

ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE

ANNO 50 GENNAIO-FEBBRAIO 2004

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 febbraio 2004

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 *Fiore impossibile*, 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 **RAPPORTO ENERGIA E AMBIENTE 2003**
2003 ENERGY AND ENVIRONMENT REPORT
ENEA

Un quadro nazionale tra liberalizzazione dei mercati e sviluppo delle grandi reti di trasmissione, fra efficienza energetica e deficit energetico, fra riequilibrio dei poteri tra Stato e Regioni e sostegno al risparmio energetico e alle fonti rinnovabili, fra necessità di fronteggiare la forte dipendenza energetica e la salvaguardia dell'ambiente

A picture of the nation between market liberalisation and development of the great transmission networks, between energy efficiency and energy deficit, between a redistribution of powers from the central government to the Regions and support for energy saving and renewable sources, between the need to lower energy dependence and the need to protect the environment

25 **COP-9: UN BILANCIO DEI RISULTATI**
COP-9: A REVIEW OF THE RESULTS
Vincenzo Ferrara

La 9ª Conferenza delle Parti aderenti alla Convenzione sui Cambiamenti Climatici, che si è svolta a Milano, ha espresso la volontà della comunità internazionale a non interrompere il cammino per raggiungere un accordo sul Protocollo di Kyoto. È un risultato da non sottovalutare e che riannoda i fili di un difficile accordo internazionale

The 9th Conference of the Parties to the Convention on Climate Change, held in Milan, reaffirmed the international community's determination to go ahead in seeking an agreement on the Kyoto Protocol. This outcome should not be underestimated; it restarts efforts to reach a difficult international accord

31 **L'UNIVERSO COME LO CONOSCIAMO**
THE UNIVERSE AS WE KNOW IT
Giuseppe Baldacchini

La conoscenza dell'universo e delle leggi fisiche che lo governano è progredita con l'applicazione del metodo scientifico sperimentale. Lo testimonia il lungo viaggio attraverso i momenti critici e le scoperte fondamentali che hanno segnato il cammino di tale progresso

Knowledge of the universe and the physical laws that govern it has progressed by use of the experimental scientific method, as can be seen by this journey through the critical moments and the milestones that have marked the long path of this progress

46 **FENOMENI DI TRASPORTO CHE CONTROLLANO LA RIPRODUCIBILITÀ DELLA**
GENERAZIONE DI ECCESSO DI POTENZA IN METALLI DEUTERATI
TRANSPORT PHENOMENA THAT CONTROL THE REPRODUCIBILITY OF THE GENERATION
OF POWER EXCESS IN DEUTERATED METALS
Vittorio Violante, Emilio Santoro, Francesca Sarto, Alberto Rosada, Luigi Capobianco

Un'indagine sulle difficoltà incontrate nella riproducibilità del processo per ottenere elevate concentrazioni di idrogeno (deuterio) in campioni di palladio porta a concludere che si tratta di un problema di scienza dei materiali

A study of the reasons that make it difficult to reproduce the production of high concentrations of hydrogen (deuterium) in palladium samples, leads to the conclusion that it is a problem related to materials science

61 **EMISSIONI DI AMMONIACA: SCENARI E PROSPETTIVE**
AMMONIA EMISSIONS: SCENARIOS AND PROSPECTS
Giovanni Vialetto, Maria Lelli, Vittorio Mazzotta, Riccardo De Lauretis

Le emissioni di sostanze azotate giocano un ruolo rilevante nei fenomeni di acidificazione ed eutrofizzazione. Tra queste sostanze, particolarmente significative sono le emissioni di ammoniaca, provenienti quasi esclusivamente da fonti non energetiche, ed in particolar modo dagli allevamenti zootecnici e dai fertilizzanti. Sarà in grado l'Italia di rispettare il tetto alle emissioni fissato dalle direttive comunitarie e dai trattati internazionali sottoscritti o dovranno essere introdotte ulteriori misure?

Emissions of substances containing nitrogen play an important role in acidisation and eutrophication phenomena. Ammonia emissions are especially significant; they come almost exclusively from non-energy sources, in particular livestock and fertilisers. Will Italy be able to respect the ceiling fixed by EU directives and international treaties, or will further measures have to be introduced?

72 SVILUPPO SOSTENIBILE: UNA SFIDA PER L'INGEGNERIA CIVILE SUSTAINABLE DEVELOPMENT: A CHALLENGE FOR CIVIL ENGINEERING

Paolo Clemente

Lo sviluppo sostenibile condiziona tutti i momenti dell'attività dell'ingegnere, in particolare dell'ingegnere civile. Ovunque nel mondo ci sia necessità di costruire nuovi sistemi di infrastrutture civili, riparare quelle esistenti, salvaguardare strutture di interesse storico e artistico l'ingegnere deve essere pronto a fronteggiare nuove problematiche e sfide

Sustainable development conditions every moment in the work of engineers, especially civil engineers. Wherever in the world there is a need to build new non-military infrastructure, repair existing structures or safeguard those of historic and artistic interest, the engineer has to be prepared to face new problems and challenges

SCIENZA, TECNICA, STORIA & SOCIETÀ

90 MITOLOGIA DELLA TECNICA: PROMETEO, EPIMETEO E PANDORA THE MYTHOLOGY OF TECHNICS: PROMETHEUS, EPIMETHEUS AND PANDORA

a cura di Fausto Borrelli

Due milacinquecento anni fa, Erodoto pensò per primo la storia come "storia di vicende umane", lasciando alle sue spalle un mondo di figure mitiche disorientanti che interferivano in quelle vicende. Due milacinquecento anni dopo, ci troviamo in una situazione analoga, ma specularmente rispetto a quella di Erodoto. Ci troviamo di fronte a un futuro dal quale irrompono presenze tecnoscientifiche assai più disorientanti delle arcaiche figure mitiche, dalle quali spesso le presenze tecnoscientifiche prendono il nome. Nella prima parte di questo articolo è stata immaginata – come ipotesi di lavoro – una storia umana come "intervallo" fra mito e tecnoscienza e sono state evidenziate sorprendenti corrispondenze fra caratteri delle figure mitiche e caratteri dei grandi progetti e prototipi tecnoscientifici. Nella seconda parte, si leggerà il mito di Prometeo, Epimeteo e Pandora sull'origine del fuoco e del sapere tecnico nei testi di Platone, Esiodo ed Eschilo

Herodotus, twenty-five hundred years ago, was the first to think of history as the "remembrance of what men have done," eschewing a world of bewildering mythical figures believed to interfere in human affairs. Twenty-five hundred years later, we find ourselves in a situation that mirrors Herodotus's, but the "technoscientific presences" bursting into our lives from the future seem much more bewildering than the archaic mythical figures for whom "technoscientific presences" are often named. As a working hypothesis, the first part of this article imagined human history as an interval between myth and technoscience, and pointed out some surprising matches between the characters of the mythical figures and those of large-scale technoscientific projects and prototypes. In the second part we shall reread the myth of Prometheus, Epimetheus and Pandora, on the origin of fire and technical knowledge, as told by Plato, Hesiod and Aeschylus

NOTE TECNICHE

97 CRITERI DI MISURA E INDICATORI PER L'ECONOMIA DELL'INNOVAZIONE MEASURES AND INDICATORS FOR THE INNOVATION ECONOMICS

Daniela Palma, Gaetano Coletta, Alessandro Zini

CRONACHE

99 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

- dal Mondo
 - Un anno di problemi ambientali 99
 - Stazione artica cinese 99
 - Rinviata la decisione su ITER 99
 - Egitto e sviluppo sostenibile 99
- dall'Unione Europea
 - Europa e ricerca di base 100
 - Aumentano le lauree in scienza e ingegneria 100
 - Premi Cartesio: invito a presentare proposte 100
- dall'Italia
 - Investimenti per la ricerca 101
 - Collaborazione Canada-Bolzano 101
 - La Cartha di Orvieto 101
- dall'ENEA
 - Nominato il nuovo CDA 102
 - Tecnologie innovative per l'arte 102
 - Strumenti on line per PMI 102
- Incontri
 - Master sulle energie rinnovabili 103
 - L'UE premia Varese Ligure 103
 - Il futuro a idrogeno 103
- Lecture
 - Metodo CLEAR 104
 - Solar Energy Houses 104

Rapporto Energia e Ambiente 2003

ENEA
Unità di Agenzia
per lo Sviluppo sostenibile
Advisor

primo piano

Un quadro nazionale tra liberalizzazione dei mercati e sviluppo delle grandi reti di trasmissione, fra efficienza energetica e deficit energetico, fra riequilibrio dei poteri tra Stato e Regioni e sostegno al risparmio energetico e alle fonti rinnovabili, fra necessità di fronteggiare la forte dipendenza energetica e la salvaguardia dell'ambiente

2003 energy and environment report

A picture of the nation between market liberalisation and development of the great transmission networks, between energy efficiency and energy deficit, between a redistribution of powers from the central government to the Regions and support for energy saving and renewable sources, between the need to lower energy dependence and the need to protect the environment

Il Rapporto 2003, presentato il 15 gennaio a Roma presso il CNEL e del quale pubblichiamo il compendio, prosegue il lavoro di analisi e di informazione annuale sulla situazione energetica nazionale e regionale avviato ormai da alcuni anni.

Nella sua dettagliata esposizione del documento, il Direttore Generale dell'ENEA Gianni Lelli ha messo in risalto l'incremento della domanda di energia elettrica registratosi nel 2003 rispetto al 2002; confermando una tendenza recente, la crescita dei consumi di elettricità è da attribuire soprattutto alla crescita dei consumi del settore residenziale e solo in minima parte ai consumi industriali. Nel 2003, a fronte di un incremento della domanda di energia elettrica pari al 2,9%, la variazione della produzione nazionale è stata superiore a quella delle importazioni nette, incidendo in maniera positiva sul grado di dipendenza dall'estero del settore elettrico. La dipendenza energetica complessiva si è tuttavia accresciuta superando il valore dell'84% contro una media europea del 54%.

L'aumento della domanda energetica – ha poi sostenuto Lelli – si è riflessa sull'impatto ambientale, dove l'Italia produce il 14% delle emissioni di CO₂ del sistema energetico europeo, al terzo posto tra i paesi membri, con responsabilità più alte per il settore dei trasporti e per quello della produzione e trasformazione dell'energia.

Nell'attuale evoluzione del sistema economico ed energetico un significativo sviluppo tecnologico dovrebbe rappresentare un fattore di competitività e un'importante opportunità per il Paese. Ma l'Italia è rimasta indietro rispetto agli altri paesi dell'OCSE per intensità di investimenti in ricerca rispetto al PIL (l'1,1% per il nostro Paese, contro una media OCSE doppia e dell'UE dell'1,9%); e l'andamento della spesa governativa per ricerca e sviluppo nel settore energetico vede dal 1990 ad oggi una riduzione pari a circa il 50%.

Uno scenario non troppo brillante, quello italiano, sul quale sono intervenuti con puntuali contributi i Direttori Generali del Ministero per le Attività Produttive Sergio Garribba, e del Ministero dell'Ambiente Corrado Clini, il Presidente dell'Autorità per l'Energia Alessandro Ortis, e l'Assessore della Regione Toscana Tommaso Franci.

Il quadro di riferimento internazionale

Economia

Nel corso del 2002, l'economia mondiale ha registrato una crescita pari al 3% su base annua, di poco inferiore alla media dell'ultimo ventennio e superiore al valore del 2,3% del 2001. Essa è stata condizionata dall'evoluzione dell'economia degli Stati Uniti, dove le incertezze sull'evoluzione della situazione economica hanno indotto la *Federal Reserve* a ridurre ulteriormente il tasso ufficiale di sconto. I tassi d'interesse a breve termine sono risultati negativi o prossimi allo zero in termini reali. Parallelamente, il Congresso statunitense ha approvato l'adozione di un programma di sgravi fiscali e di incrementi di spesa per i prossimi dieci anni. Tali misure hanno contribuito a rafforzare la ripresa iniziata nel quarto trimestre del 2001. Il saldo del bilancio federale è però peggiorato risultando, a settembre 2002, negativo per un ammontare pari all'1,5% del PIL. Il Congresso degli Stati Uniti stima che il bilancio possa rimanere in disavanzo sino al 2007, facendo registrare un passivo complessivo superiore ai 400 miliardi di dollari nel decennio 2002-2011. La crescita media annua del PIL è stata pari al 2,4% a fronte dello 0,3% del 2001, ma si è progressivamente indebolita nel corso dell'anno a causa dell'andamento negativo dei mercati finanziari e dei rinnovati timori di azioni terroristiche.

La ripresa economica è stata trainata dall'incremento dei consumi favoriti dall'andamento

dei salari reali, dagli sgravi fiscali e dalla riduzione dei tassi di interesse che ha stimolato l'attività di rinegoziazione dei mutui ipotecari.

L'accresciuto divario tra il tasso di crescita economica degli Stati Uniti e quello dei principali partner commerciali, ha determinato un ulteriore peggioramento dei conti con l'estero degli Stati Uniti. La bilancia delle partite correnti, in particolare, ha fatto registrare un aggravio del disavanzo pari al 4,8% del PIL nel 2002. L'entità del disavanzo di parte corrente e le incertezze sulla ripresa dell'economia incidono, nella valutazione dei mercati, sul deprezzamento del dollaro rispetto alle altre principali valute.

L'economia giapponese, dopo la recessione del 2001, ha fatto registrare una debole ripresa innescata dalla forte accelerazione delle esportazioni (+8,1% nel 2002, -6,1% nel 2001). Il PIL è però aumentato solamente dello 0,3% a causa della forte contrazione della componente interna della domanda. Nel corso del 2002 si è infatti accentuato il calo dell'occupazione, soprattutto nelle imprese di grandi dimensioni; nonostante la riduzione dei prezzi al consumo si è assistito ad una contrazione sensibile dei salari reali che ha compresso ulteriormente il reddito disponibile delle famiglie e determinato un rallentamento nella dinamica dei consumi.

Nell'area dell'euro il prodotto interno lordo nel 2002 è aumentato dello 0,8% (1,4% nel 2001). La componente estera della domanda aggregata ha contribuito a sostenere la crescita in presenza di una caduta degli investimenti e del ristagno dei consumi delle famiglie, questi ultimi frenati dal peggioramento delle condizioni del mercato del lavoro. Nel corso del 2002, l'inflazione al consumo è diminuita dal 2,5% al 2%. L'attenuato rischio inflazionistico e la necessità di rilanciare la componente interna della domanda ha indotto, nel dicembre 2002, la Banca Centrale Europea a ridurre di mezzo punto percentuale il tasso sulle principali operazioni di rifinanziamento che è stato fissato al 2,75%. Una riduzione ulteriore è stata effettuata nel marzo 2003 con la fissazione del tasso al 2,50%.

Le politiche fiscali sono state al contrario molto meno accomodanti. Gli elevati livelli dei disavanzi pubblici nei principali paesi dell'area e gli stretti vincoli imposti dal *Patto di stabilità* non hanno lasciato molti margini di manovra per l'adozione di politiche fiscali espansive.

Nel corso dell'anno 2002 si è registrato un ristagno della produzione soprattutto in Italia e Germania; a partire dal quarto trimestre la contrazione dell'attività economica ha interessato anche la Francia. Sin dal 1995, Italia e Germania registrano livelli di crescita inferiori alla media europea: la debolezza della domanda interna caratterizza da alcuni anni l'economia tedesca, laddove l'Italia soffre di una progressiva perdita di competitività. Il ristagno della domanda interna tedesca, soprattutto della componente che riguarda i consumi delle famiglie, trova origine nello sforzo finanziario seguito al processo di unificazione. Gli aiuti per la ristrutturazione dell'apparato produttivo delle regioni orientali hanno determinato un forte deterioramento delle finanze pubbliche, solo parzialmente compensato dall'inasprimento della pressione fiscale. Negli anni più recenti, le aspettative di riforma dello Stato sociale hanno frenato i consumi delle famiglie. Il trasferimento di molte attività produttive nei paesi dell'Europa centro-orientale ha inoltre ostacolato la crescita delle regioni orientali e comportato un rallentamento degli investimenti produttivi. La crescita è stata trainata dal buon andamento delle esportazioni, dirette per i tre quarti verso altri paesi europei. Le importazioni sono invece sensibilmente calate, influenzando negativamente le esportazioni degli altri paesi dell'Unione: nel 2002 le esportazioni dell'Italia verso la Germania sono calate del 10%. La perdita di competitività sui mercati internazionali è uno dei dati salienti relativi all'economia italiana, la cui quota di esportazioni sul totale mondiale si è ridotta, tra il 1995 e il 2002, del 20%. L'andamento delle esportazioni risente della congiuntura internazionale, ma anche di alcune caratteristiche strutturali del sistema produttivo italiano, quali il ritardo

***L'Italia soffre
di una
progressiva
perdita di
competitività***

nell'introduzione di nuove tecnologie, la specializzazione settoriale e le difficoltà di innovazione delle imprese.

Sull'evoluzione dell'economia mondiale del 2003 hanno gravato soprattutto le incertezze relative agli sviluppi della situazione geopolitica. Nel primo trimestre, il PIL è aumentato dell'1,6% rispetto al corrispondente trimestre dell'anno precedente. La situazione di incertezza ha determinato un ristagno degli investimenti e la diminuzione dell'acquisto di beni durevoli. Rispetto al trimestre precedente sono invece aumentati in misura consistente gli investimenti nelle nuove tecnologie informatiche e della comunicazione. I primi elementi relativi al secondo trimestre fanno registrare ritmi di crescita del PIL e dell'occupazione inferiori alle attese. Il miglioramento del clima di fiducia delle famiglie, il permanere di bassi tassi di interesse e la diminuzione del prezzo del petrolio inducono a prevedere una ripresa dell'occupazione e degli investimenti tali da garantire tassi di crescita più elevati.

Le previsioni del FMI dell'aprile 2003 indicano, in presenza di livelli del prezzo del petrolio prossimi ai 25 dollari al barile, un tasso di sviluppo del commercio mondiale del 4,3% e una crescita del PIL del 3,2%. I modesti tassi di crescita stimati sono da imputare soprattutto all'andamento dell'economia nel primo semestre. Dal secondo semestre si prevede un'accelerazione soprattutto grazie all'effetto traino svolto dall'economia degli Stati Uniti. In media annua si prevede per gli USA una crescita del PIL del 2,2%, con una accelerazione della crescita che nel quarto trimestre potrebbe risultare del 3,5% più elevata rispetto al corrispondente periodo del 2002. I problemi strutturali dell'economia giapponese inducono a valutazioni pessimistiche circa le prospettive di ripresa economica. Le previsioni del FMI stimano infatti una crescita del PIL pari a circa lo 0,8%.

Nell'area dell'euro si prevede nel 2003 una crescita del PIL pari all'1,1%, di poco più elevata della crescita registrata nel 2002. Le previsioni sull'andamento dei prezzi indicano una stima per l'inflazione al consumo pari all'1,8% nel 2003 e all'1,6% nel 2004. Tali aspettative hanno indotto la Banca Centrale Europea a intervenire in relazione agli sviluppi dell'economia dell'area: il tasso ufficiale di sconto, già ridotto dello 0,5% in dicembre, è stato ulteriormente ridotto dello 0,25% il 6 marzo 2003 e il 5 giugno 2003. La decisione di fissare il costo del denaro al 2%, il livello più basso dal 1948, è stata determinata anche dalla necessità di fronteggiare gli effetti dell'apprezzamento dell'euro nei confronti del dollaro (24% in 12 mesi).

Nonostante la negativa influenza dell'epidemia di polmonite acuta che ha colpito molti paesi dell'area, si stima che la crescita economica possa mantenersi a livelli prossimi al 6% negli altri paesi dell'Asia, Cina e India incluse. Anche in America Latina, grazie alla contenuta ripresa dell'attività produttiva in Brasile e Argentina, il PIL potrebbe tornare a crescere nuovamente seppur a livelli prossimi all'1,5%.

Energia

Nel 2002, i consumi mondiali di energia primaria sono aumentati del 2,6% rispetto all'anno precedente: tasso significativamente superiore a quello medio del decennio precedente e di tre volte e mezzo più elevato rispetto a quello del 2001 (tabella 1). L'andamento dipende fondamentalmente dalla ripresa economica dell'area asiatica e, in misura minore, dal rilancio dei consumi energetici negli Stati Uniti dopo il crollo dell'anno precedente.

Un'analisi della domanda per fonti (tabella 2), conferma che il petrolio rappresenta la fonte energetica più utilizzata a livello mondiale, con una quota pari a circa il 38% dei consumi primari di energia. Nel 2002 la domanda mondiale di petrolio è rimasta stabile sui livelli dell'anno precedente, anche se l'analisi dei consumi evidenzia andamenti diversi per le diverse aree geografiche. La produzione mondiale di petrolio è calata dello 0,7% rispetto al 2001, passando da 74,3 milioni di barili/giorno (74,3 Mb/g) a 73,9 Mb/g. La contrazione ha interessato principalmente i paesi OPEC, che hanno ridotto la produzione di 1,9 Mb/g.

i consumi mondiali di energia primaria sono aumentati

Tabella 1

Consumi di energia primaria per area geografica. Anni 2001 e 2002 (Mtep)

	2001	2002	Variazione 2002/2001 (%)	Quota 2002 (%)
Nord America	2670,5	2715,4	1,7	28,9
America Centrale e Meridionale	448,7	448,2	-0,1	4,8
Europa Occidentale*	1774,5	1757,8	-0,9	18,7
Ex URSS, economie in transizione**, Turchia	1070,8	1071,7	0,1	11,4
Medio Oriente	396,5	403,1	1,6	4,3
Africa	284,7	291,0	2,2	3,1
Asia e Pacifico	2519,6	2717,8	7,9	28,9
Mondo	9165,3	9405,0	2,6	100,0
di cui: Unione Europea (15)	1483,7	1468,9	-1,0	15,6
OECD	5314,0	5346,1	0,6	56,8
Ex URSS	944,6	946,1	0,2	10,1

* Include i paesi candidati all'ingresso nella UE

** Bulgaria, Romaniaa

Fonte: elaborazioni FEEM su dati BP

Il carbone soddisfa circa il 26% del fabbisogno energetico complessivo, rappresentando la seconda fonte di energia a livello mondiale. Scarsamente diffuso in Medio Oriente e in America centrale e meridionale, il carbone copre più del 50% del fabbisogno energetico complessivo di alcuni paesi (Sud Africa, Cina, India e Polonia). Una notevole diffusione si registra anche negli Stati Uniti e nei paesi dell'ex URSS. Nel 2002 i consumi di carbone hanno fatto registrare un marcato incremento rispetto all'anno precedente (circa il 7%); il *trend* di crescita è più elevato rispetto a quello della domanda totale di energia e in controtendenza rispetto all'andamento calante della domanda negli anni novanta. A fronte dell'incremento della domanda mondiale, anche la produzione è cresciuta per il secondo anno consecutivo ad un tasso superiore al 5%. L'incremento del 6,2% rispetto al 2001 è il risultato di una forte crescita della produzione asiatica (+17,8%), in particolare cinese (+28,3%), e di una drastica contrazione della produzione europea, statunitense e canadese.

Il gas naturale copre poco più del 24% del fabbisogno energetico mondiale e rappresenta la terza fonte per ordine di importanza, con livelli di consumo ormai vicini a quelli del carbone. Nel corso del 2002 i consumi mondiali sono cresciuti del 2,8%, un tasso di crescita superiore a quello dell'ultimo decennio (2,1%) ma minore del tasso di crescita del PIL (3%). Il rallentamento è stato particolarmente evidente nell'Unione Europea, dove l'anda-

Tabella 2

Energia primaria: consumo per fonti e aree geografiche. Anno 2002 (Mtep)

	Petrolio	Gas naturale	Carbone	Nucleare	Idro-elettrico	Totale	VARIAZIONE 2002/2001 (%)					
							Petrolio	Gas naturale	Carbone	Nucleare	Idro-elettrico	Totale
Nord America	1064,9	711,2	591,5	205,0	142,4	2715,4	-0,3	3,4	1,5	1,2	10,4	1,7
America Centrale e Meridionale	214,8	88,2	17,8	4,7	122,7	448,2	-1,8	0,2	-8,7	-7,8	4,7	-0,1
Europa ed Eurasia	925,2	939,5	506,1	280,0	178,9	2829,5	-0,6	2,0	-3,3	1,4	-8,2	-0,6
Medio Oriente	207,4	185,1	8,4	-	1,9	403,1	0,5	2,5	5,0	-	26,7	1,7
Africa	118,6	60,7	90,6	2,9	18,5	291,0	1,8	3,4	1,6	11,5	3,4	2,2
Asia e Pacifico	991,6	297,3	1183,5	118,0	127,7	2717,8	1,5	4,8	16,0	3,0	2,8	7,9
Mondo	3522,5	2282,0	2397,9	610,6	592,1	9405,0	0,2	2,8	6,9	1,6	1,3	2,6
di cui: UE (15)	634,4	347,2	216,8	201,7	69,2	1468,9	-0,8	0,8	0,6	-0,1	-16,1	-1,0
ex URSS	168,3	511,9	160,5	53,4	52,0	946,1	0,5	2,8	-7,8	4,3	-3,9	0,2

Fonte: elaborazioni FEEM su dati BP

mento dei prezzi relativi ha favorito il ricorso al carbone nel settore della generazione elettrica. Nel corso del 2002 la produzione di gas naturale è aumentata dell'1,4% rispetto al 2001: a fronte di un incremento notevole della produzione dell'ex Unione Sovietica, dei paesi asiatici (Indonesia e Malaysia in particolare), di quelli africani (Algeria in primo luogo), dei produttori mediorientali (Arabia e Qatar) e della Norvegia, si è registrata una riduzione dell'offerta dell'Unione Europea e degli Stati Uniti.

La domanda di energia primaria dei paesi dell'Unione Europea equivale al 15,6% del totale mondiale. La composizione per fonti mette in luce la grande importanza rivestita da petrolio (42%), gas naturale (24%), energia nucleare (14%) e carbone (14%). La parte restante del fabbisogno (6%) è coperta per mezzo degli apporti idroelettrici. Nel corso del 2002 i paesi dell'Unione Europea hanno diminuito la propria domanda di energia primaria rispetto all'anno precedente (1%). La stagnazione dell'economia e l'incentivazione di misure volte a favorire l'efficienza energetica hanno influito sulla domanda complessiva. In lieve controtendenza rispetto all'evoluzione degli anni più recenti, si è registrato un arretramento della domanda di gas naturale a favore del carbone.

L'intensità energetica, ovvero l'energia necessaria all'unità di prodotto lordo, è nel complesso diminuita in tutte le aree economiche, con l'eccezione della zona asiatica e dell'America centrale e meridionale.

Il problema della diversificazione degli approvvigionamenti appare particolarmente grave per quanto riguarda l'Unione Europea in cui, nonostante la crescita moderata, il grado di dipendenza dall'estero potrebbe passare dal 50% del 2002 a più del 70% nel 2030. La necessità di diversificare gli approvvigionamenti, riguarderebbe in misura maggiore il settore del gas naturale rispetto a quello petrolifero. Per quest'ultimo settore, infatti, coesisterebbero forniture dal Medio Oriente, dal Nord Africa e dai paesi dell'ex Unione Sovietica. La penetrazione del gas naturale, soprattutto nel settore della generazione elettrica, determinerebbe un incremento di domanda cospicuo, soddisfatto solo per una quota marginale dalle importazioni di gas africano e norvegese. La disponibilità di gas iraniano e del Qatar potrebbe scontrarsi con la necessità di nuove infrastrutture; discorso analogo vale per il mercato di gas naturale liquefatto. Sebbene sia stata programmata la costruzione di gasdotti per rifornire la Cina settentrionale e le isole settentrionali del Giappone, l'Unione Europea rimarrebbe il principale acquirente di gas dalla Russia e quest'ultima diverrebbe il più importante fornitore di energia per l'Unione Europea.

Una politica finalizzata a garantire una maggiore sicurezza degli approvvigionamenti energetici deve non solo essere rivolta ad una riduzione della propria dipendenza dall'estero ma, soprattutto, alla riduzione dei rischi connessi con quest'ultima.

Diversificazione delle fonti di approvvigionamento, sviluppo delle fonti rinnovabili e sostegno all'efficienza energetica e all'uso razionale costituiscono i pilastri della strategia europea per migliorare la sicurezza degli approvvigionamenti in un contesto sostenibile.

Ambiente

Le politiche ambientali riferite all'utilizzo delle fonti energetiche seguono due filoni principali: gli accordi internazionali per la riduzione delle emissioni e la promozione delle fonti rinnovabili. Negli ultimi mesi l'Unione Europea ha assunto un ruolo propositivo su entrambi i fronti. In attesa dell'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto, legata alla ratifica da parte del Parlamento russo, l'Unione Europea ha adottato in via definitiva la direttiva sull'Emission Trading e avanzato una proposta di direttiva sui crediti derivanti dai meccanismi flessibili. I due provvedimenti, funzionali al taglio dei costi di riduzione delle emissioni, costituiscono un importante tassello nella strategia europea di contenimento dei gas serra.

*l'intensità
energetica
è nel
complesso
diminuita*

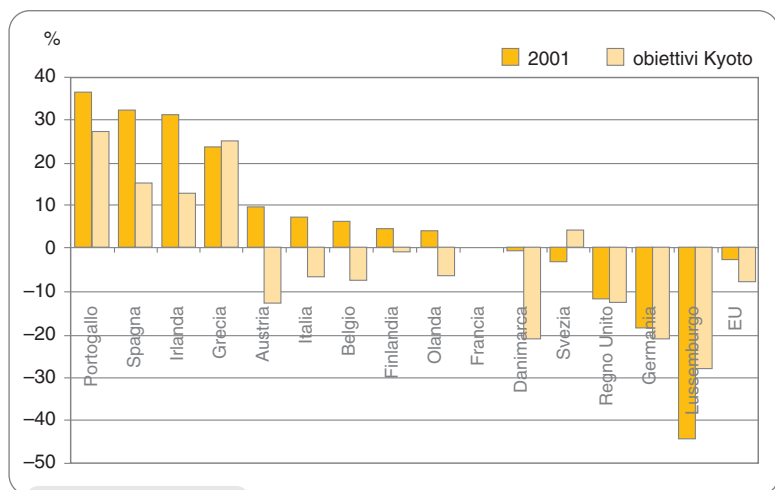


Figura 1
Emissioni di gas serra nei paesi dell'Unione Europea: dati 2001 e obiettivi di Kyoto

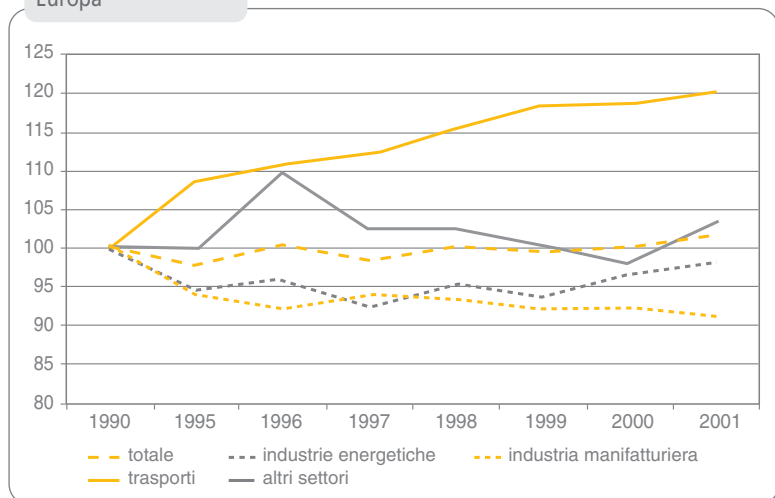
Fonte: EEA

(settembre 2002), i paesi partecipanti hanno evidenziato la necessità di incrementare urgentemente la quota di rinnovabili sull'offerta totale di energia. Su iniziativa dell'Unione Europea e dei suoi Stati membri è stata istituita la "Johannesburg Renewable Energy Coalition" (JREC), una coalizione di 80 paesi impegnata a promuovere le fonti rinnovabili attraverso la fissazione di obiettivi specifici e calendari di attuazione.

