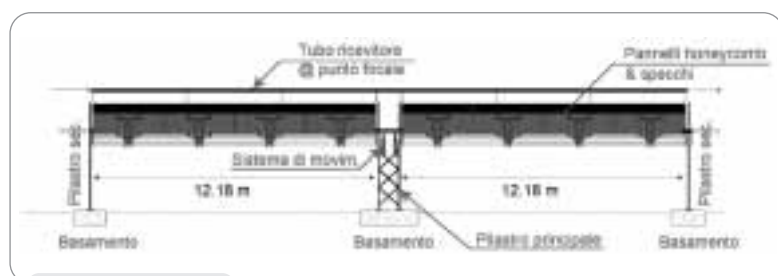


Figura 9
Modulo di collettore solare (Progetto ENEA)

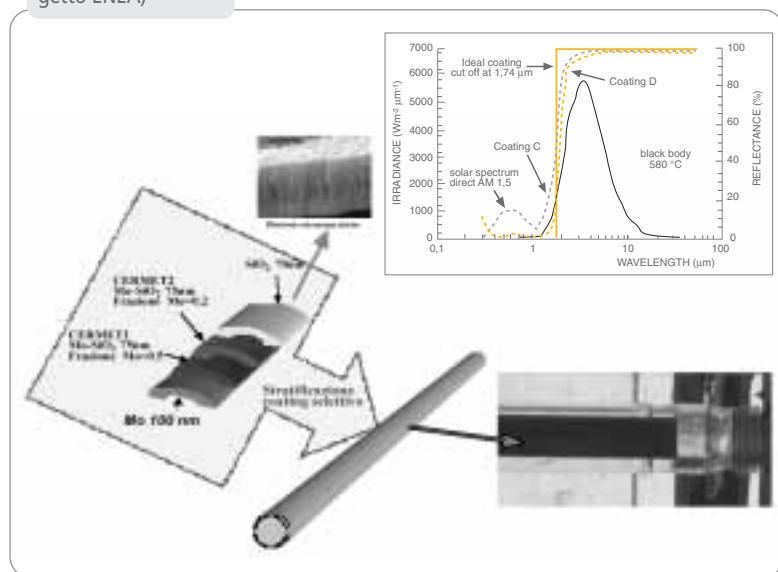
4. l'introduzione di un grande accumulo termico, che può compensare le discontinuità della sorgente solare.

Questi miglioramenti comportano un costo inferiore, più alte efficienze di conversione del calore solare in elettricità e un funzionamento 24 ore su 24 a partire esclusivamente dall'energia solare. In sintesi, gli specchi parabolici lineari concentrano la luce diretta del Sole su un tubo ricevitore lineare che assorbe l'energia raggiante e la converte in calore ad alta temperatura.

Per compensare le irregolarità dell'irraggiamento e il ciclo notte/giorno, il calore è accumulato sotto forma di sali fusi surriscaldati, utilizzati in seguito al fine di alimentare un ciclo di potenza convenzionale.

L'accumulo termico ha una capacità adeguata al fine di garantire l'erogazione di potenza quando richiesto, e in particolare la notte o quando la sorgente solare è assente.

Figura 10
Tubo ricevitore (Progetto ENEA)



Gli specchi parabolici

La radiazione solare diretta è focalizzata su un tubo collettore-ricevitore mediante l'uso di grandi specchi parabolici. L'apertura degli specchi è di 5,76 m, con una lunghezza focale di 1,81 m. Gli specchi, adatti ad una produzione economica di massa, sono costituiti da pannelli *honeycomb* di 2,5 cm di spessore con interno in alluminio e pelli in acciaio che presentano un'elevatissima rigidità. Sulla parte interna di questi pannelli aderisce un sottile specchio di vetro ad alta riflettività. Un insieme di tali pannelli riflettenti è rigidamente fissato ad una struttura di supporto, lunga circa 25 m, che consente la rotazione dell'insieme per seguire il percorso del sole.

Il tubo ricevitore

Il tubo ricevitore, situato sulla linea focale degli specchi, è costituito da una struttura coassiale di due cilindri concentrici: un tubo di vetro esterno da 11,5 cm di diametro e un tubo di acciaio interno da 7 cm di diametro all'interno del quale circola il fluido termovettore (una miscela di sali fusi).

Un opportuno rivestimento selettivo, sviluppato da ENEA, assicura il massimo assorbimento nello spettro della luce solare, mentre riduce le emissioni di radiazione infrarossa generate dal tubo caldo.

Il fluido termovettore

Il fluido termovettore degli impianti di Kramer Junction è un olio minerale infiammabile e tossico. Le proprietà di questo liquido, inoltre, limitano la temperatura di funzionamento dell'impianto e – per motivi di sicurezza e di costo – non permettono l'immagazzinamento del liquido caldo ad un livello sufficiente da costituire un efficace accumulo termico. In realtà questi impianti sono dei sistemi ibridi solare-gas naturale, in quanto necessitano di una pesante integrazione con gas naturale per coprire le discontinuità giornaliere.

Per queste ragioni, nel progetto ENEA si è preferito adottare come fluido termovetto-

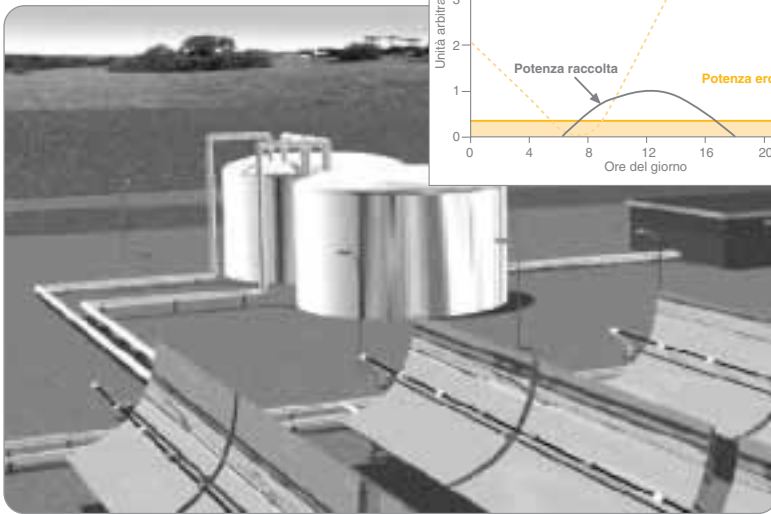


Figura 11
Sistema di accumulo del calore (Progetto ENEA)

da immagazzinare al fine di garantire la stessa continuità di funzionamento, è tuttavia molto più modesta.

Un elevato salto termico (260 °C) tra i due serbatoi di accumulo permette una capacità di accumulo termico elevata. In termini semplici, per immagazzinare 1 kWh sono

re una miscela eutettica di sali fusi, 60% NaNO_3 – 40% KNO_3 .

Questo sale è largamente usato come fertilizzante, è economico e disponibile in grandissime quantità. L'intervallo di temperatura di funzionamento è tra i 290 °C e i 550 °C: limitato attualmente dal fatto che a circa 600 °C i nitrati si decompongono in nitriti, con potenziali problemi di corrosione.

È già stato completato lo studio dettagliato dei componenti associati all'uso della miscela di sali fusi ed i potenziali problemi connessi con tale tecnologia, ad esempio quelli relativi alla corrosione, sono stati studiati e risolti con risultati soddisfacenti.

L'accumulo termico

Una tecnologia matura per la produzione di energia deve erogare l'energia in funzione della domanda. Fino ad oggi, l'unica energia rinnovabile che ha avuto una diffusione estesa è quella idroelettrica. Ciò è dovuto sia alla competitività dei suoi costi che alla presenza del sistema bacino/sbarramento, che è in grado di compensare le variazioni dovute alle variabilità delle precipitazioni.

Nel caso dell'energia solare, la funzione svolta dall'accumulo di acqua nella diga è sostituita dal calore accumulato nel serbatoio termico. Fortunatamente, in quanto l'energia solare è generalmente disponibile su base giornaliera, la quantità di energia

sufficienti circa 5 litri di sale fuso. L'energia accumulata in un volume di sale fuso è eguale a quella prodotta dalla combustione dello stesso volume di gas naturale alla pressione di 18,4 bar, ovvero a quella contenuta in una quantità di petrolio pari ad 1/43 del volume.

Ma, mentre in un impianto convenzionale ad energia fossile il riempimento del serbatoio di olio combustibile è normalmente effettuato con frequenza dell'ordine di mesi, il tempo di accumulo per l'impianto solare è determinato dal ciclo giornaliero, eventualmente incrementato al fine di compensare anche alcuni giorni di cattivo tempo.

Ne consegue che, per una data potenza installata, le dimensioni per un serbatoio di combustibile fossile e quelle per l'accumulo termico di un impianto solare continuativo sono in realtà paragonabili. Ad esempio, al fine di garantire la continuità (erogazione costante 24 ore su 24) dell'energia solare giornaliera massima raccolta da 1 km² di collettori nel Sahara, il serbatoio di accumulo è di circa 30 m di diametro e di 21 m di altezza.

Le perdite di energia associate all'accumulo termico se di dimensioni opportune, sono molto contenute, tipicamente minori dell'1% giornaliero. Quindi l'accumulo termico è un sistema estremamente efficiente, qualora confrontato con gli altri metodi correnti di accumulo energetico.

Verso la realizzazione dell'impianto industriale ENEA

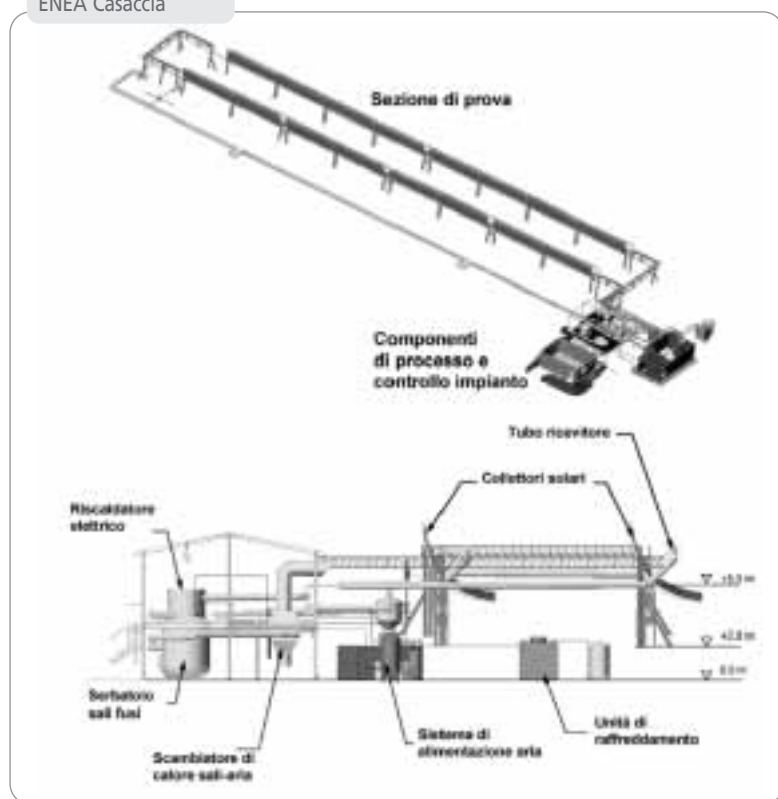
Un ampio programma di R&S per la messa a punto del sistema

Il programma ENEA sul solare a concentrazione è stato finanziato con fondi pubblici da uno specifico articolo della legge finanziaria 2001. Fin dall'inizio del 2001, è stato attivato un imponente programma di R&S che è attualmente nella sua fase conclusiva. Esso prevede una stretta collaborazione con molti partner industriali, sia italiani che stranieri, per la qualificazione del prodotto e per la successiva introduzione nel mercato. Nel 2002, l'investimento ENEA in termini di risorse umane è stato di circa 100.000 ore uomo.

L'unità di raccolta in scala reale

Un circuito di prova dell'insieme del sistema di raccolta in scala reale, realizzato con componenti di origine industriale, è in fase di costruzione e sarà operativo nell'estate 2003. Il collettore solare, il tubo ricevitore,

Figura 12
Impianto di prova e qualificazione componenti presso il CR ENEA Casaccia



le tubazioni e la circolazione del sale fuso, nelle stesse configurazioni della produzione industriale in serie, saranno provati sul campo. Il circuito è anche dotato di un piccolo accumulo, per la verifica delle modalità operative, benché in una scala più modesta rispetto a quella degli impianti finali. Viste le dimensioni modeste dell'energia raccolta, il calore prodotto è dissipato da una torre di raffreddamento.

Il prototipo pre-industriale di Specchia (LE)

Un programma per la realizzazione di un impianto completo per la produzione di energia elettrica connesso con la rete di distribuzione nazionale, è stato avviato in collaborazione con il governo regionale della Puglia e altri partner privati. L'impianto dovrebbe essere completamente operativo per il 2006. L'attuale mercato dell'energia "verde" è tale che il funzionamento dell'impianto potrà essere coperto finanziariamente grazie all'energia prodotta. Esso sarà, dunque, la dimostrazione delle validità potenziali del progetto e un modello di riferimento per le future installazioni.

I due prodotti commerciali di base

Attualmente le attività ENEA sono focalizzate sullo sviluppo di due linee di prodotti complementari:

1. un'unità modulare di captazione solare da 250 MW termici di picco con adeguato sistema di accumulo, per una potenza nominale elettrica pari a circa 40 MW. Fino ad una decina di queste unità (400 MW elettrici) possono essere aggruppate al fine di alimentare un'unica centrale a vapore convenzionale. Il modulo è principalmente dedicato alla fornitura di energia elettrica in rete in località ad alta insolazione. Una locazione ideale per tali impianti potrebbe essere ad esempio il deserto del Sahara, connessi con rete elettrica europea grazie ad una linea dedicata HVDC.
2. un'unità di captazione *stand alone* di

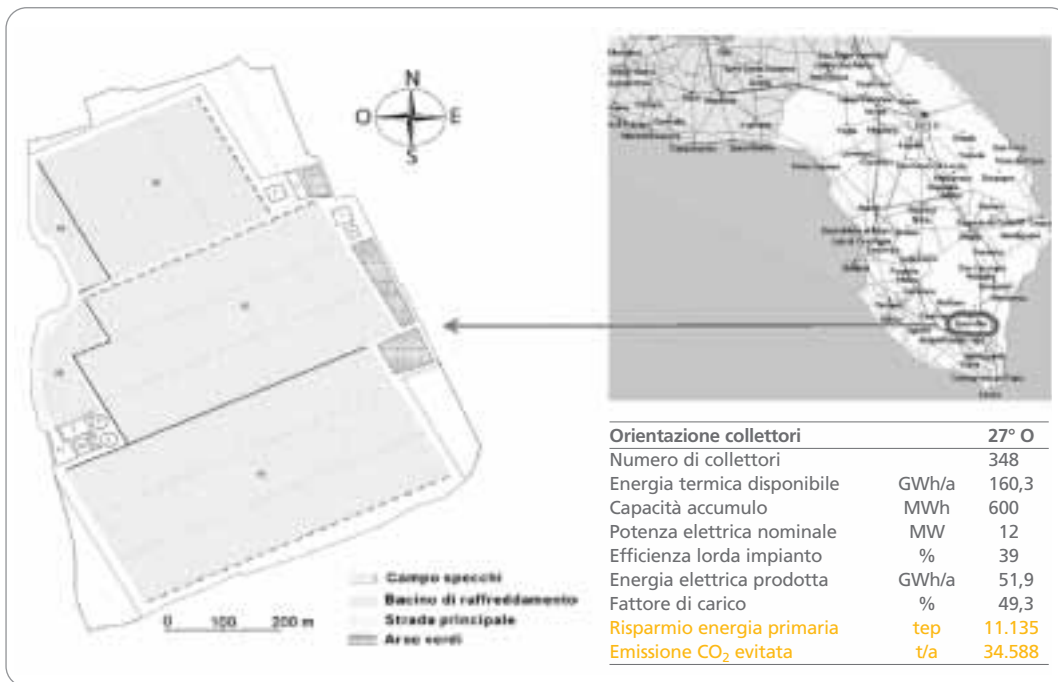


Figura 13
Impianto pre-industriale di Specchia

circa 60 MW termici di picco, anch'essa dotata di accumulo termico, in grado di garantire una potenza elettrica continua di circa 10 MW. Questi moduli sono particolarmente indicati per fornire elettricità in località remote, dove le connessioni con la rete di distribuzione è difficile o troppo costosa. Questa opzione è particolarmente interessante per esempio per isole con forte insolazione e per regioni remote, specialmente in alcuni Paesi in via di sviluppo. Ognuno di questi impianti potrebbe alimentare i fabbisogni elettrici di base per comunità dalle 20.000 alle 100.000 persone.

Entrambi i prodotti, che possono essere adattati ad una gran varietà di configurazioni del terreno e delle esigenze specifi-

che, si basano su un progetto modulare dei collettori solari e del sistema di accumulo a sali fusi. Il costo unitario dei sistemi di captazione è praticamente lo stesso per ambedue le configurazioni e decresce con il numero totale di collettori realizzati globalmente. Come già indicato, a partire da una produzione sostanziale, il costo dell'energia termica prodotta in locazioni favorevoli è dell'ordine di 2 ÷ 4 US\$/GJ, dipendente dall'insolazione disponibile, comunque altamente competitiva con il gas naturale e i combustibili liquidi.

Va tuttavia sottolineato che anche il costo specifico degli impianti, essendo superiore per le piccole potenze, si rifletterà, come peraltro anche per gli impianti a combustibili fossili, in costi variabili dell'elettricità prodotta.

Protocolli di sperimentazione per la produzione biologica in aziende pilota delle regioni meridionali

DAMIANO PETRUZZELLA*
ENRICO RASO**
MAURIZIO DESANTIS*
CARMELO SIGLIUZZO*
AGOSTINO LETARDI***

* CIHEAM, Istituto
Agronomico Mediterraneo, Bari

** Università di Firenze, Facoltà
di Agraria

*** ENEA, UTS Biotecnologie,
Protezione della Salute e degli
Ecosistemi

Una ricerca comunitaria per definire nuove forme di agricoltura sostenibile e multifunzionale, alternativa ma non conflittuale con quella convenzionale, ha portato alla definizione di una metodologia semplice, fondata sul coinvolgimento diretto degli agricoltori e messa a punto in aziende pilota a differente orientamento produttivo¹

studi & ricerche

Experimentation protocols for *biological production* at pilot farms in southern Italy

Abstract

One of the activities envisaged in the PROBIO project conducted by ENEA under the 1994-99 EU Structural Funds Support programme has been the development of experimentation protocols for biological production at pilot farms in southern Italy. The overall aim was to test and transfer methodologies and models characterised by sounder use of natural resources, enhancement of self-regulation mechanisms in farming systems, and a reduction of external inputs (even those allowed by EU Regulation 2092/91). The two main goals were to develop and validate biological farming protocols for several key southern crops, capable of integrating the technical component with local soil, climate and socio-cultural factors; and to make available to southern farmers the know-how developed at the pilot farms and thus facilitate the transition from conventional to biological agriculture.

¹ Lavoro cofinanziato dalla Comunità Europea e realizzato nell'ambito del Contratto di Associazione con IAMB "Sviluppo, sperimentazione e dimostrazione di tecniche e metodi innovativi di coltivazione e produzione biologica", attività prevista dal Progetto PROBIO (PROduzioni vegetali mediante BIOTecnologie) dell'ENEA - QCS FESR 1994-99 Sottopr. II Misura II.1.

e tendenze attuali della Politica Agricola Comunitaria sono sempre più orientate a favorire l'abbandono dell'agricoltura intensiva, specializzata e ad alta produttività favorendo il rapido trasferimento sul territorio di modelli di agricoltura sostenibili per i quali il nostro Paese e, in particolare il Meridione, sono vocati. Tale contingenza ha però generato una situazione in cui la necessità di rendere omogenei i metodi di coltivazione a livello europeo ha favorito un forte condizionamento da parte dell'agricoltura dei paesi nordici. Pertanto, si manifesta la necessità di definire e diffondere modelli dimensionati secondo le caratteristiche pedo-climatiche e socio-economiche della realtà del Meridione d'Italia.

L'agricoltura dei Paesi dell'Unione Europea di questi ultimi decenni è risultata accomunata dalle seguenti problematiche: sovrapproduzioni e flessione dei redditi, riduzione della capacità di assorbire lavoro, impatto ambientale e paesaggistico e, non ultimo per importanza, modificazione della qualità dei prodotti. Da ciò l'importanza della ricerca nel definire nuove forme di agricoltura a basso impatto ambientale, sostenibile e multifunzionale, alternativa, ma non conflittuale, con quella convenzionale. In quest'ottica nello scorso decennio, dal 1992 al 1999, ha attivamente lavorato un "Research Network for EU and associated Countries on Integrated and Ecological Arable Farming Systems (I/EAFS)" che, con 25 gruppi di ricerca internazionali, ha portato alla definizione di una "Metodologia per la progettazione e gestione di sistemi agricoli sostenibili" valida anche per gli agro-ecosistemi condotti in modo "biologico". Si tratta di una metodologia volutamente pratica e semplice da applicare.

Obiettivo della linea della ricerca qui presentata è stato quello di proporre agli agricoltori una metodologia olistica codificata, semplice da comprendere e applicare in azienda allo scopo di migliorare la gestione sostenibile aziendale. La ricerca ha avuto la finalità di mettere a punto una me-

todologia che consentisse di valutare i sistemi agricoli biologici (meglio definiti come Sistemi Agricoli Ecologici) partendo dall'analisi approfondita, a livello aziendale, delle prestazioni agro-ambientali e delle scelte tecniche, economiche e sociali dell'imprenditore e delle loro variazioni nel tempo. Conseguentemente, ciò ha permesso di migliorare i protocolli per la produzione biologica coinvolgendo direttamente le aziende agricole.

Data la complessità e la diversità degli aspetti descritti, nelle realtà del Meridione d'Italia, tale metodologia è stata applicata e messa a punto in aziende pilota a differente orientamento produttivo distribuite nelle aree produttive più significative delle regioni meridionali, con l'obiettivo di raggiungere la definizione di diversi prototipi aziendali riproducibili per i diversi sistemi colturali.

Metodologia di ricerca

La metodologia di ricerca applicata è partita dalle indicazioni emerse nell'ambito del network europeo per la progettazione e gestione degli agrosistemi a basso impatto ambientale (Network I/EAFS) che, in Italia, fa riferimento al Dipartimento Scienze Agronomiche e Gestione del Territorio Agroforestale (DISAT) della Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Firenze.

Tale metodologia prevede lo studio del Sistema Agricolo Ecologico (SAE) innanzitutto attraverso l'individuazione di obiettivi prioritari per l'imprenditore (scala gerarchica degli obiettivi economici, sociali e ambientali) che, successivamente, vengono quantificati e valutati tramite parametri. A sua volta, ogni parametro presenta un valore o un intervallo di valori ottimali che rappresentano il punto di riferimento per le valutazioni successive.

Per raggiungere gli obiettivi individuati in precedenza sono stati definiti sei metodi base, ciascuno dei quali caratterizzato dalla capacità di agire su più parametri.



Figura 1
Ubicazione aziende sottoposte a monitoraggio

Il percorso progettuale, che segue una metodologia semplice e pratica, ha previsto la sua continua revisione e miglioramento. Ogni fase ha visto il coinvolgimento diretto sia dei tecnici progettisti che dei responsabili della gestione aziendale seguendo regole modificate in relazione ai risultati e alle nuove conoscenze che, nel tempo, sono derivate dall'esperienza pratica. Tale metodologia ha consentito quindi di

effettuare una valutazione complessiva e integrata dell'azienda e dei protocolli di produzione biologica andando oltre la fase di analisi e diagnosi dei singoli aspetti dell'agrosistema.

Un ruolo determinante è stato svolto dagli imprenditori agricoli partecipanti alla ricerca. Le aziende agricole coinvolte sono state 14 (tabella 1), caratterizzate da differenti ordinamenti produttivi e localizzazione geografica (figura 1).

Nelle fasi iniziali del progetto è stato predisposto un questionario di definizione della situazione aziendale, utilizzato dai tecnici rilevatori con lo scopo di meglio conoscere i singoli aspetti dell'azienda e del suo intorno. I rilievi aziendali sono stati effettuati con sistematicità attraverso monitoraggio di parametri e metodi individuati.

Per ciascuna azienda è stato elaborato un "Rapporto aziendale" costituito da:

- un profilo aziendale con i dati e le caratteristiche generali dell'azienda;
- gli aspetti della fertilità del suolo, le caratteristiche agro-ecologiche e socio-economiche;
- l'analisi dei rilievi aziendali effettuati per le principali avversità parassitarie monitorate;
- un sintetico protocollo di produzione aziendale.

Tabella 1
Elenco aziende pilota

| n. | Orientamento produttivo | Culture osservate | Agro |
|----|--------------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | Arboricolo | Olivo | Andria (BA) |
| 2 | Cerealicolo/zootecnico | Cereali | Gioia del C. (BA) |
| 3 | Arboricolo | Ciliegio, olivo | Cisternino (BR) |
| 4 | Olivicolo | Olivo | Calimera (LE) |
| 5 | Vitivinicolo - olivicolo | Vite, olivo | Canosa (BA) |
| 6 | Vitivinicolo | Vite da vino | Cerignola (FG) |
| 7 | Viticolo (da tavola) | Vite da tavola | Castellaneta (TA) |
| 8 | Agrumicolo | Arance, mandarini | Mineo (CT) |
| 9 | Ortaggi | Pomodoro | Rocca Imperiale (CS) |
| 10 | Agrumi, vite, olivo | Arance | Amendolara (CS) |
| 11 | Cerealicolo | Cereali | Gravina di Puglia (BA) |
| 12 | Orticolo | Pomodoro | Cutrofiano (LE) |
| 13 | Cerealicolo | Cereali | Irsina (MT) |
| 14 | Ciliegio | Ciliegio | Bisceglie (BA) |

Le cinque fasi della "Metodologia" per la progettazione e gestione di agroecosistemi biologici sostenibili

- 1^a. Creazione della scala gerarchica degli obiettivi
- 2^a. Individuazione dei parametri e metodi
- 3^a. Disegno del prototipo di agroecosistema biologico e dei metodi
- 4^a. Prospetto del prototipo di agroecosistema biologico e relativo suo controllo e miglioramento
- 5^a. Diffusione del sistema agricolo biologico collaudato.

1^a Fase: creazione della scala gerarchica degli obiettivi

Con questa fase si definisce una scala gerarchica degli obiettivi agronomici, economici, sociali ed ecologico-ambientali che si intende raggiungere con l'attuazione del nuovo agroecosistema biologico.

La definizione della gerarchia degli obiettivi avviene considerando attentamente i difetti e/o le contraddizioni che il Sistema Agricolo Convenzionale presenta nell'area di studio in modo da poterli diminuire o, teoricamente, eliminare. Ogni obiettivo viene caratterizzato a livello generale (obiettivo generale) e a livello specifico (obiettivo specifico). Il

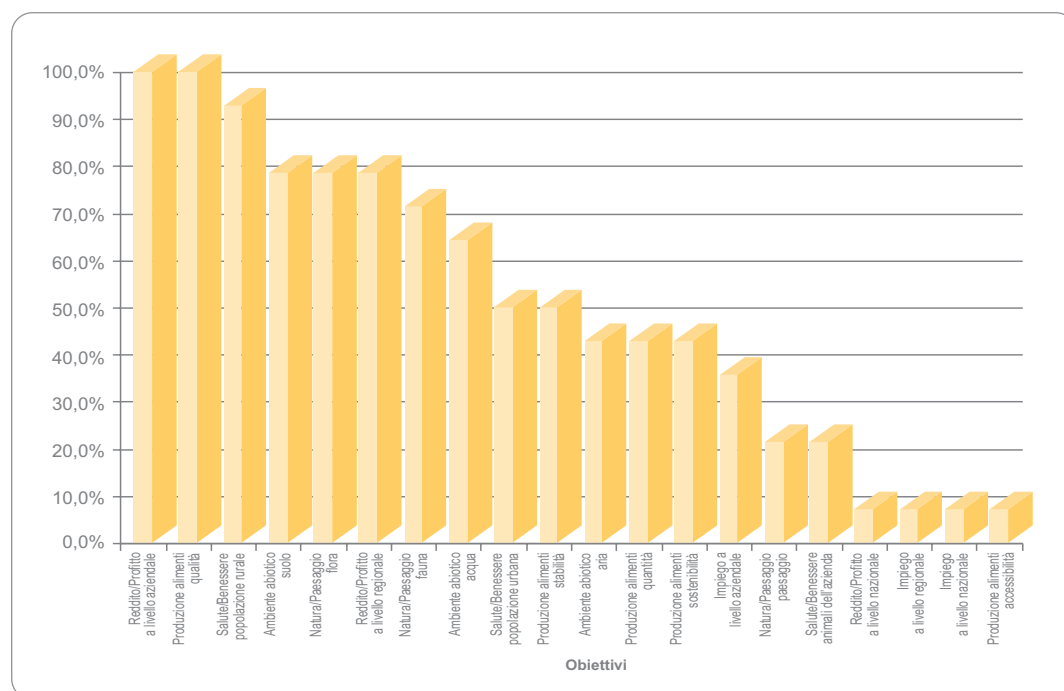
| Generale | Specifico | Generale | Specifico |
|-------------------|---|---------------------|--|
| Ambiente abiotico | Suolo Acqua Aria | Impiego manodopera | a livello aziendale a livello regionale a livello nazionale |
| Natura/Paesaggio | Flora Fauna Paesaggio | Salute/Benessere | animali dell'azienda popolazione rurale popolazione urbana |
| Reddito/Profitto | a livello aziendale a livello regionale a livello nazionale | Produzione alimenti | quantità qualità stabilità sostenibilità accessibilità |

Tabella 2
Obiettivi generali e specifici

Tabella 3
Scala gerarchica degli obiettivi generali e specifici rilevati nelle aziende agricole

| Obiettivi | | Az. 1 | Az. 2 | Az. 3 | Az. 4 | Az. 5 | Az. 6 | Az. 7 | Az. 8 | Az. 9 | Az. 10 | Az. 11 | Az. 12 | Az. 13 | Az. 14 |
|---------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ambiente abiotico | suolo | 10 | 1 | 10 | 7 | - | - | 5 | 1 | 8 | 2 | 5 | 8 | - | 10 |
| Ambiente abiotico | acqua | - | 8 | - | 3 | 5 | 5 | 9 | 3 | - | - | 7 | 10 | 3 | - |
| Ambiente abiotico | aria | - | 2 | - | - | 2 | 2 | - | 8 | - | 7 | - | - | 7 | - |
| Natura/Paesaggio | flora | 7 | 3 | 4 | 8 | 8 | 7 | 10 | 2 | - | 4 | 6 | - | - | 8 |
| Natura/Paesaggio | fauna | - | 5 | 8 | 6 | 3 | 3 | - | 5 | - | 9 | 4 | 5 | - | 6 |
| Natura/Paesaggio | paesaggio | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 4 | - | 1 |
| Reddito/Profitto | a livello aziendale | 5 | 4 | 2 | 2 | 4 | 6 | 1 | 4 | 2 | 8 | 2 | 2 | 1 | 5 |
| Reddito/Profitto | a livello regionale | 9 | 7 | - | 5 | 7 | 10 | 7 | 7 | 5 | - | 10 | 7 | 4 | - |
| Reddito/Profitto | a livello nazionale | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 10 | - |
| Impiego | a livello aziendale | 2 | - | - | - | - | - | 8 | - | 6 | 6 | - | - | - | 7 |
| Impiego | a livello regionale | - | - | - | - | - | - | - | - | 9 | - | - | - | - | - |
| Impiego | a livello nazionale | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 8 | - |
| Salute/Benessere | animali dell'azienda | - | 9 | 9 | - | - | 9 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Salute/Benessere | popolazione rurale | 3 | - | 6 | 9 | 6 | 1 | 3 | 9 | 3 | 3 | 9 | 3 | 9 | 4 |
| Salute/Benessere | popolazione urbana | 6 | - | 7 | - | 9 | 4 | - | - | 7 | - | - | 1 | 6 | - |
| Produzione alimenti | quantità | - | - | 5 | 4 | - | - | - | - | - | 5 | 3 | 9 | - | 9 |
| Produzione alimenti | qualità | 1 | 6 | 1 | 1 | 10 | 8 | 2 | 6 | 1 | 1 | 1 | 6 | 2 | 2 |
| Produzione alimenti | stabilità | 4 | 10 | 3 | - | - | - | 4 | 10 | 4 | - | 8 | - | - | - |
| Produzione alimenti | sostenibilità | 8 | - | - | 10 | - | - | 6 | - | 10 | 10 | - | - | - | 3 |
| Produzione alimenti | accessibilità | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 5 | - |

Grafico 1
Scelta gerarchica degli obiettivi (in 3%)



Gruppo Europeo ha proposto una base di 6 obiettivi generali e 20 obiettivi specifici come riportato nella tabella 2.

L'importanza che viene attribuita a ciascun obiettivo generale o specifico varia in funzione dell'indirizzo produttivo del sistema agricolo che si intende sviluppare e in relazione alle particolari problematiche socio-economiche ed agro-ambientali che presenta l'area esaminata.

Gli obiettivi generali sono stati numerati da 1 a 6 e così gli obiettivi specifici da 1 a 3 in base alla loro crescente importanza (massima importanza 6 o 3, minima importanza 1). Al fine di definire con maggiore precisione la scala gerarchica degli obiettivi è stata introdotta la possibilità di attribuire anche valori frazionari. Occorre precisare che la definizione dei valori degli obiettivi generali e specifici è stato il risultato di ripetuti incontri e discussioni tra il progettista ed il singolo imprenditore agricolo. Stabilita la gerarchia degli obiettivi sono stati definiti, per ciascuna azienda agricola, i primi dieci obiettivi specifici più importanti in base al loro maggior valore assoluto.

Nella tabella 3 e nel grafico 1 sono esposti i risultati di tali valutazioni.

2ª Fase: individuazione dei parametri e metodi

La seconda fase della metodologia consta di due passaggi:

- trasformazione dei 10 maggiori obiettivi specifici in parametri multiobiettivo che li quantificano;
- individuazione di metodi multifunzionali per raggiungere i 10 maggiori obiettivi specifici in precedenza individuati e quantificati dai parametri con relativo collegamento "obiettivi specifici-parametri-metodi".

a) Trasformazione degli obiettivi in parametri

La metodologia per quantificare i "10 maggiori obiettivi specifici" fornisce un elenco di 16 parametri "ufficiali" con proprie sigle.

Inoltre, per particolari ragioni connesse a particolari peculiarità dell'agroecosistema studiato, poiché qualche obiettivo specifico non è ritenuto sufficientemente coperto dal set dei parametri "ufficiali" ne sono stati introdotti alcuni nuovi che in tal caso assumono importanza "locale" e come tali sono indicati.

| Parametri europei | Sigle | Definizioni | Valori ottimali |
|--|------------|---|--|
| Bilancio annuale della sostanza organica | OMAB suolo | Rapporto tra $OMAR_{anno1+x}$ e $OMAR_{anno x}$ | ≥ 1 |
| Riserve disponibili di P_2O_5 | PAR | Quantità di fosforo disponibile nel suolo | 13-25 ppm (Olsen) |
| Riserve disponibili di K_2O | KAR | Quantità di potassio disponibile nel suolo | 15-30 mg/100 g |
| Bilancio annuale di fosforo | PAB | Rapporto tra Input/Output di fosforo | 1,1-1,4 |
| Bilancio annuale di potassio | KAB | Rapporto tra Input/Output di potassio | ≥ 1 |
| Efficienza energetica | EE | Rapporto tra Output/Input energetici (materie prime prodotte/mezzi tecnici impiegati) | \geq convenz. |
| Diversità delle piante a livello di specie | PSD | Numero di specie vegetali di interesse faunistico e paesaggistico-ricreativo presenti nelle infrastrutture ecologiche | ≥ 10 |
| Indice delle infrastrutture ecologiche | EII | % di superficie aziendale lasciata come habitat naturali e corridoi lineari e non, incluse strisce inerbite artificialmente | $\geq 5\%$ |
| Indice di copertura del suolo | SCI | Superficie di suolo coperto dalla coltura o dai residui colturali e gestione controllata della vegetazione spontanea e consociazione (tutto l'anno) | $\geq 50\%$ |
| Indice di qualità di produzione | QPI | Indice di qualità (QI) x Indice di produzione (PI) = (Prezzo di mercato * kg/prezzo massimo di mercato * kg) x (kg/ha di prodotto venduto / kg/ha di prodotto sul campo) | $\geq 0,9$ |
| Surplus economico netto | NS | Tornaconto dell'imprenditore | ≥ 0 £/Ha |
| Indice esposizione pesticidi | EEP ARIA | Quantità p.a. (kg/ha ⁻¹ x vapore di pressione mPa a 20-25 °C) Rotenone p.v. < 1 mPa (a 20 °C) Olii minerali p.v. = trascurabile Ossicloruri di rame p.v. trascurabile Piretrine p.v. trascurabile Azadiractina (Neem) p.v. trascurabile Zolfo p.v. = 0,53 mPa (a 30 °C) Bacillus Th. p.v. = 0 | 0 |
| Esposizione ai pesticidi | EPf | Parametro espresso da eventuale presenza di residui di fitofarmaci su foglie e/o frutti causato da effetto deriva esterna all'azienda | < l.r.. |
| Indice presenza predatori | IPP | Rapporto tra il numero di predatori catturati (Crisopa; Coccinellidi; Sirfidi) e numero di trappole installate | (*) |
| Indice di parassitizzazione | IP | Rapporto tra il numero di fitofagi parassitizzati e numero totale di fitofagi | (*) |
| Indice di dannosità del fitofago | PDF | Rapporto tra percentuale d'infezione a fine ciclo e densità di popolazione del fitofago | (*) |
| Riserva annuale di s.o. | OMAR | Quantità di s. o. del suolo | Argilla <10 1,5-2,5 % Argilla 10-30 2,0-2,5% Argilla >30 2,5-3,0% |
| Bilancio annuale basi di scambio | ABB | Na, Ca, Mg,... variazioni annue | Ca=1.000-2.000 K=150-300 Mg=150-500 Na £ 300 mg/kg |
| Riserva annuale di N totale del suolo | TNAR | Quantità di azoto totale del suolo | 1-1,5 ‰ |
| Rapporto C/N del suolo | C/N | Rapporto carbonio/azoto del suolo | 9-11 |

Tabella 4

SAE - Definizione e valore parametri europei e locali

* Indici locali in corso di valutazione

Nella scelta dei parametri "locali" è importante che questi abbiano un riconosciuto valore scientifico, risultino effettivi indicatori agroecosistemici, siano di facile e veloce rilevazione in campo e/o valutabili con le attrezzature presenti nei laboratori della zona secondo i protocolli analitici ufficiali. A sua volta ogni parametro, "ufficiale" o "locale", presenta un valore o un intervallo di valori ritenuti ottimali (desiderati) da parte del progettista in relazione allo specifico agroecosistema studiato e che in prima fase di conversione al biologico è prudente definirli di tipo "provvisorio".

Si evidenzia che nella tabella 4 i valori o intervalli di valore (provvisori) considerati ottimali per parametri impiegati nelle aziende pilota sono stati definiti a seguito di vari incontri tra i responsabili scientifici del progetto e gli Imprenditori delle aziende.

Per tale scopo sono stati considerati anche i risultati aziendali delle analisi del suolo, dei bilanci dei flussi in entrata ed in uscita di

energia a livello di colture, di elementi chimici, dell'estensione e caratterizzazione floristica delle infrastrutture ecologiche ecc.

b) Individuazione di metodi multifunzionali

Ogni parametro, individuato e monitorato, permette, quindi, di valutare il raggiungimento degli obiettivi definiti. A questo punto vengono definiti i metodi capaci di garantire il raggiungimento di tali obiettivi.

Il gruppo di progettisti, rifacendosi a quanto stabilito dal Network I/EAFS, ha individuato i metodi base caratterizzati dalla proprietà multifunzionale, cioè capaci di agire su più parametri e, quindi, su più obiettivi, definiti come di seguito (tabella 5).

Il lavoro conclusivo della seconda fase si è concretizzato nell'elaborazione di un quadro riassuntivo nel quale i 10 maggiori obiettivi, riportati in ordine crescente d'importanza, vengono quantificati tramite parametri e metodi (tabella 6, grafico 2)

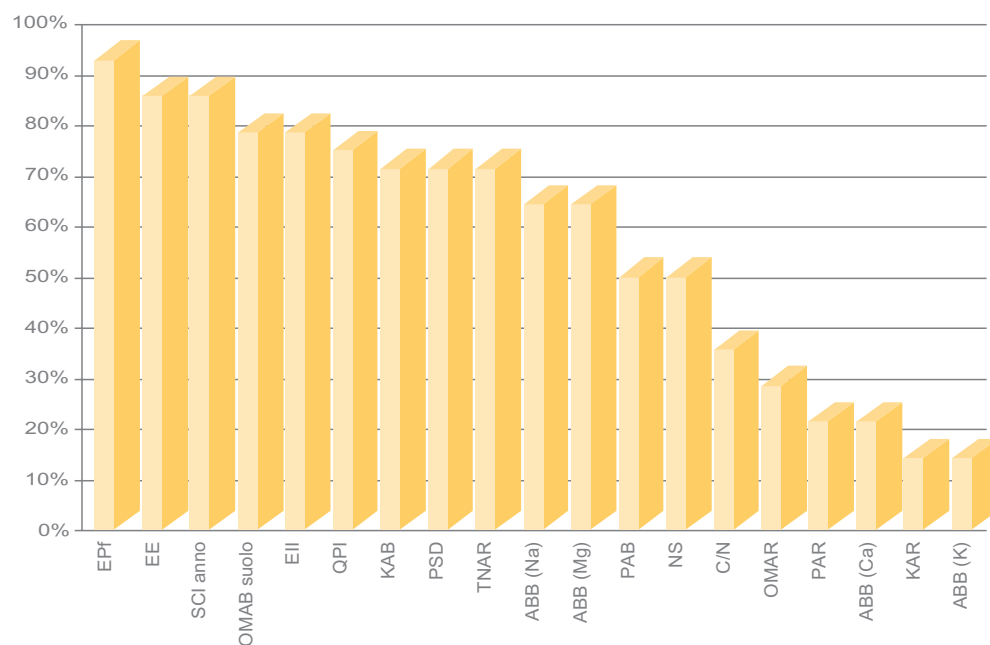
Tabella 5
Definizione metodi

| Metodi | Sigle | Definizioni |
|--|-------|---|
| Avvicendamento colturale | MCR | Metodo che, con l'opportuno avvicendamento delle colture nello spazio e nel tempo, permette il mantenimento della fertilità agronomica del suolo tale da sostenere la produzione sotto l'aspetto quali-quantitativo con la minima necessità di interventi e di input energetici |
| Gestione ecologica dei nutrienti | ENM | Metodo che, con un opportuno bilanciamento tra output ed input dei nutrienti, mantiene o migliora le riserve degli elementi nutritivi del suolo in quell'intervallo agronomicamente desiderato ed ecologicamente accettabile tale da sostenere la vitalità delle colture e la produttività sotto l'aspetto quali-quantitativo |
| Gestione delle infrastrutture ecologiche | EIM | Metodo che, con lo sviluppo e la gestione delle infrastrutture ecologiche, permette la presenza ed il miglioramento della flora e della fauna locale utile alla vitalità dell'agroecosistema e alla ricreazione della popolazione rurale e urbana |
| Ottimizzazione della struttura aziendale | FSO | Metodo che permette, con lo studio della migliore combinazione dei fattori della produzione e conseguente raggiungimento del prefissato tornaconto, di rendere economicamente efficiente un sistema agricolo ecologicamente valido |
| Minima lavorazione del suolo | MSC | Metodo che, con l'uso di particolari tecniche e sequenze di lavorazione del suolo, permette il mantenimento o il miglioramento della fertilità agronomica del terreno, il controllo delle infestanti e la riduzione dell'erosione e degli input energetici |
| Protezione ecologica delle colture | ECP | Metodo che, con la prevenzione ed il controllo delle malattie e delle infestanti, permette di sostenere la qualità e produttività delle colture con il minimo uso o il non uso di presidi sanitari seppur ammessi in agricoltura biologica |

| Parametro | Valori riferimento | Raggiungim. aziendale | | | | | | | | | | | | | | Metodo correlato | |
|------------|--|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|------------------------------|
| | | Az.1 | Az.2 | Az.3 | Az.4 | Az.5 | Az.6 | Az.7 | Az.8 | Az.9 | Az.10 | Az.11 | Az.12 | Az.13 | Az.14 | | |
| EpF | < l. r. | | | | | | | | | | 0 | | | | | 93% | EIM |
| EE | ≥ convenz. | | | | | | | | | 0 | 0 | | | | | 86% | MCR, ENM, EIM, FSO, MSC, ECP |
| SCI anno | ≥ 50 % | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 86% | MSC |
| OMAB suolo | ≥ 1 | | | | | 0 | | 0 | 0 | | | | | | | 79% | MCR, ENM, MSC |
| EII | ≥ 5 % | | 0 | | | | | | 0 | | | | | 0 | | 79% | EIM |
| QPI | ≥ 0,9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | - | | 0 | 75% | MCR, ENM, EIM, FSO, MSC, ECP |
| KAB | ≤ 1 | 0 | | | | | | | | | 0 | 0 | | 0 | | 71% | MCR, ENM, MSC |
| PSD | ≥ 10 | | | | 0 | | 0 | 0 | 0 | | | | | | | 71% | EIM |
| TNAR | 1-1,5‰ | | 0 | 0 | | 0 | | 0 | | | | | | | | 71% | MCR, ENM, MSC |
| ABB (Na) | ≤ 300 mg/kg | 0 | | | 0 | | | | | 0 | | 0 | | 0 | | 64% | MCR, ENM, MSC |
| ABB (Mg) | 150-500 mg/kg | | | | 0 | 0 | | | | 0 | | 0 | | | 0 | 64% | MCR, ENM, MSC |
| PAB | 1,1-1,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | 0 | 0 | | | 0 | | 50% | MCR, ENM, MSC |
| NS | ≥ 0 €/ha | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | 0 | - | 0 | | 50% | MCR, ENM, EIM, FSO, MSC, ECP |
| C/N | 9-11 | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 36% | MCR, ENM, MSC |
| OMAR | Argilla <10 1,5-2,5 % Argilla 10-30 2,0-2,5% Argilla >30 2,5-3,0% | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 29% | MCR, ENM, MSC |
| PAR | 13 - 25 ppm | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | | 21% | MCR, ENM, MSC |
| ABB (Ca) | 1.000-2.000 mg/kg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 21% | MCR, ENM, MSC |
| KAR | 15-30 mg/100 g | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14% | MCR, ENM, MSC |
| ABB (K) | 150-300 mg/kg | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14% | MCR, ENM, MSC |
| | | 53% | 53% | 71% | 53% | 53% | 59% | 53% | 65% | 47% | 53% | 47% | 71% | 47% | 63% | | |

Tabella 6

I 10 maggiori obiettivi, riportati in ordine crescente d'importanza, quantificati tramite parametri e metodi

**Grafico 2**

Raggiungimento parametri - totale aziendale

3ª Fase: disegno del prototipo teorico dell'agroecosistema biologico e dei metodi

La terza fase della metodologia consta di due passaggi:

- a) disegno del prototipo teorico dell'agroecosistema biologico;
- b) disegno (impostazione tecnica di base) dei metodi.

a) Disegno del prototipo teorico dell'agroecosistema biologico

Una volta individuati i 10 maggiori obiettivi specifici, individuati i parametri che li quantificano e i metodi che li gestiscono, si passa al disegno schematico del "prototipo teorico" dell'agroecosistema biologico (azienda agraria) dove si evidenziano graficamente i collegamenti tra i 10 parametri specifici maggiori e i metodi individuati nella fase precedente (figura 2).

Il disegno del prototipo teorico dell'agroecosistema evidenzia quali sono i metodi chiamati in causa per raggiungere, tramite i parametri, gli obiettivi specifici maggiori o viceparametri, quali obiettivi specifici, tramite i parametri, sono supportati dai metodi. In relazione al fatto che i metodi sono multifunzionali, ossia agiscono, sia pur in maniera differenziata sui parametri, è consequenziale che i metodi devono essere disegnati ossia impostati tecnicamen-

te non in modo indipendente l'uno dall'altro ossia in modo casuale, ma in relazione all'ordine che segue una priorità stabilita dal progettista in collaborazione con l'imprenditore agricolo.

b) Disegno (o impostazione) dei metodi

In questo contesto i metodi vengono tecnicamente impostati nelle loro principali linee guida. La metodologia infatti non può che indicare i criteri base da seguire per strutturare in modo sufficientemente valido i metodi, dato che le possibili varianti tecniche ed i conseguenti dettagli operativi sono strettamente connessi alle specifiche quanto mutevoli caratteristiche delle aziende agrarie.

4ª Fase: controllo e miglioramento del prototipo di agroecosistema biologico in pratica

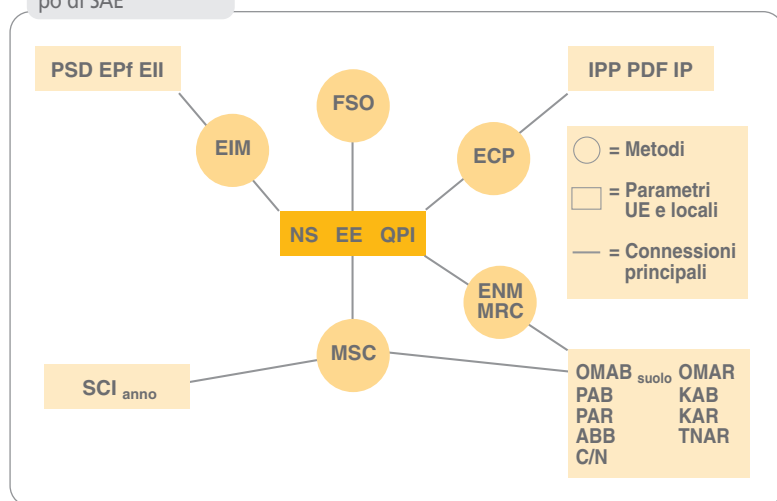
Nel corso della quarta fase la metodologia prevede la attuazione di due operazioni simultanee.

- a) la stesura del "Prospetto" dell'agroecosistema biologico;
- b) il controllo e miglioramento dell'agroecosistema nella realtà operativa fino a quando i suoi 10 maggiori obiettivi specifici, quantificati dai parametri e gestiti dai metodi, non sono stati raggiunti.

Questa è la fase più impegnativa di tutto il processo di costruzione del modello di agroecosistema e richiede molti anni per avere delle risposte "significative" circa l'efficienza delle scelte operate. Ciò non toglie che, anche nell'arco del "breve periodo", la constatazione del manifestarsi di trend positivi possano già fornire delle informazioni sulla funzionalità del modello aziendale progettato e delle strategie tecniche impiegate per gestirlo.

Indipendentemente da ciò, considerando le ricorrenti pressioni sulle aziende agrarie connesse ai mutamenti del mercato e della politica agricola come dall'innovazione tecnica dei mezzi di produzione, questa fase di

Figura 2
Disegno del prototipo di SAE



controllo in pratica diventa un'attività di routine da effettuare anno dopo anno.

Dopo avere esplicitato questo controllo e verificato la correttezza delle scelte fatte, si passa allo sviluppo del punto *a*). Questo consiste nella produzione di un documento che rappresenti l'agroecosistema nelle sue principali caratteristiche agro-ecologiche con precise voci e corrispondenti valori.

Il punto *b*) consiste nel verificare la risposta del prototipo di agroecosistema nei confronti della sua capacità di raggiungere i propri obiettivi specifici. In pratica alla fine di ogni annata agraria si predispongono lo "Stato dell'arte" dell'agroecosistema sotto forma di tabella e annesso grafico dove sono riportati i parametri studiati, i relativi valori ottenuti, i corrispondenti desiderati, l'eventuale percentuale di discrepanza tra l'ottenuto e il desiderato, gli eventuali metodi connessi ai parametri con valori in difetto, le principali cause del mancato effetto dei metodi sui parametri a questi principalmente connessi con, eventualmente, l'evidenziazione della presenza di altri fattori causa di discrepanze nei parametri ma non riconducibili ai metodi utilizzati ossia fattori "non di sistema".

Se uno o più parametri presentano delle discrepanze tra il valore ottenuto e quello desiderato, occorre migliorare e/o rivedere i metodi connessi a questi ultimi, in modo che si possa migliorare il successivo responso d'analisi dell'agroecosistema al fine di raggiungere, progressivamente, tutti gli obiettivi specifici individuati nella prima fase della metodologia.

5ª Fase: diffusione del prototipo

Ultima fase della metodologia è la diffusione progressiva nel tempo e nello spazio dei prototipi di agroecosistema studiati in aziende sperimentali e collaudati, a livello pratico, in aziende pilota. In quest'ambito le "aziende pilota" assumono anche l'importante ruolo di "aziende dimostrative" per gli agricoltori che hanno interesse a convertire le loro aziende al sistema biologico.

Conclusioni

Il lavoro svolto in questi due anni di progetto ha messo in rilievo le problematiche relative a una corretta applicazione del metodo di produzione biologico e, al tempo stesso, ha messo in evidenza i punti di forza di un settore in rapida espansione.

Pertanto, la metodologia proposta può rappresentare un valido punto di riferimento anche per le regioni e le colture dell'Italia meridionale per poter testare e migliorare i protocolli aziendali.

In generale, confrontando i dati rilevati nei due anni di sperimentazione, si può notare come si sia raggiunta una discreta concordanza tra i valori desiderati e quelli ottenuti. In alcuni casi non vi è stato il pieno raggiungimento degli obiettivi prefissati come per l'obiettivo ambiente abiotico – suolo, quantificato attraverso i parametri OMAB suolo, OMAR, PAR, KAR, PAB, KAR, ABB, TNAR, C/N, e per ambiente abiotico – aria, quantificato dai parametri Epf e IPP, nonché per l'obiettivo generale natura e paesaggio.

La causa di questi scostamenti è certamente dovuta ad una non chiara conoscenza dei rapporti all'interno dell'ecosistema aziendale con conseguente gestione degli elementi "mutuata" dall'agricoltura convenzionale (semplice sostituzione di input di origine esterna quali antiparassitari e fitofarmaci), in verità non così accentuata come generalmente si è portati a ritenere. Altre volte la causa è da ricercarsi all'esterno dell'azienda, dove agricoltori poco attenti all'ambiente utilizzano prodotti chimici ad alto impatto ambientale senza seguire le opportune indicazioni di utilizzo provocando, in alcuni casi, effetti di deriva sulle produzioni biologiche contigue compromettendo gli equilibri dell'ecosistema aziendale.

Non per ultimo la grande problematica inerente la commercializzazione dei prodotti biologici e la difficoltà di spuntare prezzi più elevati di quelli convenzionali in realtà, come quelle meridionali, dove ancora non esiste una vera cultura del mangiar sano.

In questa direzione è, dunque, proseguito il lavoro di monitoraggio aziendale che ha permesso agli imprenditori di assumere una conoscenza più particolareggiata del metodo applicato attraverso un continuo scambio di informazioni. Grande, infatti, è stata la disponibilità degli imprenditori che hanno colto l'opportunità di accrescere il proprio bagaglio culturale.