Nell'Unione Europea tra il 1990 ed il 2001 le emissioni di gas serra sono complessivamente diminuite di circa il 2,3% (figura 1). L'andamento delle emissioni nei diversi Stati membri non appare tuttavia omogeneo. Germania e Regno Unito, i maggiori responsabili delle emissioni complessive dell'UE, sono i paesi che hanno ottenuto i migliori risultati (grazie soprattutto alla sostituzione del carbone con il gas naturale) mentre l'Italia, con emissioni crescenti dal 1990 ad oggi, appare lontana dall'obiettivo di riduzione assunto formalmente.

A livello europeo, per quanto riguarda l'andamento settoriale, si osserva che nel periodo 1990-2001 le emissioni di CO₂ provenienti dal settore di produzione dell'energia mostrano un *trend* al di sotto del valore 1990 (figura 2). Il maggior contributo a tale riduzione viene dalla generazione elettrica ed è dovuto alla sostituzione di carbone e lignite con gas naturale. Al contrario, il settore dei trasporti presenta una netta tendenza alla crescita delle emissioni di anidride carbonica.

Figura 2
Contributo di alcuni settori di utilizzo alle emissioni di CO₂ in Europa



Fonte: EEA

Lo sviluppo delle fonti rinnovabili è, in gran parte, connesso alle politiche internazionali per la riduzione delle emissioni. Molti piani varati dagli Stati membri per l'attuazione del Protocollo di Kyoto considerano tale opzione come una delle più importanti tra quelle possibili. In Italia è in corso la valutazione dello stato di attuazione delle politiche richiamate nella delibera CIPE 123/2002 che comprendono, tra l'altro, un ulteriore sviluppo della produzione di energia da fonti rinnovabili. L'importanza dello sviluppo delle fonti rinnovabili è legata anche ai problemi di diversificazione dell'offerta energetica e di sicurezza degli approvvigionamenti. Al Summit Internazionale di Johannesburg

Italia

Economia

L'economia italiana ha mostrato, nel corso del 2002, una flessione più marcata che nel resto dell'area dell'euro soprattutto a causa di una serie di fenomeni strutturali. Il PIL è cresciuto in media dello 0,4% a fronte di una crescita nell'area pari allo 0,8%.

Le stime preliminari del PIL relative al primo trimestre 2003 mostrano una diminuzione dello 0,1% rispetto al trimestre precedente, causata soprattutto dalla contrazione di attività nell'industria manifatturiera. I dati sulla

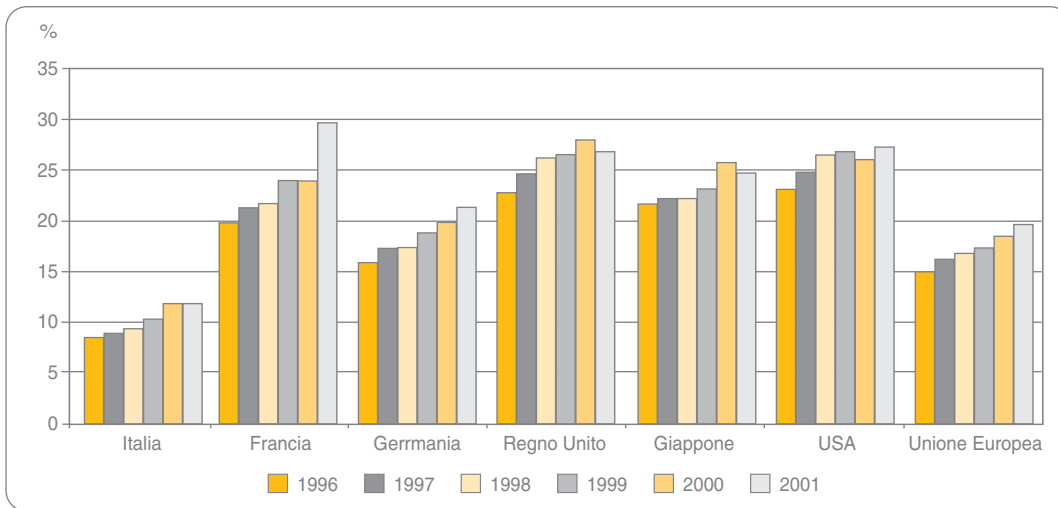


Figura 3
Evoluzione della quota *high-tech* sul totale delle esportazioni manifatturiere in vari paesi OCSE. Anni 1996-2001 (%)

Fonte: Osservatorio ENEA sull'Italia nella competizione tecnologica internazionale

produzione industriale del secondo trimestre dello stesso anno evidenziano una sostanziale stagnazione dell'indice sui bassi livelli del primo trimestre 2003, e le stime relative al PIL confermano, per il secondo trimestre, il dato del primo trimestre. Le prospettive per la seconda parte dell'anno appaiono migliori: le aspettative di ripresa nel settore delle costruzioni e i dati forniti dall'indice anticipatore del ciclo, evidenziano una ripresa trainata dal settore estero e dalla crescita della spesa delle famiglie. Il processo di accumulazione, al contrario, scontrerebbe l'acquisto anticipato dei beni di investimento effettuato lo scorso anno, in concomitanza con le scadenze relativi agli incentivi fiscali.

Il calo delle esportazioni e il rallentamento della domanda interna avevano indebolito la congiuntura economica già nella seconda metà del 2001. Investimenti, consumi ed esportazioni hanno continuato a diminuire nel primo semestre del 2002; nel secondo semestre si è assistito ad una graduale ripresa degli investimenti, favorita dalla scadenza delle agevolazioni fiscali; nello stesso periodo anche i consumi e le esportazioni hanno fatto registrare una modesta crescita.

Tra il 1996 e il 1999 la quota italiana di esportazioni sul totale mondiale è calata dal 4,8% al 4,3%; nello stesso periodo le quote di esportazioni di Francia, Germania e Spagna sono rimaste sostanzialmente stabili al 5,5%, 10% e 2%, rispettivamente. Negli ultimi tre anni la quota italiana si è ridotta ulteriormente al 3,7%. Complessivamente, tra il 1996 e il 2002, la perdita di competitività per l'Italia è stata marcata. Il nostro Paese ha infatti registrato una diminuzione della propria quota di esportazioni pari al 23%. Le quote di Spagna e Germania sono invece diminuite del 7% circa, quella della Francia del 13%. La progressiva perdita di competitività italiana è alimentata da molteplici elementi. In primo luogo, la scarsa presenza di merci italiane nei settori tecnologicamente avanzati espone i beni di esportazione italiani alla concorrenza anche dei paesi di recente industrializzazione.

In questo scenario assume particolare rilievo il recupero dei paesi dell'Unione Europea, avviatosi già ad inizio decennio, rispetto alla forte avanzata degli Stati Uniti, con una incidenza del commercio di prodotti *high-tech* sul totale dei manufatti pari a circa il 20%, contro valori di poco superiori al 25% dell'economia americana. L'Italia continua ad attestarsi intorno al 10% con un crescente divario di competitività, in un contesto internazionale nel quale l'alta tecnologia acquisisce un'importanza relativamente maggiore.

Il restringimento delle possibilità di operare svalutazioni competitive rende le esportazioni italiane vulnerabili all'andamento dei prezzi di offerta, necessariamente legati ai costi di produzione. La limitata introduzione di tecnologie digitali nei processi produttivi e organiz-

zativi e la scarsa presenza nelle produzioni tecnologicamente avanzate, sono da ricondurre anche al limitato ammontare delle risorse che in Italia sono destinate all'innovazione e alla ricerca, sia dal settore pubblico sia dalle imprese. In particolare, le imprese giapponesi e statunitensi investono in ricerca più del 2% del prodotto interno lordo, una quota quattro volte superiore a quella italiana. Valori di poco inferiori caratterizzano le spese di Germania Francia e Regno Unito. La bassa propensione innovativa delle imprese italiane è influenzata da un modello di specializzazione che privilegia produzioni a basso contenuto tecnologico.

Domanda di energia

Nel 2002, la fase di stagnazione dell'economia e le condizioni climatiche favorevoli hanno determinato una riduzione della domanda complessiva di energia primaria: il consumo interno di energia si è portato infatti a 186,7 Mtep, in calo dello 0,6% rispetto al 2001. La contrazione dei consumi energetici ha determinato una riduzione dell'intensità energetica, passata da 181,6 a 179,8 tep per milione di euro₁₉₉₅. I primi dati parziali relativi al 2003 evidenziano un incremento del 2,4% rispetto all'anno precedente della domanda complessiva di energia. Il consumo complessivo di prodotti petroliferi nel 2002 è stato pari a 90,9 Mtep, con un calo dello 0,3% rispetto all'anno precedente. Nei primi mesi del 2003 la domanda totale di prodotti petroliferi ha presentato un incremento tendenziale del 2,4%.

La domanda interna di gas naturale ha subito nel 2002 una flessione dello 0,7%, attestandosi a 58,1 Mtep. Nel 2003 invece, i consumi di gas naturale hanno fatto registrare un incremento rispetto all'anno precedente soprattutto nel settore residenziale e nella generazione termoelettrica.

Rispetto al 2001, i consumi di carbone sono aumentati nel 2002 del 3,5%, raggiungendo i 14,2 Mtep. Nel 2003 i consumi di combustibili solidi sono aumentati in maniera particolarmente marcata nel corso dei mesi estivi, in relazione all'aumento della produzione termoelettrica in prossimità del picco estivo di domanda.

Nel 2002 la richiesta totale di energia elettrica ha raggiunto i 310,7 TWh, con un incremento dell'1,9% rispetto al 2001. Seppur inferiore all'incremento registrato nel 2001 (2,3%), il dato del 2002 appare significativo in relazione alla fase di stagnazione dell'economia del Paese. L'intensità elettrica ha raggiunto i 299 kWh per milione di euro₁₉₉₅, evidenziando un tasso di crescita superiore a quello del 2001 e in linea con quello del triennio 1997-2000. La figura 4 mostra gli andamenti delle intensità energetica ed elettrica nel periodo 1995-2002.

Altri due fenomeni di rilievo hanno caratterizzato il 2002: la punta di domanda sulla rete elettrica nazionale (52.590 megawatt) registrata il 12 dicembre, superiore dell'1,2% rispetto all'anno precedente, e il nuovo picco di domanda nel periodo estivo, verificatosi il 21 giugno, pari a 50.974 megawatt e superiore del 4,8% rispetto al 2001¹. Nel 2003 le punte

Tabella 3
Consumo interno lordo di energia, per fonte. Anni 1995-2002

Fonte	Energia primaria (Mtep)								Variazione (%)	
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002*	02/95	02/01
Combustibili solidi	12,5	11,3	11,7	12,1	12,2	12,8	13,7	14,2	13,6	3,5
Gas naturale	44,8	46,4	47,8	51,5	56,0	58,4	58,5	58,1	29,7	-0,7
Prodotti petroliferi	95,7	94,3	94,9	94,9	92,4	91,3	91,2	90,9	-5,0	-0,3
Fonti rinnovabili	10,2	11,2	11,2	11,3	12,9	12,9	13,8	12,4	21,6	-10,1
Importazioni nette energia elettrica	8,4	8,4	8,9	9,4	9,2	9,8	10,6	11,1	32,1	4,3
Totale	171,6	171,6	174,5	179,2	182,7	185,2	187,8	186,7	8,8	-0,6

* Dati provvisori

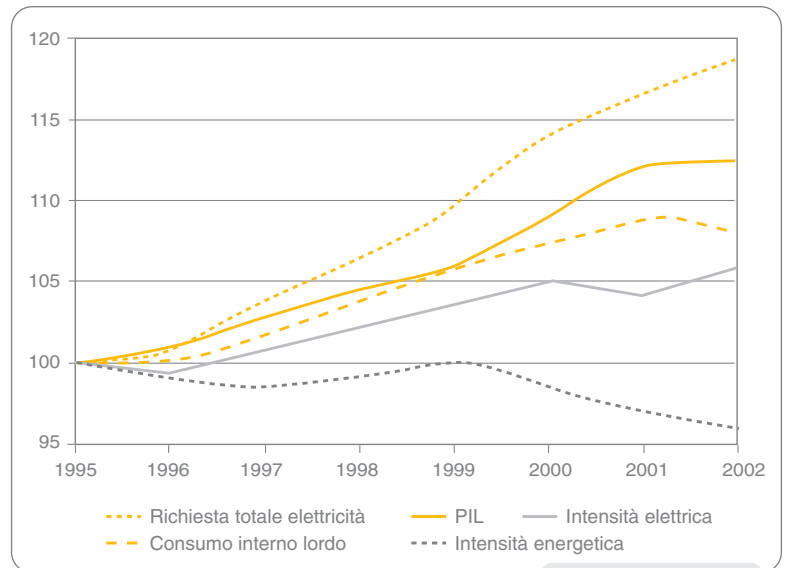
Fonte: elaborazioni ENEA su dati MAP

¹ GRTN, Rapporto sulle Attività 2002.

di domanda sono ancora aumentate negli stessi periodi, con il nuovo record estivo, il 17 luglio, del valore di 53.105 MW ed il nuovo record storico, il 10 dicembre, del valore di 53.400 MW (+1,5% rispetto a quello dell'anno precedente).

Gli impieghi finali di energia sono calati dell'1,1%, passando dai 137,1 Mtep del 2001 ai 135,6 Mtep del 2002 (tabella 4). Nel corso dell'anno si è registrata una flessione dei consumi del settore industriale, da 39,8 Mtep a 39,5 Mtep, mentre la quota riferibile allo stesso settore è rimasta stabile al 29,1%. I consumi del settore trasporti, poco più del 31% del totale nazionale, sono rimasti praticamente stabili attorno ai 42,5 Mtep. Il settore residenziale e terziario copre poco meno del 30% dei consumi. In termini assoluti i consumi sono diminuiti dell'1,8%, da 41,2 Mtep a 40,5 Mtep.

Il settore primario nel 2002 ha utilizzato il 2,5% degli impieghi finali, con un consumo di 3,4 Mtep, pari a quello dell'anno precedente. Gli usi non energetici sono diminuiti del 9,3%, passando da 7,4 Mtep a 6,7 Mtep.



Fonte: elaborazioni ENEA su dati MAP

Figura 4
Intensità energetica e intensità elettrica (numeri indice 1995 = 100)

	Combustibili solidi	Gas naturale	Prodotti petroliferi	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale
Produzione	0,4	12,0	5,5	11,9		29,8
Importazione	13,6	48,9	107,4	0,5	11,3	181,7
Esportazione	0,1		21,0		0,2	21,3
Variazione scorte	-0,3	2,8	1,0			3,5
Consumo interno lordo	14,2	58,1	90,9	12,4	11,1	186,7
Consumi e perdite del settore energetico						
Consumi e perdite del settore energetico	-1,0	-0,6	-5,7	-0,1	-43,7	-51,1
Trasformazioni in energia elettrica	-9,2	-18,5	-18,3	-10,9	56,9	
Totale impieghi finali	4,0	39,0	66,9	1,4	24,3	135,6
Settori						
Industria	3,8	16,6	7,0	0,2	11,9	39,5
Trasporti		0,4	41,4		0,7	42,5
Residenziale e terziario	0,1	21,0	7,2	1,0	11,2	40,5
Agricoltura		0,1	2,6	0,2	0,5	3,4
Usi non energetici	0,1	0,9	5,7			6,7
Bunkeraggi			3,0			3,0

* Dati provvisori

Tabella 4
Bilancio energetico nazionale di sintesi. Anno 2002 (Mtep)

Fonte: MAP

Offerta di energia

Nel 2002, la produzione nazionale di fonti energetiche si è ridotta del 4,6% rispetto all'anno precedente.

Questo ha comportato un aumento della dipendenza dalle importazioni nonostante il fabbisogno energetico italiano sia diminuito rispetto all'anno precedente.

Comunque, grazie al calo delle quotazioni del greggio e del gas naturale, la fattura energetica complessiva è risultata, nel 2002, pari a 26.449 milioni di euro, più bassa del 4,7% rispetto al 2001 (dal 2,3 al 2,1% del PIL).

In particolare, la fattura petrolifera² ha fatto registrare una diminuzione del 2,7%, passando da 15.985 milioni di euro a 15.554 milioni di euro; il miglioramento complessivo della fattura energetica, però, è dovuto soprattutto alla contrazione della spesa per il gas naturale, passata da 8.782 milioni di euro del 2001 a 7.905 milioni di euro del 2002.

Nella media del 2002, anche se il prezzo in dollari del petrolio è cresciuto del 2,2% rispetto al 2001, l'apprezzamento dell'euro nei confronti del dollaro ha più che compensato questo aumento, determinando un calo del 3,4% del prezzo in euro. Per il greggio ed il gas naturale, che costituiscono il 95% circa delle importazioni di minerali energetici, nel periodo 1993-2002 sono cresciute le quote provenienti dalla Russia, da Algeria e Norvegia, a scapito di quelle approvvigionate da Libia, Iran e Arabia Saudita.

Per quanto riguarda la produzione nazionale di greggio, a consuntivo delle attività del 2002, si può sottolineare come dato positivo un totale di 5.498 milioni di tonnellate (circa 110 mila barili al giorno), con un aumento del 35% rispetto al 2001. Questo livello di produzione si è raggiunto grazie soprattutto all'apporto della Val d'Agri, con la precisazione che attualmente la terraferma fornisce oltre l'81% della produzione, mentre la componente marina della produzione di greggio ne fornisce circa il 19%.

L'Agenzia internazionale dell'energia di Parigi, nell'analisi mensile di settembre 2003, si è soffermata sulle scorte di greggio, per mettere in evidenza che le scorte industriali non sono mai state così basse negli ultimi 5 anni. La stessa Agenzia ha ricordato che, soprattutto i paesi importatori, dovrebbero cogliere l'aspetto relativo alla sicurezza degli approvvigionamenti e quello dei prezzi. La tenuta delle scorte (commerciali, obbligatorie e strategiche) si incrocia con una fisiologica aspirazione alla riduzione degli oneri finanziari. Si risolve spesso con la decisione di acquistare all'ultimo momento quanto basta a non scendere al di sotto del livello minimo atto a garantire la marcia degli impianti di raffinazione in condizioni di sicurezza. Ad un basso livello delle scorte può anche concorrere una serie di fattori strutturali di segno positivo, tra i quali le capacità logistiche delle compagnie, potenziate dalle tecnologie dell'informazione. Lo scarso *appeal* al mantenimento di un elevato volume di scorte si è rafforzato da quando è emersa l'impossibilità pratica e istituzionale di adoperarle in funzione del contenimento dei prezzi. Le recenti esperienze, alla base delle ultime iniziative dell'Unione europea e degli Stati Uniti, tendono a rafforzare il dispositivo di tenuta e gestione delle scorte piuttosto che ad allargarle.

La piena apertura del mercato del gas naturale alla concorrenza è avvenuta il 1° gennaio 2003, con la conclusione degli adempimenti previsti dall'ordinamento nazionale per l'attuazione della Direttiva europea 98/30/CE. L'apertura effettiva del mercato sul lato della domanda (dal 1° gennaio 2003 qualunque utente, anche residenziale, può scegliere il suo fornitore di gas sulla rete di distribuzione esistente) non costituisce da sola condizione sufficiente per un'effettiva liberalizzazione del mercato. È essenziale, anche perché confermato dalle esperienze di liberalizzazione del mercato di paesi importatori, che la concorrenza si dispieghi nel modo più ampio possibile sul lato dell'offerta.

Nel 2002 la produzione nazionale di gas naturale è stata di 14.940 milioni di m³ standard (-4% rispetto al 2001). La flessione della produzione, ormai in atto dal 1994, è da attribuire al progressivo declino produttivo dei campi maturi sia terrestri che marini ed alla man-

² Unione Petrolifera: *Relazione annuale 2003*

piena
apertura
del mercato
del gas
naturale alla
concorrenza

cata messa in produzione delle nuove risorse, tra le quali quelle dell'Alto Adriatico. Nel 2002 le importazioni di gas naturale sono state di 58.100 milioni di m³ standard (83% del fabbisogno nazionale di 69.900 milioni di m³ standard), di cui 54.300 milioni di m³ via gasdotto e 3.600 milioni di m³ di gas naturale liquefatto.

Nel momento in cui è stata lanciata la discussione sulla competitività complessiva del sistema nazionale, è utile soffermarsi sulle tecnologie di trasporto del gas naturale, un settore nel quale le aziende italiane detengono posizioni di assoluto primato a livello mondiale.

Tra i gasdotti sottomarini in via di realizzazione o di progettazione, si può citare il collegamento della Libia alla Sicilia, la cui installazione è iniziata nel 2003, la linea Algeria-Spagna il cui progetto è in corso di ultimazione e, infine, il gasdotto Galsi di collegamento tra Algeria e Sardegna.

Il progetto di gasdotto Algeria-Italia via Sardegna presenta molte analogie con il *Blue Stream*³, specie sotto l'aspetto delle tecnologie. Sono previste due linee con diametro esterno di 24 pollici (624,3 mm) in acciaio X70, in partenza da Hannaba e Skidda in Algeria per approdare a Cagliari su un percorso, lungo più di 300 km, per lunghe tratte caratterizzato da profondità di 2.500 e 2.750 metri, rispettivamente. L'entrata in servizio è attesa per il 2008: la linea ha una portata di 8.000 milioni di m³ standard di gas naturale all'anno.

Contemporaneamente, sono state sviluppate nuove modalità di trasporto in alternativa al gasdotto. Tra queste ricordiamo la tecnologia GNL (gas naturale liquefatto), GTL (gas to liquids), GPL (gas di petrolio liquefatto), GNC (gas naturale compresso). Queste, applicate correntemente alle diverse scale del trasporto (tenendo conto del flusso volumetrico e della distanza), rendono possibile l'accesso ad ingenti insediamenti di riserve di gas in aree remote e di difficile accesso e, in generale, forniscono un ventaglio di soluzioni tecnico-economiche al collegamento con i mercati a grande e media distanza.

L'unica risorsa carbonifera italiana è concentrata nel bacino del Sulcis Iglesiente, localizzata nella Sardegna sud-occidentale. Si tratta di un deposito di carbone sub-bituminoso di età eocenica, costituito da numerosi strati di carbone, con potenze variabili da pochi centimetri a qualche metro, intercalati a calcari, marne, argille carboniose ed arenarie. L'attuale area di interesse minerario, che ricopre solo una limitata parte del bacino (circa 20 km²) contiene, in base alle più recenti stime sulle riserve coltivabili nelle attuali condizioni, oltre 57 milioni di tonnellate di carbone mercantile con potere calorifico maggiore di 5000 kcal/kg ed elevato contenuto di ceneri e zolfo.

In un Protocollo d'intesa siglato fra Ministero delle Attività produttive e Regione Sardegna nel febbraio 2003 si ravvisa, tra le altre cose, l'opportunità di predisporre uno studio di fattibilità per verificare le condizioni per l'eventuale realizzazione di una nuova centrale termoelettrica asservita alle utenze industriali. Oltre al rilancio della miniera, l'impianto di produzione di energia elettrica potrebbe avere ricadute positive anche per le tariffe elettriche per le industrie di base dell'area, qualora riuscisse a garantire costi dell'energia comparabili con quelli attualmente assicurati dai regimi speciali in essere.

L'Italia importa via mare circa il 99% del totale del proprio fabbisogno di carbone che viaggia, per la metà, su navi *bulk carriers* della flotta italiana, composta da circa 60 imbarcazioni con una capacità complessiva di carico superiore ai 4,6 milioni di tonnellate. I principali paesi d'importazione sono gli USA, il Sud Africa, l'Australia, l'Indonesia e la Colombia, con quote significative provenienti anche dal Canada e dal Venezuela.

**tecnologie
di trasporto
del gas
naturale
nelle
posizioni
di primato**

³ Linea di collegamento tra le coste russa e turca del Mar Nero, lunga 390 km, completata nel 2002, che ha come operatori Gazprom ed Eni, attraverso SNAM (Saipem e SNAMProgetti come *main contractors* rispettivamente dei lavori *off-shore* e dei servizi di ingegneria).

Tabella 5
Bilancio dell'energia elettrica in Italia. Anni 2001-2002 (GWh)

	2001	2002	Variazione 2002/01 (%)
Produzione idrica lorda	53.926	47.262	-12,4
Produzione termica lorda	219.379	231.069	5,3
Produzione geotermica lorda	4.507	4.662	3,5
Produzione eolica e fotovoltaica lorda	1183,4	1408,3	19,0
Totale produzione lorda	278.995	284.401	1,9
Energia per servizi	13.029	13.619	4,5
Totale produzione netta	265.965	270.783	1,8
Ricevuta da fornitori esteri	48.927	51.519	5,3
Ceduta a clienti esteri	549,3	922,3	67,9
Destinata ai pompaggi	9.511	10.654	12,0
Richiesta totale Italia	304.832	310.726	1,9

Fonte: GRTN (dati provvisori 2002)

Le importazioni totali di combustibili solidi fossili sono diminuite dell'1% circa, passando dai 20,1 milioni di tonnellate del 2001 ai 19,8 del 2002: il contributo maggiore è derivato dal carbone da vapore (+11%) e dal coke metallurgico (+12%), mentre il carbone da coke ha fatto registrare un calo del 24%.

Tra il 2001 e il 2002, la richiesta di energia elettrica è aumentata di un ulteriore 1,9%, raggiungendo quota 310,7 miliardi di kWh (tabella 5). L'aumento registrato nell'ultimo anno è in linea con l'anno precedente (2,3%) e con l'incremento medio del periodo 1990-2000 (2,4%). L'aumento di domanda è, anche per il 2002, superiore alla crescita del PIL.

L'aumento di produzione netta di energia elettrica è stato pari all'1,8%, leggermente inferiore all'aumento di domanda. La produzione interna di 284,4 miliardi di kWh è stata ottenuta grazie ad un incremento della produzione da fonti termiche tradizionali (+5,3%). La produzione da fonte idroelettrica è diminuita del 12,4% rispetto al 2001, a causa della scarsa piovosità, e si è attestata a poco più di 47 TWh, un livello inferiore a quello registrato nel 2000 (51 TWh). La produzione da fonte eolica e fotovoltaica è aumentata del 19% rispetto al 2001. L'elettricità da combustibile di recupero (dalle raffinerie, acciaierie e dai rifiuti urbani) pesa per il 10% della produzione termoelettrica.

L'aumento di elettricità da produzione termoelettrica nel corso del 2002 è dovuto principalmente ad un aumento di produzione da carbone (+12%). Si è poi ulteriormente rafforzata la crescita dei consumi di gas naturale, che ha ulteriormente distanziato i consumi di prodotti petroliferi, pure aumentati ma in misura inferiore. Dei 230 TWh termici prodotti in Italia, quasi 100 provengono dal gas naturale, 77 da prodotti petroliferi, 35 dal carbone e 18 da altre fonti (comprendenti, in ordine d'importanza, orimulsion, gas d'alto forno, gas residui di raffinazione, gas di cokeria e altro). Nel 2002 i prodotti petroliferi hanno coperto il 33,4%

della produzione termoelettrica convenzionale, in lieve calo rispetto l'anno precedente (33,5%). Il gas naturale contribuisce per il 43,2% alla produzione di elettricità (42,8% nel 2001). L'utilizzo di carbone è il dato che mostra la maggiore dinamica, passando dal 14,2% del fabbisogno della produzione termoelettrica, al 15,4%: dai 31,7 TWh del 2001 ai 35,5 TWh nel 2002.

La domanda di potenza ha conosciuto nel 2002 un massimo storico martedì 12 dicembre 2002. Quel giorno, secondo i dati del GRTN, la punta di domanda è stata di circa 52.600 MW.

Negli ultimi anni agli aumenti della domanda di energia elettrica

Tabella 6
Bilancio di potenza alla punta nell'anno 2002 - 12/12/2002 (MW)

Potenza nominale censita	76.950
Potenza disponibile Italia*	48.950
Massima capacità di importazione	6.300
Totale potenza disponibile (*)	55.250
Punta di domanda	52.590
Margine disponibile	2.660
% riserva di potenza rispetto alla punta	5,1

(*) Comprende la riserva operativa

Fonte: GRTN

in Italia non è corrisposto un adeguato sviluppo della generazione, rendendo le importazioni indispensabili alla copertura della domanda. Come per il biennio precedente, anche nel biennio 2001-2002 si registra una diminuzione del margine di potenza disponibile, per gestire eventuali indisponibilità della capacità produttiva oppure incrementi non previsti del fabbisogno. Margini di riserva molto esigui rendono inoltre cruciale il servizio di interrompibilità che consente al GRTN il distacco di una quota di carico dell'utente, collocato sul mercato libero secondo apposite procedure contrattuali. Il parco di generazione nazionale è caratterizzato da una forte differenza tra la potenza censita a fini statistici e quella effettivamente disponibile. In particolare l'obsolescenza del parco elettrico e la necessità di effettuare frequenti manutenzioni ed adeguamenti ambientali da un lato, la sensibilità di una buona parte del parco alle condizioni climatiche dall'altro, sono elementi critici ai fini della riduzione della potenza censita.

Nel 2002 l'energia elettrica importata dall'estero ha raggiunto il valore di 50,6 TWh, in crescita del 4,6% rispetto al 2001. Quasi la metà delle importazioni è affluita attraverso la Svizzera, il 36,8 % dalla Francia, il 10,2% dalla Slovenia e il restante 3,5% dall'Austria.

Per quanto riguarda il prezzo dell'energia elettrica, il sistema tariffario italiano è caratterizzato da prezzi bassi, rispetto alla media europea, per le utenze domestiche a basso consumo e, al contrario, da prezzi elevati a carico delle utenze con consumi più elevati. I prezzi dell'energia elettrica per le utenze industriali risultano invece tra i più elevati in Europa, con scostamenti crescenti con il livello di consumo di riferimento.

	1995	1999	2000	2001	2002 ⁴
Idroelettrico ¹	8312	9979	9725	10298	8694
Eolico	2	89	124	259	309
Fotovoltaico	3	4	4	4	4
Solare termico	7	10	11	11	14
Geotermico per generazione elettrica	756	969	1035	992	1026
Geotermico per usi diretti	213	213	213	213	213
Rifiuti solidi urbani	97	374	461	721	818
Legna e assimilati ²	4635	4824	4807	4833	5008
Biocombustibili	65	38	66	87	94
Biogas	29	167	162	196	270
Totale	14119	16667	16608	17613	16450
Di cui non tradizionali ³	1265	1893	2022	2516	2933

¹ Solo elettricità da apporti naturali. ² La serie include il risultato dell'indagine ENEA sul consumo di legna da ardere nelle abitazioni. ³ Eolico, solare, rifiuti solidi urbani, teleriscaldamento a legna, legna ed assimilati per la produzione di energia elettrica e calore in impianti industriali (l'utilizzo della legna da ardere nel settore residenziale, stimato in 3,6 Mtep, è escluso perché impiego tradizionale), biocombustibili, biogas. ⁴ Dati provvisori e stime.

* Inoltre, da considerare 9,8 TWh prodotti da reflui industriali che corrispondono a 2,1 Mtep sostituiti (dati GRTN)

Tabella 7
Energia da fonti energetiche rinnovabili in Italia in equivalente fossile sostituita. Anni 1995-2002 (ktep)*

Fonte: elaborazioni ENEA su dati di origine diversa

Il contributo delle fonti energetiche rinnovabili (FER) al bilancio energetico nazionale è cresciuto dai circa 14 Mtep del 1995 ai quasi 16,5 Mtep del 2002, con un aumento del 16,5% circa nell'intero periodo, ovvero con un incremento medio del 2,4% all'anno. Nello stesso periodo, l'energia prodotta dalle FER non tradizionali è più che raddoppiata (tabella 7).

Dipendenza energetica

La dipendenza energetica dell'Italia è passata da un valore di poco inferiore all'81% nel 1995, all'83,6% del 2001, fino all'84,3 del 2002 (figura 5). La media europea è prossima al 54% e solamente Irlanda, Lussemburgo e Portogallo fanno registrare, nell'Unione europea, un grado di dipendenza superiore a quello dell'Italia (tabella 8).

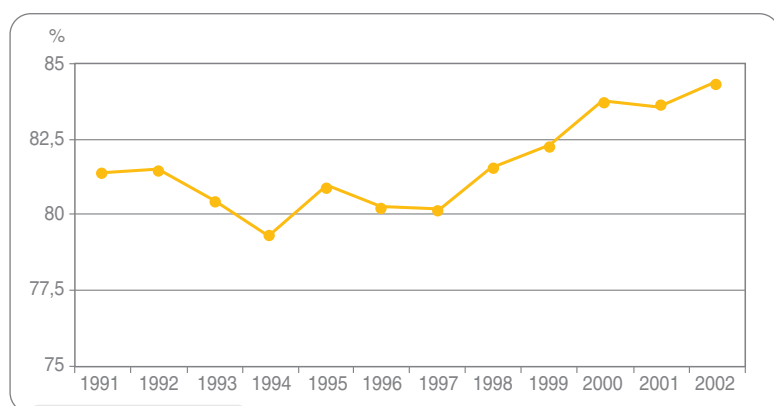


Figura 5
Andamento della dipendenza energetica dell'Italia nel periodo 1991-2002

Fonte: elaborazioni ENEA su dati MAP

Un'analisi della dipendenza per fonti di energia primaria evidenzia uno scenario che si evolve lentamente nel corso degli anni (tabella 9).

Nel 2002, la domanda interna di petrolio è soddisfatta per il 94% dalle importazioni. La domanda di combustibili solidi è coperta quasi interamente da prodotti importati, mentre la dipendenza energetica del gas naturale è in continua crescita e ha superato l'80% nel 2002. L'approvvigionamento energetico attraverso il ricorso ad operatori esteri comporta un esborso monetario di notevole entità, non adeguatamente bilanciato da esportazioni di prodotti energetici.

I valori delle esportazioni italiane di prodotti energetici sono trascurabili, fatta eccezione

Tabella 8
Dipendenza energetica¹ dei paesi UE (%)

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Austria	66,0	68,4	68,5	68,2	65,9	65,7	66,6	67,7
Belgio	77,6	78,3	76,9	77,9	76,5	77,3	77,9	76,8
Finlandia	56,6	58,7	55,1	59,4	54,2	54,7	55,7	57,3
Francia	46,9	48,5	48,0	50,5	49,9	48,9	49,2	48,4
Germania	58,0	59,9	59,6	61,8	59,9	60,4	60,7	59,9
Irlanda	60,7	68,6	76,6	80,7	80,8	83,9	88,2	87,3
Italia	80,9	80,2	80,2	81,6	82,2	83,7	83,6	84,3
Lussemburgo	98,6	98,9	98,7	98,6	98,7	98,5	98,4	98,4
Olanda	11,6	5,1	14,4	18,5	22,4	26,8	24,2	24,8
Portogallo	86,9	84,1	85,3	86,6	89,0	87,2	86,3	89,1
Spagna	69,7	67,9	70,6	71,6	74,2	74,1	73,5	75,5
Danimarca	23,9	23,8	6,5	4,2	-16,4	-39,4	-33,1	-43,0
Grecia	61,3	60,7	62,0	63,2	64,1	63,9	64,0	63,4
Regno Unito	-15,5	-15,7	-18,1	-18,0	-21,4	-16,7	-10,4	-11,3
Svezia	36,2	37,4	34,7	32,8	33,2	35,6	32,9	38,3

¹ Dipendenza energetica = (Importazioni nette / (Produzione + Importazioni nette))*100

Fonte: elaborazioni ENEA su dati MAP

Tabella 9
Italia: dipendenza energetica per fonte (%)

	Combustibili solidi	Gas naturale	Petrolio	Totale
2000	97,8	77,6	95,1	83,7
2001	96,5	78,2	95,4	83,6
2002	97,1	80,3	94,0	84,3

Fonte: elaborazioni ENEA su dati MAP

per le esportazioni di prodotti petroliferi raffinati che procurano entrate comprese tra i 4000 e i 5000 milioni di euro.

Nel corso dell'ultimo decennio la Libia si conferma principale for-

nitore dell'Italia per il petrolio greggio. La domanda italiana di gas naturale si rivolge invece alla Russia, all'Algeria e, in misura minore, all'Olanda. Dal 2001, con la liberalizzazione del settore in Europa, la Norvegia è comparsa come nuovo fornitore di gas naturale ed il suo ruolo è destinato a crescere.

Dall'Europa Occidentale proviene la gran parte delle importazioni di carbone, mentre per i prodotti di cokeria il principale fornitore italiano, dalla seconda metà degli anni Novanta, è la Cina.

La "geografia" delle fonti di approvvigionamento energetico dell'Italia si sta quindi lentamente modificando rispetto al passato decennio per i prodotti che sembrano pesare di più sul fabbisogno energetico nazionale.

Ambiente

Nell'Unione Europea il settore della trasformazione di energia è stato responsabile di circa il 27% delle emissioni CO₂ per l'anno 1990 e di circa il 35% per l'anno 2000. Nello stesso periodo, il settore delle industrie manifatturiere è passato dal 21% al 19%, quello residenziale e terziario è rimasto stabile al 20%, mentre il settore dei trasporti ha mostrato la crescita maggiore, passando dal 22% al 26% del totale. L'Italia è responsabile di circa il 14% delle emissioni di CO₂ del sistema energetico europeo (figura 6).

L'andamento delle emissioni totali di CO₂ del sistema energetico italiano mostra nel 2000 un valore superiore di circa il 6% rispetto al 1990 (figura 7).

Il settore percentualmente più rilevante è quello della trasformazione energetica che è responsabile del 35% delle emissioni totali sia per il 1990 che per il 2001 (figura 8). Il settore trasporti risulta essere responsabile del 25% delle emissioni totali nel 1990 e di circa il 29% nel 2001.

In linea con gli andamenti che si riscontrano nell'Unione, il settore trasporti è quello che registra i tassi di crescita più elevati: dal 1990 al 2001 il suo contributo è aumentato del 22,7%. Il contributo del settore dell'industria energetica è aumentato dell'11,7%, mentre quello del settore dell'industria manifatturiera è diminuito dell'8,3%.

L'Italia ha ratificato il Protocollo di Kyoto con la legge n. 120 del 1° giugno 2002. Il testo della legge prevede che si arrivi alla definizione di un piano di azione per la riduzione dei livelli di emissione dei gas ad effetto serra.

La delibera CIPE 123/2002 ha aggiornato le linee guida per le politiche e le misure nazionali di riduzione di gas ad effetto serra. Il provvedimento, che prende atto del diverso andamento rispetto agli obiettivi di riduzione delle emissioni, dimezza e in qualche

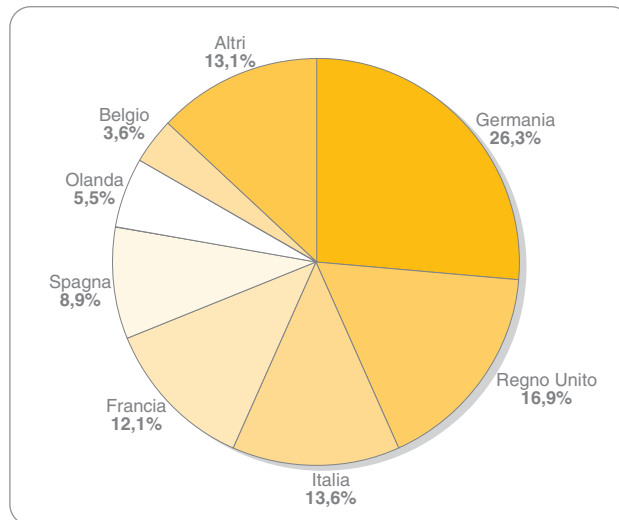
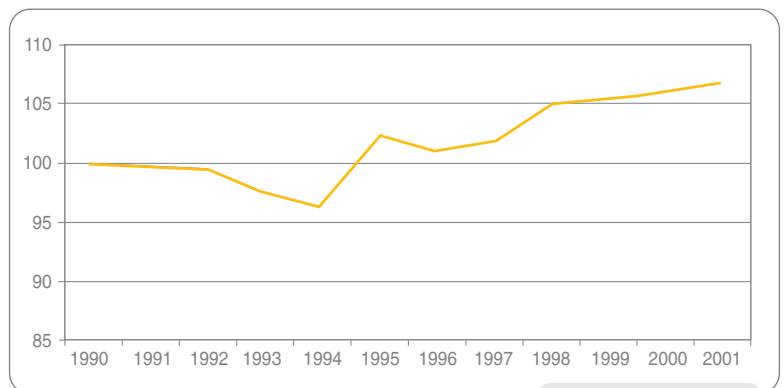


Figura 6
Contributo dei paesi dell'Unione Europea alla emissione di CO₂ dal settore energetico. Anno 2001 (%)

Fonte: EEA



Fonte: EEA

Figura 7
Andamento delle emissioni di CO₂ in Italia nel periodo 1990-2001 (1990 = 100)

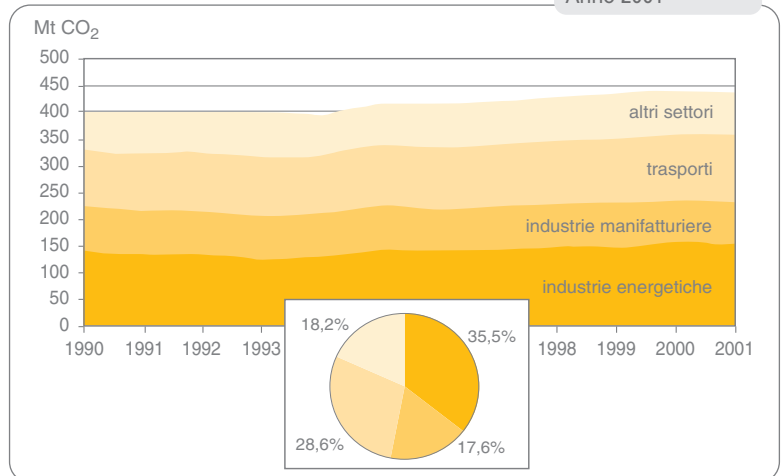


Figura 8
Contributo dei vari settori alla emissione di CO₂ in Italia. Anno 2001

Fonte: APAT

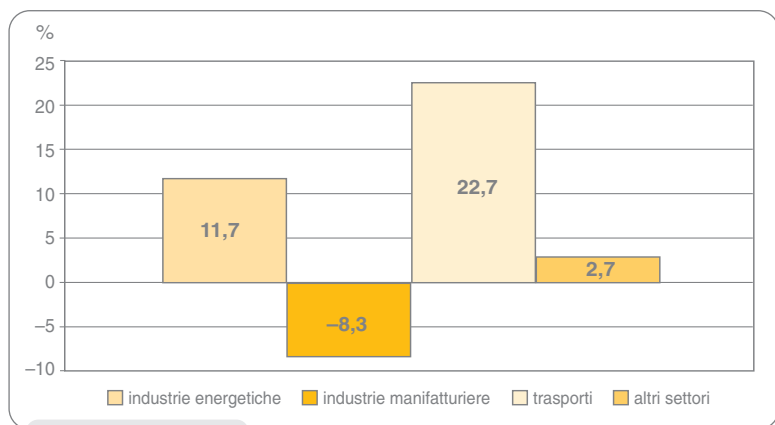


Figura 9
Emissioni di CO₂ per sotto-settore di emissione. Anni 1990-2001

Fonte: APAT

Regioni

I processi di decentramento e di liberalizzazione del mercato dell'energia, sono i due eventi che stanno caratterizzando il nuovo assetto del sistema energetico nazionale e delle sue naturali correlazioni e vincoli con i sistemi ambientale ed economico.

L'ultimo anno ha visto le Amministrazioni alla ricerca di un nuovo equilibrio alla luce delle esigenze emergenti dal sistema energetico e dell'assetto istituzionale profondamente rinnovato dalla modifica del Titolo V della Costituzione (legge costituzionale 3/2001).

È riemersa in questo periodo una questione sicuramente centrale per il funzionamento del sistema di governo del settore: l'importanza di forme di coinvolgimento delle Regioni in un quadro condiviso di indirizzi e linee guida di programmazione di medio-lungo termine, assicurando la tenuta degli strumenti di raccordo e concertazione nell'approccio ai problemi di funzionamento unitario dei mercati dell'energia e ai problemi di impatto territoriale.

Figura 10
La situazione dei Piani energetico-ambientali nelle varie Regioni



Fonte: ENEA

caso annulla gli obiettivi settoriali e compensa la differenza rispetto all'obiettivo complessivo nazionale attraverso i cosiddetti "meccanismi di flessibilità". Il ricorso illimitato a questi meccanismi è stato infatti riconosciuto nell'ambito della settima conferenza dalle parti firmatarie del Protocollo di Kyoto.

Non tutti gli aspetti dei meccanismi flessibili, comunque, sono stati ad oggi completamente definiti. Le implicazioni delle diverse modalità di applicazione degli stessi sono complesse e hanno ripercussioni a livello nazionale, europeo e internazionale.

Le emergenze dell'ultimo anno per l'aumentato consumo di energia elettrica, i problemi di fragilità della rete, le richieste di autorizzazione di nuove centrali che la liberalizzazione del sistema ha aumentato, l'avvio delle azioni di risparmio energetico e di attivazione dei titoli di efficienza, il sostegno alle fonti rinnovabili hanno complessivamente confermato la esigenza di un quadro coerente di raccordo tra le Amministrazioni.

I Piani energetico-ambientali regionali, presenti in varie forme di attuazione presso tutte le Regioni (figura 10), hanno colto le emergenze e le nuove esigenze dettate dalla legislazione nazionale ed europea e rappresentano l'importante impegno delle Regioni per lo sviluppo del sistema energetico e ambientale territoriale, con l'assunzione di una piena responsabilità nell'ambito degli indirizzi nazionali e comunitari.

Ricerca tecnologica

Lo sviluppo tecnologico rappresenta un'importante opportunità per il Paese nel quadro delle azioni per

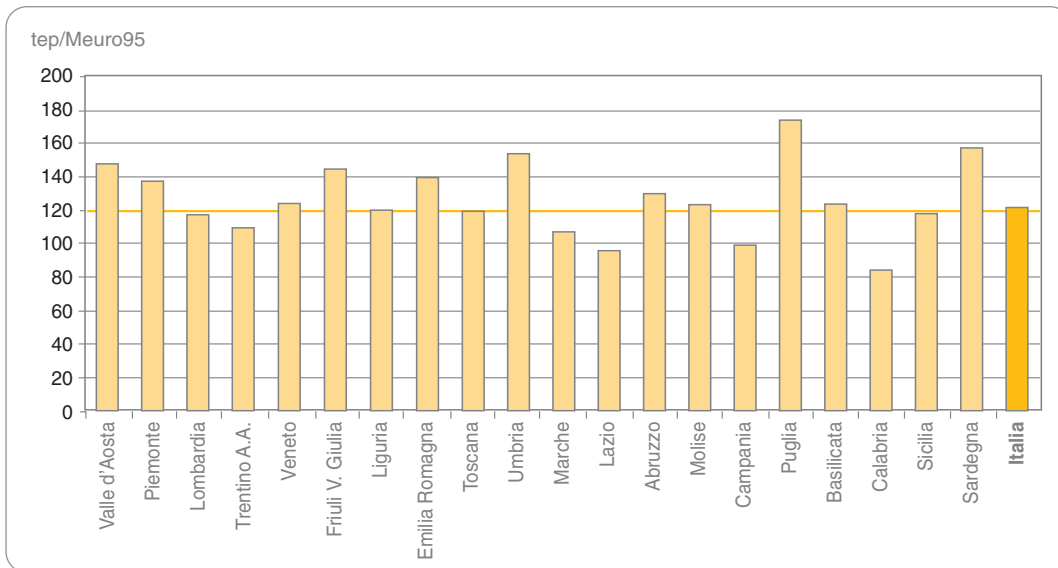


Figura 11
Confronto tra le intensità energetiche finali dei PIL delle varie Regioni. Anno 2000

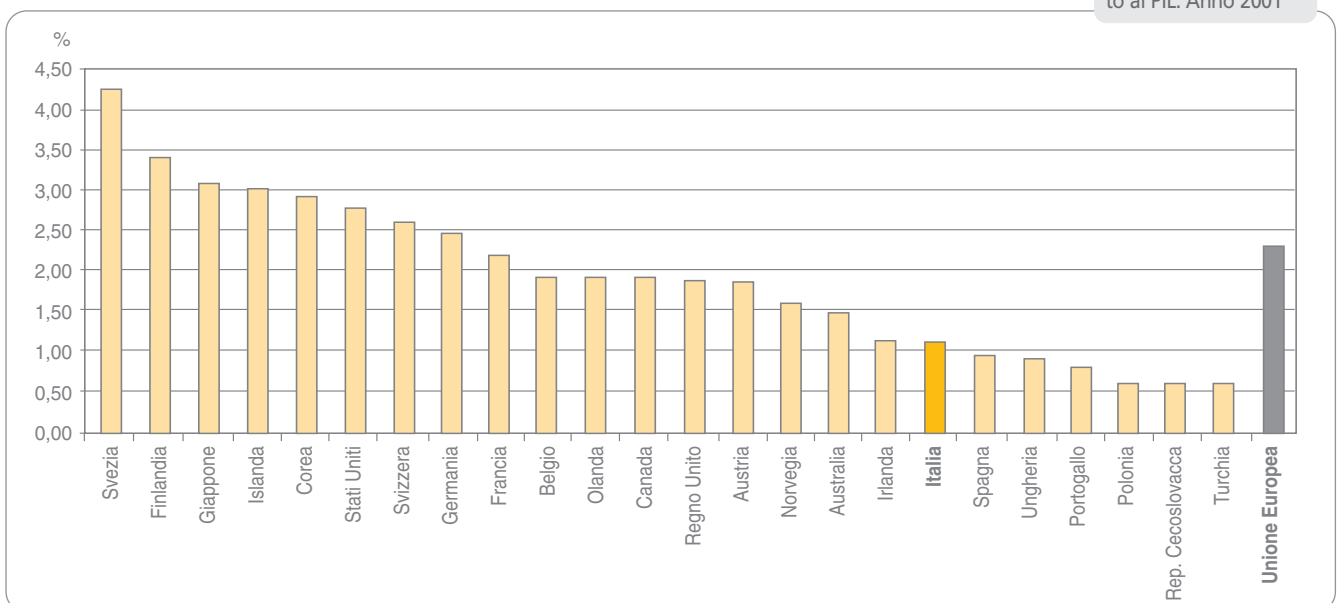
Fonte: ENEA

lo sviluppo sostenibile, per la competitività economica, oltre che per la sicurezza degli approvvigionamenti. Gli interventi di politiche e misure e i negoziati per la riduzione delle emissioni devono essere affiancati da un vigoroso sforzo di R&S di nuove tecnologie energetiche che costituisce il punto focale per essere in grado di fornire risposte sostenibili nel medio-lungo termine ai problemi sul tappeto.

L'Italia continua tuttavia a situarsi molto indietro fra i paesi dell'OCSE per intensità d'investimenti in ricerca rispetto al PIL (figura 12) mentre, in termini di valore assoluto della spesa (a parità di potere d'acquisto), il nostro Paese risulta essere ben al di sotto del posto che gli spetterebbe rispetto alle dimensioni del suo sistema economico-industriale (tabella 10).

Il ridotto impegno in ricerca del nostro Paese si esprime anche con il peso relativo della sua spesa per R&S sul totale delle spese dei maggiori paesi occidentali, pari ad appena il 2,8%, una percentuale che pone l'Italia alle spalle del Canada, un Paese con una dimensione economica sensibilmente inferiore alla nostra (tabella 10).

Figura 12
Confronto tra le spese per R&S in alcuni paesi OCSE in rapporto al PIL. Anno 2001



Fonte: OCSE, MSTI database maggio 2003

Paesi	1981		1991		2001		Variazione % media annua		
	Milioni di dollari USA a prezzi 1995	%	Milioni di dollari USA a prezzi 1995	%	Milioni di dollari USA a prezzi 1995	%	1981-1991	1991-2001	1981-2001
Canada	6.041	2,6	9.690	2,6	16.122	3,3	4,8	5,2	5,0
Finlandia	879	0,4	1.902	0,5	4.185	0,9	8,0	8,2	8,1
Francia	17.407	7,4	27.236	7,3	30.704	6,3	4,6	1,2	2,9
Germania	27.787	11,8	42.019	11,2	47.827	9,8	4,2	1,3	2,8
Giappone	43.111	18,3	82.681	22,1	96.532	19,8	6,7	1,6	4,1
Italia	7.668	3,3	13.450	3,6	13.557 (a)	2,8	5,8	0,1	3,0
Regno Unito	18.175	7,7	20.577	5,5	24.558	5,0	1,2	1,8	1,5
Stati Uniti	114.530	48,6	176.603	47,2	252.939	52,0	4,4	3,7	4,0
Totale	235.597	100	374.157	100	486.424	100	4,7	2,7	3,7

(a) 2000

Tabella 10

La spesa per R&S in alcuni paesi dell'OCSE. Anni 1981, 1991, 2001

Fonte: elaborazioni Sezione Ceris di Roma "Istituzioni e politiche per la scienza e la tecnologia" su dati OCSE

Per quanto riguarda l'impegno di ricerca specifico per il settore energetico, la figura 13 riporta l'aggregato delle spese governative per ricerca e sviluppo dei paesi membri dell'AIE dal 1974 al 1998: i valori sono espressi in milioni di dollari a prezzi e tassi di cambio del 2002. Dal primo *shock* petrolifero del 1974 e fino al 1980 le spese pubbliche di R&S in campo energetico sono più che raddoppiate, per poi ridiscendere progressivamente verso livelli comparabili a quelli iniziali. Tale *trend* appare chiaramente legato sia alle vicende dei prezzi del petrolio che a quelle del settore nucleare (da fissione prima e poi anche da fusione), il quale assorbe una quota considerevole (oltre la metà) dei *budget*

Tabella 11

La spesa per R&S in rapporto al prodotto interno lordo in alcuni paesi dell'OCSE

Paesi	1980	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Canada	1,2	1,5	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9
Finlandia	1,2	1,9	2,3	2,5	2,7	2,9	3,2	3,4	3,4
Francia	1,8	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Germania	2,5	2,7	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,5	2,5
Giappone	2,0	3,0	2,9	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1
Italia	0,8	1,3	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	...
Regno Unito	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9
Spagna	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
Svezia	2,3 (a)	2,8 (b)	3,4	...	3,5	...	3,7	...	4,3
Stati Uniti	2,5	2,7	2,5	2,6	2,6	2,6	2,8	2,8	2,8

(...) non disponibile; (a) 1981; (b) 1989

Fonte: elaborazioni Sezione Ceris di Roma "Istituzioni e politiche per la scienza e la tecnologia" su dati OCSE e ISTAT per l'Italia 2001

Tabella 12

Spese ENEA per R&S in campo energetico (milioni di euro a prezzi 1995)

	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Risparmio ed efficienza	39,88	45,14	45,72	42,55	42,68	20,18	15,95	17,29	15,11
Rinnovabili	40,47	35,33	33,03	30,56	28,68	21,92	24,63	22,26	24,97
Nucleare (fusione e sicurezza)	175,98	93,27	94,96	93,86	88,67	78,51	83,30	87,16	63,00
Generazione e accumulo	26,10	13,22	13,57	12,56	13,21	13,64	13,63	9,88	7,71
Altre tecnologie e ricerca	241,44	56,81	38,46	27,24	29,57	23,97	22,43	30,19	21,42
Totale	523,87	243,77	225,74	206,78	202,81	158,23	159,95	166,79	132,2

Fonte: ENEA

pubblici di ricerca in ambito energetico.

Per quanto riguarda l'Italia, la figura 14 mostra le spese pubbliche di ricerca e sviluppo in campo energetico effettuate dal 1990 al 2002. Come si può notare, il livello della spesa si è ridotto a poco meno della metà del livello del 1990.

La riduzione ha interessato soprattutto le attività di ricerca su tecnologie orizzontali o comunque non specificamente classificate in alcuna delle altre categorie, e la ricerca sul nucleare.

Quest'ultima si è andata focalizzando sulla fusione termonucleare e, per la fissione, sui temi della sicurezza e del trattamento delle scorie.

Tuttavia anche l'attività di ricerca riguardante il risparmio e l'efficienza energetica, che si va concentrando sul risparmio nel settore residenziale e in parte in quello industriale, appare in diminuzione con un parallelo abbandono dell'attività nei trasporti.

Investimenti pubblici in ricerca per tecnologie di prospezione, estrazione, trasporto e raffinazione di idrocarburi, nonché per la trasformazione e combustione di carbone, sono totalmente assenti perché il settore di attività è coperto dall'industria privata (principalmente società petrolifere o società elettriche). Attualmente le spese pubbliche si concentrano sulle tecnologie nucleari, su quelle per la conversione, trasmissione e accumulo di elettricità, e sulle fonti di energia rinnovabile, un'area, quest'ultima, dove negli ultimi tre anni si segnala una ripresa dell'impegno di ricerca dopo un prolungato periodo di stagnazione.

In Italia una quota importante delle attività pubbliche di ricerca in campo energetico è svolta dall'ENEA. La tabella 12 riporta l'andamento delle spese di ricerca (milioni di euro a prezzi 1995) effettuate dall'ENEA nel 1990 e negli anni dal 1995 in poi.

Le tendenze già rilevate per i dati nazionali si ritrovano nei dati relativi alle spese di ricerca dell'ENEA. Va tuttavia osservato che l'impegno sul tema della fissione nucleare, connesso agli obblighi relativi

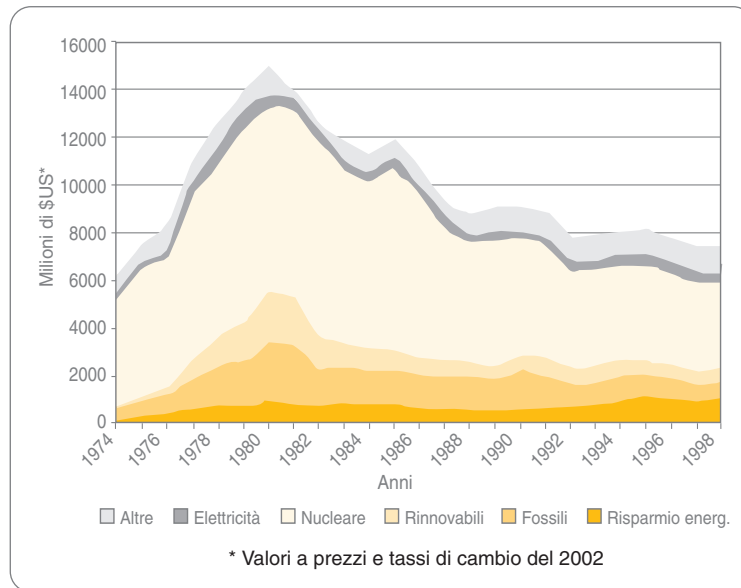


Figura 13
Spese governative per R&S in campo energetico nell'insieme dei paesi AIE

Fonte: elaborazioni ENEA su dati AIE

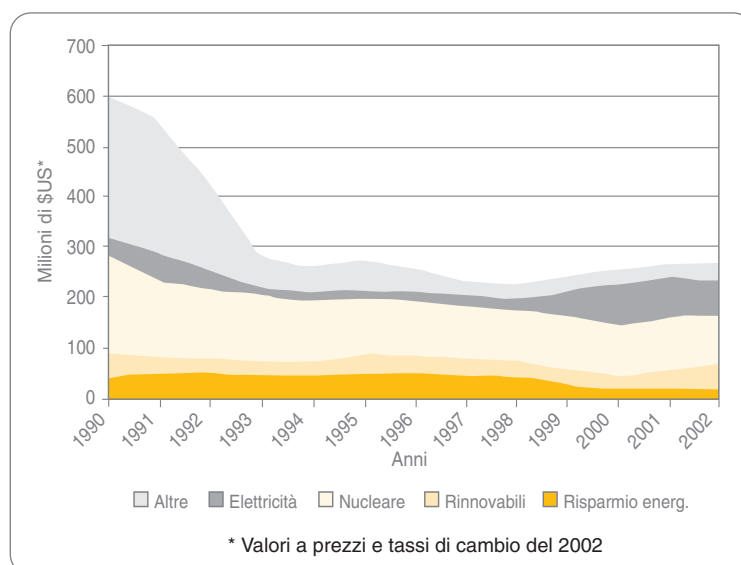
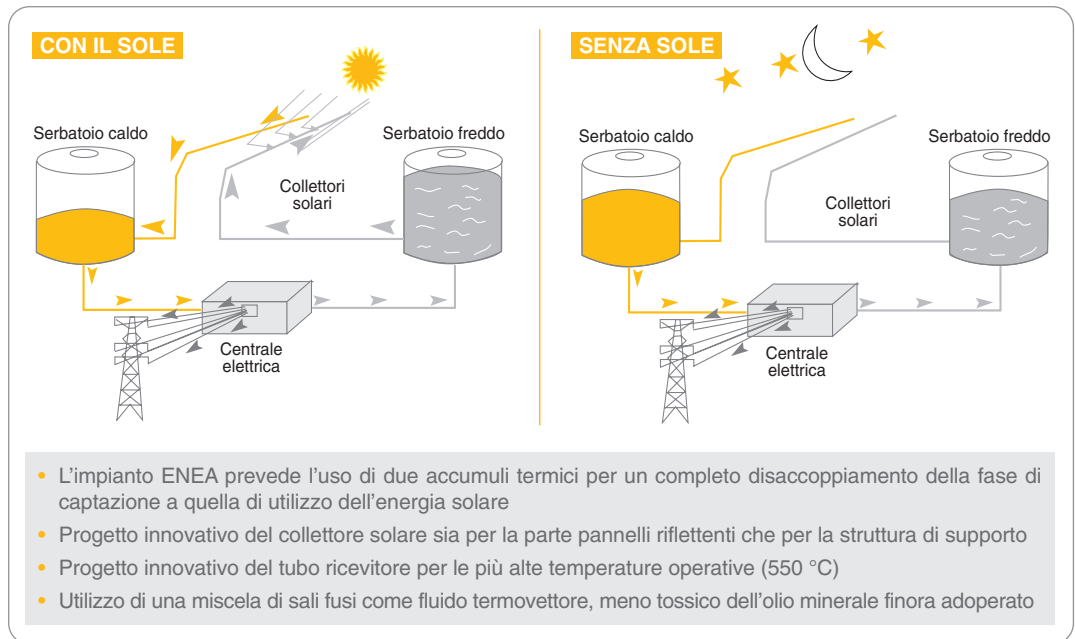


Figura 14
Spese governative per R&S in campo energetico in Italia

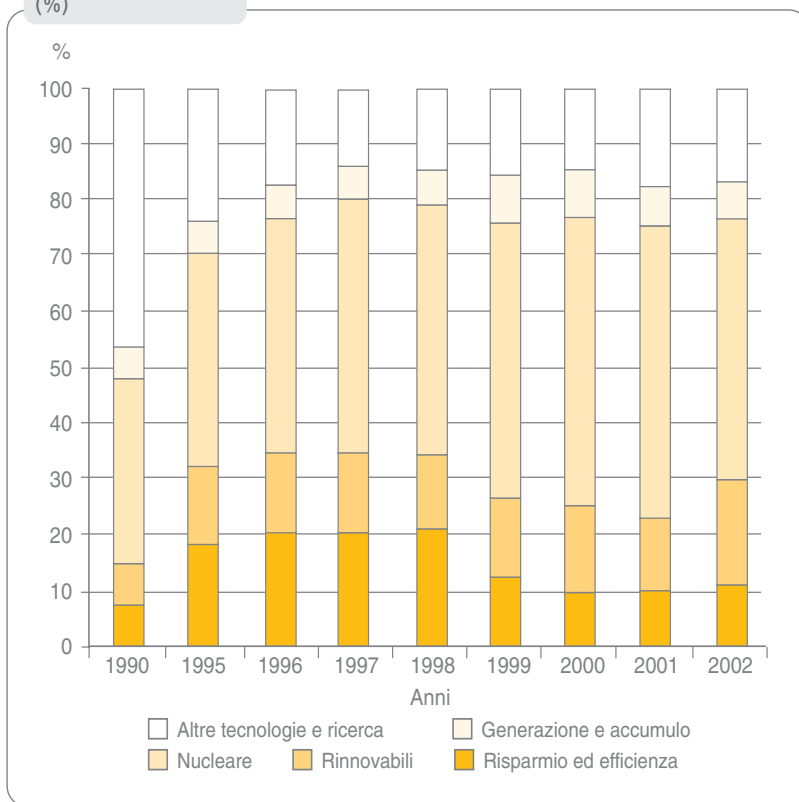
Fonte: elaborazioni ENEA su dati AIE

Figura 15
Le innovazioni del Progetto Solare Termodinamico dell'ENEA



alla sicurezza nucleare e al trattamento dei rifiuti, rappresenta negli ultimi anni circa il 20% dell'intera spesa annuale dell'Ente. A questo impegno continua ad affiancarsi l'impegno di spesa a favore della ricerca sulla fusione, strettamente connessa alla partecipazione al progetto internazionale ITER. In diminuzione appare il livello di spesa sulle rinnovabili. Per quanto riguarda il solare, negli anni più recenti è avvenuto uno spostamento dell'im-

Figura 16
Spese ENEA per R&S in campo energetico (%)



Fonte: ENEA

pegno di ricerca verso le tecnologie solari termodinamiche per la produzione di elettricità.