Infine, da rilevare la grossa potenzialità dell'agricoltura meridionale rilevata nelle aziende monitorate che hanno presentato delle produzioni dall'alto valore qualitativo e che, in alcuni casi, hanno saputo far fronte alle molteplici richieste di mercato piazzandosi su mercati un tempo "proibiti" per la nostra agricoltura.

Bibliografia

- BOCKSTALLER C., GIRARDIN P., VAN DER WERF H.M.G., 1997, *Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems*. European Journal of Agronomy 7:261-270.
- GISBON D., 1994, *Farming systems Research/Extension: background concepts, experience and networking*. In DENT J.B. E MC GREGOR M.J. (eds.): *Rural and Farming systems analysis. European perspectives*. Proceedings of the first European Convention on Farming Systems Research and Extension, Edimburg, 1993, 3-19.
- LINDI R., 1997, *L'agronomia e l'ambiente*. Vol. I. pp. 478.
- MUCCINELLI M., 1997, *Prontuario dei fitofarmaci*. Edagricole, 8ª edizione, pp. 906.
- RASO E., VAZZANA C., 1999, *Applicazione di una metodologia europea per la gestione di agrosistemi a basso impatto ambientale: risultati di una sperimentazione condotta in Toscana*. Riv. Agron., 33:228-239.
- ROHLING N., 1994, *Interaction between extension services and farmer decision making: new issues and sustainable farming*. In DENT J.B. E MC GREGOR M.J. (eds.) *Rural and Farming systems analysis. European perspectives*. Proceedings of the first European Convention on Farming. Systems Research and Extension, Edimburg, 1993, 280-291.
- SEVILLA GUZMAN E. E JSEC TEAM., 1994, *The role of farming systems research/extension in guiding low input systems towards sustainability: an agro-ecological approach for Andalusia*. In DENT J.B. E MC GREGOR M.J. (eds.): *Rural and Farming systems analysis European perspectives*. Proceedings of the first European Convention on Farming Systems Research and Extension, Edimburg, 1993, 305-319.
- SPUGNOLI P., BALDI F., PARENTI A., 1993, *L'analisi energetica per un miglior uso delle risorse nei processi agricoli*. *Applicazione ad aziende agricole toscane*. Rivista di Ingegneria Agraria, 4:225-233.
- VAZZANA C., RASO E., 1990, *Preparing farming system research in Tuscany*, Italy. La Recherche Agronomique in Suisse, 431.
- VAZZANA C., RASO E., 1992, Italy. *Research into and development of integrated arable farming systems*. In *Research into and development of integrated arable farming systems. European Network, progress report 1992*, Coordinator Philippe Viaux, ITCF, Bougneville, France, pp. 27-39.
- VAZZANA C., RASO E., PIERI S., 1996, *Relazione dell'incontro sul tema "Confronto tra diversi sistemi agricoli in colture erbacee"*, Azienda agricola Montepaldi, 19 giugno 1996. ARSIA Regione Toscana - Azienda agricola Montepaldi, Università degli Studi di Firenze, Tip. EffeEmme, pp. 40.
- VAZZANA C., RASO E., PIERI S., 1997, *Una nuova metodologia europea per la progettazione e gestione di agrosistemi integrati ed ecologici*. Riv. Agron., 2:423-440.
- VEREIJKEN P., 1992, *A methodic way to more sustainable farming systems*. Netherlands Journal of Agricultural Science, 40, 3, 209-223.
- VEREIJKEN P., 1994, *Designing prototypes*. Progress Report 1 of the research network on Integrated and Ecological Arable Farming System for EU and associated countries, April 1994, AB-DLO Wageningen, Netherlands, pp. 90.
- VEREIJKEN P., 1995a, *Designing and Testing prototypes*. Progress Report 2 of the research network on Integrated and Ecological Arable Farming System for EU and associated countries, August 1995, AB-DLO Wageningen, Netherlands, pp. 90.
- VEREIJKEN P., 1995b, *A methodical way to IAFS*. Manual of research network on Integrated Arable Farming System (IAFS) for EU and associated countries, November 1995, AB-DLO Wageningen, Netherlands, pp. 62.
- VEREIJKEN P., 1996a, *Prototyping Integrated and Ecological Arable Farming System (IEAFS) within a EU-network*. Second European Symposium on Rural and Farming System Research, Granada (Proceedings in press), pp. 1-17.
- VEREIJKEN P., 1996b, *Testing and improving prototypes*. Research network for EU and associated countries on Integrated Arable Farming System, Draft June 1996. AB-DLO Wageningen, Netherlands, pp. 43.
- VEREIJKEN P., 1998, *Improving and Disseminating Prototypes*. Progress Report 4 of the Research Network on Integrated and Ecological Arable Farming System for EU and associated countries. March 1998, AB-DLO Wageningen. Netherlands, pp. 55.
- WIJNANDS F.G., 1996a, *Integrated farming systems as a more sustainable development path for agriculture*. Research Station For Arable and Farming and Field Production of Vegetables, Lelystad, Netherlands, Draft, 1-8.
- WIJNANDS F.G., 1996b, *Multi-objective methods in Integrated and ecological farming systems*. Research Station For Arable and Farming and Field Production of Vegetables, Lelystad, Netherlands, Draft, 1-8.

Il Parco dell'Energia: mostra delle tecnologie energetiche rinnovabili

ALESSANDRA SCOGNAMIGLIO
MARCO CITTERIO

ENEA, UTS Fonti Rinnovabili
e Cicli Energetici Innovativi



Realizzazione di una mostra permanente, presso l'area sperimentale di Monte Aquilone in Puglia, nel settore della ricerca sulle tecnologie energetiche rinnovabili. L'obiettivo della mostra è, in particolare, quello di contribuire alla diffusione delle conoscenze nel campo dell'energia solare

studi & ricerche

The **Energy Park** exhibition on renewable energy technologies

Abstract

The Energy Park at Monte Aquilone is a pilot project of notable importance whose objective is to make a significant contribution to the dissemination of knowledge in the energy field. Because of its high educational and scientific value, the Park aims not only to arouse the interest of the scientific and research community, but also to involve government ministries and local authorities in its concrete implementation. The new Energy Park, included in an Italian and international network of similar facilities, should constitute an important opportunity for the cultural and economic development of the entire area.

Il tema dell'energia, ed in particolare la necessità del ricorso all'uso di fonti rinnovabili che garantiscano uno sviluppo sostenibile del pianeta, è tra gli argomenti di maggiore rilevanza discussi ed approfonditi nel contesto culturale contemporaneo. L'interesse degli operatori del settore e l'attenzione da parte della comunità sono rivolti da un lato alle ricerche in atto nel campo dell'impiego delle varie fonti rinnovabili per la produzione di energia, dall'altro alle prospettive tecniche di sviluppo e di diffusione delle diverse tecnologie attese per il futuro. In questo quadro, nell'ambito delle attività condotte dall'Unità Tecnico Scientifica Fonti Rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi, è stato elaborato un progetto per un "Parco dell'Energia", inteso come esposizione permanente sul tema delle energie rinnovabili, da localizzarsi presso l'Area Sperimentale di Monte Aquilone che ospita l'impianto fotovoltaico sperimentale Delphos.

Il Parco dell'Energia (figura 1) comprende

Figura 1

Vista del plastico del progetto da ovest



Figura 2

L'idea del Parco dell'Energia



una esposizione interattiva, un'area prototipi situata all'esterno, ed altri spazi di natura diversa, destinati ad uffici e ricerca ed alla formazione (figura 2); è stato progettato un nuovo edificio da realizzarsi ai piedi del Delphos con l'idea che al suo interno possano trovare sistemazione le diverse funzioni al coperto (figura 3). Alla progettazione di questo nuovo edificio, destinato alla funzione di "museo dell'energia" e che costituisce il fulcro del parco, è stata rivolta una particolare attenzione; questa scelta è stata ritenuta doverosa considerato che circa il 45% dell'energia prodotta in Europa viene impiegata per il funzionamento degli edifici e per la produzione dei materiali da costruzione, e che questo consumo può ridursi notevolmente mediante scelte progettuali consapevoli (attuate nelle fasi di progettazione architettonica degli edifici e di scelta dei materiali e delle tecnologie da impiegarsi per la loro realizzazione).

L'attualità della problematica accennata – la progettazione di architetture sostenibili – è dimostrata dalla natura degli argomenti affrontati dalle più importanti riviste di settore, ed è anche possibile constatare come significativi ed incoraggianti segnali giungano dal mondo della cultura architettonica. A tale riguardo, ad esempio, l'interazione positiva tra l'ambiente ed il manufatto edilizio è oramai una costante nell'approccio progettuale adottato dall'architettura contemporanea che tende a sfruttare al meglio le tecnologie più innovative ed a trovare delle forme adatte alle esigenze attuali ed a quelle future degli utenti. Tuttavia la progettazione di edifici sostenibili e, quindi, energeticamente consapevoli, richiede una impostazione progettuale necessariamente multidisciplinare e complessa, ed in questo tipo di processo sono richieste conoscenze che spesso esulano dal bagaglio culturale di un progettista "tradizionale", e che afferiscono, più propriamente, al campo della ricerca scientifica e tecnologica, che è chiamato, in definitiva, a fornire delle risposte.

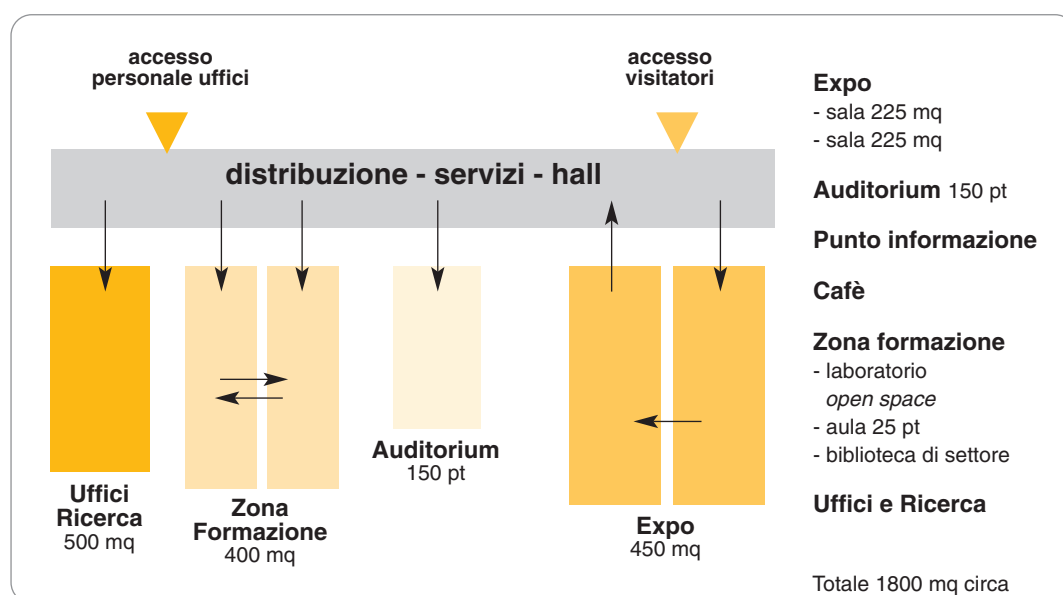


Figura 3
Programma funzionale del Museo dell'Energia

È proprio in questa direzione che va inquadrata la proposta dell'ENEA per la mostra permanente sull'energia, poiché la progettazione e realizzazione del Parco dell'Energia e dell'annesso Museo si configurano, in definitiva, come una occasione di sperimentazione e verifica per la progettazione di architetture e tecnologie sostenibili. L'organismo architettonico del Museo dell'Energia è stato, infatti, concepito come un manufatto "autoreferenziale", esempio di un nuovo modo di progettare orientato alla sostenibilità, alla minimizzazione dei consumi energetici, ed al ricorso alle fonti rinnovabili di energia. Ciò significa, in altri termini, che la natura e l'immagine dell'edificio intendono rimandare alle tematiche scientifiche affrontate in ambito ENEA ed alle finalità dell'Ente, e che il museo costituisce esso stesso un messaggio per i fruitori del Parco dell'Energia, stabilendo una coerenza tra il "contenitore architettonico" ed il "contenuto culturale".

L'idea del Parco dell'Energia e il sito di Monte Aquilone

Il Parco dell'Energia è stato ideato per un'utenza vasta e stratificata, in quanto costituisce un luogo ove ospitare gruppi di

discussione a carattere scientifico o didattico ed iniziative di formazione e di aggiornamento professionale destinate a professionisti e tecnici che operino in stretto rapporto con l'ambiente naturale e costruito, ma anche un luogo ove i bambini ed i più giovani potranno essere coinvolti, mediante una partecipazione interattiva, sugli usi e sviluppi delle energie rinnovabili, ricorrendo a modalità espositive personalizzate. Relativamente all'aspetto legato alle modalità di fruizione ed alla natura delle tematiche affrontate nel percorso espositivo, possono essere considerati come modelli i tanti "Science Center" istituiti in Europa, in Giappone, e soprattutto negli Stati Uniti, che iniziano ora a diffondersi anche in Italia. Nell'allestimento di questa speciale tipologia di musei l'idea di fondo è che ai visitatori possa essere offerta la possibilità di ripetere concretamente le esperienze che hanno consentito di realizzare i progressi scientifici, e così, ai contenitori intoccabili di preziosi oggetti della storia della scienza si sostituiscono i cosiddetti "exhibits hands-on", fatti apposta per essere toccati. Musei concepiti come grandi contenitori di laboratori ideati per trasformare la scienza in esperienza, o anche in gioco, che traducono la loro filosofia di progetto in semplici

slogan, quali “vietato non toccare”; “guarda, ma non solo”; “prova, esplora, trasforma”; “tocca, senti, indovina”; “se ascolto dimentico, se vedo ricordo, se faccio capisco”, ad esempio. Tra questi vi sono, solo per citarne alcuni tra i più noti, l’*Exploratorium* di San Francisco¹, il *Please Touch Museum* di Philadelphia², la *Cité des Sciences et de l’Industrie* presso La Villette a Parigi³, lo *Science Museum di Londra*⁴; il *Museo de las Ciencias Príncipe Felipe* a Valencia⁵. In Italia, invece, tra le più significative realtà, la *Città della Scienza* a Bagnoli⁶, l’*IS Science Center* (Immaginario Scientifico Science Center) a Trieste, la *Città dei bambini a Genova*⁷, *Explora* a Roma⁸, il *Museo Nazionale della Scienza e della Tecnica* a Milano⁹, ed il *Museo interattivo delle Scienze* a Foggia.

Per la localizzazione del Parco dell’Energia si è scelta l’Area Sperimentale di Monte Aquilone per diversi motivi, ritenendo, tra l’altro che essa non solo possedesse notevoli risorse rispetto al tema dell’energia – in particolare quella solare per gli impianti ed i laboratori presenti, che possono essere visti come veri e propri *exhibits hands on* –, ma anche che la sua collocazione territoriale, che la vede inserita in un contesto di particolare pregio ambientale compreso nei confini del Parco Nazionale del Gargano, potesse dare modo di indagare il delicato tema dell’introduzione delle tecnologie innovative in aree tutelate.

Figura 4
Delphos, l’impianto solare fotovoltaico presso Monte Aquilone



Il più rappresentativo impianto localizzato presso Monte Aquilone è il Delphos (Demonstration Electric Photovoltaic System), ed, in particolare, la prima sezione, costituita da una enorme falda fotovoltaica della potenza nominale di circa 300 kWp, il cui campo è stato realizzato negli anni Ottanta con l’impiego di 4320 moduli, per un totale di oltre 4200 m² di superficie (figura 4). Per chi arrivi dalla Strada Nazionale Garganica la falda del Delphos è visibile sulla collina da molto lontano, ed è praticamente la sola presenza artificiale percepibile sul territorio.

La peculiarità tecnica di questo impianto lo ha reso sino ad oggi un caso isolato per la scelta di realizzare un’unica superficie fotovoltaica piuttosto che adottare una disposizione dei moduli per file parallele (una soluzione di questo tipo non è stata, di fatto, mai più impiegata per un sistema di grande taglia); tale speciale conformazione ha generato anche valenze e significati forse del tutto inaspettati.

Ad un occhio attento non sfuggono le involontarie analogie della “lama fotovoltaica” con un oggetto di *Land Art*, termine coniato, come è noto, nel 1969 da Geery Schum per designare i lavori di quegli artisti che operano attraverso interventi sul paesaggio naturale, lasciando segni macroscopici ed evidenti su distese desertiche, montagne rocciose, campi innevati, e corsi dei fiumi. E non sfugge neanche l’originale trama disegnata sulla superficie della lama dalla varietà delle tessiture determinata dall’impiego di celle e moduli di tipologia diversa, necessario, all’epoca della realizzazione, per sperimentarne le prestazioni ed il comportamento.

Non è, quindi, casuale o inatteso, il grande

¹ vedi: <http://www.exploratorium.edu>

² vedi: <http://www.pleasetouchmuseum.org>

³ vedi: <http://www.cite-sciences.fr>

⁴ vedi: <http://nmsi.ac.uk>

⁵ vedi: <http://www.cac.es>

⁶ vedi: <http://www.cittadellascienza.it>

⁷ vedi: <http://www.cittadeibambini.net>

⁸ vedi: <http://www.mnbr.it>

⁹ vedi: <http://www.museoscienza.org>

interesse che il sito di Monte Aquilone suscita sul pubblico per la presenza dello "strano oggetto" Delphos – oltre che per le tematiche che vi vengono affrontate –, ed a riprova di ciò è da dire che si è registrata sempre una grande affluenza di visitatori, che ha toccato in alcuni periodi il numero di quasi 12000 presenze nel corso di un anno, nonostante la visita sia sempre stata limitata ad una fruizione piuttosto ridotta, costituita essenzialmente dall'osservazione dell'impianto assistita da personale ENEA. Questo dato non sorprende se confrontato con il notevole successo ottenuto in Italia ed all'estero dai musei tematici incentrati sulla scienza e sulla tecnica orientati alla fruizione interattiva da parte del pubblico; si pensi, ad esempio, sul territorio nazionale, al Museo della Scienza e della Tecnologia di Milano che, dalla data della sua inaugurazione (1953), ha registrato la presenza di oltre 15 milioni di visitatori, ed ai notevoli risultati conseguiti dalla Città della Scienza di Bagnoli (1996), con 1500 presenze al giorno¹⁰.

Interpretato secondo una chiave di lettura orientata ad una cultura dell'energia il sito di Monte Aquilone possiede, quindi, notevoli risorse, costituite sia dalla presenza materiale e tangibile del mondo della cultura e della ricerca scientifica – il personale tecnico scientifico ENEA –, sia dall'esistenza di numerosi impianti e laboratori scientifici, che possono essere essi stessi considerati come primi tasselli per la realizzazione di un sistema dimostrativo più complesso (tabelle 1 e 2). In definitiva, la potenzialità maggiore di quest'area è costituita dal fatto che qui è possibile fare ricerca e sperimentazione, ma è anche possibile "raccontare l'energia", nonché le ricerche

¹⁰ Tra l'altro, questa seconda esperienza può essere particolarmente significativa rispetto alla situazione di Monte Aquilone, per alcune analogie legate al contesto geografico, sociale ed economico, poiché la *Città della Scienza* si poneva come obiettivo quello di promuovere uno sviluppo equo e sostenibile per le aree più periferiche del nostro paese, che valorizzasse le risorse presenti sul territorio, e che movesse da una partecipazione sociale allo sviluppo del sapere scientifico.

Il complesso è situato in un'area di sette ettari localizzata nel comune di Foggia, posta ai piedi del massiccio del Gargano. Il sito si trova in collina, a 130 m sul livello del mare, ed è caratterizzato da una pendenza uniforme verso sud; fu scelto in base alle caratteristiche di insolazione media, ma anche in ragione delle sue peculiarità geomorfologiche, che consentivano di considerare quest'area come rappresentativa dei terreni marginali ed incolti del nostro paese.

Le principali attività svolte attualmente presso Monte Aquilone sono l'esercizio di impianti fotovoltaici; la sperimentazione di un impianto ibrido fotovoltaico-diesel; lo studio delle problematiche della connessione in rete di impianti fotovoltaici; le azioni dimostrative per il Progetto Tetti Fotovoltaici. Nell'ambito del progetto PhoCUS (Photovoltaic Concentrators to Utility Scale) è prevista, nel biennio 2003-04, la realizzazione di cinque unità standard da 5 kWp ciascuna, basate sulla tecnologia del fotovoltaico a concentrazione, ed, inoltre, proseguirà la sperimentazione degli impianti ibridi fotovoltaico-gruppo elettrogeno, legata al progetto TEFIS (Tecnologie a Film Sottili per il fotovoltaico).

Insieme a queste attività di carattere prevalentemente tecnico, nell'area era presente un Centro di Informazione Energia Delphos, che assicurava l'espletamento del compito di promozione della diffusione della tecnologia fotovoltaica, previsto dal ruolo istituzionale dell'ENEA.

Tabella 1
Presentazione dell'Area Sperimentale di Monte Aquilone

ed i progressi avvenuti negli ultimi anni nel campo della tecnologia fotovoltaica. Si pensi, ad esempio, al Delphos, testimonianza concreta da un lato della potenzialità del fotovoltaico, dall'altro del totale mutamento di approccio verificatosi in questi ultimi anni, che hanno visto il passaggio dalla realizzazione di grandi centrali fotovoltaiche alla generazione diffusa attuata mediante il ricorso a sistemi di piccola taglia integrati negli edifici.

Testimonianza anche degli indubbi progressi conseguiti nel campo della tecnolo-

Tabella 2
Impianti e laboratori

Le risorse dell'area in termini di impianti e laboratori sono costituite da:

- l'impianto Delphos della potenza nominale di 308 kWp;
- tre impianti Plug ciascuno della potenza nominale di 100 kWp;
- dieci impianti di piccola taglia (USS) da 2,5 kW;
- un impianto a bassa concentrazione e ad inseguimento passivo su 1 asse da 730 W;
- un impianto fisso da 1,08 kW abbinato all'impianto a bassa concentrazione;
- un impianto ibrido fotovoltaico-diesel;
- una stazione outdoor per la caratterizzazione dei moduli fotovoltaici;
- il TESTing Laboratory per la caratterizzazione di inverter di piccola taglia;
- un laboratorio con simulatore solare;
- un laboratorio mobile.

gia in termini di miglioramento dell'efficienza dei moduli e dei componenti, misurabili concretamente confrontando, ad esempio, la enorme dimensione della superficie della falda del Delphos con la sua potenza nominale: oggi un impianto della stessa potenza e morfologia potrebbe virtualmente occupare, grazie al miglioramento dell'efficienza di conversione dei moduli, uno spazio di circa 1000 m² inferiore. Questa intrinseca vocazione comunicativa del Delphos e di tutta l'Area Sperimentale di Monte Aquilone va certamente valorizzata, nell'ottica di un progetto più generale e articolato, che tenga anche conto che gli utenti possono diventare attori di un processo di conoscenza basato sul contatto diretto con gli strumenti ed i mezzi della ricerca.

La proposta architettonica

Relativamente ai criteri progettuali adottati per l'edificio del Museo dell'Energia è da dire che, se è certo che un edificio progettato oggi – visto il grande patrimonio di conoscenze scientifiche e di risorse tecnologiche in nostro possesso – dovrebbe virtualmente essere capace di funzionare senza alcun consumo di energia, magari esclusivamente mediante il ricorso alle tecnologie solari, è facilmente constatabile che nell'operato concreto si è ancora distanti da questo risultato, e che sussiste, di fatto, uno scollamento tra teoria e prassi.

Le ragioni di questo divario sono attribuibili a fattori di diversa natura quali, ad esempio, la reale difficoltà insita nella progettazione e nelle verifiche del corretto funzionamento di manufatti architettonici orientati alla minimizzazione dei consumi energetici, per le quali si richiede – come

anticipato nell'introduzione – un approccio multidisciplinare, e sono attribuibili anche alla difficoltà per i progettisti di reperire modelli di riferimento per una prassi non ancora consolidata. In tal senso è da tenere presente che gli utenti – destinatari finali degli edifici – sono comprensibilmente diffidenti nell'accettare proposte progettuali che facciano ricorso a soluzioni tecnologiche o impiantistiche innovative se non viene preliminarmente garantito il corretto funzionamento della macchina abitativa.

Un primo passo verso la ricomposizione della dicotomia accennata è forse quello di tentare di fornire delle risposte ad una domanda, e cioè: "Come dovrebbe essere un'architettura progettata oggi?". In altri termini come si progetta, come funziona un edificio orientato alla sostenibilità? Come sono fatti i componenti ed i materiali che utilizza? Come sceglie ed impiega l'energia? Come funzionano i suoi meccanismi di controllo? E poi: "Come è abitarvi?".

In quest'ottica la collaborazione ed il confronto, tra il mondo della ricerca scientifica e quello della disciplina della progettazione architettonica (oltre che quello dei costruttori), sono un importante obiettivo da perseguire, ed è proprio per questo motivo che gli studi per la progettazione architettonica preliminare per il Parco dell'Energia sono stati affidati alla società di progettazione MCA Mario Cucinella Architects, di Bologna, nota per la grande competenza nel campo della progettazione bioclimatica, ed orientata ad un approccio progettuale multidisciplinare.

La proposta architettonica della MCA ha tratto origine dalla lettura del Delphos come una lama adagiata sul pendio che sale dalla pianura verso il Gargano, in un contesto naturale di grande fascino; un segno artificiale che configura una mutazione del profilo naturale del paesaggio (figura 5). Qualsiasi tentativo di intervento architettonico avrebbe rischiato di entrare in competizione con la semplicità della forma

Figura 5
Lo stato attuale



del Delphos e di stabilire un rapporto disomogeneo con la realtà circostante.

È parso quindi opportuno intendere l'intervento architettonico come la ricerca di un'impronta, di un segno che il Delphos possa ipoteticamente lasciare sul territorio. In questo modo, inducendo discrete variazioni del suolo che mediano la variazione di pendenza tra il profilo naturale e quello artificiale, il terreno si anima secondo una logica ed una sequenza che fanno riferimento al movimento delle onde (figure 6 e 7), quasi il terreno avesse cercato di infrangersi sul Delphos. Si concretizza in questo modo il tema della superficie del terreno che si modifica e diviene ora veicolo di accesso all'edificio ora la copertura dell'edificio stesso. La superficie si evolve, si complica e grazie ad un apporto tecnologico fatto di differenti tessiture diviene interfaccia con l'ambiente favorendo il controllo luminoso degli ambienti e dando il suo apporto energetico al complesso (figura 8).

L'edificio è stato inteso non solo come realtà architettonica ma come oggetto sperimentale esso stesso, come una sorta di architettura da monitorare sulla quale sono state introdotte tecnologie che finora hanno trovato ben poche applicazioni reali. Un corretto monitoraggio del sistema fotovoltaico in rapporto ai consumi dell'edificio e l'applicazione del *ground cooling* sono alcuni dei temi presenti nell'idea architettonica di trasformare l'edificio stesso in oggetto di sperimentazione (figura 9).

Dal punto di vista funzionale l'accesso al Museo dell'Energia è garantito da una "frattura" vetrata che anticipa una piccola esposizione dei contenuti; da essa avviene l'accesso alla zona di distribuzione lungo la base del Delphos sulla quale si attestano le altre funzioni già elencate nelle schema funzionale e che trovano la loro forma architettonica nelle onde stesse (figura 10). È proprio dalle onde che si propaga lo spazio circostante, inteso come estensione verso l'esterno dell'esposizione al coperto, ove si trovano prototipi e sistemi in uso in-

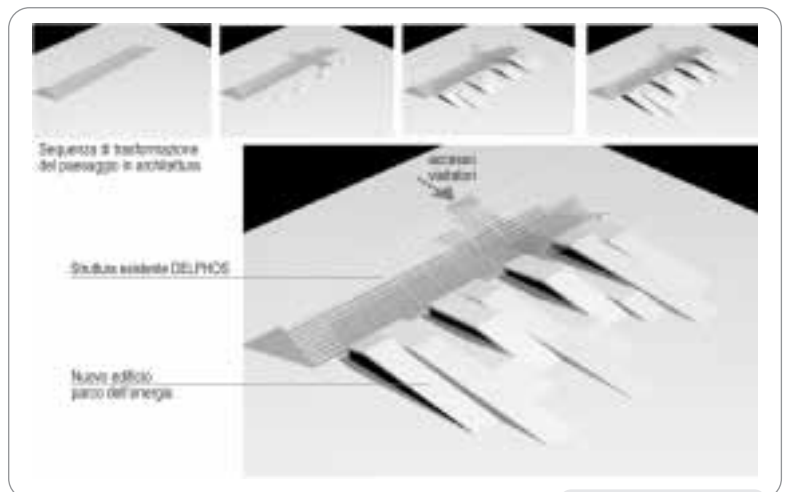


Figura 6
Sequenza di trasformazione del paesaggio in architettura

tesi come "parco tematico" del sole e quindi con forte vocazione didattica.

Il Parco ed il Museo dell'Energia di Monte Aquilone come occasione di sperimentazione

Negli ultimi anni sono stati conseguiti notevoli risultati nel campo dell'efficienza energetica degli edifici grazie all'adozione di

Figura 7
Riferimento alle onde

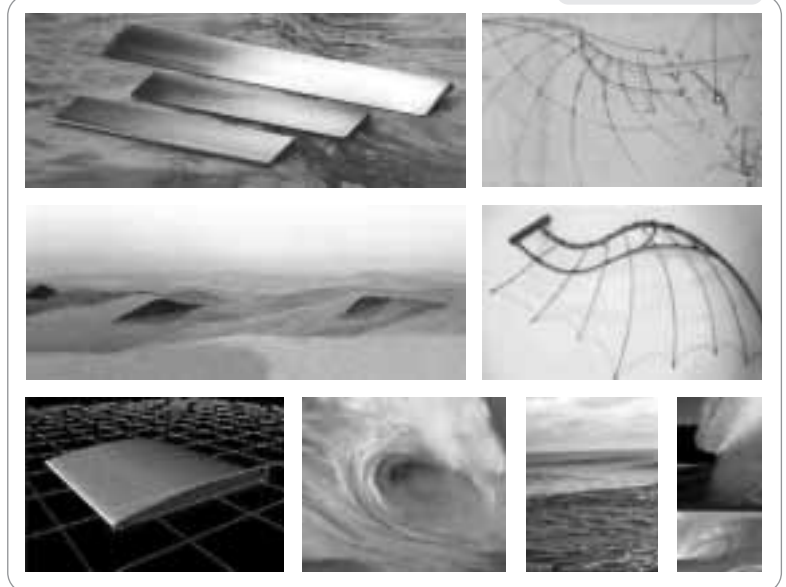


Figura 8
Il progetto, sintesi dell'interazione tra paesaggio ed architettura



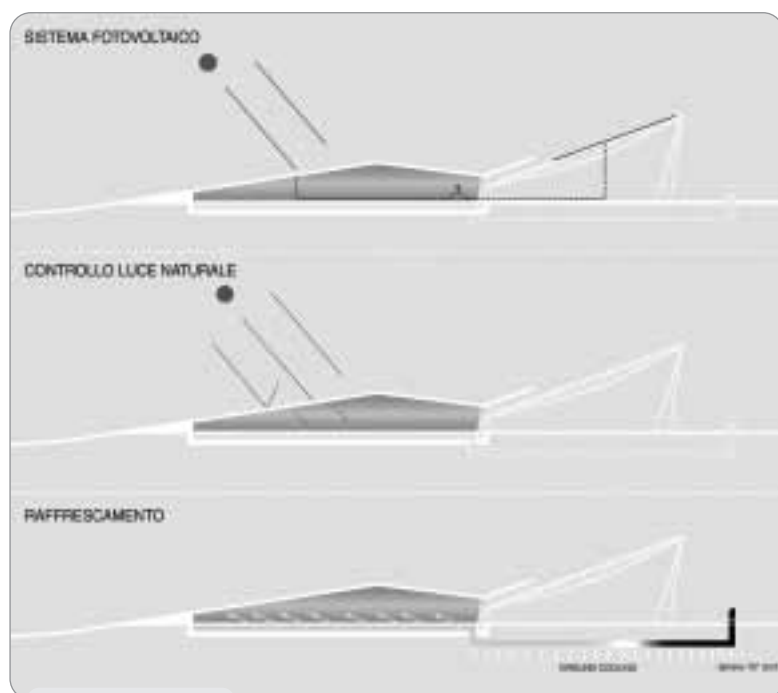
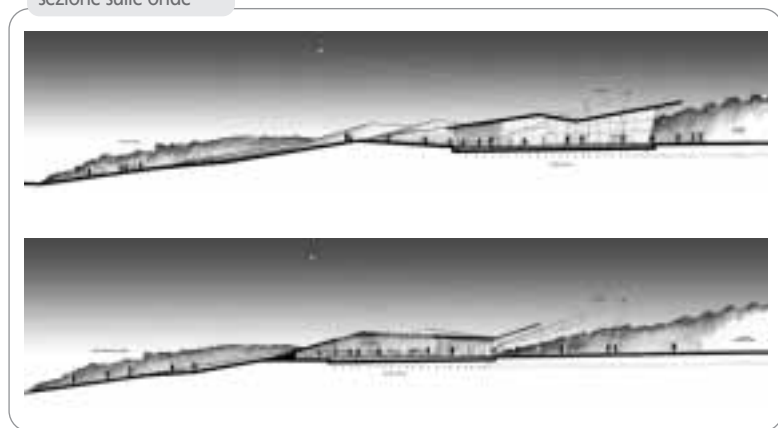


Figura 9
Alcuni temi del progetto

tecnologie avanzate ed allo sviluppo di componenti ed impianti innovativi, che hanno richiesto un processo progettuale del tutto nuovo; particolare attenzione è stata rivolta ad aspetti quali il miglioramento dell'isolamento, e lo sfruttamento della luce e della ventilazione naturale.

Allo stato attuale, tuttavia, ciò che sembra offrire le maggiori potenzialità per il futuro sono le cosiddette "soluzioni integrate", nelle quali sono adottate strategie progettuali che consentano l'integrazione in un unico sistema di componenti attivi e dei servizi tecnologici, in modo da ottenere prestazioni ottimali in termini di energia,

Figura 10
Sezione sull'ingresso e sezione sulle onde



exergia, comfort termico e qualità dell'aria interna.

In tale ambito il Museo dell'Energia di Monte Aquilone si pone come occasione importante di applicazione di tematiche progettuali e tecnologiche, poiché, infatti, l'adozione di sistemi fotovoltaici, il controllo della luce naturale, i dispositivi di raffrescamento mediante *ground cooling* e ventilazione naturale, sono i temi che sin dai primi avvisi ne hanno accompagnato la progettazione (figura 8), connotandolo come esempio di progettazione integrata basata sul concetto di "whole building". Quanto detto significa, in altri termini, che l'involucro del museo, articolato nelle sue differenti parti (coperture, pavimenti, partizioni esterne, fondazioni), si presta bene alla messa a punto ed alla "mostra" di componenti che costituiscano parte integrante della struttura dell'edificio e che partecipino attivamente alla produzione di energia ed al trasferimento di calore, luce, acqua, aria.

È evidente come in questa prospettiva in cui l'organismo architettonico si configura non solo come il luogo di interazione tra l'ambiente esterno e quello confinato, ma anche come territorio di integrazione tra componenti edilizi ed impianti, assuma importanza anche l'impiego di sistemi intelligenti di controllo per la gestione dell'edificio (necessari per il conseguimento di una reale efficienza energetica) e come proprio lo sviluppo di questi dispositivi costituisca un altro interessante tema di sperimentazione e di visibilità e mostra di tecnologie innovative messe a punto anche nei laboratori dell'ENEA.

I principali elementi gestiti da un sistema di controllo sono la temperatura interna, il sistema di riscaldamento e di condizionamento, la qualità dell'aria, l'illuminazione (naturale ed artificiale), il *daylight*, la ventilazione notturna estiva, il preriscaldamento dell'aria di ventilazione durante l'inverno. Questo schematico elenco di funzioni rende semplice intuire come il tema dello sviluppo di sistemi di controllo adatti ad

edifici caratterizzati da un involucro attivo sia particolarmente importante, poiché l'adattabilità di tali dispositivi alle condizioni climatiche esterne – necessaria per consentire una corretta regolazione degli impianti secondo le reali necessità – deve essere particolarmente curata nel caso in cui l'organismo architettonico faccia ricorso a tecnologie passive o, comunque, naturali, per il comfort termico degli ambienti interni. È proprio questa la condizione del Museo dell'Energia, e, più in generale, degli edifici che prevedano sistemi fotovoltaici architettonicamente integrati ed, ad esempio, sistemi di ventilazione naturale o ibrida per il raffrescamento estivo.

Relativamente alle investigazioni da attuarsi nel campo dei sistemi di controllo è da dire che un controllo coerente ed energeticamente efficiente difficilmente può essere ottenuto sulla base di strategie tradizionali basate su regole fisse, e che al fine di sfruttare le condizioni favorevoli e di mitigare quelle sfavorevoli, specialmente nel caso di edifici affini al museo dell'energia, dovrebbero essere adottati dispositivi che integrino meccanismi di autoapprendimento. Tale soluzione è attuabile mediante il ricorso alle più evolute tecniche di controllo avanzate, che consentono di gestire molti parametri attraverso una strategia ottimizzata; esse possono essere distinte in predittive, assistite da simulazioni, a reti neurali, basate su logiche *fuzzy*, ed adattive basate su tecniche di vita artificiale.

Ad offrire le maggiori potenzialità rispetto ai temi di nostro interesse sono i sistemi più complessi, quelli adattivi, tuttavia, nonostante le tecniche di controllo basate sulla vita artificiale siano conosciute da molti anni ed abbiano trovato applicazione in processi industriali, esse non hanno ancora trovato un largo impiego nell'edilizia. La ragione di ciò risiede, essenzialmente, nella difficoltà di implementazione, legata alla necessità di un lungo periodo per la loro messa a punto, che risulta anche piuttosto complessa, ed in tal senso, il Museo del-

l'Energia costituisce una importante occasione di confronto e sperimentazione.

In ultimo è da dire che il Parco ed il Museo dell'Energia di Monte Aquilone, oltre che prestarsi ai due importanti ambiti di sperimentazione finora descritti, quello sui componenti ed impianti innovativi e quello sui dispositivi di regolazione dei parametri ambientali, si prestano anche all'analisi ed allo sviluppo di sistemi di controllo finalizzati ad ottimizzare la gestione dell'offerta di energia (elettrica e termica) in rapporto alle esigenze dell'utenza.

Il parco offre, infatti, la possibilità di disporre della presenza di differenti impianti di produzione, poiché ai diversi gruppi di generazione fotovoltaica per la produzione di energia – presenti allo stato attuale o da realizzarsi, come ad esempio quello a concentrazione relativo al progetto *PhoCus* (tabella 2), e quello da integrare nell'involucro del museo – se ne potrebbero aggiungere altri che ricorrano all'impiego di ulteriori fonti rinnovabili (eolico, biomasse, solare termico), da realizzare quali elementi dimostrativi dell'esposizione all'esterno. L'edificio del museo, inoltre, è articolato in una successione di onde nelle quali trovano posto destinazioni d'uso differenti; in altri termini, il nuovo involucro si configura in realtà come un complesso di edifici, ognuno dei quali caratterizzato da funzioni e richieste energetiche diverse (laboratori, aule, aree espositive, uffici). In questi casi la curva della domanda di energia complessiva è sufficientemente diversificata e flessibile da giustificare lo sviluppo di una microrete che preveda l'impiego di sistemi di microgenerazione (produzione di energia termica ed elettrica), gestiti mediante idonei sistemi di controllo collegati a quelli dell'edificio. Tali dispositivi dovranno essere in grado di scegliere di volta in volta la forma di energia disponibile più conveniente, interfacciandosi e negoziando tale fornitura con il sistema di controllo della rete.

Alla luce di questa osservazione, la realiz-

zazione del Museo dell'Energia si presenta quindi anche come una importante occasione di studio per le problematiche connesse con la gestione e la ottimizzazione in linea di microreti energetiche.

Infine, in questo contesto risulta anche interessante approfondire gli aspetti tecnici relativi ai criteri di esercizio e di gestione dei sistemi di produzione menzionati, nonché l'ambito tematico relativo al loro interfacciamento con la rete di alimentazione, tenuto anche conto che allo stato attuale l'Area Sperimentale di Monte Aquilone è da considerarsi una rete debole in quanto punto terminale di una rete elettrica rurale.

Cenni conclusivi

La proposta dell'ENEA di realizzare presso l'Area Sperimentale di Monte Aquilone un Parco dell'Energia, inteso come mostra permanente delle tecnologie d'impiego delle fonti rinnovabili, ha l'obiettivo di contribuire significativamente alla diffusione delle conoscenze nel campo delle tematiche energetiche.

In tal senso, il parco si configura come il luogo in cui sarebbe possibile vivere un'esperienza diretta e sensibile sui temi della produzione e trasformazione dell'energia, sia per professionisti ed esperti del settore, sia per persone comuni o bambini. Per questi ultimi l'approccio interattivo degli allestimenti costituirebbe una importante possibilità di apprendimento.

Come attestato da esperienze analoghe condotte sul territorio nazionale, l'interesse crescente per le scienze e le tecnologie ed in particolare gli usi sostenibili dell'energia, oggetto dell'iniziativa, richiamerebbe-

ro molti visitatori, provenienti sicuramente da tutta l'Italia meridionale ma in misura minore anche da quella settentrionale.

Inoltre, la progettazione di un edificio-museo dell'energia da costruire nel parco, integrato con la "lama fotovoltaica" del Delphos, si preannuncia come un'occasione di studio ed applicazione di tecniche avanzate di progettazione di edifici sostenibili e di sperimentazione di tecnologie di climatizzazione passiva e di sistemi di controllo innovativi. L'obiettivo che ci si è prefissati è quello di realizzare un edificio sperimentale manifesto di un approccio progettuale contemporaneo e sostenibile che contribuisca alle conoscenze sui sistemi fotovoltaici *building integrated*, con l'interessante possibilità di sperimentare soluzioni architettoniche adatte a climi mediterranei, alternative alle proposte nord europee.

Il Parco dell'Energia di Monte Aquilone, costituendo uno studio pilota di notevole importanza per la dimostrazione e la diffusione della edilizia sostenibile e della sperimentazione di sistemi fotovoltaici integrati in architettura, potrebbe – oltre che suscitare l'interesse del mondo scientifico e della ricerca – anche aprire alcune possibilità di finanziamento. Risulta evidente, vista la natura del progetto e la sua alta valenza educativa e scientifica, come per la sua concreta realizzazione sia auspicabile coinvolgere l'interesse di ministeri ed enti locali in particolare della Regione Puglia. La nascita del Parco dell'Energia, inserito in una rete nazionale ed internazionale dello stesso genere, potrebbe costituire una importante opportunità di sviluppo culturale ed economico per tutta l'area.

Calcolatori quantistici

FABRIZIO CLERI
ENEA

UTS Materiali e Nuove Tecnologie



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

studi & ricerche

Quantum computers

Abstract

A quantum computer, which by its very nature has a huge memory and works in hyper-real space instead of three-dimensional space, seems plainly out of the question today, except from the theoretical standpoint. But let us not give up hope: quantum computing is only 15 years old. And even if the enormous problems posed by the energy dissipation necessary to perform operations on quantum bits seem daunting, scientists are starting to suggest ways to build devices capable of performing them.

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^[1] 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^[2] 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" Ψ 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 Ψ) 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 Ψ 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 quantitativa 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 Ψ 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 duemilaquattrocento 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^[3] 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^[4] 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 π 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 cm^2 . Facendo un conticino a spanne, in un 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, spreca 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 poiché, 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^[4] 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 ^[1]), 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^[3], 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, poiché 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.

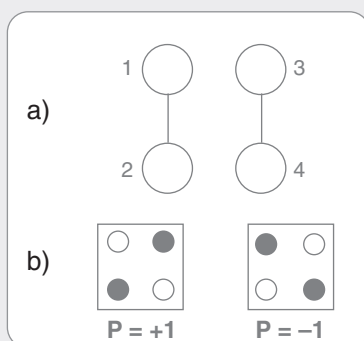


Figura 1

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.

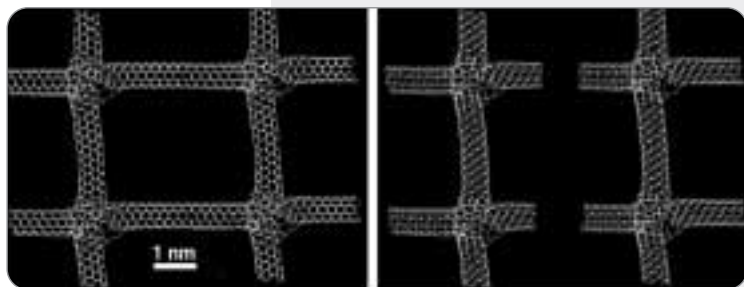


Figura 2

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:

no: (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 1.38×10^{-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 4×10^{-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.

Blob cervello (2)

a cura di
FAUSTO BORRELLI



scienza, tecnica,
storia & società

Gli anni 90 dello scorso secolo – detti anche “decennio del cervello” – hanno visto fiorire una gran quantità di pubblicazioni sugli sviluppi delle neuroscienze e della filosofia della mente.

Questo palinsesto di citazioni d’autore si concentra sul rapporto “mente-cervello”. Un tema cruciale che da oltre due millenni costituisce il luogo privilegiato in cui convergono speculazione filosofica, pensiero scientifico e fede religiosa. Nonostante gli straordinari risultati della ricerca contemporanea, il groviglio di ambiguità, oscurità e incertezze – che da sempre ha caratterizzato questo ineludibile problema – sembra aumentato piuttosto che diminuito.

Il palinsesto va dal canone buddista (IV sec. a.C.) ad Agostino di Tagaste (V sec. d.C.), da Averroè (1190) a Cartesio (1641), da Leibniz (1714) a Hegel (1807), da Nietzsche (1887) a Freud (1917), da Einstein (1936) a Erwin Schroedinger (1950), da Richard Feynman (1978) a Francis Crick (1994), a Erich Kandel (1997), da John Searle (1997) a Gerald Edelman (2000), da Igor Aleksander (2001) a Edoardo Boncinelli (2002), a Roth (2003)

Blob cervello (2)

The 1990s – dubbed the “Brain Decade” – saw a flowering of publications about developments in neuroscience and philosophy of the mind. This selection of quotations focuses on the relationship between mind and brain, a subject that has intrigued philosophers, scientists and religious thinkers for more than two thousand years. Despite the extraordinary results of research in our own day, the tangle of ambiguities, obscurities and uncertainties that has always characterised this inescapable issue seems to be growing larger rather than smaller.

The quotations range from the Buddhist canon (4th cent. B.C.) to Augustine (5th cent. A.D.), Averroës (1190), Descartes (1641), Leibniz (1714), Hegel (1807), Nietzsche (1887), Freud (1917), Einstein (1936), Schroedinger (1950), Feynman (1978), Crick (1994), Kandel (1997), Searle (1997), Edelman (2000), Aleksander (2001), Boncinelli (2002) and Roth (2003)

SECONDA PARTE

Erwin Schroedinger (1950), *fisico* (Nobel)

Da tutto ciò che abbiamo imparato sulla struttura della materia vivente dobbiamo essere preparati a vederla comportarsi in un modo che non può ridursi alle ordinarie leggi della fisica. E ciò, non perché sia o non sia in gioco una qualsiasi "nuova forza" che diriga il comportamento dei singoli atomi in un organismo vivente, ma perché la costruzione è diversa da tutto ciò che noi abbiamo fin qui verificato in un laboratorio di fisica... Che tipo di processo materiale è direttamente associato alla coscienza? La coscienza è associata ai processi di apprendimento della sostanza vivente; il suo *know how* però è inconscio... A livello biologico l'indeterminazione quantistica è irrilevante.

Gilbert Ryle (1949), *filosofo*

La mente è una proprietà della materia e soltanto ricostruendo gli intricati meandri della materia nel cervello è possibile spiegare la coscienza senza ricorrere all'ipotesi del "fantasma nella macchina" (Ghost in the machine).

Karl Lashley (1950), *neuroscienziato*

Non siamo mai consapevoli dell'elaborazione, ma solo delle conseguenze dell'elaborazione cerebrale.

Alan Turing (1950), *matematico*

Tra una cinquantina d'anni sarà possibile programmare calcolatori dotati di una memoria pari a circa 10^9 , in modo tale da farli giocare così bene al gioco dell'imitazione che un interrogante medio avrà una probabilità non superiore al 70% di compiere l'identificazione giusta dopo cinque minuti di domande.

Martin Heidegger (1953), *filosofo*

La natura, nella forma dell'oggettività matematizzante richiesta dalla scienza, è soltanto "uno" dei modi in cui ciò che è presente – che da sempre viene chiamato "natura" –

si manifesta e si offre. L'oggettività matematizzante dell'elaborazione scientifica non può abbracciare mai tutta la pienezza dell'essere della natura, la quale resta nascosta nell'inapparente, inaccessibile, inaggrabile ed impensabile dalla scienza...

A fronte del rafforzarsi planetario del conoscere e dell'operare tecnoscientifico, fondati sull'efficacia del pensiero oggettivante-matematizzante, corrisponde l'indebolirsi di quel pensiero meditativo che tenta di pensare quell'impensabile... Ma la povertà della meditazione è la promessa di una ricchezza i cui tesori risplendono nella luce di quell'inutile che non si lascia mai calcolare.

Norbert Wiener (1961), *matematico*

Il dispositivo di regolazione di una macchina a vapore o di un termostato è basato sul "feedback negativo", su cui si fonda la cibernetica o scienza della comunicazione e del controllo nell'uomo e nelle macchine. Gli ingegneri devono diventare poeti oppure i poeti devono diventare ingegneri.

Eugen Paul Wigner (1969), *fisico* (Nobel)

Se si accetta la predicibilità come condizione necessaria per essere una macchina, non siamo macchine... Attualmente non abbiamo la più vaga idea di come i processi fisico-chimici del cervello siano connessi con lo stato della mente.

Julian Jaynes (1976), *psicologo*

La coscienza è l'invenzione di un mondo analogale sulla base del linguaggio, un mondo parallelo rispetto al mondo del comportamento, nello stesso senso in cui il mondo matematico è un parallelo rispetto al mondo delle quantità delle cose. Che cosa possiamo dire sulla sua origine?... Se la coscienza è fondata sul linguaggio, ne segue che essa ha un'origine molto più recente di quanto non si sia supposto finora. La coscienza è posteriore al linguaggio!

Roger Walcott Sperry (1977), *neurobiologo* (Nobel)

Il significato del messaggio non può essere decifrato analizzando chimicamente l'inchiostro con cui è scritto... La coscienza può esistere anche senza consapevolezza... Che la mente possa essere più di una macchina è un "pensiero impensabile".

Karl Popper (1977), *filosofo*

È abbastanza chiaro che l'identità e l'integrità dell'io hanno una base fisica... Ma il rapporto fra Mondo 1 (oggetti e stati fisici), Mondo 2 (stati di coscienza) e Mondo 3 (conoscenza culturalmente accumulata) resta tuttora oscuro e problematico.

Gunther Stent (1978), *neurobiologo*

Cercare una spiegazione "molecolare" della coscienza è una perdita di tempo, poiché i processi fisiologici responsabili di un'esperienza del tutto privata come la coscienza si riducono a reazioni quotidiane piuttosto comuni, né più né meno affascinanti di quelle che si verificano, per esempio, nel fegato.

Richard Phillipps Feynman (~1978), *fisico* (Nobel)

...Scoprimmo che Tukey contava in un modo diverso dal mio: egli visualizzava un nastro su cui scorrevano i numeri. Poteva dire: "Mary aveva un agnellino" e guardare il nastro! Bene, adesso era tutto chiaro: lui per contare "guardava", e quindi non riusciva a leggere nient'altro; io invece "pronunciavo" i numeri mentalmente, per cui non potevo parlare... Abbiamo anche visto che si può sperimentare in modo obiettivo, dall'esterno, in che modo lavora il cervello. Non dovete domandare a una persona come conta e fidarvi delle osservazioni che fa su se stessa; osservate invece quel che può o non può fare mentre conta. L'esame è incontestabile. Non c'è modo di imbrogliare; non si può simulare... Questa esperienza ci rivelò che i processi mentali di persone diverse, quando anche pensano

di fare la stessa cosa – una cosa semplice come contare – sono differenti.

Thomas Nagel (1979), *filosofo*

Che effetto fa essere un pipistrello? (1974)... Senza coscienza il problema mente-corpo perderebbe molto del suo interesse. Con la coscienza esso sembra irresolubile. (1979)... La posizione della mente nell'ordine naturale resta a tutt'oggi un problema su cui non siamo in grado di offrire neanche un abbozzo di teoria soddisfacente. (1991).

Donald Hebb (1980), *psicologo*

Ogni falò ha una sua soglia termica, così come ce l'hanno i rami e gli arbusti che ne fanno parte. Nella neurodinamica, l'esempio del falò può esser formulato così: un "assembramento di neuroni" interconnessi ha lo stesso comportamento "tutto o nulla" e lo stesso comportamento di soglia del singolo neurone... Un singolo neurone può far parte di molteplici "assembramenti cerebrali"... Il "feed-back" positivo opera ai confini dell'instabilità, dove le relazioni causali fra segnali in entrata e segnali in uscita quasi si perdono... L'intensità della comunicazione fra due cellule nervose non è fissata, ma è modificabile attraverso l'esperienza... La mente è la facoltà di pensare, la coscienza e l'attività cosciente del pensiero, e il pensiero un'attività del cervello.

Derek Parfit (1984), *filosofo connessionista*

Le persone possono esser ridotte a connessioni di stati mentali.

Marvin Minsky (1986), *informatico e studioso di IA*

Nella mente di ogni persona normale sembrano esservi certi processi che chiamiamo "coscienza". Di solito riteniamo che essi ci consentano di sapere che cosa accade nella nostra mente. Ma questa reputazione di autoconsapevolezza non è molto ben meritata, perché i nostri pensieri coscienti ci rivelano pochissimo di ciò che li genera... Il problema centrale della co-

scienza è spiegare come sia possibile che il cervello, in apparenza così solido, sia il supporto di cose tanto impalpabili come i pensieri.

Francisco Varela (1991), *neurofisiologo e epistemologo*

La scienza cognitiva contemporanea ha dato sostanza all'idea di David Hume – ma soprattutto buddhista – dell'assenza di un io reale e unitario come soggetto delle varie attività mentali. In particolare, la scoperta che una gran parte dei comportamenti intenzionali dei sistemi cognitivi non sono coscienti (in quanto affidati a sottosistemi inconsci) dà spazio all'idea che la cognizione può procedere senza coscienza, perché non c'è una connessione essenziale o necessaria tra cognizione e coscienza.

Ramesh S. Balsekar (1992), *guru, ex funzionario della Bank of India*

La coscienza inconsapevole di sé – improvvisamente, inconsapevolmente, immotivatamente – è diventata consapevole di sé, credendosi "io". Ma tutto ciò che c'è è coscienza, non "io"...

Nel corpo c'è coscienza. L'illusione di un "io" nasce solo in virtù della presenza di questa coscienza nel corpo. Alla morte del corpo, questa coscienza non c'è più.

L'illusione della soggettività è che "tu" pensi di essere questo "corpo-mente"; così ti preoccupi di ciò che sarà di te alla morte del "corpo-mente". Se comprendi che l'io è soltanto un concetto, chiediti: come può un concetto preoccuparsi di ciò che accadrà alla morte del "corpo-mente"?... Attento: non confondere "coscienza" con "io". Dov'è mai questo "io" così tronfio della propria importanza?... Come potrebbe essere reale un'illusione? L'"io" è illusione, come il "tu" è illusione... Tu sei, sì, una realtà, ma non una realtà in quanto "io"; ma in quanto "corpo-mente"... Se comprendi questo intuitivamente, profondamente e totalmente non hai bisogno di leggere libri.