Il progetto per la produzione di calore ad alta temperatura dal sole rappresenta un rilevante impegno in questa direzione e riveste un importante ruolo strategico, per le sue potenzialità, sia in relazione alla necessità di diversificazione delle fonti energetiche e della riduzione delle emissioni di gas serra, sia alla capacità di innovazione tecnologica e del sostegno alla competitività del sistema industriale italiano.

Un prototipo preindustriale del sistema è in studio in collaborazione con l'ENEL per una applicazione presso la centrale ENEL di Priolo Gargallo a Siracusa (figura 15).

La figura 16 mostra l'evoluzione complessiva del mix di ricerca in campo energetico portato avanti dall'ENEA nel periodo 1990-2002.

COP-9: un bilancio dei risultati

VINCENZO FERRARA

ENEA

Progetto Speciale Clima Globale

primo piano

La 9^a Conferenza delle Parti aderenti alla Convenzione sui Cambiamenti Climatici, che si è svolta a Milano, ha espresso la volontà della comunità internazionale a non interrompere il cammino per raggiungere un accordo sul Protocollo di Kyoto. È un risultato da non sottovalutare e che riannoda i fili di un difficile accordo internazionale

COP-9: *A review of the results*

The 9th Conference of the Parties to the Convention on Climate Change, held in Milan, reaffirmed the international community's determination to go ahead in seeking an agreement on the Kyoto Protocol. This outcome should not be underestimated; it restarts efforts to reach a difficult international accord

risultati della COP-9 di Milano possono considerarsi per alcuni versi positivi e, per altri versi, negativi. Dipende dai punti di vista. Perciò, è necessaria qualche premessa e qualche analisi.

Breve premessa storica

Per capire la COP-9 di Milano bisogna tener presenti quali erano gli eventi precedenti che in qualche modo sono stati condizionanti sui risultati acquisiti. Infatti, a Milano non è stato fatto altro che completare il processo di smantellamento e di snaturazione dello spirito e dell'essenza del Protocollo di Kyoto, un processo cominciato con gli accordi di Marrakesh del 2001 (COP-7) dove, con un compromesso molto al ribasso, diventavano centrali le questioni secondarie del Protocollo e, viceversa, diventavano secondarie le questioni centrali. Il processo poi è proseguito con la COP-8 di Nuova Delhi e concluso quindi con la COP-9 di Milano.

il Protocollo di Kyoto appariva troppo costoso

Il motivo per cui si era arrivati agli accordi di Marrakesh risiede nel fallimento della COP-6 di L'Aia del novembre 2000, quando un gruppo di paesi detti "ombrello group" (Stati Uniti, Canada, Giappone, Australia e Nuova Zelanda) rappresentanti il 50,2% delle emissioni valide per la ratifica e l'entrata in vigore del Protocollo, decisero di abbandonare i negoziati, se fossero proseguiti con le finalità e le strategie con cui erano stati avviati a Kyoto nel 1997, perché il Protocollo di Kyoto appariva troppo costoso per le loro economie nazionali ed economicamente destabilizzante nella competitività dei mercati internazionali.

Per salvare il Protocollo da un fallimento che si profilava clamoroso, fu organizzata una COP-6 bis a Bonn nel luglio del 2001 al fine di trovare soluzioni percorribili, e la mediazione finale fu quella di far diventare il Protocollo uno strumento economicamente conveniente con un ruolo centrale per gli strumenti sussidiari e accessori del Protocollo. I successivi accordi di Marrakesh del novembre 2001 sancirono, di fatto, questo. Nel frattempo (marzo 2001) gli USA annunciarono il rigetto del Protocollo ed il loro rifiuto, comunque, a ratificarlo.

Gli altri elementi di contorno

La COP-9 di Milano dopo gli annunci fatti dalla Russia alla Conferenza di Johannesburg sullo sviluppo sostenibile dell'agosto 2002, si stava caratterizzando come un evento storico. Infatti, si sarebbe raggiunto e superato il famoso 55% di *quorum* per le emissioni dei paesi industrializzati che avrebbe permesso al Protocollo di Kyoto di entrare legalmente in vigore e quindi di essere pienamente attuato. La Russia, invece, a settembre 2003, nella Conferenza mondiale sul clima tenuta a Mosca, tornava indietro sui suoi passi annunciando che non avrebbe ratificato, lasciando quindi il Protocollo in una condizione di sospensione. Il Protocollo di Kyoto ha, infatti, due "quorum" del 55%. Uno riguarda il "numero" dei paesi totali che hanno aderito alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (sigla: UNFCCC), che deve essere rappresentato da almeno il 55% dei paesi (sia industrializzati e in via di sviluppo). Questo primo *quorum* è stato raggiunto e superato perché hanno ratificato 120 paesi su 188, pari al 63,8% dei paesi totali.

L'altro *quorum* riguarda le emissioni dei soli paesi industrializzati che deve essere rappresentato da almeno il 55% delle emissioni di gas serra dei soli paesi industrializzati. Questo secondo *quorum* non è stato raggiunto perché nonostante tutti i paesi industrializzati ad eccezione di Australia, Russia e Stati Uniti abbiano ratificato, la percentuale attuale è al di sotto del 55%, essendo pari al 44,2%. Gli Stati Uniti, infatti, pesano per un 36,1%, la Russia pesa per un 17,4% e l'Australia pesa per un 2,1% ma c'è anche la Slovenia che pesa per un 0,2%.

Gli aspetti deludenti

Date queste premesse (accordi di Marrakesh e mancata ratifica da parte della Russia) e non esistendo alcuna alternativa al Protocollo di Kyoto, alla COP-9 di Milano non si poteva far altro che quello che si è fatto. Questo può essere considerato un giudizio ottimistico di circostanza, per giustificare non solo il basso profilo della COP-9 di Milano, ma anche la mancanza di iniziative propositive in attesa che la Russia, non si sa quando, ratifichi e dia l'avvio al processo di attuazione.

In realtà c'era molto da fare, indipendentemente dalla ratifica della Russia e indipendentemente dal completamento del lavoro scaturito dagli accordi di Marrakesh. C'era da discutere e valutare come andare avanti con la mitigazione dei cambiamenti climatici e con la riduzione delle emissioni sia sul breve (entro il 2012, anno di scadenza del Protocollo di Kyoto) sia sul lungo termine.

La situazione mondiale delle emissioni non è affatto rosea. Il ritmo di crescita delle emissioni dei paesi industrializzati è tale che al 2012 sarà di ben il 17% al di sopra dei livelli del 1990, quando, invece, come concordato con il Protocollo di Kyoto, deve essere di 5,2% al di sotto. Come si pensa di colmare, con questi ritmi di crescita, una differenza di oltre il 22% sugli obiettivi previsti nel giro di pochissimi anni e cioè dalla data di ratifica della Russia al 2012? E poi dopo il 2012 che succede? Non sarebbe il caso di cominciare a discutere di come coinvolgere paesi in via di sviluppo come Cina, India e Brasile, che rappresentano quasi la metà della popolazione mondiale e i cui ritmi di crescita delle emissioni di gas serra sta per superare quello dei paesi industrializzati? Le valutazioni attuali più attendibili parlano di un incremento al 2012 dei gas di serra globali (paesi industrializzati e paesi in via di sviluppo) del 34% rispetto ai livelli del 1990!

Il processo dei cambiamenti climatici appare comunque destinato ad andare avanti. La riduzione del 5,2% del Protocollo di Kyoto, ammesso che sia effettivamente raggiungibile, non frena i cambiamenti del clima, al massimo li rallenta di qualche anno: occorrerebbero, già da subito, riduzioni di almeno il 60% per frenare il ritmo dei cambiamenti del clima e riportare nei prossimi decenni il sistema climatico in equilibrio tra emissioni globali ed assorbimenti globali dei gas serra. E se i cambiamenti climatici vanno avanti, quale dovrebbe essere il limite invalicabile (che la Convenzione sul clima definisce "dangerous level") al quale comunque dobbiamo attestarci, affinché i cambiamenti del clima non rappresentino una minaccia irreversibile per l'ambiente globale ed i sistemi umani e socio-economici? Questo tipo di discussione non era una discussione accademica, ma una discussione negoziale di accettabilità sociale sul post Kyoto, richiesta dall'art. 2 della Convenzione UNFCCC. In un clima di profonda apatia, non c'è stata iniziativa alcuna, né traccia di nulla su tutto questo nella COP-9 e da parte delle delegazioni governative ufficiali. Solo, in alcune manifestazioni collaterali alla COP-9, scienziati, economisti ed altri esperti, insieme a rappresentanti istituzionali, di associazioni non governative e del mondo industriale, hanno cercato di impostare questi discorsi e di valutarne le prospettive.

Gli aspetti positivi

Il Protocollo di Kyoto, così come è stato messo a punto dopo la COP-9 di Milano a completamento degli accordi di Marrakesh, ha due aspetti positivi.

Innanzitutto, è la prima volta nelle Nazioni Unite che 188 paesi siano d'accordo su qualche cosa che li riguarda tutti (anche se l'accordo è discutibile). Ci sono voluti 11 anni dai famosi accordi di Rio de Janeiro del 1992 sullo sviluppo sostenibile, che mettevano in piedi anche la Convenzione UNFCCC, e ci sono voluti 6 anni da quando il Protocollo di Kyoto è

la situazione delle emissioni mondiali di gas serra non è affatto rosea

segue a pag. 29

La Conferenza di Milano sui cambiamenti climatici

Con la presenza di oltre 5000 partecipanti si è svolta dall'1 al 12 dicembre a Milano COP-9, la nona Conferenza delle Parti che hanno aderito alla Convenzione sui cambiamenti climatici: rappresentanti di 188 paesi e di 312 organizzazioni non-governative hanno dibattuto sugli interventi possibili e su quelli auspicabili per contenere le emissioni nei termini stabiliti oltre sei anni fa con il Protocollo di Kyoto.

Dopo una lunga e a volte difficile trattativa è stato elaborato un documento finale che permette di procedere sulla strada intrapresa per combattere i cambiamenti climatici. Soddisfazione è stata espressa dal ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Altero Matteoli, che attribuisce il merito del risultato alla capacità dell'Europa di aver parlato, ancora una volta, con una sola voce. La Presidenza italiana, ha sottolineato il ministro, ha lavorato senza sosta per ottenere una conclusione positiva: gli eventi climatici estremi che continuano a colpire il pianeta impongono di progredire speditamente per ridurre le emissioni globali di gas serra.

Soddisfatto anche il Commissario europeo per l'Ambiente Margot Wallstrom perché la conferenza ha dimostrato che il Protocollo di Kyoto non è affatto rimasto lettera morta, ma è stato ribadito l'impegno delle Parti a livello mondiale ad agire concretamente per la sua attuazione.

Nella Conferenza di Milano si sono infatti sciolti alcuni nodi su cui si stava discutendo da molto tempo e questo dà la possibilità di consolidare tutto il sistema. Inoltre, l'Italia, anche grazie a numerosi accordi di cooperazione ambientale che ha avviato con alcuni paesi produttori di petrolio, ha trovato un'atmosfera favorevole che ha permesso di risolvere molti problemi sul tappeto.

Ecco alcuni punti qualificanti raggiunti con l'Accordo della Conferenza di Milano.

- È stato aumentato del 6% il budget della Convenzione per coprire le maggiori attività della Convenzione ed alcune attività preparatorie del Protocollo di Kyoto per un totale di 35 milioni di dollari per il biennio 2004-2005. I finanziamenti destinati alle attività preparatorie di Kyoto consentiranno l'attuazione dei programmi di trasferimento delle tecnologie ai paesi in via di sviluppo.
- Si è trovato l'accordo sulle definizioni e le modalità per i progetti di forestazione nell'ambito del meccanismo CDM (Clean Development Mechanism) che riconosce il ruolo delle foreste per assorbire il carbonio nell'atmosfera. In questo contesto è stata approvata la proposta italiana di fissare a 60 anni il periodo nel quale possono essere generati crediti forestali con la possibilità quindi di incentivare progetti forestali sostenibili di lungo periodo. Ogni paese produttore ed ogni paese compratore dei crediti di emissione può escludere di usare foreste di OGM o composte di specie aliene invasive.
- Sono stati elaborati il Programma per il trasferimento delle tecnologie, che identifica le linee guida del futuro programma di lavoro, e la revisione delle metodologie per gli inventari di gas serra, con un invito all'Organizzazione Aeronautica Internazionale ad affrontare la riduzione delle emissioni provenienti dagli aerei.
- Si è dato l'avvio al Fondo per i cambiamenti climatici istituito nella conferenza di Marrakesh per finanziare alcune aree di attività nei paesi in via di sviluppo e nei paesi a minimo sviluppo. Nella prossima COP verranno decise le misure ed i programmi da finanziare con il Fondo.

Complessivamente, si può riassumere che sono state portate a termine le questioni non risolte nella COP-8, ma soprattutto sono state portate a conclusione tutte le azioni stabilite negli accordi di Marrakesh (COP-7).

Le questioni rimaste ancora aperte riguardano la fase di gestione operativa del Protocollo di Kyoto (quando entrerà legalmente in vigore), che diventano di pertinenza del previsto Organo di gestione operativa (MOP) che sarà istituito nella prima sessione negoziale utile dopo l'entrata in vigore del Protocollo.

Il ruolo dell'ENEA alla COP-9 e nel negoziato sui cambiamenti climatici

La COP-9 ha avuto per l'Italia un significato particolare sia perché questa Conferenza si è tenuta nel periodo di presidenza italiana dell'Unione Europea, sia perché l'Italia era, allo stesso tempo, il paese ospitante dell'evento che era visto anche come un traguardo finale delle attività negoziali dell'Italia (in ambito Unione Europea e in ambito Nazioni Unite) in tema di cambiamenti del clima.

L'ENEA, oltre all'usuale collaborazione e supporto tecnico sulle tematiche scientifiche del clima, ha fornito, per le specifiche necessità delle attività negoziali della COP-9, il suo contributo sui temi seguenti curandone anche il coordinamento dei gruppi di lavoro in sede di coordinamento europeo, e partecipando alla presentazione e discussione delle posizioni europee nelle sedi plenarie del negoziato internazionale

I temi curati da ENEA nella COP-9 sono stati:

- il trasferimento delle tecnologie (di mitigazione e di adattamento) e del relativo *know how* verso i paesi in via di sviluppo;
- le politiche e le misure sia per la riduzione delle emissioni di gas serra, sia per gli assorbimenti dei gas serra nelle pratiche agroforestali;
- gli aspetti scientifici e socio-economici per la attuazione delle azioni di mitigazione ai cambiamenti del clima e delle azioni di adattamento ai cambiamenti climatici;
- gli aspetti scientifici della comunicazione e informazione climatica ai fini della consapevolezza del pubblico.

L'ENEA ha inoltre fornito consulenza (anche mediante la redazione di documenti e *key-notes* alla presidenza italiana UE e alla successiva presidenza irlandese UE) per gli interventi dei presidenti da tenere in occasione delle seguenti tavole rotonde:

- *Enabling environments for technology transfer*, tenuta a Milano l'8 dicembre 2003, con la partecipazione di rappresentanti di governi e di istituzioni commerciali e finanziarie,
- *Technology, including technology use and development and transfer of technology*, tenuta l'11 dicembre, in occasione del segmento ministeriale ad alto livello.

Nella fase preparatoria, esperti dell'ENEA hanno partecipato, oltre ad una serie di attività di coordinamento in sede nazionale, anche ad attività internazionali preparatorie tra cui la più rilevante è stata quella di partecipazione ad una iniziativa internazionale, svoltasi a New Delhi, sul trasferimento delle tecnologie di mitigazione e di adattamento. In tale occasione, gli esperti dell'ENEA hanno avuto la possibilità di far conoscere le attività dell'Ente e quelle italiane nel campo dell'adattamento climatico, e i risultati raggiunti dall'Ente in alcuni casi studio.

stato messo in piedi nel 1997, proprio a Kyoto. Quindi, non va sottovalutato il successo politico ed il significato simbolico di questo successo politico che è giunto a buon fine anche grazie all'Unione Europea ed alla Presidenza italiana.

Il secondo elemento positivo è che il Protocollo di Kyoto, così com'è stato definito a Milano, è uno strumento che apre enormi prospettive economiche a livello mondiale. Proprio a causa degli accordi di Marrakesh il clima non è più l'obiettivo primario del Protocollo, ma una scusa, o per dirla in termini positivi, una opportunità che favorirà, attraverso la convenienza economica e la valorizzazione economica dell'ambiente, lo sviluppo socio-economico anche dei paesi in via di sviluppo e la cooperazione internazionale fra paesi sviluppati e paesi in via di sviluppo.

C'è anche il rischio di finanziare (o di risarcire) i paesi produttori di petrolio perché tali paesi si sono più volte lamentati che il Protocollo di Kyoto danneggia le loro vendite di petrolio e di combustibili fossili e, quindi, le loro economie nazionali sono vulnerabili all'attuazione di tale Protocollo. Tuttavia, al di là di questi problemi, la cooperazione internazionale si fonderà certamente su basi più solide, cioè non più con generici aiuti allo sviluppo attra-

verso finanziamenti a pioggia (spesso mal utilizzati), ma con co-finanziamenti concordati su iniziative progettuali, verificabili e controllabili, indirizzate ad obiettivi concreti di sviluppo sostenibile.

Ma si apre anche un grande mercato ambientale dove tutti, anche chi non è direttamente interessato alle emissioni di gas serra o di mitigazione del clima, possono partecipare, acquisendo per esempio crediti di emissione nei paesi in via di sviluppo e commerciando poi tali crediti, trasformati in permessi di emissione, tra i paesi industrializzati, tanto che si pone ora il problema, come se lo è posto la Unione Europea, di dare rigide regole a tutto questo mercato.

Insomma, i cambiamenti climatici diventano un presupposto, piuttosto che una finalità e in questo contesto la finalità di salvaguardia del clima potrà coincidere con il presupposto solo se il mercato mondiale e le regole di tale mercato lo consentiranno. In altre parole i problemi del clima si risolveranno se diventeranno equivalenti a problemi economici o di mercato altrimenti non potranno trovare adeguate risposte: i grandi principi (di equità generazionale ed intergenerazionale, di responsabilità comune ma differenziata, di precauzione ecc.) devono in qualche modo soccombere agli imperativi dello "sviluppo".

*i problemi
del clima si
risolveranno
se
diventeranno
problemi
economici*

Andare oltre Kyoto

"Andare oltre Kyoto", è stata una frase ricorrente nei primi giorni della COP-9 di Milano e, senza alcuna precisazione di merito, aveva, ed ha, un significato ambiguo.

Infatti, per qualcuno significava che sarebbe stato necessario guardare oltre il 2012 per cercare di risolvere in una prospettiva a lungo termine il problema dei cambiamenti climatici sia sul fronte della mitigazione del clima (riduzione delle emissioni) sia sul fronte dell'adattamento ai cambiamenti climatici (riduzione della vulnerabilità ambientale, territoriale e socio-economica). Ma significava anche e soprattutto giungere a risultati concreti che fossero all'altezza dei grandi principi enunciati e delle attese derivanti dalle grandi promesse manifestate in passato sugli obiettivi del clima. Ebbene, da questo punto di vista la COP-9 è stata completamente deludente. Per qualcun altro significava, invece, che sarebbe stato necessario guardare il problema del clima in un contesto economico, per cercare di risolvere la questione del Protocollo di Kyoto, in una prospettiva a breve e medio termine attraverso uno stimolo alla convenienza economica dell'attuazione di un trattato internazionale, stimolo a cui tutti i governi sono sensibili. Pertanto, dando un valore economico e commerciale all'ambiente (per esempio alle foreste), si è inteso dare vigore all'economia mondiale, attraverso il Protocollo di Kyoto ed in relazione alle occasioni di sviluppo indirizzato secondo i più generali principi dello sviluppo sostenibile.

Gli aspetti positivi sono migliori di quelli negativi o viceversa? I politici si sono mostrati soddisfatti e qualcuno anche giubilante, perché non vi erano altre alternative percorribili. Le associazioni ambientaliste si sono mostrate parzialmente soddisfatte, anche se non vi sono state manifestazioni di giubilo. Gli scienziati, i ricercatori e tutti i cittadini? Per ora non lo sappiamo, anche perché non sono adeguatamente informati.

In ogni caso, bisogna prendere atto che in queste grandi assemblee multilaterali internazionali, dovendo mediare tra i diversi conflitti e i più disparati interessi di parte, spesso non si arriva ad apprezzabili risultati concreti. Nel caso specifico del Protocollo di Kyoto, tuttavia, bisogna anche prendere atto che per la maggior parte dei governi che confluiscono in queste assemblee multilaterali internazionali, i cambiamenti del clima, al di là delle grandi enunciazioni di principio e dei buoni propositi, non rappresentano una priorità e tanto meno un'emergenza.

L'universo come lo conosciamo

GIUSEPPE BALDACCHINI

ENEA

UTS Tecnologie Fisiche Avanzate

spazio aperto

La conoscenza dell'universo e delle leggi fisiche che lo governano è progredita con l'applicazione del metodo scientifico sperimentale.

Lo testimonia il lungo viaggio attraverso i momenti critici e le scoperte fondamentali che hanno segnato il cammino di tale progresso

The **universe** as we know it

Knowledge of the universe and the physical laws that govern it has progressed by use of the experimental scientific method, as can be seen by this journey through the critical moments and the milestones that have marked the long path of this progress

Da quando l'uomo prese coscienza della propria esistenza, ha sempre cercato di trovare le risposte ai molti interrogativi che gli venivano posti dal mondo che lo circondava, da vicino prima e da sempre più lontano poi e non solo dal punto di vista materiale. Di solito la descrizione che ne faceva era un misto di esperienze personali, osservazioni scientifiche, impianti mitologici e credenze religiose con pesi diversi secondo i tempi che si andavano evolvendo, ed il tutto più o meno nello stesso modo fino alla nascita della scienza moderna con Galileo, che giustamente ne è considerato il fondatore.

L'applicazione del nuovo metodo scientifico, che si basa sulla dimostrazione sperimentale delle speculazioni teoriche, ha portato nell'ultimo secolo alla scoperta che l'universo si espande, che gli elementi atomici che lo compongono non sono egualmente abbondanti, e che l'intero cosmo è pervaso da una radiazione elettromagnetica di fondo sostanzialmente isotropa. Diversi modelli teorici sono stati escogitati per spiegare queste osservazioni sperimentali ed altre, ed al momento il più accreditato è quello comunemente noto con il nome di Big Bang.

In questo lavoro si cercherà di ripercorrere le tappe principali di questa avvincente avventura della curiosità e dell'intelletto dell'uomo che ha portato a risultati impensabili fino a qualche decennio fa, aprendo incredibili scenari di dimensioni cosmiche, che però non possono essere considerati ancora del tutto definitivi. La ricerca continua...

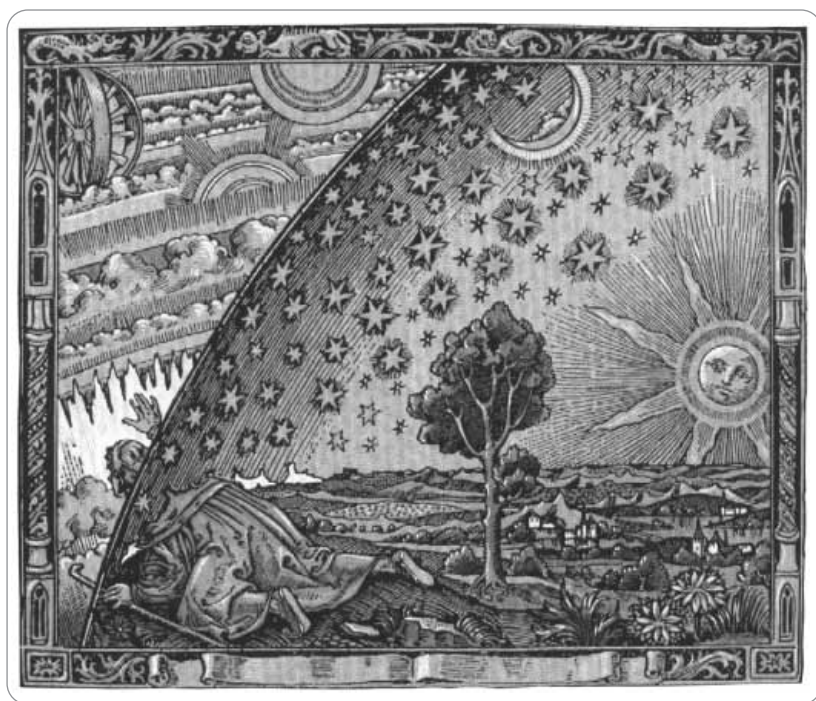


Figura 1

Dipinto meccanico dell'universo ideato verso la fine del XIX secolo da Camille Flammarion (1842-1925), celebre astronomo francese conosciuto anche come divulgatore scientifico e metafisico. L'opera originale si trova presso il museo tecnico di Monaco di Baviera in Germania. Questa rappresentazione è stata attribuita dapprima a tempi medioevali, poi all'epoca rinascimentale, una xilografia tedesca del XVI secolo, ed infine ad una produzione di *art nouveau* del XIX secolo. In ogni caso è chiaro che l'ispirazione è di origine medioevale ed è coerente con il modello aristotelico-tolemaico-cristiano che era ancora influente nel XIX secolo prima delle grandi scoperte in campo astronomico che hanno allargato a dismisura gli orizzonti dell'universo. Il tema dominante rimane comunque la curiosità dell'uomo

Introduzione

Fino a qualche secolo fa si pensava che il nostro pianeta Terra fosse fermo al centro di un sistema di sfere ruotanti contenenti ciascuna la Luna, il Sole, i pianeti e le stelle, di dimensioni finite, ed il tutto circondato dal Primo Mobile, zona di confine tra lo spazio fisico e l'empireo, la dimora di Dio, di dimensioni infinite. Questa descrizione che poneva l'uomo al centro dell'universo soddisfaceva il modello aristotelico, l'astronomia tolemaica e la teologia cristiana, e tutti, o meglio quasi tutti, erano felici e soddisfatti. I pochi che non lo erano, ma erano curiosi, hanno lavorato con perseveranza fino ad arrivare ad una descrizione dell'universo molto diversa dalla precedente, almeno da un punto di vista descrittivo apparente. La curiosità umana è bene illustrata in figura 1 dove un viaggiatore squarcia la volta celeste per cercare di capirne il funzionamento.

Questa ricerca della conoscenza è stata coronata da successo ed oggi noi sappiamo che viviamo sulla superficie del pianeta Terra, del diametro di 12.735 km, che si muove alla velocità di 30 km/s in-

torno al Sole da cui dista 150 milioni di km (figura 2). Questa grande stella del diametro di 1,4 milioni di km, che illumina e riscalda nell'immensità dello spazio vuoto e freddo, oltre alla Terra, altri pianeti più grandi e più piccoli, satelliti, meteore, comete, e fasce di gas ionizzati, che occupano un diametro di poco inferiore ad 1 anno luce e che costituiscono il nostro sistema planetario, sembra muoversi alla velocità di 20 km/s verso la stella Vega della costellazione della Lira, ma in realtà ruota insieme ad altre migliaia di stelle a 300 km/s intorno ad un punto distante 30.000 anni luce, che è il centro di un grande insieme di stelle chiamato galassia, cioè Via Lattea (1 anno luce equivale a 9,46 milioni di milioni di km).

La Via Lattea, che possiede una forma a spirale del diametro di 100.000 anni luce e che è composta da circa 30 miliardi di stelle ed altro materiale non luminoso, si muove a 40 km/s verso una galassia simile ma più grande di nome Andromeda, distante 3 milioni di anni luce.

Queste due galassie con altre più piccole, che costituiscono il Gruppo Locale, si muovono a 400 km/s verso l'ammasso della Vergine, un insieme di numerose galassie che occupano un volume del diametro di 20 milioni di anni luce e distante 60 milioni di anni luce.

Il Gruppo Locale e l'ammasso della Vergine si muovono insieme a 500 km/s verso il superammasso della Idrà Centauro delle dimensioni di 100 milioni di anni luce e distante da noi 150 milioni di anni luce.

Molto probabilmente tutti gli oggetti precedenti si muovono verso il Grande Attrattore, un volume ancora maggiore dello spazio con una grande concentrazione di galassie il cui numero non è stato ancora stimato.

Infine, a questi moti relativi in una zona dello spazio relativamente piccola e più vicina a noi, che sicuramente sono ripetuti con direzioni e valori diversi in altre zone dello spazio più lontane, si deve aggiungere una velocità di allontanamento di tutte le galassie le une dalle altre che aumenta con la loro distanza fino al limite estremo della osservazione strumentale di circa 15 miliardi di anni luce.

Questo è quello che conosciamo dell'universo oggi, un'epoca di grande progresso scientifico e tecnologico come mai prima sin dall'alba della civiltà umana. Come ha fatto l'uomo ad arrivare alla conoscenza dei fenomeni fisici che gli ha permesso persino di imbrigliare le forze della natura e di utilizzarle per suo uso personale con sempre maggiore efficacia? Questa è una domanda che negli ultimi tempi si sono posti in molti; in particolare venne formulata all'inizio del XX secolo ad Albert Einstein con riferimento al metodo scientifico. Egli rispose con la sua consueta modestia che non lo sapeva, ma sicuramente era stato un miracolo.

Oggi la storia della scienza è conosciuta molto meglio ed una risposta al precedente quesito può essere tentata: è questo lo scopo del presente lavoro con particolare riferimento all'universo, alla sua origine ed al suo futuro. Naturalmente non è mia intenzione descrivere puntualmente lo sviluppo scientifico nel corso dei secoli, cosa che è stata già fatta da altri in opere ponderose che possono essere consultate in una qualsiasi buona biblioteca, ma

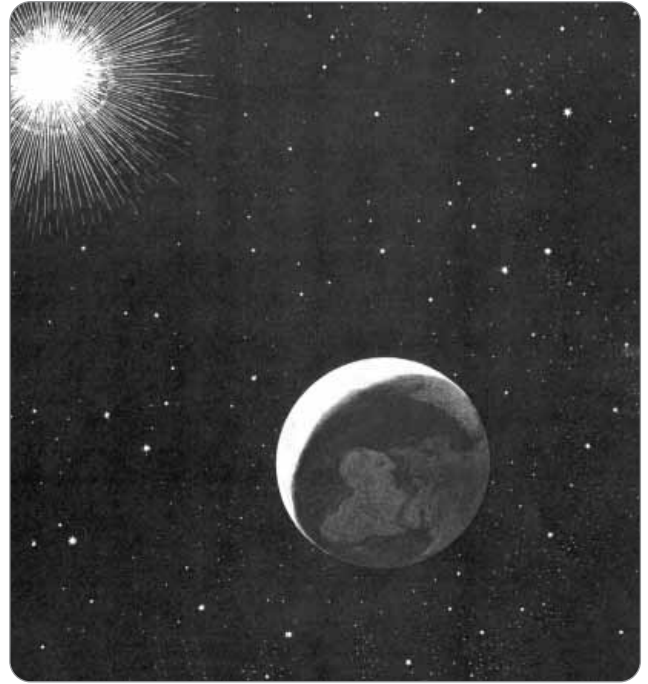


Figura 2

La Terra illuminata da un Sole distante e sospesa nella immensità dello spazio buio con le stelle sullo sfondo infinito. Una illustrazione molto vicina alla realtà dovuta alla libera interpretazione artistica ed eseguita prima della conquista dello spazio, che permette oggi di riprendere foto simili dai satelliti e dalle sonde spaziali

Fonte: dal libro di *Astronomia*

piuttosto cercherò di fare una storia ragionata di questo sviluppo mettendo in risalto i momenti critici che ne hanno segnato il lungo cammino e le scoperte fondamentali utili allo scopo di questo lavoro.