Erich Harth (1993), *fisico*

Nel paragonare le prestazioni del cervello con quelle del computer, vediamo che nemmeno il più potente dei calcolatori pensa veramente: si limita ad eseguire un programma di calcolo prestabilito per conto dell'utente. Quando ha fatto i suoi calcoli, è quest'ultimo che li deve interpretare. Il cervello invece è utente di se stesso.

Hans Jonas (1992), *filosofo*

Quanto più l'uomo si afferma come soggetto tecnico, tanto più si smarrisce come soggetto etico.

John Roger Searle (1992), *filosofo*

Oltre alla coscienza e ai bruti processi neurofisiologici... non c'è nient'altro. Sarebbe del tutto inutile mettersi alla ricerca di processi – siano essi applicazione delle regole, elaborazione mentale di informazioni, inferenze inconsce, modelli mentali, schemi primari, immagini in "due dimensioni e mezza", descrizioni tridimensionali, linguaggio del pensiero, grammatica universale – intrinsecamente intenzionali e pur tuttavia inaccessibili, in linea di principio, alla coscienza... Una scienza cognitiva non ha semplicemente ragione d'essere.

Henri Stapp (1993), *fisico*

Il cervello può essere considerato come un sistema gerarchico di dispositivi di misurazione per i quali il collasso del pacchetto d'onde (taglio di Heisenberg) può aver luogo a qualunque livello: sinapsi, assoni, neuroni o altro... Il livello più alto dell'attività dinamica del cervello si associa al taglio di un atto cosciente... Gli eventi coscienti sono sensazioni degli eventi che si verificano al livello più alto, che attualizzano le configurazioni macroscopiche dell'attività neurale.

Dominique Lecourt (1993), *filosofo*

Dobbiamo dunque ricostruire il cervello come oggetto filosofico.

Roger Penrose (1994), *matematico e fisico*

Di tutte le tesi che ho formulato, l'idea che i

segnali nervosi possano essere trattati con gli strumenti della meccanica quantistica era quella di cui ero meno sicuro; era un po' difficile crederci sebbene, in un certo senso, riponessi in essa tutte le mie speranze... Secondo la concezione che sto proponendo, a titolo di prova, la coscienza sarebbe qualche manifestazione di uno stato interno, che chiama in causa effetti quantistici del citoscheletro e del suo coinvolgimento nell'interazione tra i livelli classico e quantistico d'attività... Di conseguenza, la descrizione a livello dei neuroni, che fornisce la rappresentazione del cervello e della mente oggi in voga, è una semplice ombra di quella al livello più profondo dell'azione del citoscheletro: ed è a questo livello più profondo che dobbiamo cercare le basi fisiche della mente!

John Carew Eccles (1994), *neurofisiologo* (Nobel)

La strategia riduzionista non sarà mai in grado di spiegare i livelli superiori di attività cosciente del cervello umano... La vita non può essere spiegata dalle ordinarie leggi della fisica e della chimica... Si deve postulare l'esistenza dell'anima per spiegare i fatti accertati della realtà psichica e proporre un meccanismo grazie al quale l'anima può influenzare il cervello senza scambiare energia e quindi senza violarne il principio di conservazione. Un meccanismo, basato sulla teoria dei quanti, si fonda sul fatto che la funzione d'onda di Schrödinger è un valore di probabilità e in quanto tale non trasporta energia.

Benjamin Libet (1994), *psicologo*

L'inizio effettivo dell'atto di volizione avviene un attimo prima della decisione consapevole di compiere l'atto di volizione; essa avviene in un luogo del cervello diverso da quello (monitorato) dove si prende la decisione consapevole. Il libero arbitrio, in senso tradizionale, sarebbe un'illusione, in quanto le intenzioni derivano da alcuni centri sottocorticali che lavorano a livello

inconscio... Forse il nostro libero arbitrio non viene esercitato dando il via alle intenzioni, ma rifiutando, accettando o reagendo in altro modo alle intenzioni che scaturiscono dal nostro inconscio.

Francis Harry Compton Crick (1994), *biologo molecolare* (Nobel)

Concentrare l'attenzione sul meccanismo della visione dei mammiferi è una scelta arbitraria, che tuttavia, escludendo il linguaggio, consente di studiare anche soggetti non umani utilizzando nel contempo i risultati sperimentali relativi al cervello diviso e alla visione cieca... Il nostro non è tanto un dettagliato modello della coscienza quanto un programma di ricerca volto a chiarire i meccanismi grazie ai quali tanti elementi di informazione distribuiti nel cervello possono rapidamente unificarsi nella percezione. Non c'è affatto bisogno di chiamare in causa, in questo programma, sfiziosi effetti quantistici perché molti misteri della coscienza potrebbero svanire quando saremo in grado di costruire macchine di quel tipo e comprenderne a fondo il comportamento... Voi, le vostre gioie e le vostre pene, i vostri ricordi e le vostre ambizioni, il vostro senso dell'identità personale e del libero arbitrio, non siete altro che il comportamento di un ampio assemblamento di cellule nervose e delle molecole a loro associate.

David Chalmers (1995), *filosofo della mente*

Con la coscienza, si va oltre la pura spiegazione fisica delle funzioni. Il problema della coscienza è difficile per ragioni del tutto diverse, e precisamente perché non si esaurisce nella spiegazione di strutture e funzioni.

Noam Chomsky (1995), *linguista*

Non esiste nulla che possa assomigliare al problema mente-corpo. Perché esista un problema mente-corpo, dovrebbe esserci una qualche caratterizzazione del corpo, ma l'ultima nozione di corpo è stata elimi-

nata da Newton... quando scoprendo la gravità, e con essa l'azione a distanza, ha mostrato che il materialismo non funziona nemmeno per un fenomeno semplice come una palla che rotoli su un piano. Il mondo non è costituito da oggetti materiali che si influenzano reciprocamente attraverso il contatto diretto, ma di proprietà immateriali. Tra queste proprietà ci sono la gravità, l'elettromagnetismo e, naturalmente, la coscienza... Nel cervello c'è una facoltà del linguaggio, che può essere pensata come una rete intricata e complessa di un certo tipo associata ad un dispositivo di interruttori in grado di assumere una posizione tra due possibili... Questa rete è il sistema di principi della grammatica universale... che genera il componente semantico.

Hilary Putnam (1997), *filosofo, matematico e logico*

Dire che la "grammatica universale nel cervello" genera il "componente semantico" quando i valori di certi parametri sono stati "opportunitamente fissati dall'ambiente" equivale a dire che "un non so che" fa "un non so cosa" quando "un altro non so che" accade!

Stephen Stich (1983 e 1996), *filosofo*

Come le streghe, il flogisto e il fluido calorico, gli stati mentali, come credenze e desideri, sono funzioni prodotte da errate teorie della mente... Sono uno strenuo difensore dell'eliminativismo (1983).

Se l'eliminativismo fosse vero non arriverei a dire, con Fodor, che sarebbe la più grande catastrofe intellettuale nella storia della nostra specie; ma penso che, se fosse vero, comporterebbe un cambiamento radicale nel panorama intellettuale, dalla storia della psicologia alla filosofia e all'antropologia (1996).

Henry Margenau (1997), *fisico teorico*

Tutta la nostra conoscenza del mondo ha origine nella mente... È attraverso la scienza moderna, in particolare attraverso la

fisica quantistica, che ci è consentito di ipotizzare che ogni individuo sia parte della Mente Universale. Il postulato di una Mente Universale di cui ogni essere cosciente e forse ogni entità presente nel mondo sarebbe parte, come pensava Aldous Huxley, presenta delle evidenti difficoltà soprattutto per lo scienziato occidentale.

Aldous Huxley (1945), *scrittore* (Nobel)

Philosophia Perennis: l'espressione è stata coniata da Leibniz, ma la cosa è universale e più antica di ogni memoria; cioè la metafisica che riconosce una realtà divina come sostanza del mondo delle cose, delle vite, delle menti; la psicologia che trova nell'anima qualcosa di simile alla realtà divina, o addirittura di identico ad essa; l'etica che pone il fine ultimo dell'uomo nella conoscenza del fondamento immanente e trascendente di ogni essere.

Daniel Clement Dennett (1997), *filosofo della mente*

Mia nonna era una macromolecola!

Gerald M. Edelman (1997), *fisiologo, medico e neuroscienziato* (Nobel)

Sono convinto che non sia possibile comprendere la mente, se non attraverso l'elaborazione di un modello neuroscientifico fondato su una teoria a base evolutivista. Partendo dall'ipotesi che le funzioni cerebrali si formino secondo un processo selettivo, dobbiamo essere in grado di conciliare la variabilità strutturale e funzionale del cervello con la necessità di spiegare la sua capacità di categorizzare... Per essere scientifica, la teoria deve fondarsi sull'ipotesi che ogni attività cognitiva e ogni esperienza conscia poggino esclusivamente su processi e ordinamenti appartenenti al mondo fisico.

Hubert Dreyfus (1997), *filosofo*

Fondandosi sulla definizione aristotelica dell'uomo come animale razionale, la filo-

sofia ha sviluppato una teoria della mente che descrive l'uomo come soggetto capace di risolvere problemi e di agire sulla base di credenze e desideri. Un uomo che sa prendere decisioni e seguire regole prestabilite, ma che "dimentica" il proprio essere.

Heidegger ha mostrato che l'epistemologia soggetto/oggetto presuppone uno sfondo di pratiche quotidiane alle quali non corrispondono rappresentazioni mentali. Tale sfondo non rappresentazionale costituisce qualcosa di più fondamentale della mente, è ciò che consente il manifestarsi dell'essere. L'ontologia precede la coscienza: la domanda sulla natura della mente diviene con Heidegger la domanda sull'essere.

Richard Rorty (1997), *filosofo*

Non c'è alcun bisogno, per definire gli essere umani, di fare ricorso ad altre categorie che non siano quelle della biologia, della sociologia e dell'antropologia. La filosofia non è più necessaria per comprendere l'uomo... Il linguaggio è diventato la questione essenziale nella filosofia contemporanea... Ciò che oggi viene meno in questione è la centralità filosofica del problema del legame fra rappresentazione e realtà... Il linguaggio non dev'essere considerato come una rappresentazione, ma come una capacità che ci consente di realizzare azioni che non sono accessibili ad altri animali intelligenti.

Jerry A. Fodor (1997), *psicologo e filosofo*

Sembra che coscienza e processi mentali siano radicalmente distinti... Il timore diffuso è che sia effettivamente possibile una teoria dell'intenzionalità, senza la coscienza... Ritengo inaccettabile l'idea che il pensiero sia semplicemente l'unione di una serie di abitudini mentali.

Steven Pinker (1997), *linguista e psicologo*

Se i processi del pensiero vanno intesi come il prodotto dell'attività di un organi-

simo biologico, allora essi saranno il risultato di un millenario cammino evolutivo.

Daniel Clement Dennett (1997), *filosofo della mente*

Evitare il dualismo a qualunque costo!...

Mistificazione della coscienza. Questa tendenza, nel tentativo fuorviante di preservare la unicità e la dignità del genere umano, ignora i successi ottenuti dalla scienza nello spiegare i misteri dell'astrofisica e della trascrizione del codice genetico.

Canto delle sirene dualiste. C'è un solo tipo di sostanza – la materia con cui hanno a che fare i fisici e i chimici – e il dualismo di Popper e Eccles è caduto, oggi, in disgrazia poiché la sostanza mentale (dei Mondi 2 e 3) elude le misurazioni fisiche.

Teatro Cartesiano. L'idea che esista un centro speciale nel cervello è una delle idee più tenaci e ingannevoli tra quelle che frustrano i nostri tentativi di riflettere coerentemente sulla coscienza. Le funzioni cognitive e di controllo sono distribuite nel cervello anziché localizzate in specifiche regioni.

"Qualia". Le qualità secondarie (aromi, colori, gusti e suoni) non esistono affatto: sono pura apparenza.

A.F. Surikov (1997), *studioso di IA*

I modelli computazionali della coscienza non dicono nulla sull'esistenza di stati qualitativi coscienti vissuti in "prima persona". Ma gli stati di coscienza in "prima persona" restano pur sempre stati reali che arredano il mondo; non sono pura apparenza solo perché non possiamo osservarli in "terza persona". Semplificando con una similitudine: la mosca non riesce ad attraversare il vetro della finestra e non riesce a capire il perché; è il mondo che stabilisce i limiti del soggetto "mosca". Noi comprendiamo la natura dei limiti del soggetto mosca, ma non comprendiamo la natura dei limiti del soggetto "uomo", pur avendo la certezza che ci siano.

Erich Kandel (1997), *neuroscienziato* (Nobel)

Come risultato dei progressi nelle neuro-

scienze degli ultimi anni sia la psichiatria che le neuroscienze si trovano ora in una nuova e migliore posizione per un loro riavvicinamento; riavvicinamento che permetterebbe alle intuizioni della prospettiva psicoanalitica di contribuire alla ricerca di una più profonda comprensione delle basi biologiche del comportamento... Dopotutto perché, dal momento che la psicoanalisi produce dei cambiamenti nel cervello, il parlare con un amico, un prete o un terapeuta "dovrebbe valere meno dell'uso del Prozac"?

John Roger Searle (1997), *filosofo*

La filosofia della mente degli ultimi cinquant'anni ha cercato di risolvere il problema della coscienza, e del dualismo mente-corpo "riducendolo" al solo problema fisico; il materialismo è ancora oggi l'orientamento dominante. Ma tale atteggiamento porta alla negazione stessa della coscienza. La mia teoria della coscienza cerca di dare soluzione alle ipotesi tradizionali, a mio avviso palesemente false: essa è una teoria ontologica, fondata sulla biologia del cervello. La soluzione non è ancora raggiunta, numerosi problemi rimangono aperti e irrisolti, ma credo sia una questione di tempo. Nel secolo scorso filosofi e biologi dibattevano animatamente il concetto di vita; oggi siamo in grado di dare una risposta precisa a "che cos'è la vita", e tale quesito non costituisce più un problema filosofico. Auspico che per la coscienza accada la stessa cosa: un giorno neuroscienziati e biologi giungeranno a confermare l'ipotesi del "naturalismo biologico", convalidando scientificamente la stretta connessione tra il funzionamento della mente e quello del cervello.

Michele Di Francesco (1998), *filosofo*

A favore del riduzionismo resta, ovviamente, l'applicazione del rasoio di Occam (*entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*): se fosse possibile integrare in una visione scientifica unificata l'intera nostra

concezione di noi stessi, il vantaggio esplicativo sarebbe ovviamente straordinario; ma come tutti gli strumenti affilati, anche il rasoio di Occam va utilizzato con cautela, per non asportare parti (della nostra forma di vita) di cui non possiamo fare a meno. Forse, il riduzionismo avrà successo. Forse. Ma per ora le "persone" qui sono, e qui sembrano intenzionate a restare.

Richard Restak (1998), *neuroscienziato*

La ricerca della comprensione di noi stessi è paragonabile alle fatiche di una formica vagante, per il British Museum (la similitudine è di Carl Gustav Jung). Per quanti sforzi faccia, la formica non saprà mai che cosa contiene il Museo o "perché" gli oggetti siano lì. Con questo non voglio indurre nessuno ad abbandonare "i perché". Facciamone solo un uso più parco, e con la necessaria umiltà. Vi è una buona ragione per agire così: non conosciamo tutti i processi operativi del nostro cervello... e non è detto che il tuo cervello sia congegnato come crede la tua mente.

Jan Robertson (1999), *neurofisiologo*

Il cervello umano è un organo "plastico": ogni cosa che vediamo, udiamo, annusiamo, gustiamo, tocchiamo, ogni esperienza che viviamo, tutte le parole che ascoltiamo o leggiamo modificano in maniera permanente il nostro cervello, lasciano una traccia in quella rete elettrica (il vecchio "telaio incantato" di Sherrington) che costituisce il nostro io. L'io ha sede nella vibrante ragnatela di connessioni cerebrali, una trama percorsa da onde, continuamente ripulsmata dall'instancabile cesello del mondo esterno.

Hilary Putnam (1999), *filosofo, matematico e logico*

Oltre a tutti gli altri problemi connessi con l'insensatezza dell'identità nel contesto mente-corpo, va sottolineato che, se è fondamentalmente oscuro, come credo che sia, parlare de "il correlato" di un'esperienza di

colore, ad esempio, allora la questione dell'“identità” dell'esperienza con “il” correlato è perlomeno altrettanto oscura... Se chiamare l'aver una mente un “mistero” è solo un modo per dire che è qualcosa di “meraviglioso” – allora, in questo senso, è certamente un mistero – ma la stessa cosa vale anche dell'universo fisico, come Einstein ci ha ripetutamente ricordato. Molte cose meritano il nostro stupore, ma formulare una domanda intelligibile richiede qualcosa di più del semplice stupore.

Igor Aleksander (2000), *ingegnere neurale*

Se ci si domanda in che senso una macchina dotata dei meccanismi necessari potrebbe essere cosciente, può essere pertinente domandarsi: “Cosciente di che cosa?”... La differenza fondamentale tra la macchina e la persona è che la prima sarebbe cosciente di essere una macchina, mentre la seconda è cosciente di essere una persona viva. Ne potrebbero seguire conversazioni assai interessanti, a condizione che i due usino lo stesso linguaggio. Quel che intendo è che una macchina cosciente (definita dalle sue rappresentazioni centrate sull'ego) non si troverebbe sullo stesso piano della linea che congiunge l'ameba e l'essere umano, ma che comunque potrebbe percepire, ricordare, pianificare e comunicare nel suo modo da macchina. Non potrebbe farlo, tuttavia, se non fosse dotata di sistemi neurali adeguatamente messi a punto.

Arnaldo Benini (2000), *chirurgo cerebro-midollare*

Il problema mente-corpo e quindi il problema della coscienza come fatto biologico legato all'attività del cervello sono fuori dalla nostra portata conoscitiva. Ciò non comporta che l'attività mentale debba venir vista come un'attività miracolosa separata dal corpo: a ciò si può credere, ma ovviamente per convinzione religiosa e non per una dimostrazione scientifica.

Gerald M. Edelman e Giulio Tononi (2000), *neuroscienziati*

Non esistono i domini completamente separati della materia e della mente, così come non vi è fondamento per il dualismo. È evidente però che esiste un regno creato dall'ordine fisico del cervello, del corpo e del mondo sociale in cui il senso viene coscientemente costruito. Quel senso è essenziale per la nostra descrizione del mondo, come lo è per la sua comprensione scientifica. Sono le strutture materiali estremamente complesse del sistema nervoso e del corpo a dare origine ai processi mentali dinamici e al senso. Non c'è bisogno di presupporre altro: non altri mondi o spiriti, e nemmeno forze straordinarie ancora misteriose come la gravità quantistica... La nostra pretesa è che possiamo afferrare le basi materiali della mente al punto da raggiungere una conoscenza soddisfacente dell'origine di cose elevate, come il mondo della mente... La storia della scienza, delle scienze biologiche in particolare, ha più volte dimostrato che barriere apparentemente misteriose e impenetrabili per la nostra conoscenza erano basate su false concezioni o sui limiti della tecnica. I fondamenti materiali della mente non fanno eccezione...

Darwin, di ritorno dal viaggio intorno al mondo sul Beagle, si arrovellò per capire come, nel corso dell'evoluzione fossero emerse le funzioni espletate dal cervello... Toccherà alle neuroscienze portare a compimento il progetto di Darwin.

Andrew Newberg e Eugen D'Aquili (2001), *neurobiologi*

Durante gli stati di intensa esperienza mistica – meditazione buddhista tibetana e preghiera cristiana di suore francescane – la regione dell'encefalo posteriore viene sottoposta a un “black-out”, cosicché l'assorbimento dell'io all'interno di qualcosa di più vasto non deriva da una costruzione emotiva, ma scaturisce da eventi neurologici... Il cervello umano è stato genetica-

mente configurato per incoraggiare la fede religiosa... Dio nel cervello.

Abraham H. Maslow (1962), *psicologo*

In certi resoconti, particolarmente riguardanti l'esperienza mistica o quella religiosa o quella filosofica, tutto il mondo è visto come unità, come un'unica entità ricca e viva.

In altre "peak experiences", più particolarmente in quella amorosa e in quella estetica, si percepisce soltanto una piccola parte del mondo, come se, in quel momento, essa fosse l'intero mondo.

Elio Sgreccia (2002), *sacerdote, Pontificio Consiglio della Famiglia*

Non vedo contrasti con il Credo. Anche in questo caso [Dio nel cervello (*ndr*)] tra la scienza e la fede non c'è contraddizione.

Rita Levi Montalcini (2002), *biologa cellulare* (Nobel)

È ipotizzabile che una parte del cervello possa reagire in un certo modo agli stimoli della preghiera...

Le Doux ha analizzato il rapporto fra i circuiti neocorticali e i centri paleocorticali dell'ippocampo e dell'amigdala. Le Doux ritiene che queste connessioni possono risultare in una integrazione armoniosa di ragione e passione. Tale ipotesi trova conferma nei risultati di recenti ricerche, a livello anatomo-fisiologico, che hanno evidenziato l'esistenza nel cervello umano di questo sistema... Alle facoltà cognitive è devoluto non soltanto il compito di avvalersi delle conoscenze sempre più approfondite del mondo circostante. Ma è devoluto anche il compito di esercitare un controllo sul comportamento emotivo per affrontare i pericoli che minacciano l'intero globo.

Joseph Le Doux (2002), *neurofisiologo*

Mentre riuscite a capire coscientemente la frase che una persona ha detto, non avete però accesso cosciente ai processi cerebrali che vi hanno permesso di capire la frase che quella persona ha detto... L'idea

che il Sè sia creato e preservato da arrangiamenti di connessioni sinaptiche, non sminuisce ciò che siamo. Fornisce invece una semplice e plausibile spiegazione di come sia possibile il pacchetto di protoplasma psico-spirituale e socio-culturale, enormemente complesso, che chiamiamo il nostro Sè, il Sè sinaptico... Tu sei le tue sinapsi. Esse sono chi sei tu... Interrompi le connessioni e perderai le funzioni... Dopo mezzo secolo di dibattiti e discussioni, non esistono ancora criteri unanimemente accettati per stabilire in modo chiaro quali aree cerebrali appartengano al "sistema limbico". Alcuni scienziati (Brondal A., Kotter R. e Meyer N.) hanno proposto che il "sistema limbico" fosse abbandonato.

Edoardo Boncinelli (2002), *neurobiologo e filosofo*

Perché io? E perché io qui ora? Ma se non ora, quando? Il qui ora non può che essere quello del soggetto parlante, individuo vivente fra gli individui viventi, immerso in un mondo di eventi che egli distingue, percepisce e dota di senso, in maniera sostanzialmente arbitraria e soggettiva. La storia dell'emergere dell'individualità è insomma la storia della comparsa e dell'affermazione degli individui della nostra specie, con le loro particolarità biologiche e culturali. Se esiste una sorta di *anima mundi*, questa nostra non è che una storia fra le tante. Ma per noi, per me e per tutti i Me di questa Terra, è la storia. Quella che ci situa nel mondo, anzi al centro del nostro mondo, in una traiettoria esistenziale che non ha alternative...

Non si può risalire da uno psicostato ai neurostati che lo hanno determinato.

Enrico Bellone (2003), *filosofo*

È vero, in fin dei conti, che gli studiosi del problema mente-cervello usano i loro cervelli e le loro menti per capire la mente e il cervello. Ma è ancor più vero che la barriera tradizionale tra mente e cervello si è in più punti incrinata, poiché, nell'ultimo

mezzo secolo, un poco di luce è stata gettata. Per un verso, le nuove conoscenze sul cervello hanno indebolito l'opinione di molti psicologi e filosofi secondo cui v'era un peccato mortale di tipo riduzionista nell'approccio biologico ai processi mentali. E, per l'altro verso, quelle stesse conoscenze hanno aiutato molti neuroscienziati a riconoscere i meriti degli studi che ampi settori della psicologia e della filosofia della mente hanno condotto sui processi cognitivi, sul linguaggio o sulle pulsioni.

Gerhard Roth (2003), *neuroscienziato*

Per il sorgere della coscienza è essenziale che ognuna dei circa 50 miliardi di cellule nervose della corteccia cerebrale sia connessa a migliaia, se non a decine di migliaia, di altri neuroni... In altri termini: se pure la corteccia cerebrale è in collegamento con il resto del cervello – e attraverso gli organi di senso e l'apparato motorio con il corpo e l'ambiente – essa parla essenzialmente con se stessa... Un buon candidato fra quegli stati dinamici che producono gli stati di coscienza sono le sincronizzazioni tra i miliardi di neuroni corticali e i bilioni di sinapsi, il tutto sotto l'influsso della formazione reticolare, del talamo, dell'ippocampo e del sistema limbico. A favore di questa interpretazione parla già l'astronomico numero di connessioni nella corteccia associativa. Appare plausibile supporre che in quel tipo di processi "emergano" proprietà di tipo nuovo, come per esempio l'aver coscienza di sé. Alla luce di tale supposizione saremmo non solo nella condizione di indicare quando e a quali condizioni si manifestino nel cervello gli stati di coscienza, ma anche di spiegare in modo plausibile almeno alcune proprietà della coscienza, come per esempio perché nessuno può sperimentare la coscienza di un'altra persona... Non vogliamo affermare che siamo già in grado di spiegare completamente il costituirsi fisiologico degli stati di coscienza né che possiamo dedurre, anche solo in modo ap-

prossimato, come funzioni la mente conoscendo le leggi che regolano gli eventi neuronali.

• • •

John Roger Searle (anni '90), *filosofo*

Il cervello dimostra una complessità che, nonostante la rivoluzione delle neuroscienze, presenta ancora numerose zone oscure. Dalle indagini di Gerald Edelman, sappiamo che in alcune aree del cervello sono presenti miliardi di neuroni, e il numero di connessioni sinaptiche che essi stabiliscono è sbalorditivo: circa un milione di miliardi di connessioni. Se l'organizzazione della materia della mente, formata da neuroni, sinapsi, cellule, strati, lamine e nuclei è già di per sé complessa, tale complessità diviene necessariamente maggiore se posta in relazione all'agire cosciente dell'individuo... Quello che si può supporre è che il pensiero e l'agire cosciente appaiono come "proprietà emergente" di un gruppo neuronale. Ma questo dice solo quanto poco (per ora) sappiamo.

Daniel Clement Dennett, *filosofo della mente*

La giovane "ascidia" vaga nel mare alla ricerca di uno scoglio o di un corallo su cui attaccarsi ed eleggerlo a sua dimora per tutta la vita. Per questo compito si avvale di un rudimentale sistema nervoso. Quando trova il suo posto e mette radici non ha più bisogno del cervello, quindi se lo mangia! (Proprio come quando si vince un concorso a cattedre).

Friedrich Nietzsche, *filosofo*

Noi potremmo pensare, sentire, rammemorare. Noi potremmo ugualmente "agire" in ogni senso della parola. Nonostante "tutto questo" – "tutto questo" non avrebbe bisogno di entrare nella nostra coscienza... La vita intera sarebbe possibile senza che essa si vedesse nello specchio.

Hilary Putnam, *filosofo e matematico*

Voler esplorare i pensieri osservando i neuroni al lavoro, è un po' come voler

comprendere il senso di una canzone dei Beatles analizzando unicamente le frequenze sonore che essa produce... Il tempo non sta negli orologi.

Paul Valery, poeta

Certe volte penso, certe volte sono.

Bibliografia (2)

SCHROEDINGER ERWIN, *Mind and Matter*, Cambridge University press, 1958.

RYLE GILBERT, *The Concept of Mind*, London 1949.

TURING ALAN M., *Computing Machinery and Intelligence*, 1950.