Lo sviluppo scientifico nella storia

La figura 3 riporta in modo schematico la crescita della scienza nel tempo, banda grigia al centro, con riferimento ai personaggi a sinistra ed alla storia a destra. Non si deve infatti dimenticare che la scienza, come ogni altra attività umana, è immersa nella storia dell'uomo ed è stata influenzata ed ha influenzato la storia stessa.

Tralasciando i contributi anteriori delle prime civiltà umane, che peraltro non sono stati trascurabili, tutto è iniziato nel mondo ellenico intorno al 500 a.C. Infatti a quell'epoca un gruppo di persone eccezionali, stimolate probabilmente da favorevoli condizioni sociali, economiche e politiche e da altri fattori che fino ad oggi sono sfuggiti ad una comprensione completa, iniziò uno studio sistematico di tutti i campi culturali definendo lo scopo ed il significato delle varie discipline che ancora oggi portano la denominazione allora attribuita.

Così nel campo scientifico vennero fondate la matematica, la fisica, la medicina, la geometria, l'astronomia ecc., ed i nomi di alcuni di questi giganti della cultura sono riportati nella stessa figura 3 in ordine temporale.

Lo straordinario contributo culturale del mondo ellenico perse la sua spinta propulsiva verso il 200 a.C., ma la conoscenza accumulata venne preservata e diffusa in tutto il vasto territorio del dominio romano per più di 600 anni. In questo modo essa si radicò profondamente in particolare ad occidente ed a settentrione del bacino del Mediterraneo e costituisce ancora oggi la base della civilizzazione occidentale. Il contributo dei Romani alla cultura in generale non fu particolarmente importante ad eccezione che nelle discipline del diritto, politica, ingegneria ed architettura, ma decisivo fu il loro ruolo nel radicamento territoriale della cultura. All'arrivo dei barbari non c'erano più energie da dedicare alla cultura, che rimase relegata negli scritti della biblioteca di Alessandria d'Egitto e nei monasteri che andavano sorgendo numerosi in Europa. Ma non bisogna credere che la conoscenza fosse andata perduta del tutto, come dimostra il caso del monaco Dionigi il Piccolo, matematico e astronomo di origine russa, che nel 525 d.C. determinò la nascita di Gesù Cristo e fissò lo "zero" del calendario Giuliano, poi Gregoriano, uno dei più precisi mai concepiti dall'uomo ed oggi in uso praticamente in tutto il mondo. In ogni caso il risveglio culturale per la Scienza avvenne ad opera degli Arabi quando verso il 700 d.C. uscirono dalla penisola arabica ed in un tempo rela-



Figura 3
La nascita e lo sviluppo della Scienza sono segnati da una zona in colore nella parte centrale. I nomi di alcuni personaggi notevoli sono riportati a sinistra, mentre la storia è rappresentata in grandi linee sulla destra. Infine i personaggi legati al calendario giuliano-gregoriano, in uso oggi in tutto il mondo moderno, sono riportati al centro a cavallo della zona colorata

tivamente breve crearono un impero che andava dai confini della Cina alla Spagna. Nel processo di conquista vennero in contatto con la civilizzazione ellenica attraverso i testi conservati nella biblioteca di Alessandria, che furono tradotti in arabo e studiati in vari circoli culturali. Studiosi arabi di grande levatura, alcuni dei quali riportati in figura 3, ampliarono la conoscenza dei Greci in campi quali la matematica, geometria, fisica, astronomia e medicina in un periodo di qualche secolo intorno l'anno 1000, dopo il quale però non si ebbero più contributi rilevanti e gli Arabi sparirono rapidamente, così come erano apparsi, dall'orizzonte culturale scientifico.

Questo importante contributo ebbe comunque un effetto decisivo e duraturo sull'Europa che a quell'epoca andava risorgendo dalle rovine delle invasioni barbariche. Infatti molte Università venivano fondate dalla Chiesa cattolica per preparare persone brillanti in grado di contestare al massimo livello nuove e vecchie eresie. Verso il 1200 alcuni libri arabi, traduzioni in generale di originali greci, dalla Spagna giunsero alla Università di Parigi e si pose subito il problema se dovessero essere accettati come libri di testo per l'insegnamento. Studiosi famosi come Alberto Magno e Tommaso d'Aquino, entrambi futuri Santi della Chiesa, vennero investiti del problema, che fu risolto con l'accettazione dei libri e non solo. Infatti essi dissero che era dovere dello studioso cristiano investigare il contenuto scientifico di questi antichi testi aprendo in questo modo la strada della ricerca scientifica. Insomma la Scienza era sentita come un dono di Dio che doveva essere coltivato a maggiore gloria della Fede cristiana. In questa prima fase la lettura dei libri, in particolare la Fisica di Aristotele, non fu affatto superficiale se si pensa che Alberto Magno si accorse della inconsistenza del principio di inerzia enunciato dallo stesso Aristotele.

A questo punto per capire il significato del contributo di questi primi studi europei in ambito ecclesiale (la cultura all'epoca era praticamente nelle mani della Chiesa) è necessario fare un passo indietro e tornare al tempo degli antichi Greci. Infatti, malgrado i loro risultati fossero eccezionali per l'epoca, i Greci non riuscirono mai a stabilire un vero e proprio metodo scientifico. Infatti, durante tutto l'arco del loro sviluppo culturale ci furono essenzialmente due scuole di pensiero, che potremmo definire "teorica" e "sperimentale".

La prima asseriva che una comprensione del funzionamento dell'Universo era possibile con la sola ragione, mentre per la seconda le ipotesi dovevano essere provate da appropriati esperimenti prima di essere accettate per vere. Queste due scuole di pensiero convissero insieme per molto tempo con alterne vicende, ma alla fine quella "teorica" prese il sopravvento anche per il contributo di studiosi del calibro di Aristotele e Tolomeo, le cui teorie non vennero più messe in discussione per circa mille anni.

Solo durante il risveglio intellettuale dell'Europa, e per i motivi cui ho accennato poco sopra, l'approccio "sperimentale" venne preso di nuovo in considerazione specialmente da Giovanni Buridano e Nicola Cusano, il primo un frate francescano francese ed il secondo un cardinale di origine tedesca ma residente a Roma. Essi infatti reintrodussero il metodo scientifico sperimentale che richiedeva una verifica dimostrativa per validare le ipotesi teoriche.

In particolare Buridano, eseguendo esperimenti di meccanica, dimostrò falsa l'ipotesi di Aristotele, accettata a priori da tutti fino a quel momento, che una freccia non potesse muoversi in assenza di atmosfera.

Questo metodo è stato poi applicato in modo sistematico da Galileo Galilei, che a ragione è considerato il padre della scienza moderna. Egli infatti non disdegnò di condurre esperimenti che gli aristotelici dell'epoca consideravano infantili. Quanto essi non lo fossero è dimostrato dal successo della scienza, che da Galileo in poi ha utilizzato in modo sistematico il metodo scientifico sperimentale con i risultati che oggi sono sotto gli occhi di tutti noi.

*le ipotesi
dovevano
essere
provate da
appropriati
esperimenti
prima di
essere
accettate per
vere*

Alcune scoperte fondamentali della scienza moderna

Non è questa la sede per raccontare in dettaglio le numerose scoperte scientifiche che si sono susseguite da Galileo in poi, ma solo un aspetto mi interessa ai fini di questo lavoro, ed esso riguarda le scoperte che hanno dato inizio alla seconda rivoluzione della scienza moderna e che hanno permesso di conoscere l'universo così come descritto nell'introduzione.

Alla fine del XIX secolo la scienza fisica era arrivata ad un punto morto. Infatti la meccanica classica e l'elettromagnetismo, che in pratica avevano raggiunto l'apice del loro sviluppo grazie anche a individui geniali quali Newton, Coulomb, Laplace e Maxwell, non erano in grado di dare una spiegazione ad alcuni fenomeni elementari che coinvolgevano materia e radiazioni luminose.

All'epoca si sapeva che la radiazione luminosa, o luce almeno nel visibile, era un fenomeno elettromagnetico ma i suoi meccanismi di interazione con la materia erano sconosciuti. Infatti era noto che la luce veniva emessa dalla materia, atomi e molecole eccitate con scariche elettriche, a particolari lunghezze d'onda distribuite in modo discreto. Si parlava di atomi ma non si conosceva ancora la loro costituzione. Inoltre tutti i corpi materiali riscaldati emettevano uno spettro continuo di luce, chiamata radiazione di corpo nero, che dipendeva esclusivamente dalla temperatura del corpo e non dal tipo di materiale.

*si parlava di
atomi ma
non si
conosceva
ancora la
loro
costituzione*

La fisica classica non era in grado di dare alcuna risposta alla emissione discreta degli atomi e dava una risposta platealmente errata alla radiazione di corpo nero, nota con il nome di "disastro ultravioletto". Infatti il calcolo classico prevedeva una emissione di energia luminosa infinita da parte di un corpo caldo, con una intensità che aumentava come una potenza al quadrato verso la luce ultravioletta, entrambe le previsioni contraddette dall'esperienza ma che hanno generato la locuzione del disastro di cui sopra.

Questa specie di muro che limitava il mondo della scienza cominciò a sgretolarsi il 14 dicembre del 1900 quando Max Planck presentò alla conferenza della Società Tedesca di Fisica a Berlino la sua derivazione della legge della radiazione di corpo nero che finalmente rendeva conto dei risultati sperimentali noti da tempo. Questo episodio può essere considerato a tutti gli effetti come la nascita della meccanica quantistica. Infatti per la prima volta veniva introdotto il concetto di "quanto di energia", e cioè che l'energia della radiazione esisteva e poteva essere scambiata solo in multipli del quanto elementare:

$$E = h\nu,$$

dove ν è la frequenza della radiazione ed $h = 6,625 \times 10^{-34}$ *joule* · *s*, una nuova costante universale che si chiama "costante di Planck" in onore del suo inventore.

Più o meno allo stesso tempo, trascurando tutti coloro che non credevano alla esistenza degli atomi perché non c'era alcuna loro evidenza diretta, esistevano due modelli in competizione che tenevano conto entrambi del fatto sperimentale che gli atomi erano elettricamente neutri e che avevano una dimensione molto piccola di circa 1 \AA (10^{-10} m).

Nel primo modello un numero eguale di cariche negative (elettroni) e positive (protoni) erano distribuite in modo uniforme in un volume sferico, mentre nel secondo le cariche positive erano collocate al centro del volume con le cariche negative ruotanti sulla sua superficie. Tutti e due i modelli avevano pregi e difetti, ma nessuno dei due riusciva a spiegare lo spettro di emissione di luce degli atomi che era conosciuto sperimentalmente. La situazione venne sbloccata in parte da Ernest Rutherford che nel 1910 fece a Manchester l'esperienza della diffusione delle particelle α (nuclei dell'elio di carica positiva) da parte di sottilissime lamine d'oro. Durante le misure egli si accorse che, mentre la maggioranza delle particelle α veniva deviata secondo una certa distribuzione angolare, alcune di loro torna-

vano esattamente indietro. Questo comportamento poteva essere spiegato solamente supponendo che tutta la carica positiva e la massa degli atomi fossero al loro centro, cioè la situazione prevista dal secondo modello.

Quindi, stabilito che erano gli elettroni a ruotare intorno ai nuclei, rimaneva da capire come un simile sistema potesse essere stabile. Infatti gli elettroni dovevano ruotare molto velocemente per evitare di cadere nei nuclei dai quali venivano attratti dalla forza elettrica. Ma la meccanica classica prevede che una carica elettrica accelerata, come l'elettrone ruotante, emetta energia elettromagnetica di tale intensità da cadere a spirale nel nucleo in un tempo di 10^{-9} secondi. Di nuovo si cadeva in contraddizione con l'esperienza degli atomi stabili e della loro emissione di luce.

Anche in questo caso fu un'idea nuova a risolvere il problema. Nel 1913 Niels Bohr, che conosceva bene i lavori di Planck e di Rutherford, propose che solo alcune orbite degli elettroni potessero essere stabili, e che nel caso dell'atomo di idrogeno l'energia dell'elettrone era data dalla formula:

$$E = -2m(\pi e^2/hn)^2,$$

in cui m ed e sono la massa e la carica elettrica dell'elettrone, h la costante di Planck, n un numero intero positivo qualsivoglia, ed il segno $-$ si riferisce al fatto che l'elettrone è legato al nucleo.

In pratica l'energia dell'atomo veniva quantizzata dal "numero quantico n ", come era accaduto tredici anni prima alla radiazione elettromagnetica. Con questa ulteriore scoperta era stato finalmente risolto il problema della emissione discreta, cioè a righe spettrali, della luce dagli atomi, e della interazione luce-materia, entrambe le quali si venivano ora a trovare su uno stesso piano di descrizione fisica.

Un ulteriore passo era stato fatto in quegli anni da Albert Einstein senza ricorrere ai quanti, ma utilizzando le contraddizioni della meccanica classica ed il fatto accertato sperimentalmente che la luce era composta da onde elettromagnetiche che si muovevano alla velocità di 3×10^8 m/s in qualsiasi riferimento inerziale, cioè la "velocità della luce c " che è una costante universale. Nel 1905 egli introdusse la teoria della relatività speciale per la quale tutti i fenomeni avvengono in uno spazio a quattro dimensioni, delle quali tre rappresentano lo spazio fisico e la quarta è il tempo, non più separato dallo spazio fisico come nella meccanica classica. Questa rivoluzionaria scoperta portò tra l'altro alla formulazione della famosa equazione:

$$E = mc^2 = m_0c^2/(1-(v/c)^2)^{1/2},$$

in cui m_0 è la massa a riposo e v la velocità rispetto ad un riferimento inerziale del corpo materiale. Questa formula per la prima volta dimostrava l'equivalenza tra massa ed energia, un risultato di importanza fondamentale per tutti gli sviluppi a seguire nella scienza. È bene sottolineare a questo punto che le energie delle tre formule precedenti hanno la stessa natura anche se si riferiscono a sistemi diversi, ed in particolari condizioni si possono trasformare l'una nell'altra.

Le scoperte in astronomia e la cosmologia

Le rivoluzionarie scoperte della nuova fisica non tardarono a sortire effetti nel campo astronomico, fino ad allora limitato sostanzialmente al sistema planetario ed alle stelle della Via Lattea ed in particolare alle più vicine, delle quali si riusciva a misurare la distanza fino a circa 100 anni luce.

*le
rivoluzionarie
scoperte
della nuova
fisica non
tardarono a
sortire effetti
nel campo
astronomico*


Figura 4

Ai primi di aprile del 2002 la cometa Ikeya-Zhang è passata a 2° dalla galassia di Andromeda (M31) e dalle sue piccole galassie satelliti M32 alla sua sinistra e M110 in basso a destra. La coda di gas e di polvere della cometa copre un campo di circa 5° e sembra molto più grande della galassia in basso a sinistra. In realtà la galassia di Andromeda, uno degli oggetti più grandi dello spazio profondo, dista 3 milioni di anni luce (circa 30 milioni di milioni di milioni di km) mentre la cometa all'epoca della foto era ad una distanza di circa 100 milioni di km. Un elenco metodico delle nebulose (oggetti diffusi diversi da stelle, comete e pianeti) venne redatto una prima volta nel 1784 da Charles Messier, da cui la lettera M. Il suo catalogo conteneva 103 oggetti di cui circa 50 risultarono in seguito extragalattici. Nel 1890 venne pubblicato da J.L.E. Dreyer un nuovo catalogo generale, NGC, con molti più oggetti che ancora continua oggi. La foto è stata presa dall'Observer's Calendar 2003 della Royal Astronomical Society of Canada

I primi risultati vennero da Einstein stesso, che avendo sviluppato la relatività speciale ed avendo compreso che la forza gravitazionale esercitava i suoi effetti su grandi distanze, iniziò a lavorare sulla relatività generale, cioè sulla estensione dei principi della relatività ai sistemi non inerziali ed agli effetti della gravità sul tessuto spazio-temporale. In questo modo nel 1916 riuscì a formulare una serie di equazioni (circa 20 relazioni tensoriali) che descrivevano le curvature dello spazio-tempo nell'universo. Con l'artificio dell'aggiunta di una "costante cosmologica", cioè di una forza repulsiva tra corpi celesti a grandissime distanze, riuscì a trovare una soluzione per un universo meccanicamente stabile a curvatura spazio-temporale positiva. È curioso notare che più tardi Einstein affermò che la costante cosmologica era stato uno tra i maggiori errori in tutta la sua vita, ma oggi ci sono molte ragioni per credere che invece non fu un errore ma anzi una tra le sue maggiori scoperte.

In ogni caso nel 1922 Alexander Friedmann scoprì una banale svista in un passaggio delle equazioni di Einstein, una delle quali

in particolari condizioni era stata divisa per zero. Eliminata questa incongruenza matematica, egli riuscì a dimostrare che le equazioni cosmologiche ammettevano due soluzioni: una di un universo in espansione e l'altra di un universo in contrazione.

Nel 1925 Edwin P. Hubble dall'osservatorio del monte Wilson in California scoprì che la grande nebulosa a spirale di Andromeda non è una nube di gas (come la nube di Orione di polvere e gas) fluttuante nello spazio interstellare della nostra galassia, ma essa stessa una gigantesca galassia alla distanza di 1 milione di anni luce dalla nostra Via Lattea. La figura 4 mostra una spettacolare foto della galassia di Andromeda ripresa con una cometa di passaggio nella stessa zona del cielo.

Negli anni seguenti Hubble studiò altre galassie ancora più lontane e nel 1929 si accorse, misurando lo spostamento nel rosso delle righe di emissione atomica, che esse si allontanavano dalla Via Lattea ad una velocità v proporzionale alla loro distanza, come nella formula seguente:

$$v = Hd,$$

in cui d è la distanza delle galassie dalla terra ed "H" è una costante che oggi si chiama "costante di Hubble" in onore del suo scopritore. All'epoca egli misurò un valore di $H = 180$ km/s per milione di anni luce, ma nel 2001 misure più precise hanno dato il valore molto più piccolo di $H = 15,35$ km/s per milione di anni luce.

A parte il valore numerico preciso della costante H , il fatto stesso che tutte le galassie si allontanino le une dalle altre sta a significare che nel lontano passato tutta la materia di que-

ste galassie era concentrata e compressa in un volume molto piccolo, se non nullo.

La figura 5 mostra la galassia del Vortice, più lontana di quella di Andromeda ma ancora relativamente vicina a noi, una tra le miriadi di galassie esistenti nell'universo.

La recessione delle galassie osservata da Hubble non sfuggì a Georges Lemaitre che, indipendentemente da Friedmann, aveva già trovato nel 1927 una soluzione alle equazioni di Einstein di un universo in espansione. Accortosi che i nuovi dati sperimentali si accordavano con la sua soluzione, a partire dal 1931 costruì un sistema di teorie sull'ipotesi di un "atomo primordiale". In pratica, secondo il suo modello, l'universo primordiale omogeneo ed altamente compresso ad un certo istante iniziò ad evolversi espandendosi tra fantastici bagliori cosmici fino alla situazione attuale di stelle, cenere e fumo, similmente ai fuochi di artificio, come nelle parole stesse del proponente.

Lemaitre propagandò per molti anni il suo modello cosmologico nei congressi scientifici di astronomia di tutto il mondo ma con scarso successo, anche perché la sua teoria somigliava molto da vicino alla creazione dal nulla proposta da sempre dalla Chiesa ed egli ne era un sacerdote e quindi chiaramente di parte, un propagandista possiamo dire, fino a che dopo la seconda guerra mondiale George Gamow, il quale conosceva abbastanza bene anche la fisica nucleare che si era sviluppata nello stesso periodo di tempo, cominciò ad interessarsi della teoria di Lemaitre. Egli ebbe molto successo nel dimostrare che questa nuova teoria era in accordo con svariate osservazioni sperimentali, tra cui in parte l'abbondanza degli elementi nell'universo, e fu in grado di prevedere l'esistenza di una radiazione cosmica di corpo nero a bassa temperatura.

Il modello cosmologico di Lemaitre venne chiamato in seguito la teoria del Big Bang, ed è così che ancora oggi si indica.

Malgrado la scoperta della recessione delle galassie, la teoria del Big Bang sarebbe rimasta solamente una tra le numerose teorie cosmologiche esistenti allora, se nel 1965 Arno A. Penzias e Robert W. Wilson non avessero scoperto e misurato una radiazione di corpo nero uniforme in tutte le direzioni del cielo alla temperatura di circa 3 K (gradi Kelvin).

Questa importante scoperta fu immediatamente collegata alla teoria di Gamow di circa dieci anni prima, che aveva previsto per questa radiazione una temperatura di qualche diecina di gradi, una previsione molto buona per le conoscenze dell'epoca. A questo punto la teoria del Big Bang venne presa veramente sul serio e si iniziò uno studio sistematico sperimentale e teorico per descrivere in tutti i particolari gli sviluppi dell'universo dall'inizio fino ad oggi.



Figura 5

Le grandi braccia della galassia del Vortice (M51) sono influenzate dalla più piccola galassia NGC 5195 a sinistra, che ruota in senso contrario e sembra trascinare con sé una miriade di stelle del braccio inferiore della più grande galassia. Le dimensioni della galassia del Vortice, che dista da noi 30 milioni di anni luce, sono impressionanti rispetto ad altre galassie che si osservano nella stessa foto ma che sono molto più distanti. Un elenco metodico delle nebulose (oggetti diffusi diversi da stelle, comete e pianeti) venne redatto una prima volta nel 1784 da Charles Messier, da cui la lettera M. Il suo catalogo conteneva 103 oggetti di cui circa 50 risultarono in seguito extragalattici. Nel 1890 venne pubblicato da J.L.E. Dreyer un nuovo catalogo generale, NGC, con molti più oggetti che ancora continua oggi. La foto è stata presa dall'Observer's Calendar 2003 della Royal Astronomical Society of Canada

L'universo secondo la teoria del Big Bang

L'inverso della costante di Hubble coincide con l'inizio dell'universo, che corrisponde a 19 miliardi di anni fa. Ma poiché, come vedremo alla fine, il momento iniziale preciso dipende dallo sviluppo futuro dell'universo, questa data ha una incertezza che oggi è compresa tra 15 e 20 miliardi di anni. In ogni caso l'universo iniziale era limitato in un volume molto piccolo, molto denso, molto caldo, la temperatura era milioni di milioni di milioni di gradi, e l'energia era tutta contenuta nelle radiazioni elettromagnetiche, cioè nei fotoni (figura 6). Subito dopo, materia ed antimateria vennero prodotte per creazione di coppie di particelle elementari, le quali si annichilavano producendo di nuovo fotoni, fino al momento in cui la temperatura si abbassò sotto la soglia di creazione di coppie elettrone-positrone di circa 10 miliardi di gradi. Al di sotto di questa temperatura solo la parte della materia non annichilata, grazie ad una provvidenziale ed infinitesima rottura della simmetria delle leggi di creazione e di distruzione di coppie, rimase immersa nella radiazione elettromagnetica, ed è costituita da elettroni, protoni e neutroni, questi ultimi nel rapporto di uno a cinque rispetto ai protoni a causa della loro maggiore massa. Tutto ciò richiese circa 100 secondi.

Un neutrone isolato non è stabile e decade in un protone ed un elettrone in 15 minuti, ma l'espansione dell'universo ed il suo raffreddamento hanno negato ai neutroni questa possibilità. Infatti quando la temperatura scese ad 1 miliardo di gradi, i neutroni si unirono ai protoni formando nuclei di deuterio, i quali a loro volta formarono i nuclei di elio, due protoni e due neutroni. Il processo durato appunto circa 15 minuti avrebbe potuto continuare con l'aggiunta di un neutrone od un protone, ma anche in questo caso una rottura della continuità delle masse, i nuclei di massa 5 e 8 non sono stabili, ha impedito sostanzialmente la formazione di nuclei di massa superiore a 4, con l'eccezione di minime quantità di litio, berillio e boro. Poiché all'inizio di queste reazioni nucleari c'erano a disposizione due neutroni per dieci protoni, alla fine ci sarà un nucleo di elio per dieci protoni, che significa un universo contenente circa il 10% di atomi di elio ed il resto di atomi di idrogeno. Questo è approssimativamente il rapporto misurato oggi nell'universo, e ciò costituisce una prima e consistente verifica sperimentale della teoria del Big Bang. Naturalmente rimane da spiegare come si siano formati gli altri nuclei più pesanti del sistema periodico, cosa che sarà fatto nel seguito.

Prima però di proseguire con l'universo in espansione, è utile seguire la sorte del deu-

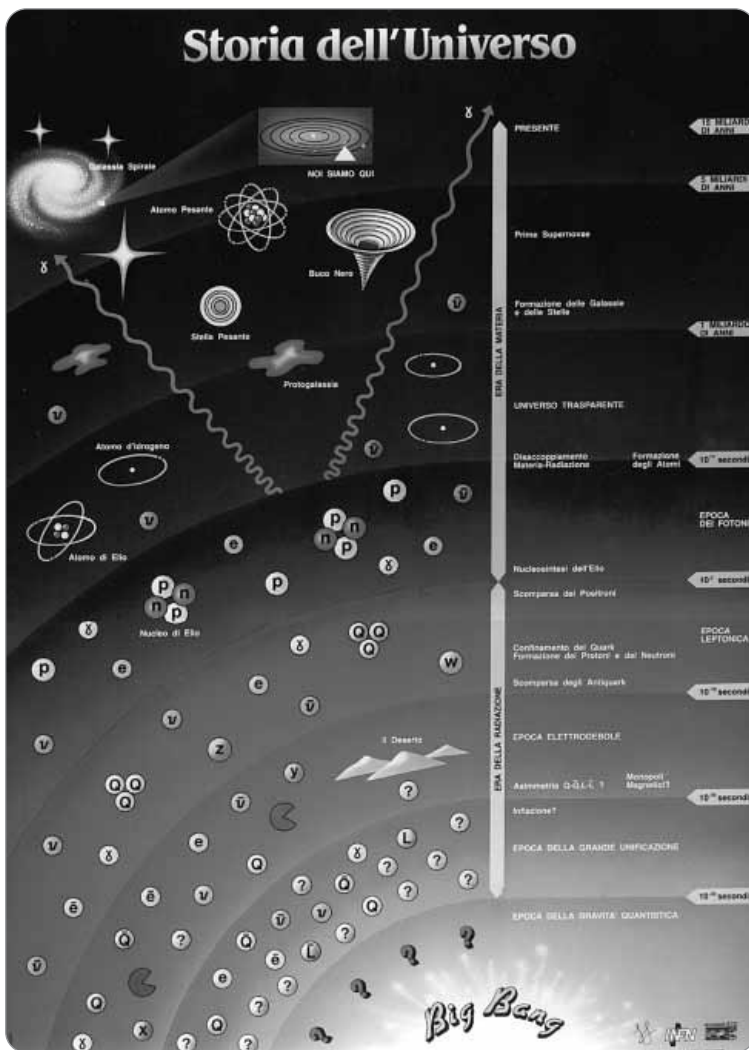


Figura 6
 Evoluzione dell'universo fino ai nostri giorni secondo l'ipotesi del Big Bang. Vedere il testo per dettagli. Illustrazione tratta da una locandina realizzata da CERN e INFN intorno al 1990

terio che ha permesso la sintesi dell'elio. Infatti, una piccola parte del deuterio può sopravvivere se la densità dell'universo non supera un certo valore critico, e quindi la sua presenza oggi sarebbe l'indice di un certo tipo di sviluppo futuro sul quale si tornerà nel seguito.

Dopo la nucleosintesi dell'elio la temperatura scese al di sotto di 1 miliardo di gradi e le reazioni nucleari cessarono completamente. A quel punto l'universo era formato da un gas totalmente ionizzato di idrogeno e di elio e dalla radiazione elettromagnetica accoppiati tra di loro in modo tale che i fotoni, cioè la luce, non aveva la possibilità di muoversi su grandi distanze ma veniva continuamente assorbita e diffusa dal gas ionizzato. Si può immaginare lo stato dell'universo in questa fase come una gigantesca bolla di fuoco che si espandeva a velocità incredibilmente elevata senza lasciar sfuggire dalla sua superficie né materia né luce. Questa situazione continuò per ancora 300.000 anni quando l'universo raggiunse la temperatura di 3000 K e gli elettroni si legarono ai nuclei formando atomi stabili. Da quel momento in poi la radiazione e la materia si disaccoppiarono e l'universo divenne trasparente con la luce che iniziò a propagarsi liberamente in tutte le direzioni. Questa radiazione, all'inizio della sua libertà in equilibrio termico con la materia a 3000 K, continuò ad espandersi con conseguente calo della sua temperatura e della sua densità sino a diventare quella che oggi è nota come radiazione cosmica di corpo nero, misurata per la prima volta nel 1965 ed alla quale esperimenti più recenti hanno attribuito una temperatura di 2,7 K. Questa è la seconda e probabilmente più importante verifica della teoria del Big Bang.

Nel seguito fino a circa 1 miliardo di anni l'universo continuò ad espandersi e la temperatura ad abbassarsi, e se qualcuno fosse stato presente non avrebbe potuto osservare nulla per il semplice fatto che non c'erano stelle che potessero illuminare questo grandioso scenario cosmico, ma invece avrebbe avvertito una temperatura abbastanza gradevole specialmente verso la fine di questo periodo di gestazione. Infatti, a causa di iniziali piccole fluttuazioni della densità della materia, che poi sono rimaste come un'impronta nella radiazione cosmica di corpo nero, l'universo sostanzialmente omogeneo iniziò a separarsi in grandi isole separate da spazi con meno materia. All'interno di queste gigantesche isole di dimensioni galattiche si formarono strutture più piccole che sotto l'effetto della gravitazione cominciarono a collassare fino a raggiungere nei loro nuclei temperature di centinaia di milioni di gradi capaci di innescare le reazioni nucleari di fusione dell'idrogeno. A quel

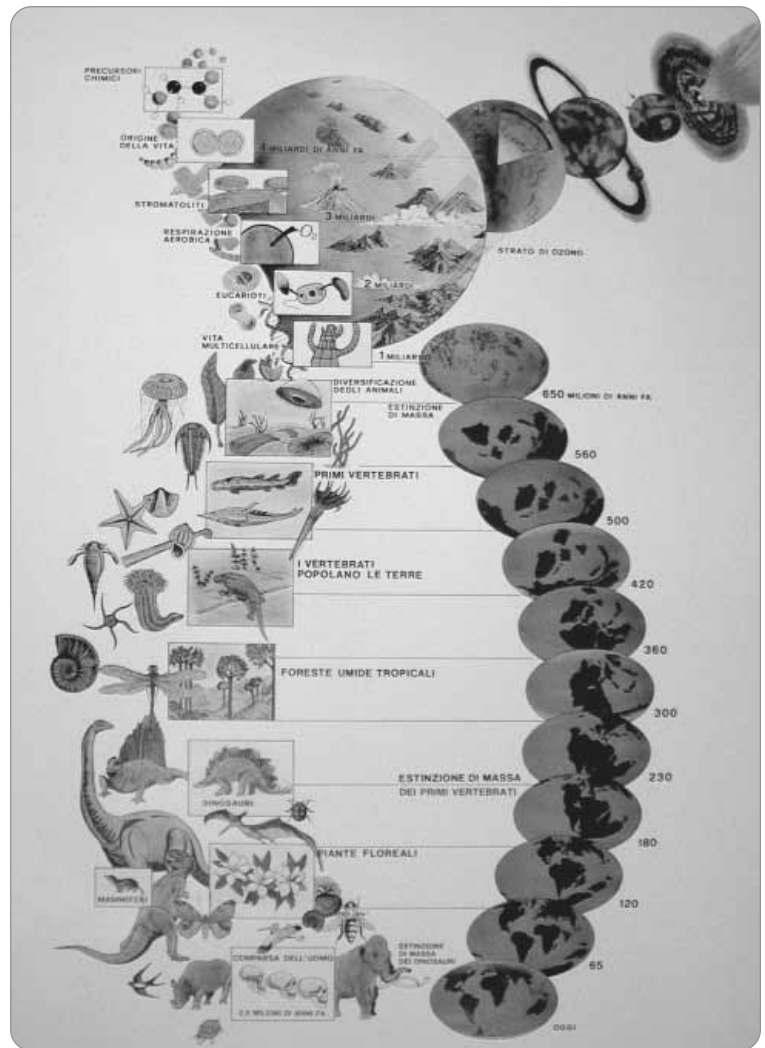


Figura 7

L'evoluzione del pianeta Terra e del suo ambiente biologico. Illustrazione tratta da una locandina realizzata da ENEA intorno al 1980

punto la energia nucleare bilanciava la energia gravitazionale e le prime stelle rimasero stabili fino ad esaurimento del combustibile nucleare, che era prima idrogeno, poi elio ed avanti fino ad arrivare al ferro. Alla fine la stella riprendeva a collassare fino a raggiungere temperature così alte da esplodere come una supernova. Durante questa esplosione elementi più pesanti del ferro furono prodotti e scagliati nello spazio cosmico insieme ad una buona parte del materiale della stella. Il ciclo di formazione ed esplosione di stelle primordiali più grandi del Sole si ripeté più volte nel corso di parecchie centinaia di milioni di anni fino alla formazione degli elementi del sistema periodico con l'abbondanza che oggi è misurata nell'universo. E questo risultato sperimentale rappresenta una ulteriore ed importante verifica della teoria del Big Bang.

Con il tempo il processo di formazione stellare rallentò e, anche a causa della presenza degli elementi pesanti, le nuove stelle che si andavano formando erano più piccole delle precedenti e la loro vita media molto più lunga, come per il nostro Sole di circa 10 miliardi di anni. Naturalmente alla stessa epoca appartiene la nascita delle galassie prodotte dalle isole primordiali. Dopo la formazione di stelle più stabili, i pianeti composti principalmente di elementi pesanti ma non solo cominciarono ad aggregarsi intorno alle stelle. Ancora più tardi, circa 10 miliardi di anni dopo il Big Bang, la prima attività biologica apparve su almeno uno dei pianeti con condizioni ambientali adatte, la Terra (figura 7).

È bene sottolineare a questo punto che la vita biologica che conosciamo e di cui facciamo parte non sarebbe stata possibile senza gli elementi pesanti prodotti nelle fucine nucleari delle stelle, e quindi si può affermare che la vita è figlia delle stelle.

la vita biologica non sarebbe stata possibile senza gli elementi pesanti prodotti nelle fucine nucleari delle stelle

Evoluzione dell'universo

Nell'introduzione è stato descritto un universo in espansione di dimensioni conosciute enormi e composto di un numero praticamente infinito di galassie che sono separate da distanze tanto grandi che persino la luce impiega milioni di anni per andare da una all'altra, e lo spazio tra di loro è un misto di vuoto e gigantesche nuvole di gas e polvere, forse nuove fucine di stelle in formazione o ceneri di esplosioni stellari precedenti.

Questo universo ha iniziato ad espandersi sin dal primo istante della sua apparizione, ma continuerà ad espandersi ancora per sempre o solamente per un certo tempo per poi invertire il processo e contrarsi fino a tornare ad essere l'atomo primordiale di Lemaitre?

Questa è la domanda che si sono posti gli studiosi da quando furono ideati i primi modelli cosmologici, ed alla quale fino a qualche anno fa non era possibile dare una risposta. Infatti il destino dell'universo è legato alla sua massa totale che, se sufficientemente elevata, potrebbe attraverso la forza di attrazione gravitazionale impedire una espansione infinita. In pratica esiste un valore critico della densità equivalente di massa pari a $8 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$, e la densità dell'universo è indicata come una frazione di questo valore con il simbolo greco Ω . Per $\Omega > 1$ l'universo è chiuso e tornerà prima o dopo a collassare. Per $\Omega < 1$ l'universo è aperto e tenderà ad espandersi sempre più velocemente. Per $\Omega = 1$ l'universo è piatto e si espande in modo lineare. Ma il valore di questo parametro incide anche sulla topologia dello spazio perché per $\Omega > 1$ lo spazio è a curvatura positiva e finito (sferico), per $\Omega < 1$ lo spazio è a curvatura negativa ed infinito (iperbolico), e per $\Omega = 1$ l'universo è a curvatura zero ed infinito (euclideo). Per fare un esempio, nel caso di uno spazio bidimensionale, $\Omega > 1$ equivale alla superficie di una sfera, $\Omega < 1$ alla superficie di una sella, ed $\Omega = 1$ alla superficie di un piano, ed anche le curvature e le dimensioni delle tre figure geometriche corrispondono a quelle dello spazio-tempo quadridimensionale.

La risposta al quesito sulla sorte dell'universo è stata trovata studiando con molta cura la

struttura della radiazione cosmica di corpo nero. In questi ultimi tempi sono stati eseguiti esperimenti complessi usando satelliti, COBE (1990), MAP (2001), e palloni, BOOMERANG (1999), per la misura delle piccole anisotropie angolari della radiazione di corpo nero.

Nell'esperimento BOOMERANG un pallone contenente i rivelatori di radiazione elettromagnetica è stato lanciato nel Polo Sud dove ha compiuto a seguito dei venti predominanti a 38 km di altezza un giro circolare intorno al polo tornando dopo 10 giorni al punto di partenza (da questo comportamento il nome dell'esperimento). I rivelatori della radiazione erano raffreddati a 0,3 K ed il criostato che li conteneva e che ha funzionato per tutto il volo è stato realizzato nel Centro Ricerche di Frascati dell'ENEA, dove esistevano da tempo le maggiori competenze in Italia nel campo della criogenia. In ogni caso lo strumento è stato in grado di misurare un picco di anisotropia pari a $69 \mu\text{K}$ ad una scala angolare di $\pi/197$, che dal punto di vista della densità equivalente di massa corrisponde ad $\Omega=1,06$, un valore compatibile con un universo piatto.

Il fatto che non sia stato trovato un picco secondario a più piccoli valori angolari ha disatteso le aspettative dei promotori dell'universo inflazionato, per i quali nell'universo primordiale ci sono state rapide espansioni (più veloci della luce) che avrebbero dovuto lasciare il segno proprio su queste anisotropie. La questione è ancora aperta perché senza queste espansioni rapide, chiamate comunemente "inflazioni", l'universo non potrebbe essere delle dimensioni attuali, un sassolino nella scarpa del Big Bang. A questo riguardo, le prime misure ottenute dall'esperimento MAP sembrano confermare l'esistenza del processo inflazionato (figura 8), anche se la prudenza suggerisce di attendere altre conferme sperimentali per trarre conclusioni definitive.

In ogni caso, a parte il fatto che tutte le conoscenze attuali tendono verso un universo piatto ed euclideo, rimane il fatto che il valore della densità $\Omega=1$ non è raggiungibile con ciò che si conosce della densità di massa, $\Omega_M=0,3$, e di radiazione, $\Omega_R=0,01$. Per arrivare al valore 1 si deve aggiungere un termine $\Omega_L=0,7$ legato ad una energia sconosciuta ma che molti chiamano energia del vuoto. È singolare che a distanza di circa 80 anni sia necessario ricorrere di nuovo alla famosa costante cosmologica di Einstein che era stata introdotta inizialmente per ottenere un universo statico, ed in un secondo tempo abbandonata dopo che si era scoperta l'espansione dell'universo. Oggi sembra che questa nuova forza repulsiva a grandissime distanze stia giocando un ruolo fondamentale nel determinare il futuro dell'universo, che potrebbe essere chiamato Big Rip, cioè grande strappo a causa della forza repulsiva dirompente.

Conclusioni

Abbiamo visto nei precedenti paragrafi che noi viviamo su un piccolo pianeta, o meglio una minuscola astronave che naviga nell'universo infinito intorno ad una stella, e continuerà a farlo per altri miliardi di anni, fino a quando il Sole esploderà distruggendo la Terra. Se a quell'epoca gli uomini saranno stati capaci di rimanere ancora in vita e di co-

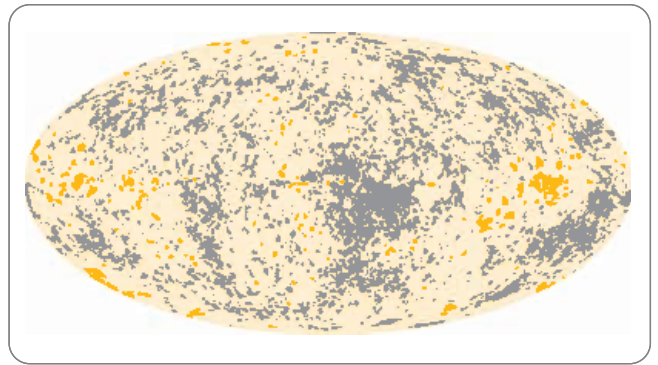


Figura 8

Questa illustrazione dell'universo rappresenta una mappa ad alta risoluzione della temperatura della radiazione cosmica di corpo nero emessa circa 380.000 anni dopo il Big Bang. Le zone colorate in ocra sono più calde e quelle in grigio più fredde di qualche decina di milionesimi di grado. Questi dati sono stati ottenuti dal satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) in questi ultimi mesi. Essi indicano che l'universo è vecchio di 13,7 miliardi di anni, è composto del 73% di energia oscura, 23% di materia fredda e oscura, e solo del 4% di atomi. Inoltre si espande alla velocità di 22 km/s per milione di anni luce, ed ha subito episodi di rapida espansione chiamati inflazioni, e continuerà ad espandersi per sempre. L'illustrazione è stata realizzata da WMAP Science Team, NASA, 12 febbraio 2003

struire una o più astronavi artificiali vaganti nello spazio, allora saranno anche in grado di seguire i destini dell'universo sempre più buio a causa della scomparsa graduale delle stelle. In pratica il cosmo non solo sarà buio ma anche freddo e vuoto fino al limite di uno stato di equilibrio estremo senza ritorno.

Visto che la fine del mondo si conosce, come anche l'inizio del mondo, ci si può chiedere che cosa ci fosse prima dell'inizio. Poiché circa 1600 anni fa Agostino, vescovo di Ippona, poi Santo e Padre della Chiesa, si pose per primo questa domanda nei termini "Che cosa faceva Iddio prima di creare il cielo e la terra?", il tempo prima del Big Bang viene chiamato "era di Sant'Agostino". A questa domanda la scienza non può rispondere perché manca di qualsiasi indizio sperimentale, ma possiamo andare indietro fino allo stesso Sant'Agostino secondo il quale Iddio non faceva nulla perché il cielo e la terra sono stati creati con il tempo e non nel tempo, e quindi non si può parlare di un prima e un dopo. Non era proprio una risposta scientifica nel senso moderno della parola, ma sicuramente l'aver messo insieme il tempo, lo spazio e la materia fa di Sant'Agostino un acuto e profondo precursore della teoria della relatività.

*il cosmo
non solo
sarà buio
ma anche
freddo e
vuoto*

Tutto quello che si è detto fino ad ora si basa su osservazioni sperimentali e sulla loro interpretazione all'interno della teoria del Big Bang. Questa scelta di modello è stata dettata dal successo con il quale la teoria è riuscita negli ultimi 50 anni ad interpretare l'universo che conosciamo ed a prevedere alcune delle sue caratteristiche. Ad onore del vero esistono altre teorie che sono state formulate in tempi diversi per spiegare un aspetto oppure un altro dell'universo, ma nessuna di esse è mai riuscita a spiegarne contemporaneamente tutti gli aspetti. In ogni caso, sebbene il Big Bang sia in grado di fornire una descrizione completa del cosmo, vale la pena accennare ad alcune altre teorie che si possono ancora trovare nella letteratura scientifica più ampia.

Una delle osservazioni sperimentali più importanti che ha portato allo sviluppo della teoria del Big Bang è stata la recessione delle galassie. Ma la recessione era misurata tramite lo spostamento nel rosso delle righe di emissione atomiche, ed allora qualcuno ha cercato di trovare altre ragioni per questo spostamento che non implicasse l'espansione dell'universo. Ecco quindi la teoria cosmologica della "luce stanca". Questa teoria, che richiede una nuova legge fisica, non può essere esclusa del tutto ma alla luce delle più recenti scoperte è molto difficile da sostenere.

Rifacendosi ancora allo spostamento nel rosso, è stata avanzata l'ipotesi suffragata da alcune osservazioni astronomiche che lo spostamento sia una proprietà intrinseca degli oggetti che emettono la luce e non del loro movimento. Questa è la teoria cosmologica degli "oggetti di Arpian", dal nome dell'astronomo che la ha introdotta.

Al contrario di Epicuro, per il quale l'universo ordinato si era sviluppato da un caos primordiale, Aristotele diceva che l'universo esisteva da sempre e non era mai cambiato, sottintendendo che fosse stazionario e probabilmente infinito. Questa idea è rimasta sempre nei circoli culturali dei secoli seguenti, e probabilmente ha anche influenzato Einstein che introdusse la costante cosmologica per una soluzione statica dell'universo. Ancora oggi questa cosmologia dello "stato stazionario" ha avuto anche in epoche recenti dei famosi difensori, ma oggi, specialmente a causa della impossibilità strutturale di spiegare la radiazione di corpo nero, sono rimasti in pochi a propugnarla.

All'inizio del Big Bang è stata creata materia ed antimateria e si è supposto che subito dopo solo la materia sia sopravvissuta e sia arrivata sino a noi. Alcuni studiosi pensano invece che entrambe le specie siano sopravvissute ed abbiano dato origine a galassie di materia ed antimateria separate ed ancora esistenti nell'universo odierno. Questa teoria cosmologica delle "galassie e antigalassie" ha difficoltà nello spiegare la radiazione di corpo nero e la sua isotropia, ed oggi non trova molti assertori convinti.

Alcuni, tra cui il grande Paul Dirac, hanno postulato a seguito di osservazioni pertinenti riguardanti le leggi della natura che la forza gravitazionale possa essere cambiata nel tempo e che all'inizio dell'universo fosse molto più grande del suo valore attuale. È chiaro che questa variazione potrebbe avere avuto effetti non trascurabili sull'evoluzione dell'universo. Ma la teoria della "gravitazione variabile" non ha trovato alcuna verifica sperimentale almeno fino ai nostri giorni.

L'inizio dell'universo è incominciato con una singolarità, massa e temperatura infinite, un concetto matematico difficile da accettare e che non è andato a genio in particolare ad alcuni studiosi, che hanno invece proposto un universo periodico di espansioni, Big Bang, e contrazioni, Big Crunch, ripetitive che evitano la singolarità iniziale. Questa teoria della "singolarità evitata" non regge il confronto con l'universo piatto emerso recentemente dalla radiazione di corpo nero.

Ci sono poi stati vari tentativi di formulare cosmologie di un "universo caotico primordiale" e di un "universo freddo primordiale" che potevano spiegare qualche particolare come la formazione delle galassie, ma poi si sono fermati di fronte alle evidenze sperimentali moderne. Insomma, da tutto quello che si è detto risulta che la teoria del Big Bang è quella che riesce al momento a dare una descrizione completa e soddisfacente dell'universo nel suo insieme, anche se rimangono alcuni dettagli, ad onore del vero non di poco conto, che attendono ancora una spiegazione. Tra questi sicuramente c'è l'inizio, che rimane ancora nebuloso. Che cosa ha innescato la tremenda esplosione di energia che ha dato inizio a tutto? Alcune nuove ipotesi della teoria delle particelle elementari stanno cercando di sondare il momento che separa l'era di Sant'Agostino da quella del tempo reale, ma a me piace concludere con un modello che parte direttamente dalle basi della meccanica quantistica. Se lo spazio è quantizzato per la radiazione elettromagnetica, allora esiste la cosiddetta radiazione di punto zero che in genere è egualmente distribuita tra tutte le infinite frequenze possibili. Ma non si può escludere che una fluttuazione statistica anomala abbia raccolto tutta questa energia su una sola frequenza generando una densità di energia infinita che è stata l'inizio di tutto. Inoltre, chi ci assicura che una simile evenienza non possa accadere un'altra volta alla fine del mondo freddo e buio previsto da questo universo piatto in espansione? E tutto potrebbe ricominciare daccapo.....!

[Relazione presentata al Forum Teologico Interdisciplinare, Anagni, 8 marzo 2003, presso l'Istituto Teologico Leoniano].

Ringraziamenti

È doveroso ringraziare Francesco Scaramuzzi, Roberto Viotti e Tommaso Baldacchini per aver fornito documentazione appropriata e per utili discussioni prima e durante la preparazione del manoscritto, e Francesco Flora e Lucilla Crescentini per il loro aiuto essenziale nella preparazione di alcune illustrazioni e per la sistemazione ottimale del testo. L'autore è anche grato a Quirino Baldacchini per una lettura critica e disincantata del manoscritto nelle fasi finali.

Bibliografia

- G. GAMOW, *La Creazione dell'Universo*, Biblioteca Moderna Mondadori, A. Mondadori Editore, 1956.
 SANT'AGOSTINO, *Le Confessioni*, Libri 11 e 12, BUR, Rizzoli Editore, 1958.
 L. RUDAUX, G. DE VAUCOULEURS, *Astronomia*, Istituto Geografico De Agostini, Novara, 1960.
 J. SILK, *The Big Bang*, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.
Relatività e Cosmologia, a cura di Tullio Regge, Le Scienze SpA Editore, Milano, 1981.
 G.F.R. ELLIS, *Before the Beginning*, Boyars/Bowerdean, Londra, 1994.
 K. SAWYER, *Unveiling the Universe*, National Geographic, ottobre 1999, pag. 8.
Person of the Century, TIME, the weekly newsmagazine, Vol. 154 n. 27, 31 dicembre, 1999.
 A. ZICHICHI, *L'Irresistibile Fascino del Tempo*, Il Saggiatore, Milano, 2000.
 R. COWEN, *Galaxy Hunters*, National Geographic, febbraio 2003, pag. 2.

Fenomeni di trasporto che controllano la riproducibilità della generazione di eccesso di potenza in metalli deuterati

VITTORIO VIOLANTE¹
EMILIO SANTORO²
FRANCESCA SARTO²
ALBERTO ROSADA³
LUIGI CAPOBIANCO⁴

ENEA

¹ UTS, Fusione

² UTS, Tecnologie Fisiche Avanzate

³ UTS, Materiali e Nuove Tecnologie

⁴ Università di Roma "La Sapienza"

Un'indagine sulle difficoltà incontrate nella riproducibilità del processo per ottenere elevate concentrazioni di idrogeno (deuterio) in campioni di palladio porta a concludere che si tratta di un problema di scienza dei materiali

studi & ricerche

Transport phenomena that control the reproducibility of the generation of power excess in deuterated metals

Abstract

The stress field produced by very steep concentration gradients may explain the difficulty of reproducing the production of high concentrations of hydrogen (deuterium) in palladium samples. Experimental observations and theoretical studies have shown that an appropriate procedure for loading hydrogen into metal samples having an appropriate microstructure (obtained with an appropriate treatment) can significantly improve the final concentration of H (D) in palladium, provided that the electrochemical parameters are well optimised. It can thus be said that a metal structure characterised by appropriate hydrogen-transport paths, and the material's capacity to relax the stress states produced by the loading process, can strongly influence the final value of the concentration of hydrogen dissolved in the metal's grid. The loading dynamic too can play a significant role in reaching a high concentration of the gas in the metal, because it can modify the concentration gradients, which in turn are responsible for the presence of stress fields, hence for the increase in the solute's chemical potential. The technique described in this paper has made the achievement of high hydrogen and deuterium load ratios in palladium reproduceable

La dissoluzione di isotopi dell'idrogeno nel reticolo di un metallo non è soltanto un problema di equilibrio termodinamico tra l'idrogeno nel reticolo e quello nella fase esterna a contatto con il metallo, ma anche di non equilibrio a causa dello svolgersi di un processo di trasporto di materia di tipo diffusivo. Entrambi gli aspetti del fenomeno sono correlati in quanto, da un lato la concentrazione di equilibrio del soluto (idrogeno o un suo isotopo) è raggiunta quando il potenziale chimico di quest'ultimo in una fase risulta essere eguale a quello nell'altra fase e dall'altro il processo di trasporto nel reticolo metallico è guidato dal gradiente di potenziale chimico.

La migrazione di interstiziali in un metallo soggetto ad una deformazione provocata da carichi esterni è nota con il nome di Effetto Gorsky¹. Il campo di deformazione produce la migrazione di difetti attraverso aree espanse. Lewis e coautori²⁻⁴ hanno dimostrato che si generano tensioni (*stress*) interne durante l'inserimento e la diffusione di idrogeno interstiziale e che queste tensioni si oppongono al flusso prodotto dal gradiente di concentrazione. Pertanto, il gradiente di concentrazione può generare uno stato tensionale a prescindere dalla presenza o meno di carichi esterni.

Il potenziale chimico dell'idrogeno in soluzione solida in un reticolo metallico è fortemente influenzato da tutti i campi di forza, come il campo degli *stress*, che possono modificare l'energia libera del sistema.

L'idrogeno che si solubilizza in un metallo, come ad esempio il palladio, occupa posizioni interstiziali ed espande il reticolo. Questo processo genera un campo di stress quando si instaura una notevole differenza di concentrazione, ossia quando esistono forti gradienti o zone di coesistenza di fasi diverse. Tale situazione, schematizzata in figura 1, rassomiglia a quella prodotta da un gradiente di temperatura.

La zona ove la concentrazione di idrogeno è più elevata subisce un effetto di com-

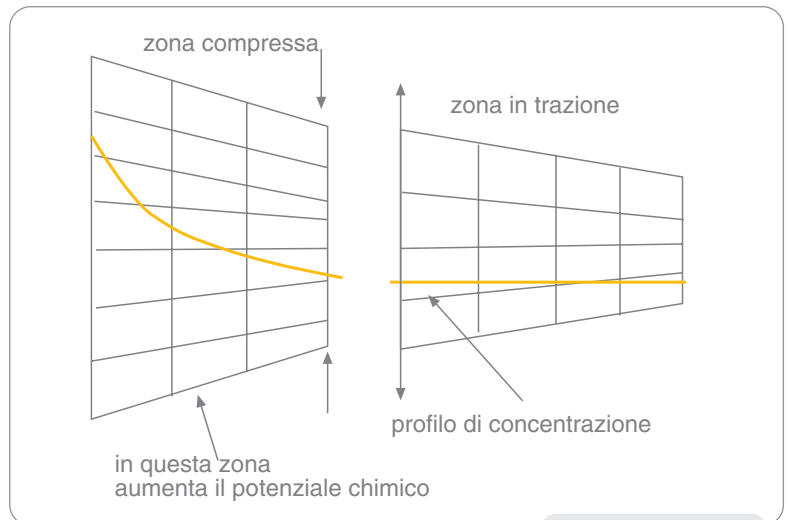


Figura 1
Effetto del profilo di concentrazione di idrogeno sul campo di stress

pressione da parte della zona ove la concentrazione del soluto si mantiene a valori più bassi. Per effetto dello stato tensionale prodotto dalla compressione, il potenziale chimico del soluto aumenta, con conseguente inibizione del processo di caricamento di idrogeno nel materiale ospite.

Nel seguito si affronterà questo problema con il duplice obiettivo di ricavare da un lato uno strumento analitico che consenta di stimare l'effetto del campo di stress sul caricamento e dall'altro di identificare le condizioni metallurgiche che possono ridurre questo effetto al fine di incrementare l'ammontare di idrogeno disciolto nel metallo a parità di tutte le altre condizioni.

Interazione dell'idrogeno con le imperfezioni dei reticoli metallici

I reticoli metallici esibiscono difetti strutturali aventi diverse dimensionalità.

I difetti zero-dimensionali sono vacanze ed auto-interstiziali, di cui i primi possono avere concentrazioni crescenti con la temperatura, come previsto dalla termodinamica. Entrambi i difetti possono essere generati dalla deformazione plastica e le vacanze possono essere congelate nel reticolo, ad una concentrazione superiore a quella di equilibrio, mediante un rapido raffreddamento a partire da una temperatura elevata.

I difetti mono-dimensionali o lineari sono le dislocazioni prodotte nei metalli mediante deformazione plastica o altri processi. Un'elevata concentrazione delle dislocazioni può produrre un aumento della durezza di una sostanza cristallina. L'energia di interazione delle dislocazioni con l'idrogeno nel palladio è stata calcolata⁴: la popolazione addizionale di idrogeno dovuta alle interazioni attrattive con le dislocazioni fornisce un contributo significativo nel palladio solo per bassi valori della concentrazione di idrogeno.

I difetti strutturali bi-dimensionali in un reticolo metallico includono il bordo dei grani, le interfasi, le superfici interne dei microvuoti e micro-fratture.

È stato dimostrato che la distribuzione delle energie di interazione tra l'idrogeno disciolto e il bordo dei grani nel palladio è Gaussiana: ciò è dovuto alla diversità dei siti di legame nei bordo-grano. L'energia media di interazione è 5,3 kJ/mole H. Si può asserire con certezza che il bordo dei grani, in ogni metallo, esibisce una interazione attrattiva con l'idrogeno disciolto.

I difetti tri-dimensionali sono essenzialmente costituiti dai microvuoti e dai micro-difetti, sulle cui superfici si adsorbe l'idrogeno. Questi difetti possono essere prodotti durante la fabbricazione dei metalli così come pure durante il processo di solubilizzazione dell'idrogeno. Inoltre il volume della cavità interna all'equilibrio acquisisce una concentrazione di idrogeno molecolare in fase gassosa consistente con la fugacità dell'idrogeno nell'ambiente gassoso esterno.

Effetto del campo di *stress* sul potenziale chimico dell'idrogeno disciolto nel metallo

Le interazioni tra l'idrogeno disciolto in un metallo solido e le imperfezioni strutturali di quest'ultimo possono, in generale, essere divise in due categorie: chimiche ed elastiche. La prima categoria si riferisce a

posizioni ove gli spostamenti atomici sono ampi, come ad esempio interfasi interne e centri di dislocazioni. La seconda si riferisce a posizioni sufficientemente lontane dall'imperfezione, ragion per cui gli spostamenti degli atomi, rispetto alle posizioni da essi occupate nel reticolo perfetto, sono piccole e l'elasticità lineare può essere applicata con un sufficiente grado di approssimazione.

Durante la dissoluzione dell'idrogeno in metalli come il palladio, regioni con parametro reticolare più grande (fase β) crescono all'interno di regioni caratterizzate da un parametro reticolare più piccolo (fase α). Nella regione di coesistenza (fase $\alpha + \beta$) la variazione del parametro reticolare al confine tra le due fasi crea un campo di *stress* localizzato molto elevato, il quale non favorisce la diffusione (*stress* coerenti). Se lo stato tensionale interno può essere rimosso mediante deformazione plastica o mediante scorrimento di dislocazioni, il cristallo deformato, privo di stato tensionale, diventa incoerente. Questa situazione è schematizzata in figura 2.

Pertanto l'energia correlata ad una configurazione strutturale nel dominio α - β sarà molto diversa a seconda che ci si trovi nello stato coerente oppure nello stato incoerente. Nella realtà, il cristallo si troverà in uno stato caratterizzato da un mixing di queste due situazioni ideali estreme.

La coesistenza di fasi $\alpha + \beta$ può essere evitata durante il processo di caricamento di idrogeno da un ambiente esterno gassoso selezionando un percorso appropriato sul diagramma di fase Pd/H pressione-concentrazione.

Calcoli di concentrazione di idrogeno in eccesso nella regione elastica nelle vicinanze di una imperfezione strutturale si basano sulla relazione termodinamica tra il potenziale chimico μ_s di un soluto interstiziale come l'idrogeno che occupa una certa posizione in un solido e lo stato tensionale in quella posizione.

Lo *stress* locale può essere generato da

forze meccaniche applicate dall'esterno o da imperfezioni strutturali, come accennato poc'anzi; il gradiente dello *stress* può inibire il processo di diffusione. Il potenziale chimico di un soluto interstiziale in un sistema tensionato è correlato al potenziale chimico μ^* del soluto alla stessa concentrazione nel sistema non tensionato mediante la seguente relazione⁵:

$$\mu_s - \mu_s^* = \sum_i \sum_j \int_0^{\sigma_j} \left[V_m s_{ij} + (1-x_s) V_m \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_s} \right] \sigma_i d\sigma_j - V_m (1-x_s) \sum_i \sigma_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial x_s} \quad (1)$$

ove V_m è il volume molare della soluzione solida avente frazione molare del soluto pari a x_s , ε è la deformazione percentuale, σ lo *stress* e $s_{ij} = \partial \varepsilon_i / \partial \sigma_j$.

Il primo termine dell'equazione (1) conduce a termini della forma $\sigma^2 V / 2E$, ove E è il modulo di Young; questi termini, in prima approssimazione, possono essere considerati trascurabili se lo *stress* risulta essere molto minore di E . Escludendo il primo termine ed usando x , y e z come coordinate Cartesiane, l'equazione (1) può essere riscritta come segue:

$$\mu_s = \mu_s^* - V_m (1-x_s) \left[\left(\sigma_{xx} \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x_s} + \sigma_{yy} \frac{\partial \varepsilon_{yy}}{\partial x_s} + \sigma_{zz} \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial x_s} \right) + 2\sigma_{xy} \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial x_s} + 2\sigma_{xz} \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial x_s} + 2\sigma_{yz} \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x_s} \right] \quad (2)$$

I termini diagonali di ε rappresentano l'aumento percentuale in lunghezza di elementi inizialmente paralleli agli assi del sistema di riferimento. I termini non diagonali di ε rappresentano metà del decremento dell'angolo compreso tra due elementi di solido inizialmente posizionati lungo gli assi indicati dai pedici. Se un soluto interstiziale dilata il reticolo in maniera isotropa (come ad esempio si verifica quando l'idrogeno si solubilizza nel palladio) i termini fuori diagonale dell'equazione (2) possono essere omessi.

Se $\varepsilon_u = \sigma_u / E$ risulta essere piccolo si può

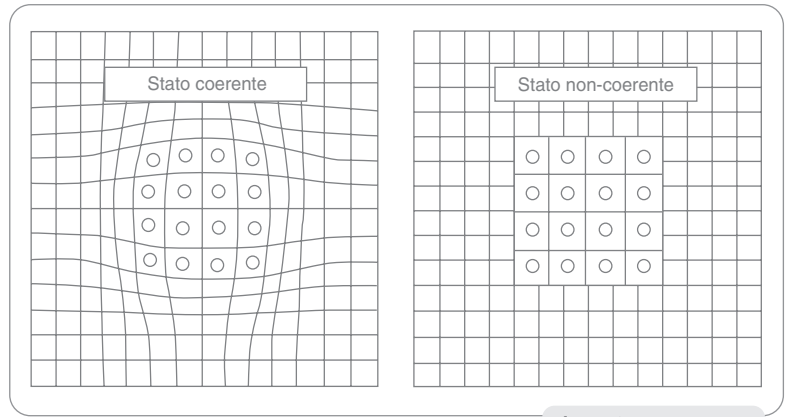


Figura 2
Stato coerente e non-coerente di un reticolo; nello stato coerente si conserva la continuità dei piani reticolari e le tensioni sono elevate

introdurre la seguente approssimazione:

$$\varepsilon = \varepsilon(0) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_s} \Delta x_s \quad (3)$$

pertanto, considerando Δx_s dell'ordine di $(1-x_s)$ segue che:

$$\mu_s = \mu_s^* - \frac{\bar{V}_s}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = \mu_s^* - \bar{V}_s \text{tr} \bar{\sigma} \equiv \mu_s^* - \bar{V}_s \sigma_h \quad (4)$$

ove \bar{V} è il volume parziale molare del soluto e $\bar{\sigma}$ il tensore degli sforzi.

Equazione di diffusione in presenza di un campo di stress

L'equazione che descrive il fenomeno di trasporto è data da:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} - (1-\eta)b \frac{\bar{V}E}{RT} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} \right)^2 - (1-\eta)b \frac{\bar{V}E}{RT} \bar{c} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} - b \frac{\bar{V}E}{RT} \frac{\partial \eta}{\partial \bar{x}} \bar{c} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} \right) \quad (5)$$

ove $\eta = \eta(x)$ indica la percentuale degli *stress* rilassati e serve a descrivere l'effetto di rilassamento dovuto alle deformazioni reticolari e al movimento dei grani.

Risulta subito evidente che quando gli *stress* si rilassano completamente ($\eta=1$) l'equazione (5) si riduce alla ben nota equazione di diffusione di Fick. Per completezza, la trattazione teorica che conduce alla (5) è riportata in Appendice A.