HEIDEGGER MARTIN, *Saggi e discorsi*, Mursia 1974 (1953).

WIENER NORBERT, *La cibernetica*, Il Saggiatore 1982 (1961).

WIGNER EUGEN P., *Are We Machine?*, "Proc. Amer. Philos. Soc." 1969.

JAYNES JULIAN, *Il crollo della mente bicamerale e l'origine della coscienza*, Adelphi 1984 (1976).

SPERRY ROGER W., *Forebrain Commissurotomy and Conscious Awareness*, J. Med. Phil. 1997.

POPPER KARL, ECCLES JOHN, *L'io e il suo cervello*, Armando 1981 (1977).

STENT GUNTHER, *Paradoxes of Progress*, San Francisco 1978.

FEYNMAN RICHARD P., *Il piacere di scoprire*, Adelphi 2002 (1999).

BENINI ARNALDO, *Coscienza e autoscienza*, in GABBI L. e PETRUIO V.U., *Coscienza*, Donzelli 2000.

HEBB DONALD D., *Essay on Mind*, Hillsdale 1980.

PARFIT DEREK, *Reasons and Persons*, Clarendon Press 1984.

MINSKY MARVIN, *La società della mente*, Adelphi 1989 (1986).

VARELA FRANCISCO ET AL., *La via di mezzo della coscienza*, Feltrinelli 1992 (1991).

BALSEKAR RAMESH S., *La coscienza parla*, Ubaldini 1996 (1992).

HARTH ERICH, *The creative Loop. How the Brain makes Mind*, Addison-Wesley 1993.

JONAS HANS, *La filosofia alle soglie del duemila*, Il melangolo 1994 (1993).

SEARLE JOHN ROGER, *La riscoperta della mente*, Bollati-Boringhieri 1994 (1992).

STAPP HENRI P., *Mind, Matter and Quantum Mechanics*, Springer Verlag 1993.

LECOURT DOMINIQUE, *Le cerveau des philosophes*, P.U.F. 1993.

PENROSE ROGER, *Ombre della mente. Alla ricerca della coscienza*, Rizzoli 1996 (1994).

ECCLES JOHN, *Come l'io controlla il suo cervello*, Rizzoli 1994 (1994).

LIBET BENJAMIN, in HORGAN JOHN, *La mente inviolata*, Cortina 2001.

CRICK FRANCIS H.C., *La scienza e l'anima. Un'ipotesi sulla coscienza*, Rizzoli 1994 (1994).

CHALMERS DAVID, *The conscious Mind*, Oxford University Press 1996.

CHOMSKY NOAM, in HORGAN JOHN, *La mente inviolata. Una sfida per la psicologia e le neuroscienze*, Cortina 2001 (1999).

PUTNAM HILARY, *Mente e corpo*, in *Mente, corpo, mondo*, Il Mulino 2003 (1997).

STICH STEPHEN, *Decostruire la mente*, in CARLI EDDY, *Cervelli che parlano*, Bruno Mondadori 1997.

MARGENAU HENRY, *Il miracolo dell'esistenza*, Armando 1987 (1984).

HUXLEY ALDOUS, *Philosophia Perennis*, Adelphi 1978 (1945).

EDELMAN GERALD M., *La mente, una prospettiva evolutivista*, in CARLI EDDY, *op. cit.*, 1997.

DREYFUS HUBERT L., *Heidegger, Husserl e la filosofia della mente*, in CARLI EDDY, *op. cit.*, 1997.

RORTY RICHARD, *Il linguaggio del pensiero*, in CARLI EDDY, *op. cit.*, 1997.

PINKER STEVEN, *How the Mind Works*, Penguin books 1997.

DENNETT DANIEL C., *La mente e le menti*, Sansoni 1997.

SURIKOV A.F., *intervista a "Ill. Scient. Obs."*, maggio 1997.

SEARLE JOHN ROGER, *Mente, coscienza, cervello*, in CARLI EDDY, *op. cit.*, 1997.

RESTAK RICHARD, *Il cervello modulare*, Longanesi 1999.

DI FRANCESCO MICHELE, *L'io e i suoi sè*, Cortina 1998.

ROBERTSON JAN H., *Il cervello plastico*, Rizzoli 1999.

PUTNAM HILARY, *Mente, corpo, mondo*, Il Mulino 2003 (1999).

ALEKSANDER IGOR, *Come si costruisce una mente*, Einaudi 2001 (2000).

BENINI ARNALDO, *Coscienza e autoscienza: eventi biologici fuori dalla portata della neuroscienza*, in GABBI L. e PETRUIO V.U., *Coscienza: storia e percorsi di un concetto*, Donzelli 2000.

HORGAN JOHN, *La mente inviolata* (KANDEL), Cortina 2001 (1999).

EDELMAN GERALD M. e TONONI GIULIO, *Un universo di coscienza*, Einaudi 2000.

NEWBERG ANDREW e D'AQUILI EUGENIO, *Dio nel cervello*, Mondadori 2002 (2001).

MASLOW H. ABRAHAM, *Verso una psicologia dell'essere*, Ubaldini 1971 (1962).

LEVI-MONTALCINI RITA, *Tempi di mutamenti*, Baldini e Castoldi 2002.

LE DOUX JOSEPH, *Il sè sinaptico. Come il nostro cervello ci fa diventare ciò che siamo*, Cortina 2002.

BONCINELLI EDOARDO, *Io sono, tu sei. L'identità e la differenza negli uomini e in natura*, Mondadori 2002.

BELLONE ENRICO, *Editoriale: I sentieri della conoscenza umana*, in: *Mente e cervello*, gennaio-febbraio 2003.

ROTH GERHARD, *Sincronia nella rete dei neuroni*, in: *Mente e cervello*, gennaio-febbraio 2003.



Colonnine e plutei in stucco provenienti da Sutri

FRANCESCO CARDELLINI, GIOLJ FRANCESCO GUIDI,
FABRIZIO PIERDOMINICI
ENEA, UTS Materiali e Nuove Tecnologie

Presso i laboratori del Centro Ricerche ENEA della Casaccia, sono state effettuate indagini chimico-fisiche su alcuni campioni di stucco e patine – prelevati da colonnine e plutei frammentati provenienti dalla zona di Sutri e facenti parte probabilmente di un arredo liturgico – allo scopo di provvedere ad una loro caratterizzazione chimica e mineralogica.

Le indagini sono state effettuate utilizzando un sistema di diffrazione dei raggi X (XRD) ed un microscopio elettronico a Scansione (SEM) corredato di un sistema analitico a dispersione di energia (EDS), ed hanno permesso di riconoscere le fasi cristalline presenti nei campioni e di determinare, a livello qualitativo e semiquantitativo, la loro composizione elementare.

Metodologie analitiche

La tecnica della diffrazione dei raggi X (XRD)¹ fornisce informazioni sulla struttura delle sostanze solide e sulla composizione delle loro miscele, relati-

vamente alle fasi cristalline presenti. Una sostanza è definita cristallina quando i suoi costituenti (atomi e ioni) sono distribuiti nello spazio secondo specifici criteri di ordine e simmetria. Una siffatta distribuzione ordinata della materia definisce un reticolo cristallino caratterizzato da uno o più elementi di simmetria (centro, assi, piani ecc.) che possiamo immaginare ottenuto dalla ripetizione nello spazio di una unità fondamentale, detta cella elementare. In questa cella elementare sono presenti tutti gli elementi di simmetria che caratterizzano il corrispondente reticolo cristallino, inoltre i costituenti chimici delle sostanze (atomi o ioni) sono nello stesso rapporto stechiometrico indicato dalla sua formula chimica.

In ogni reticolo cristallino, gli atomi o gli ioni costituenti, sono distribuiti ordinatamente nello spazio ed in tal modo determinano famiglie di piani paralleli tra loro, differentemente orientate in funzione della simmetria

del reticolo stesso. In ciascuna famiglia la distanza tra i singoli piani, indicata con la lettera d , è una costante.

Ciascuna sostanza cristallina è quindi caratterizzata da un certo numero di famiglie di piani, in funzione della simmetria della sua struttura, e ciascuna famiglia da un diverso valore della distanza interplanare d ; in altri termini, ogni sostanza cristallina è caratterizzata da un certo numero di valori di d che dipendono dal modo secondo il quale i suoi costituenti sono distribuiti nello spazio.

L'analisi di diffrazione dei raggi X permette, pertanto, la misura dei valori di d e, di conseguenza, attraverso tale misura, il riconoscimento della sostanza cristallina incognita.

Il microscopio elettronico a scansione (SEM) con microanalisi X² permette, invece, di osservare la superficie del preparato ottenendone un'immagine tridimensionale con un potere di risoluzione di circa 3 nm. È costituito da: a) un cannone elettronico in cui un catodo formato da un cristallo di esaboruro di lantanio (LaB₆) produce un fascio di elettroni ad alta energia che attraversando una serie di diaframmi fissi ed un sistema di lenti elettromagnetiche viene accelerato e focalizzato sulla superficie del campione, b) una serie di rivelatori per catturare i diversi segnali prodotti per l'interazione tra il fascio di elettroni e la materia costituente il campione in esame, c) una catena elettronica che permette di amplificare e selezionare i diversi segnali elettronici prodotti, ed infine, d) un sistema di microanalisi X.

Per poter essere osservato il campione deve essere conduttore di elettricità; nel caso che non lo sia è necessario renderlo

tale depositando sulla sua superficie un film di qualche centinaio di Angstrom; ciò si ottiene per evaporazione sotto vuoto, di un metallo (i più usati sono oro, alluminio, rame e carbonio) sino ad ottenere una copertura sottile e continua sulla superficie del campione. In particolare, per osservare e caratterizzare il campione in esame, sia dal punto di vista chimico che dal punto di vista fisico, vengono utilizzati i diversi segnali emessi dal campione stesso a seguito dell'impatto del fascio di elettroni sulla sua superficie. Tale impatto determina infatti la produzione, tra gli altri, di elettroni secondari, elettroni retrodiffusi e raggi X.

Mentre l'immagine degli elettroni secondari fornisce informazioni sulla morfologia superficiale del campione in esame, quella ottenuta dagli elettroni retro diffusi, permette di individuare la presenza di eventuali fasi diverse, basandosi sulle differenze di numero atomico degli elementi chimici che costituiscono il campione. Infine il fascio elettronico primario ad alta energia, interagendo con gli atomi del campione in esame, determina l'espulsione degli elettroni dalle orbite più interne provocando l'emissione, da parte dell'atomo, di raggi X caratteristici di ciascun elemento

chimico costituente il reperto in esame. Dalla misura di tali radiazioni X caratteristiche è possibile, pertanto, risalire alle specie chimiche presenti determinando sia qualitativamente che quantitativamente anche in modo spaziale.

Risultati

L'osservazione ottica stereoscopica dei campioni ha permesso di individuare le peculiarità presenti e di definire la tipologia di preparazione da adottare per le successive analisi. In particolare, da ciascun campione sono state prelevate due frazioni di cui la prima è stata polverizzata ed analizzata mediante diffrazione dei raggi X, mentre la superficie della seconda, dopo essere stata lucidata, è stata resa conduttrice (mediante evaporazione di grafite sotto vuoto) per essere osservata al microscopio elettronico a scansione.

Per le indagini diffrattometriche è stato utilizzato un generatore di raggi X Ital Structures 3K5 avente le seguenti caratteristiche:

- radiazione incidente monocromatica focalizzata (Co K α)
- tubo AEG al cobalto
- analizzatore multicanale portatile
- canali utilizzati 4096
- rivelatore curvilineo a filo a flusso di gas (argon-etano 15%)

- risoluzione 0,03 gradi
 - area di misura 10 mm x 2 mm
 - calibrazione 0,02 gradi/canale
 - tempo di misura 300 secondi ed operando a 35 kV e 30 mA.
- Dopo l'elaborazione degli spettri di diffrazione dei raggi X è stato possibile riconoscere la presenza di calcite (CaCO₃), quarzo (SiO₂) ed ematite (Fe₂O₃).

Le analisi effettuate con un microscopio elettronico a scansione Cambridge 250 MK3 corredato di un sistema di microanalisi X Link-Isis a dispersione di energia (EDS) con rivelatore al Ge avente una risoluzione di 120 eV a 5,9 keV, hanno permesso di determinare la composizione percentuale degli elementi presenti (tabella 1).

Allo scopo di verificare il possibile raggruppamento dei campioni in famiglie distinte, i risultati analitici sono stati trattati statisticamente mediante analisi discriminante per valutare globalmente le eventuali differenze composizionali, tenendo conto di tutti gli elementi dosati. Sulla base dei coefficienti di correlazione determinati, è stato possibile valutare le differenze esistenti tra i singoli campioni tenendo contemporaneamente conto di tutte le variabili in gioco. Il metodo necessita di un'ipotesi di partenza sull'aggregazione delle misure in gruppi omogenei; i coefficienti di correlazione determinati hanno permesso di identificare gli elementi meglio correlati (Ca, Al, Si e K) con cui sono stati ottenuti i relativi grafici (figure 1 e 2). Il criterio di lettura dei grafici di tali funzioni è quello della distanza: quanto più lontani sono i gruppi tanto più diverse tra loro sono le composizioni.

Conclusioni

Sebbene i risultati delle analisi

Tabella 1

Composizione chimica dei campioni analizzati (% peso)

| Campione | Mg | Al | Si | S | Cl | K | Ca | Ti | Fe |
|----------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|
| VT1 | 1,8 | 8,5 | 33,0 | 0,2 | 0,2 | 3,2 | 47,4 | 0,8 | 4,8 |
| VT3 | 0,1 | 11,5 | 17,5 | 3,1 | 0,0 | 1,2 | 15,5 | 35,7 | 15,4 |
| VT3a | 0,8 | 2,4 | 25,0 | 1,2 | 0,0 | 0,6 | 69,0 | 0,2 | 0,9 |
| VT4 | 1,4 | 2,6 | 22,6 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 70,4 | 0,4 | 1,1 |
| VT5 | 1,6 | 3,0 | 22,9 | 0,2 | 0,6 | 1,2 | 68,8 | 0,0 | 1,9 |
| VT6 | 0,8 | 1,8 | 23,6 | 0,2 | 0,6 | 0,0 | 71,6 | 0,0 | 1,6 |
| VT7 | 1,1 | 3,6 | 25,2 | 0,4 | 0,4 | 1,3 | 65,8 | 0,2 | 2,1 |
| VT8 | 0,9 | 3,6 | 27,5 | 0,2 | 0,1 | 0,7 | 65,1 | 0,3 | 1,5 |
| VT9a | 1,3 | 5,9 | 32,5 | 0,8 | 0,6 | 2,2 | 49,9 | 0,9 | 5,9 |
| VT9a1 | 1,8 | 8,9 | 33,6 | 4,8 | 0,2 | 3,5 | 38,7 | 0,9 | 7,6 |
| VT9c | 2,3 | 12,4 | 40,2 | 2,3 | 0,0 | 3,4 | 33,4 | 0,8 | 5,5 |

chimiche, effettuate al microscopio elettronico a scansione, siano semiquantitativi, è possibile comunque avanzare le seguenti conclusioni:

1. il materiale costituente le colonnine e i plutei è uno stucco a marmorino in cui sono stati riconosciuti, mediante diffrazione dei raggi X, calcite e quarzo quali minerali principali ed ematite quale minerale accessorio. Tale stucco è stato realizzato impastando calce (che nel tempo ha subito un processo di ricarbonatazione all'aria), probabili frammenti minuti di marmo e sabbia ricca di quarzo allo scopo di conferire resistenza all'impasto;
2. la colorazione rosata, riscontrata in tutti i reperti, è da attribuire alla presenza di un pigmento ocra ottenuto dall'impiego di ematite macinata finemente;
3. in tutti i reperti sono stati riconosciuti, al microscopio elettronico a scansione, i seguenti elementi: Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti e Fe. In particolare lo S è da attribuire alla presenza di gesso policristallino di neo formazione, mentre Mg, Al, K, Ti e Fe sono da attribuire alla probabile presenza di muscovite quale minerale accessorio delle sabbie ricche di quarzo. In entrambi i casi sia il gesso che la muscovite sono presenti in quantità inferiore al 5% e quindi non determinabili mediante diffrazione dei raggi X;

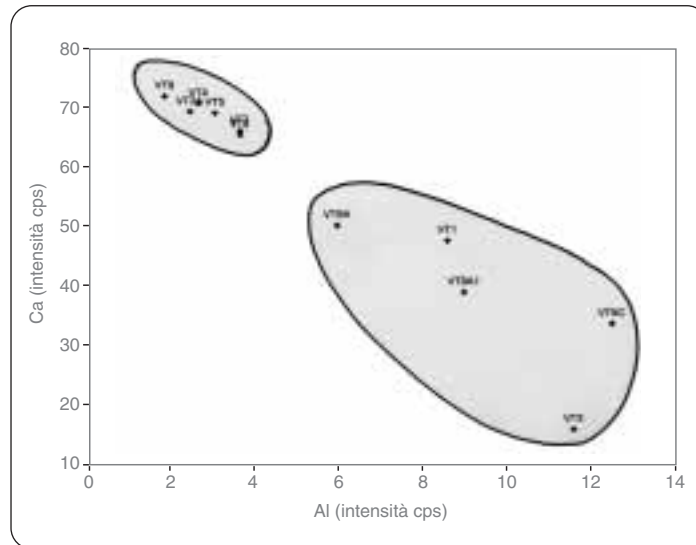


Figura 1
Diagramma binario
Ca/Al

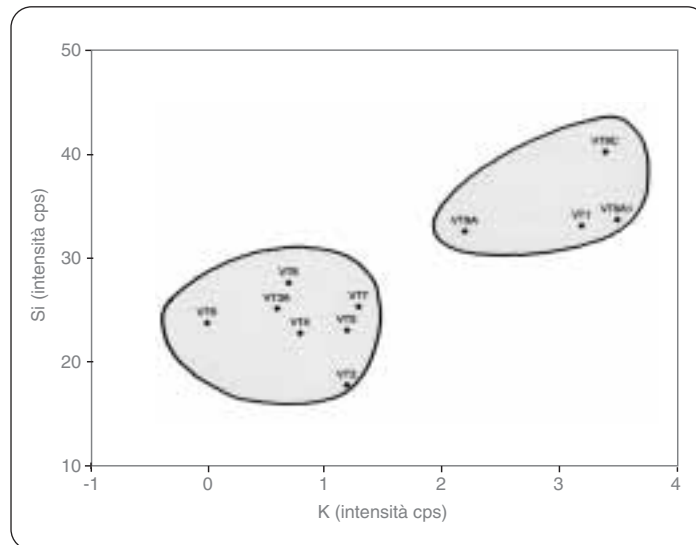
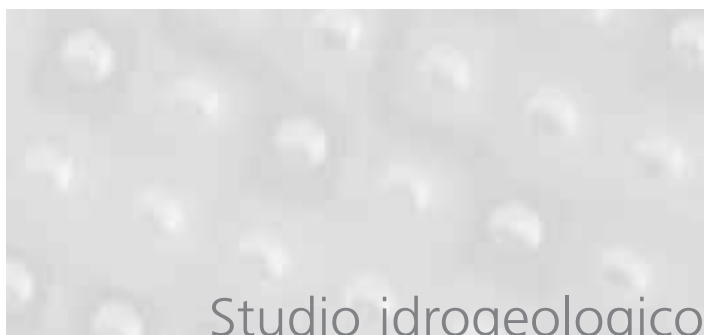


Figura 2
Diagramma binario
Si/K

4. l'analisi multifattoriale ha permesso di differenziare i reperti in due ben distinte famiglie. Ciò potrebbe indicare che lo stucco sia stato preparato, miscelando le singole componenti in rapporti diversi, in due fasi distinte.

Bibliografia

1. H.P. KLUG, E.L. ALEXANDER (1954), *X-ray diffraction procedure*, J. Wiley & Sons, New York.
2. J.A. CHANDLER (1981), *X-ray Microanalysis in the Electron Microscope*, North-Holland Publishing Company.



Studio idrogeologico per la definizione di una rete di monitoraggio delle acque e di indicatori per la certificazione ecologica

DIVO VINCENZI*, ANTONIO GNES**

* ENEA, UTS Protezione e Sviluppo del Territorio

** ARPA, Ravenna

Il presente lavoro tratta dello studio idrogeologico per la definizione di una rete di monitoraggio per il controllo della qualità delle acque. Lo scopo è quello di fornire gli indicatori chimico-fisici necessari alla certificazione della qualità ambientale del territorio circostante la torre di Oriolo dei Fichi sull'Appennino faentino.

Lo studio viene svolto nell'ambito del progetto TORRE (Turismo Organizzato Recupero Rurale Ecologico) che è finalizzato allo sviluppo di flussi di turismo sostenibile, preceduti dal necessario recupero e riqualificazione della zona del parco di Oriolo dei Fichi.

Il progetto ha ottenuto l'approvazione della Comunità Europea ed ha ricevuto un contributo dal Programma Comunitario Life Ambiente (decisione della Commissione Europea n. C(2001)/2505/88 del 4 agosto 2001. Il

Partner Beneficiario è il Comune di Faenza. Il progetto ha una durata di tre anni ed è iniziato nell'ottobre del 2001. Le attività sono notevolmente avanzate, per cui è possibile trarre le prime conclusioni preliminari.

Il progetto si articola in Task che scandiscono le fasi salienti. Il lavoro qui illustrato costituisce i "Task 3.2 e 3.3, Controllo della qualità delle acque - Studio idrogeologico", che fa parte del "Task 3, Valutazione della qualità ambientale - Monitoraggio attraverso indicatori fisico-chimici e biologici".

La bibliografia ed i dati fino ad ora raccolti nei punti censiti hanno permesso di sviluppare i seguenti argomenti: l'inquadramento geologico, l'inquadramento meteo-climatico, il progetto e la realizzazione di banche dati, il GIS (Geographic Information System), i risultati delle analisi effettuate, il model-

lo di funzionamento idrogeologico, la definizione della rete di monitoraggio delle acque, gli indicatori per la certificazione ecologica.

I caratteri geologici della zona circostante la torre di Oriolo dei Fichi, sui primi rilievi collinari a SE di Faenza, si sono impostati nella parte terminale del Pliocene e nel Pleistocene (da 1,2 Ma) in base all'evoluzione sedimentaria dell'avanfossa del Nord Appennino a seguito di una generale tendenza regressiva, da depositi a prevalente carattere marino a depositi a prevalente carattere continentale.

La documentata presenza, a livello regionale, di una superficie di inconformità ha portato alla definizione di un modello concettuale di struttura stratigrafica, che include una sequenza deposizionale, dominata da depositi marini, separata, dalla sovrastante sequenza deposizionale a prevalenti depositi continentali, dalla superficie su accennata (A. AMOROSI ET AL., 1998).

L'analisi delle elaborazioni di una serie di circa 70 anni di dati di pioggia porta ad affermare che per alcune delle stazioni (Faenza, Brisighella, Riolo Terme) vi è una chiara tendenza all'abbassamento della piovosità media negli anni, mentre per altre (Forlì, Modigliana, Castrocaro) non esiste alcuna tendenza.

La piovosità media della zona, su lungo periodo, è senz'altro compresa tra i 750 mm/anno, ed i 900 mm/anno. La quantità di precipitazioni meteoriche della zona è quindi abbastanza consistente.

Sebbene il periodo coperto dalle registrazioni dei dati di temperatura sia breve (10 anni) e quindi poco significativo per elaborazioni che riguardano le tendenze in atto, l'analisi di esse permette di affermare che per

RIEPILOGO ANALISI CHIMICHE

| Punto | pH | Cond. El. µS/cm | NO ₃ mg/l | Cl mg/l | SO ₄ mg/l | Data dei rilievi |
|-------|------|--------------------|----------------------|---------|----------------------|------------------|
| 5 | 7,72 | 703 | 0,5 | 24,6 | 7,3 | 18/12/02 |
| 13 | 7,99 | 825 | 26,50 | 15,40 | 117,10 | 5/3/02 |
| 13 | 7,68 | 802 | 28,04 | 15,10 | 123,10 | 17/4/02 |
| 13 | 8,12 | 920 | 28,90 | 16,70 | 117,30 | 2/10/02 |
| 13 | 7,20 | 1006 | 32,70 | 77,60 | 131,60 | 18/12/02 |
| 16 | 7,08 | 950 | 135,20 | 32,80 | 65,60 | 5/3/02 |
| 16 | 7,19 | 869 | 110,92 | 29,90 | 62,60 | 17/4/02 |
| 16 | 7,05 | 850 | 114,70 | 27,80 | 60,90 | 4/6/02 |
| 16 | 7,73 | 997 | 82,30 | 36,10 | 53,90 | 2/10/02 |
| 21 | 7,37 | 902 | 36,40 | 32,40 | 37,30 | 18/12/02 |
| 23 | 8,06 | 651 | 24,30 | 48,20 | 27,40 | 18/12/02 |
| 33 | 7,63 | 797 | 102,70 | 37,40 | 67,80 | 5/3/02 |
| 34 | 7,42 | 614 | 21,27 | 39,40 | 41,70 | 17/4/02 |
| 34 | 7,14 | 697 | 32,40 | 46,80 | 49,60 | 4/6/02 |
| 34 | 7,97 | 668 | 10,20 | 28,80 | 28,40 | 2/10/02 |
| 34 | 7,69 | 638 | 4,60 | 92,40 | 27,00 | 18/12/02 |
| 37 | 6,92 | 948 | 30,70 | 28,00 | 107,30 | 5/3/02 |
| 37 | 7,15 | 911 | 31,50 | 22,30 | 87,90 | 17/4/02 |
| 37 | 7,13 | 678 | 29,20 | 25,50 | 93,40 | 4/6/02 |
| 37 | 7,67 | 1088 | 33,90 | 28,50 | 107,30 | 2/10/02 |
| 37 | 7,02 | 1153 | 25,90 | 42,60 | 112,70 | 18/12/02 |
| 42 | 7,64 | 807 | 67,20 | 19,10 | 132,00 | 17/4/02 |
| 44 | 7,20 | 1200 | 46,70 | 33,10 | 304,20 | 17/4/02 |
| 44 | 7,08 | 1210 | 53,50 | 35,80 | 352,80 | 4/6/02 |
| 44 | 8,31 | 1137 | 33,50 | 22,00 | 174,50 | 2/10/02 |
| 44 | 6,98 | 940 | 12,50 | 74,30 | 94,60 | 18/12/02 |
| 46 | 7,58 | 1156 | 4,10 | 42,40 | 209,50 | 18/12/02 |
| 47 | 6,95 | 840 | 72,10 | 10,30 | 52,30 | 5/3/02 |
| 47 | 7,03 | 812 | 51,25 | 5,30 | 33,10 | 17/4/02 |
| 47 | 7,00 | 824 | 75,60 | 9,10 | 52,90 | 4/6/02 |
| 47 | 7,72 | 957 | 75,00 | 10,30 | 48,90 | 2/10/02 |
| 50 | 7,27 | 925 | 0,90 | 32,40 | 90,40 | 18/12/02 |
| 51 | 7,31 | 1000 | 0,80 | 67,90 | 53,60 | 5/3/02 |
| 51 | 7,24 | 827 | 2,07 | 41,50 | 50,50 | 17/4/02 |
| 51 | 7,09 | 862 | 2,50 | 41,60 | 82,70 | 4/6/02 |
| 51 | 8,07 | 817 | 2,50 | 25,50 | 58,30 | 2/10/02 |
| 62 | 7,73 | 732 | 15,50 | 33,30 | 91,00 | 4/6/02 |
| 62 | 8,30 | 832 | 17,90 | 47,00 | 68,10 | 2/10/02 |
| 62 | 7,93 | 716 | 16,80 | 14,60 | 36,40 | 18/12/02 |
| 64 | 7,70 | 805 | 70,00 | 11,80 | 34,80 | 2/10/02 |

ambidue le stazioni (Faenza e Forlì) vi è una chiara tendenza all'innalzamento della temperatura media.