In prima approssimazione, η può essere

stimato mediante la seguente equazione:

$$\eta = \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{sn}} \quad (6)$$

ove σ_{sn} è il carico di snervamento e $\sigma_{loc} = \delta \epsilon E$ è lo *stress* locale ($\delta \epsilon$ è la variazione di deformazione tra due elementi vicini del dominio discretizzato).

Per una geometria cilindrica (filo) l'equazione di trasporto diventa:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} D \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} - \bar{r} D \alpha (1 - \eta) \bar{c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} \right) \quad (7)$$

Figura 3a
Profilo di concentrazione di idrogeno allo stato stazionario in una lamina di palladio con modulo di Young 1×10^{10} Pa

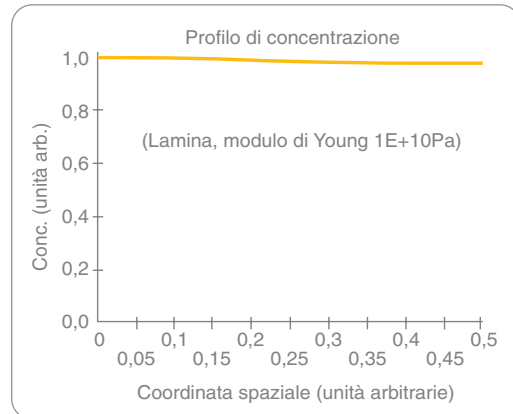


Figura 3b
Evoluzione del rapporto R/R_0 in una lamina di palladio con modulo di Young 1×10^{10} Pa

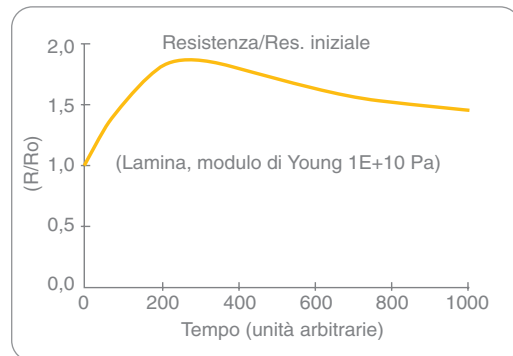
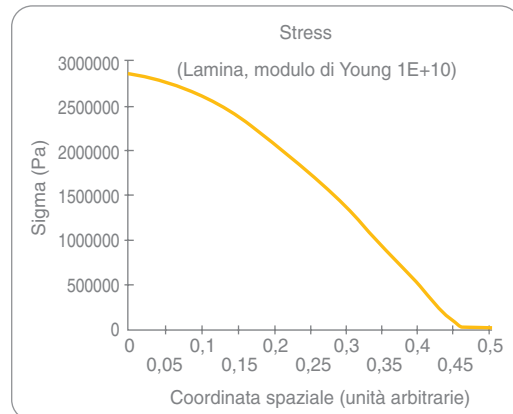


Figura 3c
Andamento dello stress in una lamina di palladio con modulo di Young 1×10^{10} Pa



ove:

$$\alpha = \frac{\bar{V} E b}{R T}, \text{ e } \bar{r} \text{ è il raggio dimensionale.}$$

Le equazioni (5) e (7) descrivono la diffusione interstiziale dell'idrogeno in un metallo (e.g. palladio) in presenza di un campo di *stress*, il cui effetto, allo stato stazionario, si traduce in un profilo di concentrazione diverso da quello che si otterrebbe da un processo diffusionale descrivibile con la legge di Fick.

Risulta pertanto evidente che, per i sistemi oggetto dello studio, una differenza nelle proprietà del materiale, come ad esempio il modulo di Young, può produrre significative differenze sulla solubilità dell'idrogeno. L'effetto del campo di *stress*, che dipende dalle proprietà del materiale (come il modulo di Young), si traduce in un diverso profilo di concentrazione sia durante il transitorio che allo stato stazionario.

L'equazione di trasporto (5) è risolta con le seguenti condizioni iniziali e al contorno

$$\bar{c} = 0 \quad \bar{x} > 0 \quad t = 0$$

$$\bar{c} = 1 \quad \bar{x} = 0 \quad (\bar{r} = 0) \quad \forall t \quad \text{e} \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} = 0 \quad (\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} = 0) \quad \bar{x} = L/2 \quad \forall t \quad (8)$$

e includendo il calcolo dello *stress* rilassato sulla base delle proprietà meccaniche del materiale (σ_r).

Nel seguito vengono riportati i risultati del calcolo dei profili di concentrazione dell'idrogeno in una lamina ed in un filo di palladio, ottenuti risolvendo numericamente rispettivamente l'equazione (5) e l'equazione (7) con le condizioni (8).

Inoltre, in base ai valori noti dell'andamento della resistenza dell'idruro di palladio, normalizzata alla resistenza del palladio puro, in funzione della concentrazione di idrogeno, avvalendosi dello schema alle differenze finite, è stata riprodotta l'evoluzione di questo parametro (curva di Baranowsky). Tutti gli elementi discreti in cui è stato suddiviso il dominio di integrazione sono stati considerati come un sistema di resistenze in parallelo, ognuna delle quali è stata calcolata in base al valore della con-

centrazione locale di idrogeno.

Le figure 3a e 4a mostrano il profilo di concentrazione, allo stato stazionario, dalla superficie esterna fino al piano di simmetria, in due fogli di palladio aventi diverso modulo di Young, ossia 1×10^{10} Pa, e 1×10^{11} Pa. Risulta subito evidente, dai valori di concentrazione, che la quantità di idrogeno che riesce a solubilizzarsi nel materiale si riduce nel caso in cui il modulo di Young è più elevato.

La figura 5a mostra il profilo di concentrazione che si raggiunge allo stato stazionario quando il processo di solubilizzazione dell'idrogeno avviene in un filo sottile con modulo di Young elevato. Sia nel caso del foglio che in quello del filo si è considerato uno spessore (diametro) pari a 200μ .

Nel primo caso, molto simile ad un classico processo di diffusione governato dalla legge di Fick, la concentrazione di idrogeno evolve fino al massimo stechiometrico ($x = 1$). Negli altri casi i profili di concentrazione allo stato stazionario indicano valori di concentrazione più bassi.

Le figure 3b, 4b e 5b mostrano l'evoluzione della resistenza (normalizzata al suo valore iniziale) dell'idruro di palladio, durante il caricamento di idrogeno.

Le figure 3c, 4c e 5c mostrano l'andamento approssimato dello stato tensionale alla fine dei transitori. Si può osservare che quando il modulo di Young non supera il valore di 10^{10} Pa, il profilo di concentrazione che si instaura non è particolarmente ripido e le tensioni interne si mantengono a livelli non elevati ed il processo diffusivo procede fino al raggiungimento di un valore della concentrazione dell'idrogeno prossimo all'unità.

La rappresentazione grafica, frutto della simulazione numerica, anche se ottenuta con delle ipotesi semplificatrici, consente di correlare il mancato raggiungimento della completa solubilizzazione dell'idrogeno allo stato tensionale nel materiale.

L'effetto di un forte gradiente di concentrazione, il quale, in genere, può crearsi in

prossimità della superficie del metallo, o ai bordi dei grani, è analogo, in termini di produzione degli *stress*, all'effetto di un forte gradiente di temperatura. La zona in cui la concentrazione del soluto è più elevata è forzata ad espandersi ma risulta vincolata ad una zona ove la concentrazione del soluto è più bassa e che, di conseguenza, non riesce ad espandersi o che si espande molto meno. Pertanto la zona a concentrazione più alta viene mantenuta in uno stato di compressione dalla zona a

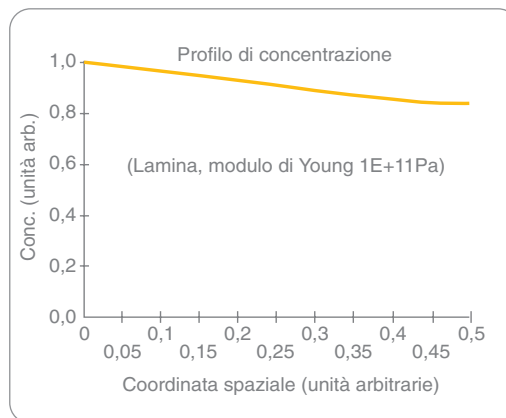


Figura 4a
Profilo di concentrazione di idrogeno allo stato stazionario in una lamina di palladio con modulo di Young 1×10^{11} Pa

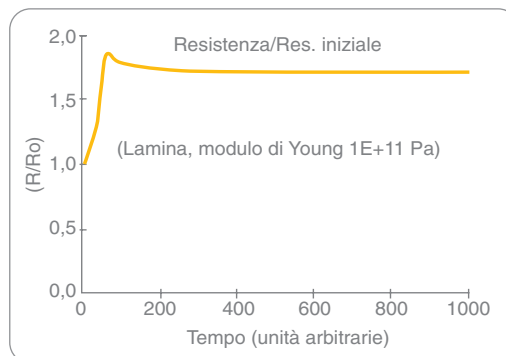


Figura 4b
Evoluzione del rapporto R/R_0 in una lamina di palladio con modulo di Young 1×10^{11} Pa

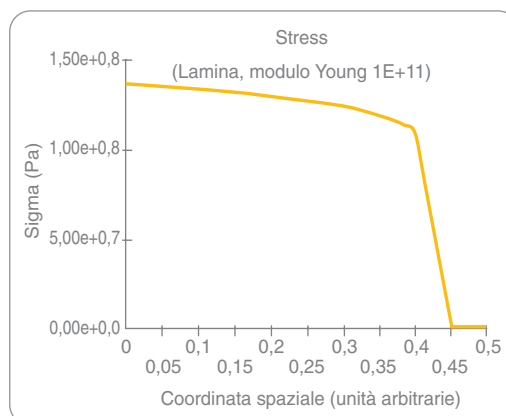
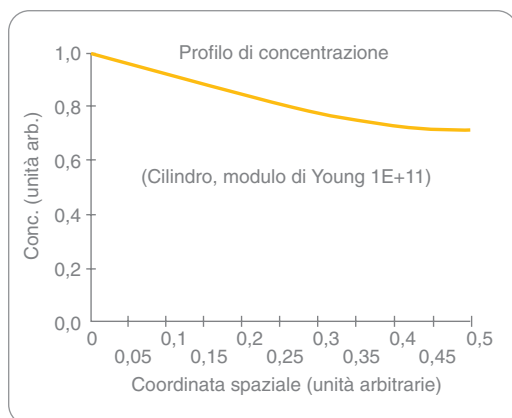


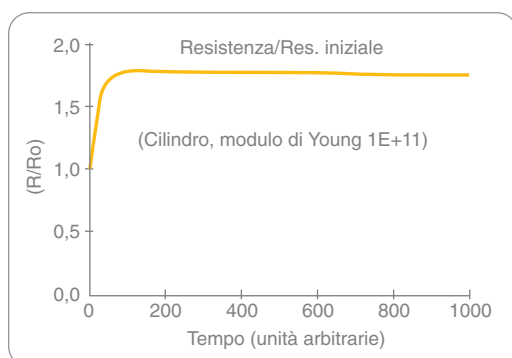
Figura 4c
Andamento dello stress in una lamina di palladio con modulo di Young 1×10^{11} Pa

Figura 5a

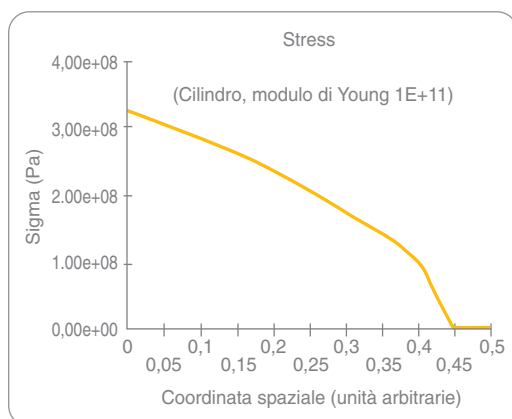
Profilo di concentrazione di idrogeno allo stato stazionario in un cilindro (filo sottile) di palladio con modulo di Young 1×10^{11} Pa

**Figura 5b**

Evoluzione del rapporto R/R_0 in un cilindro (filo sottile) di palladio con modulo di Young 1×10^{11} Pa

**Figura 5c**

Andamento dello stress in un cilindro (filo sottile) di palladio con modulo di Young 1×10^{11} Pa



concentrazione più bassa, questa situazione produce un aumento del potenziale chimico del soluto nella zona a concentrazione più elevata, rispetto al valore che si avrebbe in assenza di uno stato tensionale di compressione.

Questa situazione, che è decisamente sfavorevole per il caricamento, può essere modificata studiando una struttura metallurgica del campione in grado da un lato di consentire il rilassamento delle tensioni interne e dall'altro di minimizzare il gradiente

di concentrazione. Il valore dello *yield stress* indica la capacità del materiale di rilassare gli stress; pertanto lo stato iniziale del campione è molto importante al fine di ridurre la forza, dettata dalle tensioni, che blocca la solubilizzazione del gas nel metallo.

La figura 6a mostra l'evoluzione sperimentale del rapporto R/R_0 per un campione di palladio che manifesta una considerevole solubilità nei confronti dell'idrogeno; questo risultato è in ragionevole accordo con i risultati teorici riportati in figura 4b, ove è stato considerato un metallo con caratteristiche metallurgiche idonee all'ottenimento di elevati valori di solubilità.

La figura 6b, di contro, mostra l'evoluzione sperimentale del rapporto R/R_0 per un campione di palladio dotato di scarsa solubilità nei confronti del gas.

A questo punto è possibile cercare una correlazione tra la solubilità dell'idrogeno nel metallo e lo stato metallurgico del materiale. Sulla base delle considerazioni poc'anzi esposte, si è deciso di effettuare alcuni trattamenti metallurgici^{6,11} sui campioni da caricare, allo scopo di ottenere strutture metallurgiche in grado di massimizzare il caricamento del gas nel reticolo. Come materiale di partenza si è adoperato palladio al 99,8 di purezza dello spessore di 0,7 mm, in forma di lamina.

Questo materiale, senza subire alcun trattamento, sottoposto a caricamento di idrogeno, mediante polarizzazione catodica (caricamento elettrochimico) in soluzione 0,1 M di LiOH, era in grado di raggiungere concentrazione di idrogeno pari a 0,8 in frazione atomica.

Successivamente è stato effettuato un trattamento in due fasi:

- 1) laminazione a freddo del campione di materiale che ha consentito di ottenere una lamina di palladio dello spessore di 150 μm ;
- 2) trattamento termico a differenti temperature (nell'intervallo 700-1100 $^{\circ}\text{C}$) con diversi tempi.

La micrografia mostrata in figura 7 eviden-

zia l'elevata concentrazione di difetti del campione laminato a freddo.

La figura 8 mostra la microstruttura di un campione prima laminato a freddo e successivamente ricotto a 1100 °C per 5 ore. La microstruttura risulta notevolmente modificata ed è evidente la crescita dei grani. La micrografia di figura 9 mostra l'effetto di un diverso trattamento termico effettuato dopo la laminazione a freddo. In questo caso il campione è stato ricotto a 900 °C per un'ora.

In figura 10 è mostrato l'effetto della diversa microstruttura sul caricamento di idrogeno, effettuato mediante polarizzazione catodica con LiOH 0,1 M. La massima concentrazione di idrogeno (in frazione atomica) ottenuta è stata pari a 0,97, con il campione ricotto a 900 °C per un'ora. Una ragionevole interpretazione di questo risultato, che è possibile effettuare grazie allo studio teorico illustrato in precedenza, conduce a sostenere che nel campione che ha manifestato la più elevata solubilità rispetto al gas, i gradienti di concentrazione, grazie alla particolare struttura metallurgica, si sono mantenuti piuttosto modesti, con conseguente riduzione dello stato tensionale. Inoltre la ricottura ha assicurato al materiale anche una considerevole capacità di rilasciare le tensioni interne. Prove successive hanno anche mostrato l'elevata riproducibilità del risultato.

Un altro effetto interessante riscontrato nelle prove sperimentali è la correlazione, che talvolta si ottiene, tra la dinamica di caricamento e la concentrazione finale di idrogeno che si riesce a raggiungere. Si osserva che dopo il caricamento ottenuto lavorando a densità di corrente costante per un certo tempo, la concentrazione del soluto nel metallo non aumenta più e a volte diminuisce spontaneamente. In base ai concetti esposti in precedenza è possibile ritenere che questo comportamento è generato dalla creazione di un campo di stress in prossimità della superficie del campione sottoposto a caricamento elet-

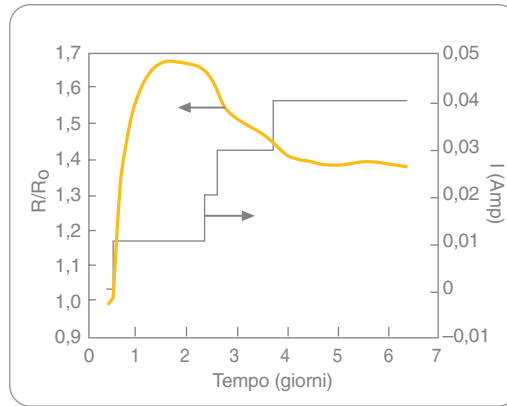


Figura 6a

Dati sperimentali sull'evoluzione del rapporto R/R_0 per un materiale ad elevata solubilità di idrogeno

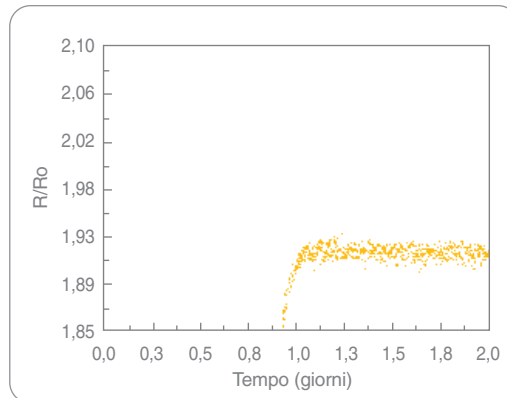


Figura 6b

Dati sperimentali sull'evoluzione del rapporto R/R_0 per un materiale a bassa solubilità di idrogeno

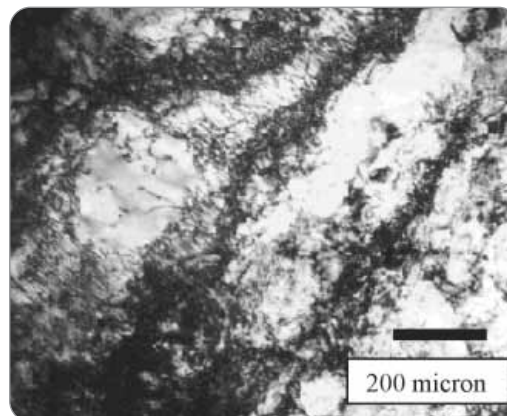


Figura 7

Palladio lavorato a freddo

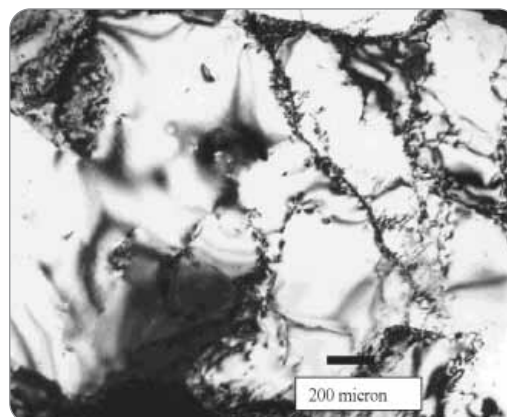


Figura 8

Palladio dopo trattamento termico a 1100 °C per 5 ore

Figura 9
Palladio dopo trattamento termico a 900 °C per 1 ora

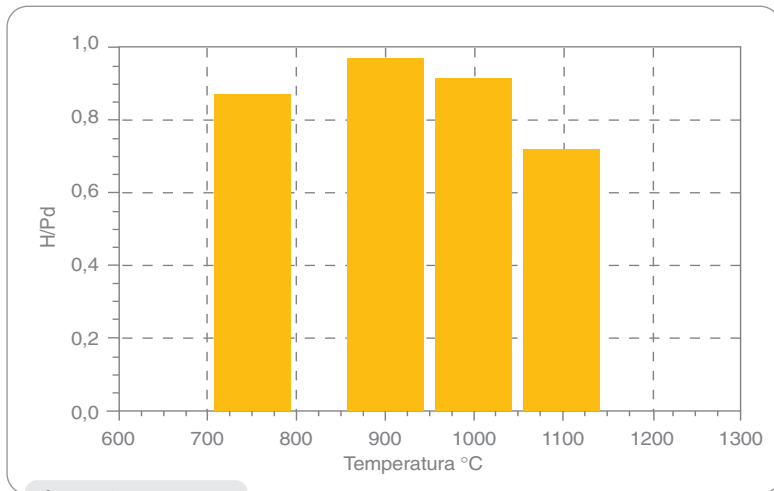
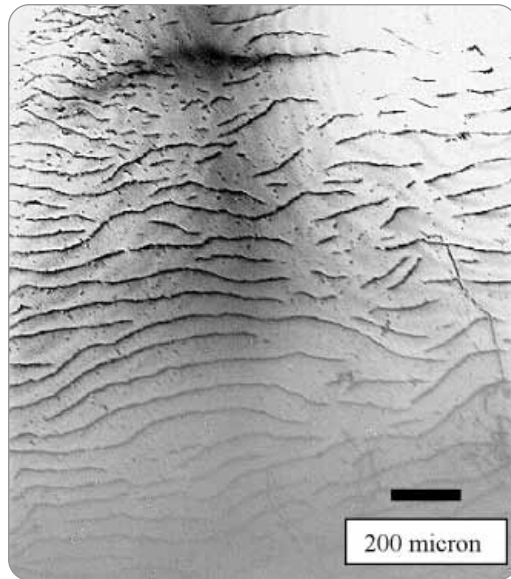
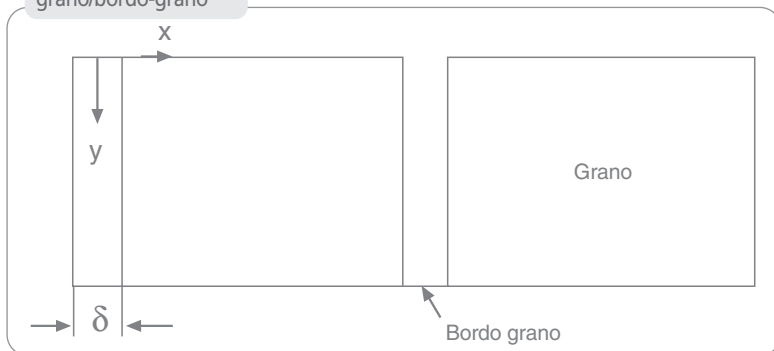


Figura 10
Effetto del trattamento termico sul caricamento di idrogeno

trochimico. Invertendo la corrente di polarizzazione per un determinato periodo, stimabile con i tempi di diffusione, oppure variando la corrente di elettrolisi tra un valore alto e uno basso per periodi sempre confrontabili con i tempi di diffusione attraverso

Figura 11
Rappresentazione schematica del sistema grano/bordo-grano



so la regione presumibilmente interessata dal campo di *stress*, è possibile modificare il gradiente di concentrazione in maniera tale da ridurre lo stato tensionale responsabile del *blocco* del caricamento¹².

Effetto del bordo grano sulla diffusione dell'idrogeno

Prima di concludere questa sezione riguardante l'effetto delle proprietà metallurgiche sulla solubilizzazione dell'idrogeno nei reticoli metallici, esaminiamo l'effetto del bordo grano sul trasporto di materia durante il caricamento di idrogeno di un reticolo metallico come quello del palladio. Il sistema grano/bordo-grano è rappresentato schematicamente in figura 11. Un semplice bilancio di materia, per un processo diffusivo, attraverso il bordo-grano e attraverso il grano conduce al seguente sistema di equazioni differenziali¹³:

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} = D_b \frac{\partial^2 C_b}{\partial y^2} + \frac{2D_g}{\delta} \left(\frac{\partial C_g}{\partial x} \right)_{x=\delta/2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_g \nabla^2 C_g \quad (10)$$

il quale deve essere risolto con le seguenti condizioni iniziali e al contorno:

$$y = 0, t = 0 \quad C = C_0; \quad y > 0, t = 0 \quad C = 0; \quad (11)$$

$$x = 0, C_g = C_b$$

ove gli indici *g* e *b* si riferiscono rispettivamente al grano e al bordo-grano, δ è la dimensione del bordo-grano, *D* è il coefficiente di diffusione e *C* è la concentrazione del soluto.

La soluzione analitica del sistema di equazioni (10) con le condizioni (11) è:

$$C_g(x, y, t) = C_0 \exp \left[\frac{-y\sqrt{2}}{(\pi D_g t)^{1/2} (\delta D_b / D_g)^{1/2}} \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_g t}} \right) \right] \quad (12)$$

Le figure 12 e 13 mostrano i grafici bidimensionali dei profili di concentrazione, ot-

tenuti dopo lo stesso tempo di caricamento, in due sistemi con diversi rapporti tra dimensione del grano e dimensione del bordo grano.

Sono state considerate due dimensioni caratteristiche per il bordo-grano, ossia rispettivamente 0,01 e 0,1 μm . Si osserva che nel caso in cui il bordo-grano è di minore dimensione il gradiente di concentrazione all'interno del grano è più elevato rispetto al caso in cui il bordo grano è di dimensioni più ampie.

Questo risultato è stato ottenuto con l'ipotesi di sistema ideale, privo di impurezze a bordo-grano. Le impurezze a bordo-grano, generalmente, riducono il coefficiente di diffusione. I calcoli mostrano che il gradiente di concentrazione nel grano è più elevato nel sistema dove il coefficiente di diffusione a bordo grano è minore, pertanto un opportuno coefficiente di diffusione a bordo grano, così come pure un'opportuna dimensione dei grani, può facilitare la dissoluzione dell'idrogeno nel metallo.

Eccesso di potenza

I materiali che hanno mostrato la maggiore solubilità nei confronti dell'idrogeno e del deuterio sono stati usati per misure calorimetriche¹⁴⁻¹⁷ durante caricamento elettrochimico. Il catodo era costruito con una lamina di palladio il cui spessore era 150 μm e la cui superficie era 2 cm^2 su ciascun lato. Il valore di concentrazione (frazione atomica) del deuterio più elevato che si è ottenuto è stato pari a 0,95-0,96, con una densità di corrente di 50 mA/cm^2 , tuttavia l'eccesso di potenza di 80 mW è stato registrato quando la corrente è stata innalzata al valore di 75 mA/cm^2 . Aumentando la densità di corrente fino a 100 mA/cm^2 l'eccesso di potenza è aumentato fino a 150 mW.

Una riduzione della corrente a 50 mA/cm^2 ha fatto scomparire l'eccesso di potenza.

Un ulteriore aumento della corrente a 75 e 100 mA/cm^2 ha riprodotto l'eccesso di potenza ai valori ottenuti in precedenza. Una

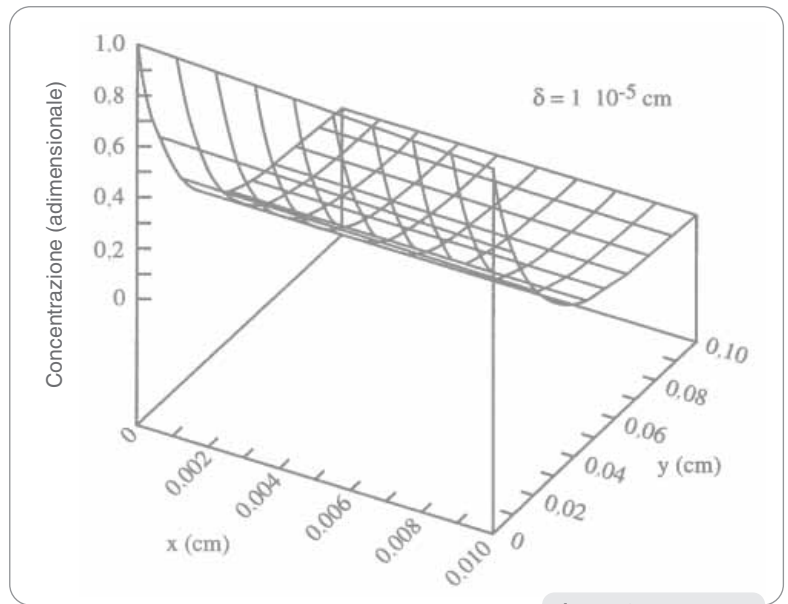


Figura 12
Profilo di concentrazione assumendo un bordo grano con $\delta = 0,01 \mu\text{m}$

aggiunta di acqua pesante ha poi determinato istantaneamente la scomparsa definitiva dell'eccesso di potenza, il quale era arrivato a raggiungere circa il 35% della potenza in ingresso.

L'effetto osservato con l'aggiunta di acqua pesante sembra confermare che la regione vicina alla superficie svolge un ruolo fondamentale nel processo come osservato in un precedente lavoro¹⁷. Infatti una variazione nell'elettrolita produce rapidamente una perturbazione all'interfase tra elettrolita e

Figura 13
Profilo di concentrazione assumendo un bordo grano con $\delta = 0,1 \mu\text{m}$

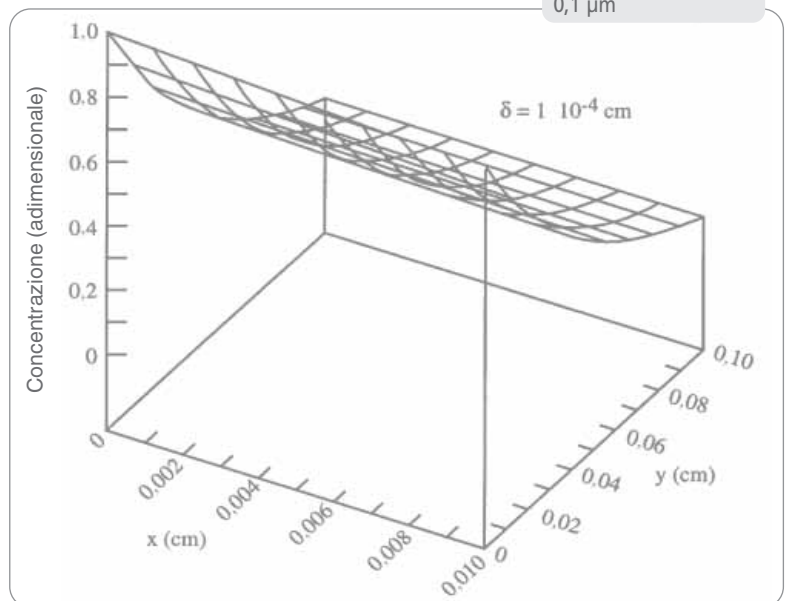
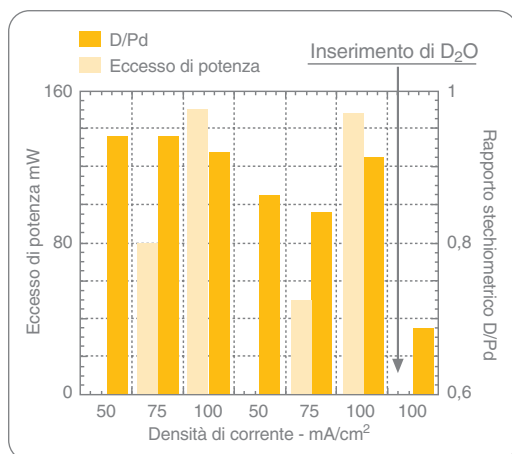


Figura 14

Eccesso di potenza e concentrazione di D in Pd in funzione della densità di corrente in tre prove successive effettuate con lo stesso campione. Nell'ultima prova il rapporto D/Pd risulta inferiore al valore di soglia e, di conseguenza, in questo caso, non è stato osservato alcun eccesso di potenza



catodo, ed i tempi in gioco non sono compatibili con i tempi di trasporto del deuterio nel reticolo metallico. Possiamo pertanto ritenere che il raggiungimento della soglia di caricamento costituisca una condizione necessaria per lo sviluppo dell'eccesso di potenza. In figura 14 è mostrato il grafico degli eccessi di potenza (espressi in mW) in funzione della densità di corrente ed i valori di concentrazione di deuterio misurati in coincidenza con la produzione di eccesso di potenza.