La posizione che gli indici di Emberger, calcolati per le stazioni di Faenza e di Forlì negli anni dal 1990 al 2000, assumono sul grafico, che classifica i climi

della regione mediterranea, permettono di dire che il clima della zona indagata si situa tra il mediterraneo umido ed il mediterraneo temperato.

Per rendere più facili e razionali le analisi da effettuare per la scelta dei siti più idonei a monitorare le acque del sito di Oriolo

dei Fichi, sono state progettate e realizzate alcune banche dati.

La banca dati realizzata con "Access" può essere facilmente utilizzata per stilare semplici analisi mirate con la possibilità di incrociare vari campi in modo da estrarre il tipo di punto censito di interesse.

Le banche dati realizzate con "Excel" sono state utilizzate per le elaborazioni relative all'inquadramento meteorologico ed alla realizzazione del GIS del sito. In quest'ultimo caso i dati in esse contenuti sono stati incrociati con i caratteri topografici e geologici allo scopo di analizzare i complessi rapporti tra geologia, topografia e parametri dei punti censiti ed in particolare con la profondità dei pozzi censiti. Tali incroci hanno dato utili indicazioni per la stesura del modello di funzionamento idrogeologico, in base al quale si compie la scelta definitiva dei punti della rete di monitoraggio. Il Sistema Informativo Territoriale (GIS) del sito di Oriolo dei Fichi è costruito sulla base topografica 1:5000 e sulla carta geologica 1:10.000 della zona, fornite dalla Regione Emilia Romagna in formato digitale. Su di esse sono stati realizzati dei tematismi inerenti alle caratteristiche idrografiche, idrogeologiche, idrochimiche, ed altre, necessarie alla definizione della rete di monitoraggio.

Le notizie reperite durante i rilievi in campagna, l'analisi dei caratteri piezometrici e chimico-fisici, e gli studi pregressi hanno premesso la costruzione del seguente modello di funzionamento idrogeologico.

Il substrato impermeabile è costituito dai terreni argillosi appartenenti alla formazione di Riolo Terme. I pozzi scavati in questa formazione non sono normalmente produttivi e sono

| PIEZOMETRIA | | | | | |
|-------------|----------|-----------------|-------|----------|-----------------|
| Pozzo | Data | Livello (m slm) | Pozzo | Data | Livello (m slm) |
| 2 | 12/02/02 | 60,18 | 34 | 02/10/02 | 48,18 |
| 2 | 04/06/02 | 60,98 | 34 | 18/12/02 | 49,05 |
| 2 | 02/10/02 | 60,68 | 36 | 12/02/02 | 82,18 |
| 2 | 18/12/02 | 64,74 | 36 | 28/02/02 | 83,70 |
| 3 | 28/02/02 | 128,65 | 36 | 04/06/02 | 82,48 |
| 3 | 18/12/02 | 128,40 | 37 | 22/01/02 | 98,95 |
| 5 | 12/02/02 | 118,66 | 37 | 17/04/02 | 99,18 |
| 5 | 04/06/02 | 118,75 | 37 | 04/06/02 | 99,00 |
| 5 | 18/12/02 | 118,77 | 37 | 02/10/02 | 99,00 |
| 6 | 28/02/02 | 111,16 | 37 | 18/12/02 | 99,28 |
| 7 | 12/02/02 | 143,94 | 39 | 12/02/02 | 73,35 |
| 8 | 12/02/02 | 142,56 | 40 | 12/02/02 | 81,95 |
| 8 | 02/10/02 | 142,39 | 40 | 04/06/02 | 82,95 |
| 9 | 05/03/02 | 128,04 | 40 | 02/10/02 | 82,92 |
| 10 | 05/03/02 | 119,19 | 40 | 18/12/02 | 83,12 |
| 14 | 22/01/02 | 103,12 | 41 | 12/02/02 | 110,96 |
| 14 | 04/06/02 | 102,54 | 41 | 04/06/02 | 110,99 |
| 14 | 02/10/02 | 102,75 | 42 | 05/03/02 | 120,67 |
| 14 | 18/12/02 | 103,14 | 42 | 04/06/02 | 118,09 |
| 16 | 22/01/02 | 48,25 | 42 | 02/10/02 | 119,38 |
| 16 | 17/04/02 | 47,68 | 46 | 28/02/02 | 102,71 |
| 16 | 04/06/02 | 48,20 | 46 | 04/06/02 | 102,89 |
| 16 | 02/10/02 | 48,18 | 46 | 02/10/02 | 103,10 |
| 16 | 18/12/02 | 49,33 | 46 | 18/12/02 | 103,45 |
| 17 | 22/01/02 | 75,23 | 47 | 28/02/02 | 147,12 |
| 17 | 04/06/02 | 74,69 | 47 | 17/04/02 | 148,09 |
| 17 | 02/10/02 | 74,45 | 47 | 04/06/02 | 147,11 |
| 17 | 18/12/02 | 74,40 | 47 | 02/10/02 | 147,98 |
| 19 | 22/01/02 | 96,14 | 48 | 28/02/02 | 148,79 |
| 21 | 12/02/02 | 112,29 | 49 | 28/02/02 | 117,63 |
| 21 | 04/06/02 | 111,90 | 50 | 05/03/02 | 119,90 |
| 21 | 18/12/02 | 112,03 | 50 | 04/06/02 | 123,10 |
| 23 | 22/01/02 | 145,80 | 50 | 02/10/02 | 124,58 |
| 23 | 02/10/02 | 147,94 | 51 | 05/03/02 | 73,93 |
| 23 | 18/12/02 | 148,29 | 51 | 17/04/02 | 74,10 |
| 24 | 28/02/02 | 97,43 | 51 | 04/06/02 | 73,86 |
| 24 | 02/10/02 | 97,63 | 51 | 02/10/02 | 73,92 |
| 24 | 18/12/02 | 97,74 | 51 | 18/12/02 | 74,84 |
| 26 | 22/01/02 | 96,15 | 53 | 17/04/02 | 110,32 |
| 26 | 04/06/02 | 96,78 | 54 | 17/04/02 | 96,13 |
| 26 | 02/10/02 | 96,74 | 54 | 04/06/02 | 95,45 |
| 26 | 18/12/02 | 96,79 | 54 | 02/10/02 | 95,85 |
| 30 | 22/01/02 | 132,41 | 63 | 17/09/02 | 94,05 |
| 30 | 02/10/02 | 135,91 | 63 | 02/10/02 | 93,94 |
| 30 | 18/12/02 | 137,37 | 63 | 18/12/02 | 94,61 |
| 33 | 12/02/02 | 44,16 | 64 | 17/09/02 | 94,61 |
| 34 | 17/04/02 | 47,86 | 64 | 02/10/02 | 94,75 |
| 34 | 04/06/02 | 46,77 | 64 | 18/12/02 | 94,74 |

quasi sempre utilizzati come serbatoi di accumulo delle acque piovane intercettate dai tetti delle case, e delle acque epidermiche raccolte con appositi dreni artificiali collocati poco al di sotto del livello del terreno dai gestori dei fondi agricoli. La parte più sabbiosa della formazione geologica di Riolo Terme si può considerare facente parte del sistema acquifero locale qui descritto.

In alcuni casi, esistono pozzi che raccolgono le acque liberate per effetto di alcuni fenomeni geologici particolari come frane, faglie e piccoli accumuli di versante ed eluvio-colluviali.

Il sistema acquifero sovrapposto al substrato impermeabile è distinto in tre gruppi acquiferi separati (Regione Emilia Romagna, ENI AGIP, 1998).

L'inferiore è costituito dai terreni appartenenti alla parte superiore della formazione di Riolo Terme ed alla formazione delle Sabbie di Imola, affioranti nella parte centrale dell'area, e che nella zona settentrionale si incuneano sotto ai terreni appartenenti allo intermedio.

L'intermedio è costituito dai terreni appartenenti alle unità geomorfologiche del ciclo continentale riferibili all'"Alloformazione Emiliano-Romagnola Inferiore".

Il superiore è costituito dai terreni appartenenti alle unità geomorfologiche riferibili all'"Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore".

Ogni gruppo acquifero si considera, in questo lavoro, costituito da un unico indistinto livello acquifero.

I tre acquiferi, data la loro frammentazione in lembi separati ed arealmente limitati, intercettano una porzione esigua delle precipitazioni meteoriche, e pertanto sono sede di falde acquifere poco produttive. A ciò contri-

buiscono anche la pendenza del substrato impermeabile, ed il drenaggio operato dai numerosi pozzi esistenti. Il flusso viene così indirizzato verso i pozzi, verso i rii e verso la fascia pedecollinare, lasciando rapidamente la zona per andare in parte ad alimentare gli acquiferi di pianura. Le falde acquifere della zona sono pertanto esigue ed in certi casi effimere.

Gli agricoltori hanno costruito, su substrato impermeabile, piccoli stagni artificiali da utilizzare a scopo irriguo. Essi però si prosciugano rapidamente nei mesi estivo-autunnali.

Normalmente le acque di tali laghetti non hanno nessun rapporto con le acque sotterranee. La zona riveste, dal punto di vista idrogeologico, una grande importanza, facendo parte dell'area di ricarica dei più consistenti acquiferi di pianura (Regione Emilia-Romagna, ENI - AGIP, 1998).

La valutazione del bilancio idrico della zona non è, con i dati a disposizione, definibile. Tuttavia si può dire che è un bilancio estremamente deficitario.

Gli elementi fino ad ora acquisiti hanno portato a definire la seguente rete di monitoraggio:

- 29 sono i punti (pozzi) adatti per misure di livello;
- 22 sono i punti adatti per misure di qualità;
- di questi:
 - 18 sono pozzi;
 - 2 sono sezioni sul rio Monte Brullo;
 - 2 sono sorgenti.

La metodologia adottata per la definizione di indicatori ricalca quella contenuta nell'All. 1 al D. Lgs 11 maggio 1999 n° 152, adattandola ai dati a disposizio-

ne ed all'ambito territoriale considerato.

In sintesi dal lavoro svolto si possono estrarre le seguenti considerazioni.

Le risorse idriche della zona sono ridotte in ragione della limitata estensione e spessore delle rocce serbatoio e del substrato poco permeabile che porta, per le acque di superficie, a tempi di corrivazione brevi.

Il clima della zona, anche se le precipitazioni meteoriche sono abbastanza consistenti, combinato con i caratteri geologici, non favorisce l'accumulo dell'acqua negli acquiferi e nei piccoli serbatoi artificiali, per cui, nei mesi estivo-autunnali, in condizioni meteo climatiche medie, i laghetti si prosciugano ed i pozzi della zona arrivano a livelli piezometrici bassissimi, al limite del prosciugamento.

Le misure e le osservazioni effettuate permettono di escludere dalla rete di monitoraggio i punti censiti che non offrono le necessarie garanzie di affidabilità.

La consistenza numerica dei pozzi a disposizione permette di operare, in base ai risultati delle prossime campagne di misura, ulteriori scelte per il miglioramento della rete.

Gli indicatori definiti suggeriscono che lo stato ambientale delle acque, sia di superficie che sotterranee, oscilla da scadente a particolare.

Si sottolinea inoltre che, sebbene le risorse idriche della zona siano limitate, detta zona ha una importanza idrogeologica ed ecologica notevolissima, facendo parte dell'area di alimentazione e ricarica degli acquiferi regionali della pianura romagnola.

Bibliografia

1. AMOROSI A., SEVERI P., CAPORALE L., COLALONGO M.L., PASINI G., VAIANI S.C., CIBIN U., RICCI LUCCHI F. (1998). *The Pleistocene littoral deposits (Imola Sands) of the northern Apennines piedmont*. *Giornale di Geologia, Serie 3a*, vol. 60, 1998. ISSN 0017-0291.
2. AMOROSI A., SEVERI P., ROVERI M., CORREGGIATI A., PRETI M., TOMASSETTI C., TAROCCO P., COLALONGO M.L., PASINI G., VAIANI S.C., FUSCO F., MARCHESINI L., SPADAFORA E., CIBIN U., ZUFFA G.G., DINELLI E. (1999) - Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50000, Foglio 223, Ravenna. Servizio Geologico d'Italia. Regione Emilia-Romagna. Istituto poligrafico e Zecca dello Stato - Roma 1999.
3. CICOGNANI C. (1998). *Analisi terreno*. Laboratorio analisi I.R.F.A.T.A.
4. CURZI P., LENAZ R., MARABINI S., VAI G.B. (1987). *Mesostrutture deformative tipo pockmark in un paleosuolo olocenico di Romagna*. *Rend. Soc. Geol. It.* 10 (1987), 38-40, 2 ff.
5. LUCCHI E. (1994). *Indagini geofisiche presso M. Riccio*. EN: SER Engineerin Service, Forlì.
6. MARABINI S., LENAZ R., VAI G.B. (1987). *Pleistocene superiore e Olocene del margine pedeappenninico romagnolo: rapporto preliminare*. *Rend. Soc. Geol. It.* 10 (1987), 33-37, 4 ff.
7. MARABINI S., COSTA G.P., GIUSBERTI G., SAMI M., TAVIANI M., RICCI LUCCHI F., VAI G.B. (1987). *Rinvenimento di un cranio di Elephas nella parte alta della Sabbie Gialle presso Faenza (Pleistocene)*. *Rend. Soc. Geol. It.* 10 (1987), 55-58, 4 ff.
8. REGIONE EMILIA ROMAGNA, ENI-AGIP (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. S.EL.C.A. Firenze.
9. RICCI LUCCHI F., COLALONGO M.L., CREMONINI G., GASPERI G., IACCARINO S., PAPANI G., RAFFI I., RIO D. (1982a). *Evoluzione sedimentaria e paleogeografia del margine appenninico*. In G. CREMONINI e F. RICCI LUCCHI (Eds), *Guida alla geologia del margine appenninico-padano*. Guide Geologiche Regionali Soc. Geol. Ital., 17-46.
10. D. Lgs. 11 Maggio 1999 n° 152. *Gazzetta Ufficiale n° 177 del 30/7/99 - Suppl. Ord. n° 146*. Ecoserver <http://www.ecoserver.cima.unige.it/>.



Campagna sperimentale di termovalorizzazione dei rifiuti urbani

STEFANO CASSANI*, ANDREA CORTI**, LUANA FRASSINETTI***

* ENEA, Unità PROT (Protezione Sviluppo Ambiente e Territorio)

** Università di Firenze, Dipartimento Energetico

*** ARRR Toscana

La termovalorizzazione dei rifiuti urbani è considerata da molti esperti nel campo una delle soluzioni migliori per risolvere il problema dello smaltimento rifiuti e nel contempo trovare una nuova fonte di energia in uno scenario in cui le discariche tendono a trovarsi in continuo conflitto con la salvaguardia del territorio e l'impatto ambientale.

Nei primi mesi del 2002 il Comune di Monsummano Terme e la CMSA (Cooperativa Muratori Sterratori e Affini), concessionaria per la costruzione e gestione della discarica locale a servizio della Val di Nievole, hanno effettuato una sperimentazione sulla biostabilizzazione del rifiuto solido urbano, che ha permesso di evidenziare la possibile sinergia con la produzione di frazioni secche selezionate adatte alla termovalorizzazione. Sulla base di queste prime risultanze è stata individuata la opportunità di sperimentare pres-

so l'impianto di termovalorizzazione del CIS (Consorzio Intercomunale Servizi dei Comuni di Agliana, Montale e Quarrata) il trattamento di tali frazioni, con lo scopo di verificare la possibilità di ridurre il volume di rifiuto avviato a discarica come tal quale e conferire al processo di recupero di energia frazioni selezionate ad alto potere calorifico, verificando al contempo eventuali ottimizzazioni del processo e condizioni operative per minimizzare l'impatto ambientale.

Data la valenza tecnico-scientifica, la ricerca è stata effettuata con il contributo di ENEA (Unità PROT), del Dipartimento di Energetica dell'Università di Firenze e di ARRR SpA. Toscana, grazie al patrocinio della provincia di Pistoia ed è stata finanziata dal Comune di Monsummano Terme e dal CIS con il contributo della CMSA e della BIOE Srl.

Lo schema di processo sul quale si è basata la campagna

di prove implica che a valle delle raccolte differenziate sia previsto un processo di selezione meccanica e/o di biostabilizzazione a seguito del quale siano quindi avviate a termovalorizzazione solo quelle frazioni più adatte a tale processo per le loro caratteristiche quali-quantitative e/o per motivi di opportunità economiche.

Il programma di ricerca ha previsto l'impiego di una delle due linee di combustione a tamburo rotante dell'impianto di smaltimento di rifiuti urbani del CIS di Montale per il solo trattamento delle frazioni sottoposte a sperimentazione, mentre l'altra linea dell'impianto è stata mantenuta in marcia convenzionale con il rifiuto normalmente raccolto presso il bacino di servizio dello stesso CIS.

I vantaggi attesi dalla prova in oggetto sono stati così sintetizzati:

- creare una sinergia compatibile tra la tecnologia di biostabilizzazione e di termovalorizzazione dei rifiuti in modo, tra l'altro, da poter incrementare il bacino di utenza delle due tecnologie;
- chiudere la catena del ciclo dei rifiuti con gli anelli finali di termovalorizzazione e messa a discarica, rispetto alle indicazioni previste dalla normativa vigente.

Impianti di riferimento

Impianto di biostabilizzazione: il sistema si basa sulla tecnica del cumulo statico aerato, con un ciclo di trattamento (fase accelerata) di circa 15-20 giorni. Il cuore del sistema è l'impiego dei teli Gore-Tex a copertura dei rifiuti posti in trattamento, disposti in cumuli su platee pavimentate o in trincee. Ogni cumulo o corsia è dotato di un ventilatore con inverter che alimen-

ta la canalizzazione di insufflazione disposta in senso longitudinale. Il funzionamento della linea di insufflazione è a controllo computerizzato sulla base dei dati di processo acquisiti attraverso un set di sonde: temperatura (per diverse profondità), concentrazione di ossigeno e umidità relativa.

La copertura con telo a membrana Gore-Tex permette il passaggio in atmosfera di CO₂ e di parte del vapore acqueo, limitando al contempo la fuoriuscita di molecole odorogene e di microrganismi, garantendo quindi un confinamento "ambientale" del processo e la protezione dello stesso dagli agenti atmosferici.

Impianto di termovalorizzazione: il termovalorizzatore di Montale consiste in un impianto di potenzialità giornaliera nominale di circa 120 t/giorno, operante su due linee a tamburo rotante; esso è dotato di una fossa di stoccaggio chiusa con dispositivi di limitazione delle possibilità di spargimento di cattivi odori (chiusura porte e depressione locale) e prevede un sistema di alimentazione specifico per rifiuti ospedalieri e di uno a benna per rifiuto tal quale di tipo urbano ed assimilabile. Le scorie di fondo dalla fase di termodistruzione sono prima spente in canaletta ad acqua e quindi asportate con una serie di dispositivi comuni alle due linee e stoccati in locale attiguo alla fossa di stoccaggio rifiuti.

I fumi di combustione subiscono un raffreddamento nella caldaia a vapore, per la produzione di vapore surriscaldato a 28 bar e 380 °C, che viene utilizzato per la produzione di energia elettrica in turbina a vapore a condensazione di potenza nominale pari a 0,9 MW.

La caldaia della linea 2, per la

quale si è proceduto al ripotenziamento del tamburo rotante, non essendo stata modificata asserve al recupero entalpico di una sola parte delle portate di fumi generati in camera di combustione, ragione per cui l'eccesso di calore sensibile dei fumi viene ridotto in un dissipatore.

Il processo è dotato di due linee di trattamento fumi, a servizio dei fumi generati dalle due unità forno, costituite da filtro elettrostatico (EPS), reattore a secco (DS) per l'abbattimento dei gas acidi alimentato con bicarbonato di sodio e carboni attivi, e filtro a maniche (FF) per un ulteriore trattamento e filtrazione delle polveri residue e dei sali generati.

Le due linee fumi convergono in un unico camino di emissione dove sono posti gli strumenti di campionamento e misura in automatico delle concentrazioni di inquinanti.

Materiale utilizzato

Allo scopo di avere un maggior numero di informazioni si è ritenuto opportuno confrontare la marcia convenzionale eseguita con rifiuto tal quale proveniente dal bacino di raccolta del CIS con diverse matrici di rifiuto provenienti da diversi processi di lavorazione:

- Frazione Secca Selezionata (FSS) proveniente dal rifiuto relativo al bacino della Val di Nievole, a valle della vagliatura con maglia da 40 mm (sovravallo);
- Frazione Biostabilizzata Secca Selezionata (FBSS) proveniente dal rifiuto relativo al bacino della Val di Nievole, a valle del processo di biostabilizzazione aerobica in cumuli statici aerati per circa 15 giorni e della vagliatura con maglia da 40 mm (sovravallo);
- Rifiuto Biostabilizzato (RB) proveniente dal rifiuto relativo

al bacino della Val di Nievole, a valle del processo di biostabilizzazione aerobica in cumuli statici aerati per circa 15 giorni.

Sul materiale oggetto di studio sono stati effettuati diversi controlli e verifiche allo scopo di avere una idonea caratterizzazione per lo specifico intervento, e in particolare sono state effettuate diverse analisi merceologiche e valutazioni di potere calorifico (PCI), contenuto di solidi volatili, solidi inerti, e umidità. Le risultanze delle prove di caratterizzazione effettuate hanno permesso di evidenziare una forte disomogeneità delle frazioni oggetto di studio.

Definizione delle fasi di attività

L'attività è stata articolata in fasi successive come descritte di seguito:

Fase propedeutica - La fase propedeutica di preparazione alla campagna sperimentale ha riguardato:

- studio sulla fattibilità in riferimento al materiale di alimento, sui parametri di processo e sui flussi in ingresso ed uscita dall'impianto;
- caratterizzazione del materiale e pianificazione delle fasi di trattamento e approvvigionamento;
- elaborazione della documentazione di prova;
- ispezione tecnica dell'impianto nel suo insieme;
- elaborazione del programma sperimentale.

Fase sperimentale - Questa fase ha riguardato le prove di termovalorizzazione delle diverse matrici oggetto di studio. In particolare l'attenzione è stata rivolta al controllo e alla verifica dei parametri funzionali e di processo, nonché al riscontro dei

parametri analitici relativi all'impatto ambientale.

Fase conclusiva - Raccolta delle informazioni relative alla fase sperimentale e loro elaborazione, analisi e valutazione.

Controllo e caratterizzazione dei flussi solidi e gassosi

Per quanto riguarda le determinazioni analitiche dei flussi in uscita dall'impianto, si è proceduto avvalendosi di due diverse procedure analitiche: una in loco (misurazione on-line) ed una tramite un laboratorio di analisi, per il controllo delle matrici ambientali presenti.

Il controllo delle emissioni on-line è stato effettuato utilizzando la strumentazione di controllo di processo di cui è dotato l'impianto. In particolare sono stati tenuti sotto controllo i seguenti parametri: HCl, CO, polveri totali, NO_x, HF, SO₂, idrocarburi totali (THC). Tali parametri sono registrati in continuo da un sistema di acquisizione dati e archiviati poi come valori mediati sui 15 minuti.

Le determinazioni analitiche di laboratorio sono state effettuate, previo campionamento, secondo quanto prestabilito nella Specifica Generale e nel Progetto Esecutivo con riferimento ai seguenti campionamenti:

– caratterizzazione chimica dei

- fumi al camino (come verifica dei dati monitorati in continuo);
- caratterizzazione fisico chimica scorie da combustore;
- caratterizzazione fisico chimica polveri da elettrofiltro;
- caratterizzazione fisico chimica polveri da filtro a maniche;
- caratterizzazione fisico chimica rifiuti in ingresso.

L'analitica di laboratorio è stata effettuata esclusivamente per le frazioni FSS e FBSS, come previsto nella documentazione di prova essendo queste le due frazioni per le quali appare più interessante nel complesso la sinergia tra processi di pretrattamento e processi di smaltimento finale. Per la caratterizzazione del rifiuto tal quale si è preso a riferimento una serie storica di indagini analitiche relative a monitoraggi eseguiti nel recente passato mediante campionamenti relativi a diverse aree di raccolta.

Valutazioni finali

La complessità della sperimentazione, la necessaria brevità del periodo di prova preso in esame e la forte dipendenza dei risultati da diversi fattori oggettivi ci porta a distinguere le valutazioni finali su tre diversi livelli di intervento:

- valutazione del materiale di alimentazione;
- effetti sull'impianto e sul processo;

– valutazione dei flussi in uscita.

Materiale di alimentazione: i materiali di alimentazione conferiti all'impianto e utilizzati nelle prove sperimentali predisposte hanno comprovato la difficoltà nel rendere omogeneo un flusso di rifiuti in ingresso ad un impianto.

Questo dato è emerso dalla diversa conformità di analisi delle varie frazioni utilizzate, sia esse in condizioni di tal quale, sia a valle di processi di selezione e trattamento. Questo fattore, tipicamente connesso con il rifiuto di tipo tal quale per diversità di conferimento da parte dell'utente in termini di periodicità e tipologia, si è manifestato anche nel caso di rifiuto trattato, a valle di processi di selezione e di biostabilizzazione.

La differenza di potere calorifico tra le diverse frazioni ha comportato di conseguenza la diversa portata di materiale in alimento stante il carico nominale di marcia dell'impianto a cui deve essere assoggettata la portata di rifiuto, sulla base del potere calorifico dello stesso.

Impianto e processo: in conseguenza di quanto evidenziato in termini di variazione delle portate specifiche di frazioni, l'impianto si è dovuto adeguare alla diversa tipologia di rifiuto. Tale regolazione vale non solo per quanto riguarda la diversità di PCI, ma anche la diversità manifestata per altri parametri fisici (densità, tenore di umidità, dimensione media delle frazioni componenti ecc.).

Nonostante ciò la versatilità del processo di trattamento termico presente nell'impianto del CIS di Montale è stata dimostrata sia dal comportamento del materiale all'interno del tamburo rotante, sia dall'andamento dei parametri di processo che, pur adeguandosi

Tabella 1
Flussi di ingresso/uscita dei rifiuti nella caldaia della linea 1

| ALIMENTAZIONE LINEA 1 | | | | |
|----------------------------|-----------|------------|----------|--------------|
| | ROT + FSS | ROT + FBSS | ROT + RB | ROT + Tal Q. |
| Rifiuti (kg/giorno) | 34477 | 26337 | 31544 | 47579 |
| % rifiuto sul totale | 34 | 26 | 28 | 43 |
| % scorie sul rifiuto | 28 | 25 | 25 | 21 |
| Elettrofiltro (kg/giorno) | 712 | 963 | 298 | 639 |
| % elettr. sul rifiuto | 2,1 | 3,7 | 0,9 | 1,3 |
| Filtro maniche (kg/giorno) | 651 | 987 | 653 | 767 |
| % f.m. sul rifiuto | 1,9 | 3,7 | 2,1 | 1,6 |
| Bicarbonato (kg/giorno) | 675 | 610 | 719 | 675 |
| % bicarbonato sul rifiuto | 2,0 | 2,3 | 2,3 | 1,4 |

Tabella 2
Emissioni al camino

| Inquinante | FSS+RSU+ROT mg/Nm ³ (**) | FBSS+RSU+ROT mg/Nm ³ (**) | RSU+ROT (§) mg/Nm ³ (**) | Valore limite Orario DM503 mg/Nm ³ (**) |
|---|--|---|--|--|
| Monossido di carbonio (CO) | 4 | 8 | 61 | 100 |
| Polveri totali | 1,5 | 1,5 | 0,9 | 30 |
| Sostanze organiche volatili (SOV come C) | 4,9 | 7,6 | 4,1 | 20 |
| Cloruri (HCl) | 36,7 | 34 | 11,8 | 40 |
| Fluoruri (HF) | <0,07 | | | 4 |
| Fluoruro + Bromuro (HF+HBr) | – | 1,5 | <1,3 | 4 |
| Ossido di zolfo (SO _x come SO ₂) | 16 | 28 | 16 | 200 |
| Ossido di azoto (NO _x) | 77 | 82 | 55 | 400 |
| Mercurio (Hg) | 0,008 | 0,002 | 0,007 | 0,05 |
| Cadmio (Cd) + Tallio (Tl) | <0,003 | <0,001 | <0,001 | 0,05 |
| Metalli pesanti (*) | 0,003 | 0,038 | 0,011 | 0,5 |
| IPA | 0,00017 | 0,000009 | 0,00002 | 0,05 |
| PCDD+PCDF (***) | 0,095 | 0,084 | 0,063 | 0,1 |
| PCDD+PCDF (****) | 0,102 | 0,093 | 0,096 | 0,1 |

(*) somma dei metalli come da DM503
(**) dove richiesto il valore è normalizzato all'11% di O₂
(***) valore in ng/Nm³ – non tiene conto dei limiti di rilevabilità
(****) valore in ng/Nm³ – tiene conto dei limiti di rilevabilità
(§) valori di riferimento inerenti campionamento e analisi effettuate in periodo antecedente la sperimentazione
(§§) dati provenienti da campionamenti e analisi di laboratorio

alle diverse caratteristiche del flusso in ingresso, hanno mantenuto un andamento costante rispetto ad intervalli di tempo relativi all'intero periodo di prova.

Flussi in uscita: rispetto ai flussi in uscita è necessario fare due tipi di considerazioni, una di tipo quantitativo e una di tipo qualitativo.

Quantitativamente si è verificata una discreta oscillazione delle produzioni medie specifiche sia per quanto riguarda le scorie che le polveri (tabella 1), con un incremento più o meno elevato nelle prove riguardanti rispetti-

vamente FSS, FBSS, RB. La variazione di portata di ceneri prodotte, che appare percentualmente importante, si ritiene che possa dipendere dalle diverse condizioni di aria comburente alimentata all'impianto in ragione del diverso bilancio di combustione che si manifesta per le tre diverse tipologie di marce del forno in prova sperimentale. Infatti i diversi eccessi di aria all'interno del forno necessari per mantenere costante la temperatura massima di processo, determinano un diverso regime fluidodinamico all'interno del

forno rotante e quindi una possibile maggiore sospensione di frazioni particellari leggere, nelle tre diverse condizioni di marcia.

L'analisi qualitativa di tipo ambientale dei flussi in uscita, siano essi solidi che gassosi, ci fornisce una serie di informazioni sui parametri di riferimento che, pur oscillando da frazione a frazione, rientrano comunque nei valori limite e permettono quindi di verificare anche in questo caso una discreta flessibilità dell'impianto rispetto alle diverse frazioni alimentate (tabella 2).

dal **MONDO**

Nuova macchina per la fusione nucleare

Case a consumo zero

Foreste tropicali e CO₂

ce raggi-X, la cui energia riesce a comprimere una capsula di deuterio, fondendone abbastanza da produrre neutroni.

La compressione di plasma caldi densi è un passo importante per realizzare l'accensione e mantenere la reazione. I ricercatori del Sandia National Laboratories che hanno realizzato l'esperimento, sapevano di poter produrre molta energia attraverso grandi impulsi elettrici, ma non credevano di poterla concentrarla in un'area talmente piccola da innescare la fusione. Ora si tratta di realizzare una macchina molto più grande, che permetta di raggiungere uno stato in cui viene rilasciata più energia di quanta sia necessaria per far avvenire la reazione iniziale.

CASE A CONSUMO ZERO

Venti edifici residenziali ad alto risparmio energetico saranno realizzati negli USA dall'Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Centro di ricerca federale in collaborazione con Habitat for Humanity International. L'iniziativa fa parte del programma federale "Building America" nel cui ambito sono già state realizzate oltre 14 mila abitazioni ad elevata efficienza energetica in tutti gli Stati Uniti. L'obiettivo non è solo quello di costruire case più efficienti ma soprattutto quello di arrivare a realizzare delle abitazioni energeticamente autosufficienti "net-zero energy" in grado di auto-produrre tutta l'energia necessaria e di consumarla in modo estremamente efficiente.

Addirittura si pensa che in futuro, su base annua, una casa "net-zero energy" dovrebbe essere in grado di produrre più energia di quanta ne consuma. Le "tecnologie abilitanti" utiliz-

zate comprendono i pannelli solari fotovoltaici, sistemi di generazione a celle a combustibile e a microturbina, questi ultimi alimentati con biomasse, sistemi avanzati per l'accumulo dell'energia elettrica e termica.

Queste case serviranno a mostrare concretamente l'importanza delle più avanzate tecnologie oggi disponibili o emergenti e che saranno commercializzabili entro il 2010.

FORESTE TROPICALI E CO₂

Gli alberi assorbono anidride carbonica attraverso la fotosintesi, ma devono anche continuamente respirare il gas.

Fino a un decennio fa si riteneva che i due processi si bilanciasero. Ora si è osservato che negli anni più caldi, gli alberi di una foresta pluviale crescono di meno e quindi rilasciano grandi quantità di CO₂. Questo lascia pensare che i tropici potrebbero presto diventare una grande sorgente di gas serra (anziché assorbirli) e che quindi le temperature globali, a loro volta, tenderebbero a salire molto più velocemente di quanto stimato finora.

Le variazioni annuali di gas serra rilasciato nell'atmosfera delle zone tropicali, misurate in oltre un decennio da ecologi statunitensi dell'Università del Missouri in una stazione biologica del Costa Rica, sono andate di pari passo con la crescita delle piante.

In altre parole, la minore crescita, dovuta anche alla combinazione con incendi, deforestazione e altri processi, sta trasformando le foreste tropicali in una sorgente di anidride carbonica negli anni più caldi. E quindi il temuto effetto serra potrebbe procedere ad una velocità maggiore del previsto.

NUOVA MACCHINA PER LA FUSIONE NUCLEARE

La "Z machine", una macchina sviluppata per conto del Dipartimento dell'Energia USA, è riuscita a creare un plasma caldo e denso che produce neutroni termonucleari e la reazione di fusione riesce ad autosostenersi.

Finora le reazioni si ottenevano confinando plasma a bassa densità all'interno di enormi campi magnetici, come fanno i tokamak, oppure focalizzando intensi raggi laser su un bersaglio, come nella fusione al laser.

La "Z machine" fa avvenire la reazione di fusione attraverso grandi impulsi elettrici che creano un intenso campo magnetico che, a sua volta, produ-

dall'UNIONE EUROPEA

Emissioni di gas di serra in Europa

Carbone e sviluppo energetico

1990 al 2001 ha ridotto soltanto del 2,3% le sue emissioni di gas serra (grazie solo ad alcuni paesi come Lussemburgo, Svezia, Gran Bretagna e Germania) ed è ancora lontana dagli obiettivi di Kyoto, perchè manca ancora da ridurre il 5,7% delle emissioni complessive europee rispetto all'obiettivo dell'8% previsto al 2010. Ma il fatto più eclatante è che anche per il 2001, così come era accaduto nel 2000, le emissioni di gas serra, in Europa, invece di ridursi stanno aumentando al ritmo dell'1% per anno (vedi tabella).

Tra i paesi più "indisciplinati": Austria, Belgio, Danimarca, Finlandia, Grecia, Irlanda, Italia, Olanda, Portogallo e Spagna. Irlanda e Spagna, allo stato attuale, devono ridurre le loro emissioni di circa il 18% per rientrare negli obiettivi di Kyoto. L'Italia, che sta aumentando le sue emissioni dello 0,3% per anno, deve ora ridurle del 13,6% per raggiungere l'obiettivo previsto. Tra i "buoni" vi sono: Francia, Germania, Gran Bretagna, Lussemburgo e Svezia. Il più buono di tutti è il Lussemburgo che ha ridotto le sue emissioni di ben il 44% andando al di sotto dell'obiettivo di Kyoto di oltre il 16%. Analogamente la Svezia è andata

al di sotto del suo obiettivo di circa il 7%, mentre i rimanenti "buoni" hanno già raggiunto, o quasi raggiunto, i loro obiettivi.

CARBONE E SVILUPPO ENERGETICO

L'Assocarboni, un'associazione internazionale delle imprese carbonifere, ha contestato lo scenario energetico della recente relazione della Commissione europea "Prospettive per la politica mondiale in materia di energia, tecnologia e clima" (vedi pag. 103).

Confermando le previsioni di un raddoppio del consumo energetico mondiale nei prossimi trent'anni, vengono contestate le affermazioni secondo le quali l'ampliamento della rete di distribuzione del gas consentirebbe di soddisfare il crescente fabbisogno energetico mondiale. Il gas, infatti, non rappresenta la soluzione migliore, a causa degli oligopoli regionali dei produttori; in particolare per l'Europa, il gas verrà importato principalmente da due paesi non europei, la Russia e l'Algeria, e ciò comporterà una crescente dipendenza dalle importazioni ed una politica dei prezzi del gas onerosa.

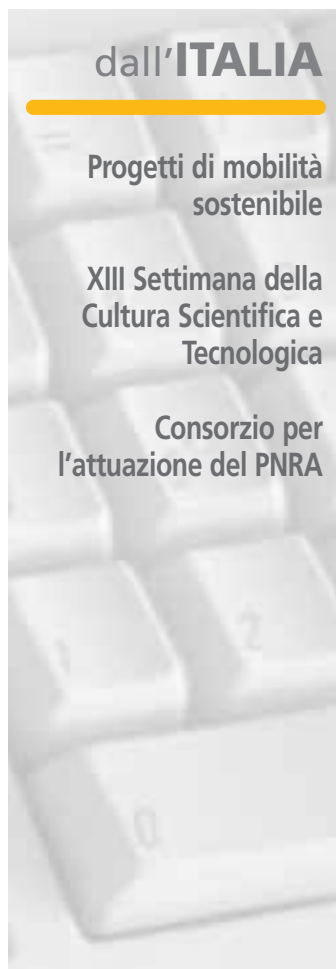
La soluzione migliore consisterebbe in una combinazione bilanciata di carburanti, che permetterebbe di evitare la dipendenza da un'unica risorsa energetica. E il carbone deve far parte di questa combinazione per una serie di ragioni valide: la sua ampia disponibilità in oltre 110 paesi, la durata delle sue riserve per un periodo superiore ai 270 anni e la convenienza del prezzo dovuta alla diversità delle fonti di approvvigionamento. Non dimenticando che l'attuazione delle tecnologie del carbone pulito ne garantirebbe un utilizzo più ecologico, consentendo di trattenerne oltre il 90 per cento delle emissioni di gas nocivi.

EMISSIONI DI GAS DI SERRA IN EUROPA

L'Agenzia Europea per l'Ambiente fa sapere che l'UE dal

| Stati membri | Anno base (Mt) | 2001 (Mt) | Cambiamento 2000-2001 (%) | Cambiamento anno base 2001 (%) | Obiettivi al 2008-12 (%) |
|---------------|----------------|---------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Austria | 78,3 | 85,9 | 4,8 | 9,9 | -13,0 |
| Belgio | 141,2 | 150,2 | 0,2 | 6,3 | -7,5 |
| Danimarca | 69,5 | 69,4 | 1,8 | -0,2 (-10,7) | -21,0 |
| Finlandia | 77,2 | 80,9 | 7,3 | 4,7 | 0,0 |
| Francia | 558,4 | 560,8 | 0,5 | 0,4 | 0,0 |
| Germania | 1216,2 | 993,5 | 1,2 | -18,3 | -21,0 |
| Grecia | 107,0 | 132,2 | 1,9 | 23,5 | 25,0 |
| Irlanda | 53,4 | 70,0 | 2,7 | 31,1 | 13,0 |
| Italia | 509,3 | 545,4 | 0,3 | 7,1 | -6,5 |
| Lussemburgo | 10,9 | 6,1 | 1,3 | -44,2 | -28,0 |
| Olanda | 211,1 | 219,7 | 1,3 | 4,1 | -6,0 |
| Portogallo | 61,4 | 83,8 | 1,9 | 36,4 | 27,0 |
| Spagna | 289,9 | 382,8 | -1,1 | 32,1 | 15,0 |
| Svezia | 72,9 | 70,5 | 2,2 | -3,3 | 4,0 |
| Gran Bretagna | 747,2 | 657,2 | 1,3 | -12,0 | -12,5 |
| EU-15 | 4204,0 | 4108,3 | 1,0 | -2,3 | -8,0 |

cronache

dall'**ITALIA****Progetti di mobilità
sostenibile****XIII Settimana della
Cultura Scientifica e
Tecnologica****Consorzio per
l'attuazione del PNRA****PROGETTI DI MOBILITÀ
SOSTENIBILE**

Il pacchetto "Finanziamento ai Comuni per la realizzazione di politiche radicali ed interventi integrati per la mobilità sostenibile nelle aree urbane", previsto dal Ministero dell'Ambiente, è stato oggetto di una pubblicazione della *Gazzetta Ufficiale* del 1° marzo 2003.

A rientrare nella rosa dell'iniziativa ministeriale per un investimento globale pari a 34 milioni di euro saranno 25 città che si sono impegnate nel presentare ecoprogetti di immediato interesse per l'ambiente.

Il finanziamento più cospicuo, quasi 6 milioni di euro, andrà al Comune di Reggio Emilia che tra le proposte per intervenire

su smog e traffico prevede il potenziamento della rete di monitoraggio che verifica la qualità dell'aria, la gestione attraverso un sistema satellitare di un servizio di scuolabus e trasporto disabili, l'innovativo trasporto scolastico a chiamata, e l'uso del *bike-sharing*.

Nel progetto è anche contemplato il rinnovo del parco bus dando spazio a mezzi a basso impatto ambientale.

**XIII SETTIMANA DELLA
CULTURA SCIENTIFICA E
TECNOLOGICA**

Si è svolta, dal 31 marzo al 6 aprile, la XIII Settimana della Cultura Scientifica e Tecnologica. Il Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca ha scelto per l'edizione 2003 quattro temi di grande attualità: il ruolo della tecnologia per la riduzione dei rischi da calamità naturali; lo spazio europeo della ricerca, strumenti, obiettivi e programmi per la sua realizzazione; la scienza e la tecnologia per comunicare meglio e di più; dal DNA al Genoma umano, 50 anni di conquiste alla scoperta del mistero della vita.

Quest'ultimo tema ha inteso celebrare quella che viene considerata una tra le più importanti scoperte del secolo scorso, paragonabile forse solo a quella dell'energia atomica, in quanto ha consentito un enorme sviluppo delle conoscenze sulle basi molecolari della vita, le cui applicazioni tecnologiche riguardano ormai capillarmente ogni aspetto dell'esistenza umana.

Promuovere, perciò, la riflessione sulle opportunità ed i benefici per la salute pubblica, che derivano dallo sviluppo delle ricerche sulla genetica, nonché

sui dilemmi che il progresso scientifico pone alla coscienza individuale e collettiva, e anche sulla necessità di una collettività di ricercatori sempre più coesa e interessata a formare e informare, ha rappresentato l'impegno intrapreso da enti, associazioni, scuole, università, fondazioni per la XIII Settimana.

**CONSORZIO PER
L'ATTUAZIONE DEL PNRA**

L'atto costitutivo del Consorzio per il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide è stato firmato il 17 aprile.

Il Consiglio di Amministrazione, costituito da Mario Zucchelli, (ENEA), Presidente, dai rappresentanti dei soci attuali, è formato per il primo anno da Ivo Allegroni, del CNR, Ivo Grimaldi, dell'OGS, Tullio Pepe, dell'INGV; Direttore generale è Antonino Cucinotta (ENEA).

Il Consorzio ha per oggetto l'attuazione del programma nazionale di ricerche in Antartide (PNRA), nel rispetto delle norme previste dal trattato sull'Antartide, attraverso la programmazione, il coordinamento e il controllo di tutte le attività finanziate.

Esso provvede anche alla gestione delle infrastrutture antartiche e nazionali connesse al PNRA, nonché polari in genere, e al coordinamento delle iniziative dei consorziati finalizzate all'esecuzione delle ricerche antartiche e polari.

Al Consorzio possono partecipare Enti, Università, Istituti, Associazioni, Fondazioni, e altri soggetti giuridici pubblici o privati, aventi tra le proprie finalità quelle della ricerca scientifica e tecnologica, e le relative applicazioni.

dall'ENEA

Mitigazione
della desertificazione
in SiciliaAdeguamento sismico
degli edifici

MITIGAZIONE DELLA DESERTIFICAZIONE IN SICILIA

Il 13 marzo si è svolto, presso la Facoltà di Agraria dell'Università di Palermo, il Seminario "Valutazione e mitigazione della desertificazione in Sicilia" per presentare i risultati degli studi condotti dall'ENEA.

Per le sue caratteristiche climatiche e ambientali, la Sicilia è la regione italiana con la maggiore percentuale di territorio a rischio di desertificazione.

L'erosione, la salinizzazione e la siccità costituiscono concrete minacce non solo allo sviluppo ma anche al mantenimento degli attuali livelli di qualità ambientale e produttiva nella Regione. Le attività umane, disbo-

scamento, abbandono delle terre divenute improduttive, urbanizzazione delle coste, spesso concorrono a determinare la sensibilità del territorio siciliano alla desertificazione e forse ne sono proprio le cause principali. Oltre la Sicilia, la desertificazione interessa anche la Sardegna, la Puglia, la Basilicata e la Calabria, per una percentuale totale di territorio pari al 12% di quello nazionale; e lo stesso si verifica per tutti i paesi del bacino del Mediterraneo.

Nell'ambito della Convenzione delle Nazioni Unite per la Lotta alla Siccità e alla Desertificazione (UNCCD) esistono progetti di cooperazione che si prefiggono di affrontare problemi comuni individuando strategie di prevenzione e mitigazione estese all'intera area mediterranea. L'ENEA è impegnato nell'attuazione del Programma di Azione Nazionale promosso dal Ministero dell'Ambiente, in attuazione dell'UNCCD, svolgendo attività di ricerca, di valutazione e di mitigazione della desertificazione al fine di quantificare l'intensità e l'estensione dei fenomeni e individuarne possibili soluzioni.

ADEGUAMENTO SISMICO DEGLI EDIFICI

Nel corso di una giornata dimostrativa organizzata dall'ENEA e dal Servizio Sismico Nazionale della Protezione Civile, a conclusione della campagna sperimentale "Progetto sicuro", il Capo Dipartimento della Protezione Civile, Guido Bertolaso e il Commissario Straordinario dell'ENEA, Carlo Rubbia, hanno assistito in diretta alle prove sperimentali su "tavole vibranti" effettuate il 25 marzo presso i laboratori del Centro Ricerche della Casaccia.

Obiettivo delle prove è stato quello di verificare l'efficacia dei sistemi di protezione sismica applicati a edifici esistenti progettati con criteri non antisismici.

Gli edifici protetti sottoposti a prove sono stati quelli di tre piani, rappresentativi della realtà italiana, con protezioni sismiche consistenti in isolatori in gomma-acciaio e in isolatori a scorrimento con dissipatori-ricentratori di energia in lega a memoria di forma. Le prove, su edifici realizzati in scala 1 a 4, sono consistite in azioni sismiche con movimenti ondulatorio e ondulatorio-sussultorio, fino ad arrivare ad una accelerazione massima della tavola vibrante pari a 1,5 volte quella di gravità. Gli edifici protetti hanno sopportato le sollecitazioni massime (pari a 4 volte il terremoto di Colfiorito del 1997) senza subire danni; lo stesso modello di edificio, che non era stato adeguato sismicamente, è collassato con scosse pari a 0,8 l'accelerazione di gravità.

Una tavola rotonda, conclusiva della giornata, ha evidenziato la stringente attualità del problema di adeguamento sismico delle strutture pubbliche a livello nazionale, che va affrontato insieme alla diffusione di una cultura più generale della sicurezza sismica, vista anche come stimolo all'innovazione ed allo sviluppo economico e come fattore per un'occupazione qualificata. Dal dibattito è emerso che gran parte del patrimonio edilizio italiano situato in zone attualmente classificate sismiche non è stato progettato e costruito con criteri antisismici. Circa la metà degli edifici per abitazione in cemento armato costruiti in zone sismiche è progettato per sostenere solo carichi verticali di esercizio, e si stima una percentuale simile per gli edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici, caserme ecc.).

cronache

INCONTRI

Produzione e riciclo
del vetro

Premio "Oscar Masi"
2002

Giornata Mondiale
dell'Acqua

sero adottato il sistema della raccolta monomateriale.

Se nel 2002 sono state recuperate, con gli attuali sistemi di raccolta, oltre 1 milione di tonnellate di vetro, pari a oltre il 51% del consumo nazionale, con la raccolta monomateriale la percentuale di recupero sarebbe salita a oltre il 57%, raggiungendo un valore molto vicino a quello imposto dall'Unione Europea per il 2008.

Gli industriali del vetro da molto tempo ormai esercitano una forte pressione affinché questo modello di raccolta, il più diffuso in Europa, possa diffondersi capillarmente soprattutto in vista dei possibili scenari europei che potrebbero creare nuovi impegni per l'industria italiana produttrice di vetro cavo.

E in questa ottica, accanto alla raccolta monomateriale, si fa strada, ed è in sperimentazione in una zona di Roma, la raccolta differenziata per colore, già adottata in molti paesi europei, che favorisce le vetrerie produttrici di imballaggi di vetro bianco.

veicolo GAS-DRIVER.

Il veicolo integra, in modo intelligente, tre tipi di innovazioni radicali sviluppate negli anni passati: il cambio robotizzato, il motore a metano, il motogeneratore elettrico.

Il premio ha inteso riconoscere la passione e la capacità dei ricercatori FIAT di integrare fra loro le competenze di diverse aree tecnologiche ed organizzative: motori, veicoli, elettronica, sistemi elettrici, informatica, "project management" e gestione dei costi.

GIORNATA MONDIALE DELL'ACQUA

La gestione sostenibile delle risorse idriche rappresenta una delle più importanti sfide che la comunità internazionale è chiamata ad affrontare.

Il libero accesso ad acqua sicura e pulita è un prerequisito fondamentale per la sopravvivenza, per il benessere e per lo sviluppo socio-economico a livello mondiale.

La Giornata Mondiale dell'Acqua è stata celebrata anche quest'anno, il 21 marzo, in Italia con diverse iniziative.

L'Accademia dei Lincei ha organizzato a Roma un convegno che ha affrontato il tema della "siccità in Italia", come impegno concreto per avviare politiche ambientali adeguate.

Infatti, benché il nostro Paese si collochi tra le nazioni ricche di acqua, le recenti crisi idriche nel Mezzogiorno hanno evidenziato come la irregolarità delle precipitazioni, la dispersione lungo le reti di distribuzione, l'inquinamento delle falde, impediscano a quasi un sesto della nostra popolazione di raggiungere il fabbisogno idrico minimo durante i mesi estivi.

PRODUZIONE E RICICLO DEL VETRO

La raccolta, la differenziazione per materiali e gli obiettivi minimi di riciclo sono stati i temi principali della conferenza dati organizzata, l'8 maggio a Roma, da Assovetro e da Co.Re.Ve., il Consorzio per il recupero del vetro.

La produzione di contenitori in vetro è cresciuta negli ultimi cinque anni di oltre il 9% e si è verificata anche un'apprezzabile crescita del numero di tonnellate di vetro riciclato. Tale crescita, frutto dell'impegno e dell'organizzazione del sistema industriale, avrebbe dato tuttavia risultati più significativi se tutte le amministrazioni comunali aves-

PREMIO "OSCAR MASI" 2002

L'AIRI (Associazione Italiana per la Ricerca Industriale) indice da molti anni il premio "Oscar Masi" per l'innovazione industriale.

Il tema specifico per il 2002 è stato: "Tecnologie energetiche per uno sviluppo sostenibile". A seguito della selezione svolta da un'apposita giuria, composta da rappresentanti del MIUR, MAP, CNR, ENEA, Sanpaolo-IMI, AIRI e da tre docenti universitari di chiara fama del settore, il premio è stato assegnato all'innovazione sviluppata dai ricercatori del Centro Ricerche Fiat (CRF) per il sistema di propulsione del

LETTURE

**Antartide:
ai confini del mondo**

Combustibili legnosi

**World Energy,
Technology and Climate
Policy Outlook**

**Pianificazione e
controllo di gestione**

ANTARTIDE: AI CONFINI DEL MONDO

Dalla immaginazione alla conoscenza

Bruno Marsico
ENEA, dicembre 2002
pagine 86, euro 25,00

Il continente antartico è stato raggiunto dall'uomo poco più di un secolo fa, ma ancora oggi è in gran parte inesplorato e poco conosciuto dalla maggior parte delle persone. L'idea di un Continente Australe ha avuto origine dai filosofi greci, i quali ne immaginarono l'esistenza, necessaria, secondo loro, a bilanciare le masse dei continenti noti dell'emisfero boreale. L'avvicinamento, l'avvistamento e il primo sbarco sono stati poi condizionati dall'evoluzi-

zione delle tecniche di costruzione navale e dei sistemi di navigazione. Queste pagine si propongono di ripercorrere le tappe di tale evoluzione, fino all'avvento dell'aereo e dei mezzi meccanizzati per impieghi esplorativi.

COMBUSTIBILI LEGNOSI

Calore sostenibile per gli edifici pubblici e residenziali. Informazioni tecniche di base

ENEA, 2002
pubblicazioni gratuite

L'Unione Europea, per incentivare l'uso delle fonti rinnovabili di energia, ha fissato una serie di obiettivi specifici a breve e lungo termine. Per quanto riguarda le biomasse, in particolare i combustibili legnosi, l'obiettivo è quello di introdurre, entro il 2003, sistemi di riscaldamento di edifici pubblici e residenziali privati per complessivi 2.000 MW termici.

A tal fine diversi paesi europei, soprattutto dell'arco alpino e scandinavi, hanno promosso il progetto Bioheat, una campagna promozionale parzialmente finanziata dalla Commissione Europea nell'ambito di Altener, il programma di promozione delle fonti energetiche rinnovabili.

Il progetto Bioheat si è concretizzato, tra l'altro, in campagne informative sia attraverso internet (www.bioheat.info), sia attraverso pubblicazioni divulgative destinate, in particolare, ai Comuni e alle Regioni ove si producono combustibili legnosi. L'ENEA, partner italiano del progetto Bioheat, ha realizzato tre opuscoli divulgativi:

- "Combustibili legnosi calore sostenibile per gli edifici pubblici";
- "Combustibili legnosi calore sostenibile per gli edifici residenziali";

- "Riscaldamento dei grandi edifici con combustibili legnosi - Informazioni tecniche di base".

Gli opuscoli sono distribuiti gratuitamente a richiesta degli interessati e sono dedicati a informare sui moderni sistemi di riscaldamento a legna, molto differenti dai vecchi camini o stufe. Le nuove caldaie utilizzano infatti tecnologie pulite, efficienti e comode e bruciano combustibili legnosi appositamente preparati.

Negli opuscoli vengono presentati casi di successo nel nostro Paese e vengono illustrate le condizioni necessarie per ripetere quelle positive esperienze.

WORLD ENERGY, TECHNOLOGY AND CLIMATE POLICY OUTLOOK

WETO 2030
Commissione Europea, 2003,
pagine 138, euro 20

Nel 2030 il consumo mondiale di energia risulterà raddoppiato; tra le fonti energetiche continueranno a predominare i combustibili fossili, in particolare il petrolio, e le emissioni di anidride carbonica saranno quasi due volte superiori al 1990.

Lo studio, effettuato da un consorzio, fra cui ENERDATA e CNRS-IEPE in Francia, il Bureau Fédéral du Plan in Belgio e il Centro comune di ricerca della Commissione a Siviglia, Spagna, mette in discussione l'impatto a lungo termine delle misure ambientali per quanto riguarda la riduzione dei gas ad effetto serra e il più accentuato ricorso alle fonti di energia rinnovabili.

Si prevede che i Paesi in via di sviluppo incideranno in notevole misura sul quadro globale, rappresentando oltre il 50%