Conclusioni

Lo studio svolto porta a concludere che il campo di *stress* prodotto da gradienti di concentrazione molto ripidi può essere la causa della ben nota difficoltà che si incontra nella riproducibilità dell'ottenimento di elevate concentrazioni di idrogeno (deuterio) in campioni di palladio. È stato osservato sperimentalmente ed è stato studiato sul piano teorico che una opportuna procedura di caricamento di idrogeno in campioni metallici dotati di una opportuna mi-

crostruttura (ottenuta con un trattamento appropriato) può migliorare in maniera sensibile la concentrazione finale di H (D) in palladio se i parametri elettrochimici sono ben ottimizzati.

Pertanto si può affermare che una struttura metallurgica caratterizzata da opportuni percorsi per il trasporto di idrogeno e la capacità del materiale di rilassare gli stati tensionali prodotti dal caricamento stesso possono influire fortemente sul valore finale della concentrazione di idrogeno disciolto nel reticolo del metallo.

Anche la dinamica di caricamento può svolgere un ruolo significativo nel raggiungimento di una elevata concentrazione del gas nel metallo, in quanto essa può modificare i gradienti di concentrazione, i quali, a loro volta sono responsabili della presenza di campi di stress e quindi dell'aumento del potenziale chimico del soluto.

La tecnica poc'anzi esposta ha consentito di rendere riproducibile il raggiungimento di elevati valori del rapporto di caricamento nel palladio, sia con idrogeno sia con deuterio. Lavorando con deuterio, una volta raggiunta la soglia di caricamento $D/Pd \geq 0,95$, si è potuto constatare sia la reale esistenza del fenomeno della produzione di eccesso di potenza, sia la sua riproducibilità (>80%). È stato inoltre possibile studiare l'effetto della densità di corrente sulla potenza generata.

In conclusione, da questo studio emerge che la riproducibilità del raggiungimento di un elevato caricamento del deuterio nel palladio, il che rappresenta la condizione necessaria per l'ottenimento dell'eccesso di potenza, è un problema di scienza dei materiali.

Appendice A

Un flusso diffusivo di idrogeno in un mezzo solido omogeneo è creato da un gradiente di potenziale chimico e dal campo di forze applicate, ragion per cui l'espressione per il flusso è

$$\bar{J} = -Mc\nabla\mu + Mc\bar{F} \quad (A1)$$

ove M è la mobilità della specie diffondente, c la concentrazione del soluto, \bar{F} il vettore dato dalla somma delle forze applicate, le quali agiscono sull'idrogeno interstiziale disciolto nel solido.

In generale:

$$\bar{J} = -Mc \frac{\partial\mu}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial x} + Mc\bar{F} \quad (A2)$$

Il coefficiente di diffusione è definito dalla seguente espressione

$$D = Mc \frac{\partial\mu}{\partial c} \quad (A3)$$

il prodotto $c(\partial\mu/\partial c)$ stabilisce la dipendenza del coefficiente di diffusione dalla concentrazione.

Tenendo conto della relazione (A3) per il coefficiente di diffusione l'equazione (A2) fornisce:

$$\bar{J} = -Mc \frac{\partial\mu}{\partial c} \nabla c + Mc\bar{F} = -D\nabla c + \frac{D\bar{F}c}{c(\partial\mu/\partial c)} \quad (A4)$$

La concentrazione di equilibrio di idrogeno in un campione metallico contenuto in un ambiente di idrogeno in fase gas, con una temperatura costante T e con una pressione parziale p_H , può essere misurata sperimentalmente.

Dalla termodinamica, nelle condizioni considerate, si ottiene:

$$c \frac{\partial\mu}{\partial c} = \frac{RT}{2} \frac{\partial \ln p}{\partial \ln c} \quad (A5)$$

ove R è la costante dei gas. Assumendo che nel campo di pressione prescelto valga la legge di Sievert, è possibile esprimere la concentrazione in funzione della pressione mediante la seguente ben nota relazione:

$$c = Sp^{1/2} \quad (A6)$$

ove S è la solubilità.

Dalla equazione (A6) si ottiene:

$$\partial p = 2cS^2 \partial c \quad (A7)$$

pertanto:

$$\frac{\partial p}{p} = 2 \frac{\partial c}{c} \quad (A8)$$

sostituendo la (A8) nella (A5):

$$c \frac{\partial\mu}{\partial c} = RT \quad (A9)$$

Dalla (A9) e dalla (A3) si ricava quindi il coefficiente di diffusione D :

$$D = RTM \quad (A10)$$

In definitiva, l'equazione costitutiva del flusso, in presenza di un campo di forze diventa

$$\bar{J} = -D\nabla c + D \frac{\bar{F}}{RT} c. \quad (A11)$$

Se il campo di forze coincide con un campo di stress, la (A11) si particolarizza in:

$$J = -D(\nabla c - \frac{c\bar{V}}{RT} \nabla \sigma) \quad (A12)$$

ove σ è lo stress locale.

Se il campo di forze è creato da un campo elettrico:

$$\bar{F} = -NeZ^*\nabla\phi \quad (A13)$$

ove N è il numero di Avogadro, e la carica dell'elettrone, Z^* la carica effettiva dell'idrogeno nel reticolo metallico e $\nabla\phi$ è il campo elettrico imposto dall'esterno. In presenza di questo campo di forze l'equazione costitutiva del flusso diventa:

$$\bar{J} = -D\nabla c - D \frac{NeZ^*\nabla\phi}{RT} c \quad (A14)$$

ed il processo è detto elettro-diffusivo. È interessante stimare l'ordine di grandezza dell'effetto del campo di stress sul flusso dell'idrogeno nel metallo durante il processo di dissoluzione. Dall'equazione (A13) è facile comprendere che la condizione di equilibrio (flusso nullo) conduce a:

$$\nabla c - \frac{c\bar{V}}{RT} \nabla \sigma. \quad (A15)$$

La condizione di flusso nullo si esplicita sostituendo ∇c con $\Delta c/\Delta x$ e $\nabla \sigma$ con $\Delta \sigma/\Delta x$.

$$\Delta \sigma = \Delta c \frac{RT}{C\bar{V}}. \quad (A16)$$

Per il palladio $\bar{V} = 1,6 \text{ cm}^3/\text{mole}$ la condizione di flusso nullo è soddisfatta per $\Delta \sigma \cong 1,5 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$ (questo valore è inferiore a valori di σ che normalmente possono essere raggiunti in un reticolo metallico, come, ad esempio, in prossimità di una dislocazione)⁵. Questa stima, anche se approssimata, consente di comprendere che, anche in presenza di un gradiente di concentrazione elevato, è possibile avere situazioni, dettate dalla presenza di un campo di stress, che annullano il flusso di materia.

Le valutazioni effettuate poc'anzi conducono pertanto alla conclusione che sia la cinetica diffusoria sia la concentrazione di equilibrio dell'idrogeno nel reticolo metallico possano essere fortemente influenzate dalla presenza di un campo di stress, il quale può anche essere prodotto dallo stesso processo di caricamento.

La conoscenza dell'equazione costitutiva del flusso consente di scrivere un'equazione in grado di descrivere il processo di trasporto nelle condizioni menzionate in precedenza. Nel seguito considereremo un sistema in cui il processo diffusivo è descritto da un modello mono-dimensionale dipendente dal tempo, valido per membrane, lamine e fili di metallo¹².

Il flusso, nel sistema in esame, può essere considerato come prodotto da due meccanismi, ognuno dei quali fornisce un contributo al flusso complessivo.

I contributi all'equazione costitutiva del flusso, forniti rispettivamente dal gradiente di concentrazione e dal campo di stress, si esprimono, come si è visto, come segue:

$$J^d = -D\nabla c \quad \text{e} \quad J^s = D \frac{\bar{V}}{RT} c \nabla \sigma . \quad (\text{A17})$$

Eguagliando il termine di accumulo alla divergenza del flusso, per il caso mono-dimensionale, con semplici passaggi si ottiene:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D \frac{\bar{V}}{RT} \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial \sigma}{\partial x} - D \frac{\bar{V}}{RT} c \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} \quad (\text{A18})$$

ove t è il tempo e x la coordinata spaziale.

Cerchiamo ora di esprimere σ in funzione della concentrazione, a tal fine consideriamo la ben nota relazione tra *stress* e deformazione ε :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{A19})$$

ove E è il modulo di Young.

Per il palladio in fase beta (assumendo che essa possa essere estrapolata fino a valori della concentrazione, espressa in frazione atomica, prossimi all'unità) esiste la seguente relazione tra σ e ε e la concentrazione:

$$\varepsilon(\bar{c}) = [1 + b(\bar{c} - \bar{c}_{\beta \min})] \quad (\text{A20})$$

ove $\bar{c}_{\beta \min}$ è la concentrazione di idrogeno al limite di coesistenza delle fasi $\alpha + \beta$, $b = 0,044$ e $\bar{c} = c/c_0$ è la concentrazione adimensionale (concentrazione in frazione atomica, c_0 è la concentrazione degli atomi di metallo). Introduciamo i seguenti parametri dimensionali:

$$\bar{x} = x/L ; \quad \tau = L^2/D \quad (\text{A21})$$

ove L è la dimensione caratteristica del sistema (tipicamente lo spessore o il raggio) si può quindi scrivere:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \sigma}{\partial \bar{c}} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} = bE \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} \quad (\text{A22})$$

e

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \bar{c}} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} \right) = bE \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} . \quad (\text{A23})$$

Pertanto l'equazione che descrive il fenomeno di trasporto diventa:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} - (1 - \eta)b \frac{\bar{V}E}{RT} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} \right)^2 - (1 - \eta)b \frac{\bar{V}E}{RT} \bar{c} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} - b \frac{\bar{V}E}{RT} \frac{\partial \eta}{\partial \bar{x}} \bar{c} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} \right) . \quad (\text{A24})$$

Appendice B

In geometria cilindrica il bilancio differenziale, con $\eta = \eta(\bar{x})$ conduce a

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} D \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} - \bar{r} D \alpha (1 - \eta) \bar{c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} \right)$$

ossia:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} - \frac{\alpha}{\bar{r}} (1 - \eta) \bar{c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{r}^2} - \alpha (1 - \eta) \bar{c} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{r}^2} - \alpha (1 - \eta) \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}} \right)^2 + \alpha \bar{c} \frac{\partial \eta}{\partial \bar{r}} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{r}}$$

Bibliografia

1. WIPF H., *J. Less-Common Met.* 49, 291 (1976).
2. LEWIS F.A., MAGENNIS J.P., MCKEE S.G., SEBUWUFU P.J.M., *Nature* (London) 306, 673 (1983).
3. LEWIS, F.A. BARANOWSKI B., KANDASAMY K., *J. Less Common Met.* 134, L27 (1987).
4. LEWIS F.A., TONG X., KANDASAMY K., BUCUR R.V., SAKAMOTO Y., *Electrochem. Acta* 218, 57 (1993).
5. ORIANI R.A., "Transaction of Fusion Technology" 26 (1994) 235-266.
6. DE NINNO A., LA BARBERA A., VIOLANTE V., "Selection of Palladium Metallurgical Parameters to Achieve Very High Loading Ratios". *Proc. VI International Conference on Cold Fusion*, Vol. 1, (192-197), Toya (Japan) 13-18 ottobre 1996.
7. DE NINNO A., LA BARBERA A., VIOLANTE V., "Deformations Induced by High Loading Ratios in Palladium-Deuterium Compounds", *J. Of Alloys and Compounds*, 253-254 (1997) 181-184.
8. ADROVER A., GIONA M., CAPOBIANCO L., TRIPODI P., VIOLANTE V., "Steady State Concentration Profiles of Hydrogen in Tubular Metallic Membranes", *Int. J. Of Hydrogen Energy*, accettato per la pubblicazione.
9. ADROVER A., GIONA M., CAPOBIANCO L., TRIPODI P., VIOLANTE V., "Stress Induced Diffusion of Hydrogen in Metallic Membranes: Cylindrical vs Planar Formulation I", *J. of Alloys and Compounds* 1 (2003).
10. ADROVER A., GIONA M., CAPOBIANCO L., TRIPODI P., VIOLANTE V., "Stress Induced Diffusion of Hydrogen in Metallic Membranes: Cylindrical vs Planar Formulation II", *J. of Alloys and Compounds* 1 (2003).
11. ADROVER A., GIONA M., CAPOBIANCO L., TRIPODI P., VIOLANTE V., "Effects of self-stress on Hydrogen Diffusion in Pd Membranes in the Coexistence of α and β Phases", sottomesso per la pubblicazione a *J. of Alloys and Compounds*.
12. DE NINNO A., LA BARBERA A., VIOLANTE V., "Consequences of Lattice Expansive Strain Gradients on Hydrogen Loading in Palladium", *Phys. Rev. B*, Vol. 56, n. 5 (1997) 2417-2420.
13. FAST J.D., *Gases in Metals*, The Gresham Press, (1976) 148, (9), SHEWMON P.G., *Diffusion in Solids*, Mc Graw Hill (1967) 166.
14. BERTALOT L., DE MARCO F., DE NINNO A., LA BARBERA A., SCARAMUZZI F., VIOLANTE V., ZEPPA P., *Il Nuovo Cimento* vol.15, N 11 (1993) 1435.
15. BERTALOT L., DE MARCO F., DE NINNO A., LA BARBERA A., SCARAMUZZI F., VIOLANTE V., ZEPPA P., "Fronteers of Cold Fusion", Proceedings of the 3th International Conference on Cold Fusion (ICCF3), Ed by H Ikegami, Universal Academy Press Inc. Tokyo, 365 (1993).
16. BERTALOT L., DE MARCO F., DE NINNO A., LA BARBERA A., FELICI R., SCARAMUZZI F., VIOLANTE V., *Proceedings of the 4th International Conference on Cold Fusion* (ICCF4) Maui, Hawaii, USA, Dic 93, Vol 1 4-1, Edited by Electric Research Power Institute, Palo Alto CA.
17. BERTALOT L., DE MARCO F., DE NINNO A., LA BARBERA A., SCARAMUZZI F., VIOLANTE V., *Proceedings of the 5th International Conference on Cold Fusion* (ICCF5), Monte-Carlo, Monaco, Apr. 1995, Published by Int. Conf. On Cold Fusion V, Valbonne, France, 34.

ENERGIA,
AMBIENTE
E INNOVAZIONE

Emissioni di ammoniaca: scenari e prospettive

GIOVANNI VIALETTO
MARIA LELLI
VITTORIO MAZZOTTA
RICCARDO DE LAURETIS *

ENEA
UTS Protezione e Sviluppo
dell'Ambiente e del Territorio,
Tecnologie Ambientali
*APAT

Le emissioni di sostanze azotate giocano un ruolo rilevante nei fenomeni di acidificazione ed eutrofizzazione. Tra queste sostanze, particolarmente significative sono le emissioni di ammoniaca, provenienti quasi esclusivamente da fonti non energetiche, ed in particolar modo dagli allevamenti zootecnici e dai fertilizzanti. Sarà in grado l'Italia di rispettare il tetto alle emissioni fissato dalle direttive comunitarie e dai trattati internazionali sottoscritti o dovranno essere introdotte ulteriori misure?

studi & ricerche

Ammonia emissions: scenarios and prospects

Abstract

Emissions of nitrogen compounds play an important role in acidisation and eutrophisation phenomena in Europe. Ammonia emissions from livestock and fertilisers are especially significant, and many international initiatives have been taken to control them. Italy too is supposed to respect the ammonia emission ceiling. This paper describes a medium-to-long term scenario for Italy, the aim being to verify our country's compliance. Our findings indicate that implementation of the IPPC Directive might suffice to ensure compliance, but further measures aimed at reducing emissions caused by using urea as a fertiliser would be helpful

in dagli anni 60 l'attenzione degli scienziati e dei *policy maker* si è sempre concentrata sulle emissioni di zolfo, ritenute a ragione le massime responsabili dei fenomeni di acidificazione riscontrati in vaste aree del continente europeo, Italia non esclusa, responsabili di consistenti danni alla salute umana e causa primaria di fenomeni di deterioramento del patrimonio monumentale.

La produzione di energia, usando principalmente combustibili fossili ad elevato contenuto di zolfo, è sempre stata la principale responsabile delle emissioni di zolfo, e programmi e misure sono stati intrapresi con successo negli ultimi decenni al fine di ridurre le emissioni di zolfo provenienti dal settore energetico.

Di pari passo con il miglioramento della situazione ambientale del settore energetico cresceva però sempre più la consapevolezza che anche le emissioni di sostanze azotate erano parimenti responsabili dei fenomeni di acidificazione osservati, che anche l'eutrofizzazione cominciava a divenire un problema ambientale sentito in Europa, e che settori non energetici erano in grado di contribuire significativamente alle emissioni di sostanze acidificanti, fino a rischiare di vanificare gli enormi sforzi ed i brillanti successi di riduzione ottenuti sul versante dell'energia.

Il Protocollo di Göteborg in ambito UNECE (United Nation Economic Commission for Europe) e la direttiva sui tetti nazionali alle emissioni in ambito Unione Europea hanno sancito definitivamente l'importanza delle emissioni di fonte non energetica e della loro riduzione ai fini di una completa tutela dell'ambiente e della salute dai fenomeni di acidificazione ed eutrofizzazione. Allo stesso tempo, hanno introdotto degli obblighi di riduzione delle emissioni di inquinanti atmosferici di fonte non energetica che dovranno essere rispettati dal nostro Paese.

Tra gli inquinanti atmosferici responsabili dei fenomeni di acidificazione ed eutrofizzazione, particolarmente significativa è l'ammoniaca*. È di fondamentale importanza pertanto conoscerne la situazione emissiva e le sue tendenze evolutive, anche al fine di determinare se le misure di controllo attualmente previste dalla legislazione in vigore sono sufficienti per rispettare gli impegni di riduzione o se ulteriori misure si renderanno necessarie, con conseguenti ripercussioni sui costi dei settori economici interessati. È inoltre importante sapere se le emissioni così risultanti saranno comunque sufficienti a garantire un adeguato grado di protezione degli ecosistemi e della salute umana, in linea con la strategia tematica sull'inquinamento atmosferico, una delle sette strategie tematiche previste dal sesto Piano di Azione Ambientale (EAP), che la Commissione Europea sta sviluppando nell'ambito del Programma CAFE (Clean Air For Europe - Aria Pulita Per l'Europa)¹.

Acidificazione ed eutrofizzazione: i carichi critici

L'acidificazione e l'eutrofizzazione dei suoli e delle acque dolci è determinata dalle deposizioni di solfati e nitrati. Queste sostanze sono riconducibili alle emissioni di zolfo, di ossidi di azoto e di ammoniaca. Mentre le prime sono il risultato della combustione di combustibili fossili, le emissioni di ammoniaca, come si può evincere dalla figura 1, provengono principalmente dagli allevamenti zootecnici e dall'uso dei fertilizzanti in agricoltura.

Per determinare la quantità di emissioni tollerabili si ricorre al concetto di carico critico. Per carico critico si intende una stima quantitativa dell'esposizione a uno o più inquinanti al di sotto della quale non avvengono significativi effetti dannosi sugli elementi sensibili dell'ambiente in accordo

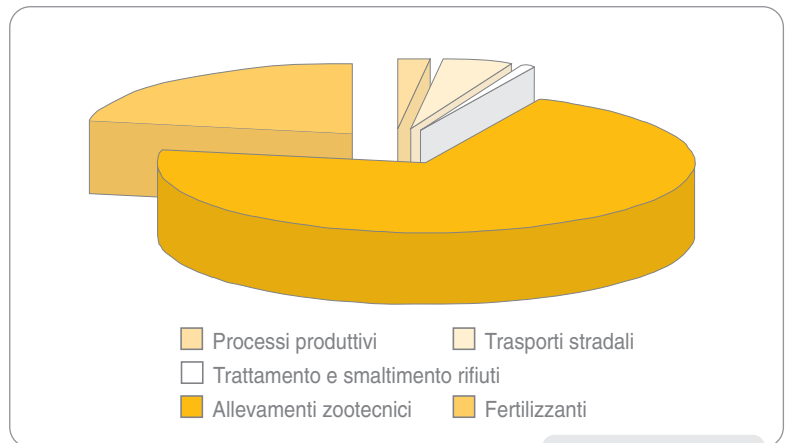
* Nonostante la sua alcalinità, l'ammoniaca dà luogo ad effetti acidificanti nel terreno e nell'acqua quando gli ioni ammonio sono trasformati, anche per azione di microrganismi, in ioni nitrici (nitrificazione).

alle attuali conoscenze². Nel nostro caso si farà riferimento al carico critico di acidità, inteso come sensibilità degli ecosistemi recettori al contenuto acido delle deposizioni dovuto sia alla presenza dei composti dello zolfo che dei composti dell'azoto, ed al carico critico di azoto nutriente, inteso come sensibilità degli ecosistemi recettori al contenuto di composti dell'azoto presente nelle deposizioni relativamente al loro contributo al fenomeno dell'eutrofizzazione³. L'idea alla base del concetto di carico critico è quella di bilanciare la deposizione di inquinante alla quale l'elemento recettore (sia esso l'ecosistema, i materiali o anche la salute umana) si trova esposto con la capacità dello stesso di tollerare tale deposizione senza subire danni. Sia il Protocollo di Göteborg che le direttive comunitarie in materia di riduzione delle emissioni di inquinanti e la qualità dell'aria sono basate sull'obiettivo di ridurre le eccedenze dei carichi critici; in particolare, il V Programma di Azione Ambientale dell'Unione Europea del 1993 richiedeva espressamente l'annullamento delle eccedenze dei carichi critici di acidificazione in tutto il territorio dell'UE.

Il contesto internazionale di riferimento

Come già detto, è cresciuta negli ultimi anni la consapevolezza che le emissioni di ammoniaca giocano ormai un ruolo significativo nei fenomeni di acidificazione ed eutrofizzazione che si riscontrano nel continente europeo, e l'attenzione della comunità internazionale si è sempre più concentrata sull'introduzione di una serie di misure necessarie per iniziare ad ottenere una riduzione di tali emissioni.

In ambito UNECE è stato raggiunto un accordo a livello governativo per introdurre misure di riduzione dell'ammoniaca, accordo sancito con la firma, avvenuta nel 1999 a Göteborg, di un protocollo, nell'ambito della Convenzione di Ginevra sull'in-



Fonte: APAT

Figura 1
Emissioni di ammoniaca in Italia per l'anno 2000

quinamento atmosferico transfrontaliero a lunga distanza, per l'abbattimento dell'acidificazione, dell'eutrofizzazione e dell'ozono al suolo.

In ambito Unione Europea, è stata emanata una direttiva comunitaria che stabilisce dei tetti nazionali alle emissioni, la direttiva 2001/81/CE, più nota come direttiva NEC (National Emission Ceiling), che, per quanto riguarda le emissioni di ammoniaca per l'Italia, conferma e rende più vincolanti i tetti alle emissioni già fissati con il Protocollo UNECE.

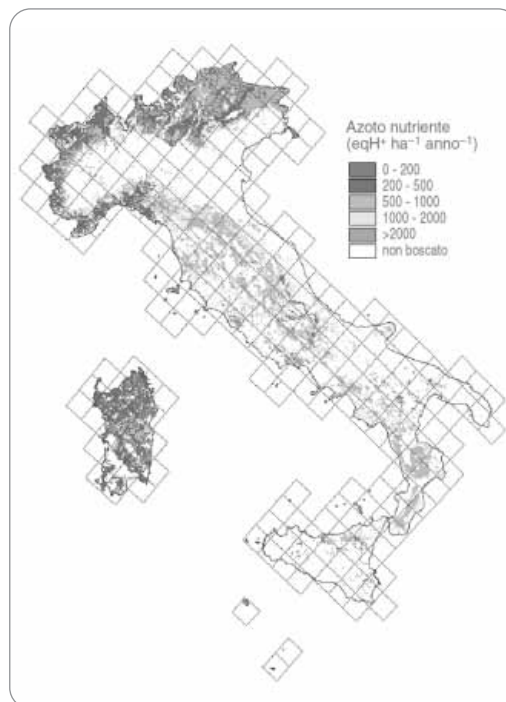


Figura 2
Mappa dei carichi critici di azoto nutriente per il territorio italiano

Fonte: Buffoni et al, 1999⁴

Tabella 1
Misure di riduzione delle emissioni di ammoniaca previste dal protocollo di Göteborg

Obbligo	Tempo di attuazione	Iniziative attuate	Iniziative da attuare
Tetto alle emissioni (419 migliaia di t)	2010		Applicare direttiva 2001/81/CE (NEC). Verificare la necessità di definire ulteriori misure di riduzione delle emissioni
Codice di buone pratiche agricole per emissioni di ammoniaca	Entro 1 anno dall'entrata in vigore (~2004)		Emanare codice di buone pratiche agricole per le emissioni di ammoniaca
Uso di fertilizzanti basati su urea	Entro 1 anno dall'entrata in vigore (~2004)		Emanare misure per ridurre le emissioni di ammoniaca dall'uso di fertilizzanti basati su urea (codice di buone pratiche agricole)
Divieto d'uso del carbonato di ammonio come fertilizzante	Entro 1 anno dall'entrata in vigore (~2004)		Emanare divieto d'uso del carbonato di ammonio come fertilizzante
Introduzione di tecniche di spandimenti dei liquami	Entro il 31/12/2007		Attuazione direttiva 96/61/CE (IPPC)
Introduzione di tecniche di spandimento delle deiezioni solide	Entro 1 anno dall'entrata in vigore (~2004)		Emanare misure per assicurarsi che le deiezioni solide vengano incorporate entro 24 dal loro spandimento (codice di buone pratiche agricole)
Applicazione di BAT ai nuovi stoccaggi di liquami	Entro 1 anno dall'entrata in vigore (~2004)		Attuazione direttiva 96/61/CE (IPPC)
Applicazione di BAT agli esistenti stoccaggi di liquami	Entro il 31/12/2007		Attuazione direttiva 96/61/CE (IPPC) (*) (* Le BAT possono non essere applicate qualora ciò risultasse tecnicamente od economicamente non fattibile (va documentato)
Applicazione di BAT ai ricoveri nuovi	Entro 1 anno dall'entrata in vigore (~2004)		Attuazione direttiva 96/61/CE (IPPC)

Fonte: Rapporto CNEL 2001

Inoltre, nell'ambito della direttiva 99/61/CE (Direttiva IPPC relativa al controllo ed alla prevenzione integrata dell'inquinamento), i grandi allevamenti zootecnici sono stati considerati in sede di autorizzazione ai sensi della direttiva stessa. Una descrizione delle misure di riduzione delle emissioni di ammoniaca previste dal Protocollo di Göteborg è riportata in tabella 1, insieme alle iniziative da intraprendere per attuarle, alla luce della normativa vigente.

Proiezioni delle attività agricole che emettono ammoniaca

Per quanto riguarda le proiezioni a medio termine, 2000-2010, si è innanzi tutto indivi-

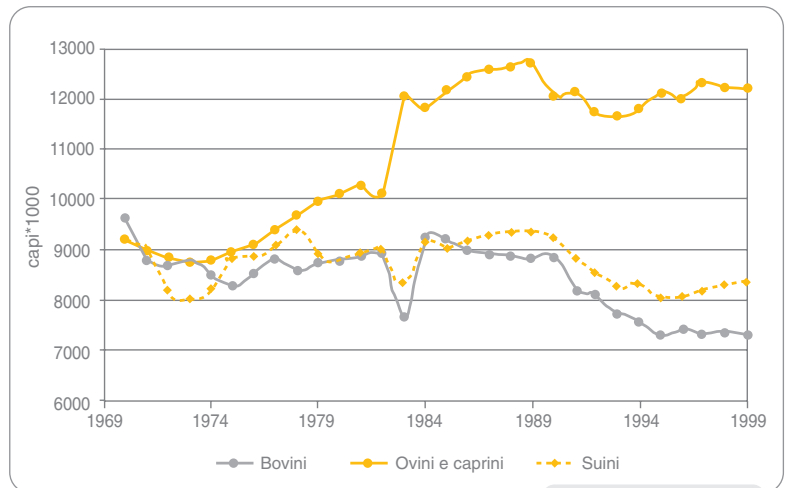
duato un trend per i settori principali di emissione di ammoniaca (allevamenti e consumo/produzione di fertilizzanti azotati), analizzando le serie storiche delle attività negli ultimi trent'anni (figure 3 e 4). Sulla base dei trend analizzati e di contatti con esperti nazionali di settore, sono state formulate delle ipotesi di evoluzione nel medio termine. Tali ipotesi sono state confrontate con analisi e previsioni disponibili in letteratura (tabella 2). In particolare, sono state considerate le previsioni fatte dalla Commissione Europea, Direzione Agricoltura, per quanto riguarda le variazioni nella produzione di carne su scala europea, e le previsioni nel breve termine fatte dall'associazione industriale nazionale

di categoria Federchimica per quanto riguarda i fertilizzanti. Va comunque osservato che le previsioni riguardanti la produzione di carne su scala europea possono essere estese al numero dei capi allevati su scala nazionale solo con una certa cautela, in quanto va tenuto conto anche delle importazioni/esportazioni.

Per i bovini, si può osservare una netta differenza rispetto alle indicazioni fornite dalla Commissione Europea; tale differenza è dovuta al fatto che la ripresa su scala europea, ipotizzata dalla Commissione in un valore stimabile all'incirca intorno al 5% in 10 anni, non pare applicabile alla realtà nazionale alla luce del trend osservato negli ultimi venti anni, che mostra un calo pressoché continuo, e delle indicazioni ricavabili dall'evoluzione nazionale del mercato, sempre più orientato alla produzione di qualità a scapito della quantità. L'ipotesi di stabilità nel numero complessivo dei capi risulta inoltre coerente con quanto previsto in sede di proiezione delle emissioni di gas ad effetto serra nell'ambito della terza comunicazione nazionale alla Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici⁵.

Per i suini le nostre ipotesi generalmente corrispondono con quelle della Commissione.

Per gli avicoli, per i quali i dati esaminati sono discordanti e contraddittori e non si è potuto ricostruire una serie storica coerente ed attendibile, l'ipotesi fatta dalla Commissione Europea di crescita a livello europeo nella produzione di carne del 10% è stata ritenuta poco plausibile alla luce delle considerazioni esposte dall'associazione nazionale di categoria degli avicoltori (UNA)⁶. Tali considerazioni sono basate sull'andamento dei mercati, caratterizzati da prezzi delle carni fortemente al di sotto dei costi di produzione, dalla crescente difficoltà di esportazione per le imprese nazionali, da un eccesso di produzione non compensato da un analogo aumento di consumi. Si è quindi ipotizzato un



Fonte: FAO

lieve incremento del numero di capi, quantificabile nell'1%.

Per gli ovini e i caprini, sebbene il trend riportato dalla FAO⁷ mostri negli ultimi anni una tendenza in leggera ascesa, si sono ritenute valide anche per l'Italia le considerazioni fatte dalla Commissione su scala europea, che tengono conto del crollo nella produzione di carne avutosi nel 2001 a seguito di una epidemia e dell'introduzione di nuove regole comunitarie dal 2002 nel settore.

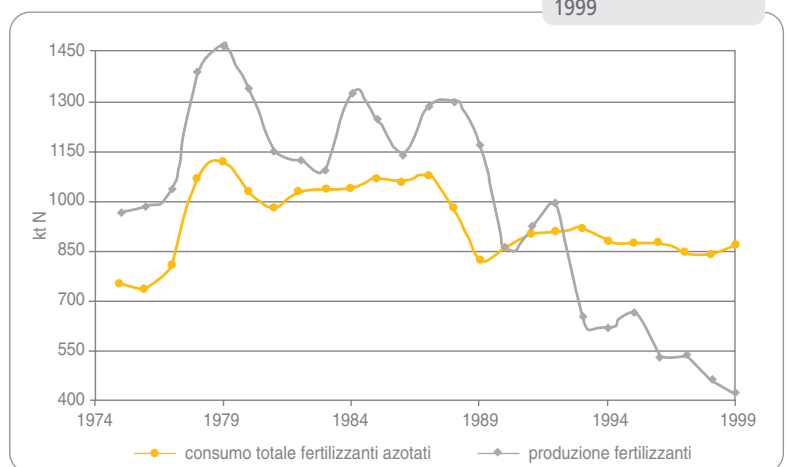
Per il consumo totale di fertilizzanti azotati, è stata ipotizzata una situazione di stasi alla luce del trend osservato e della diminuzione della superficie agricola utilizzata totale rispetto al 1990, passata da circa 15 a poco più di 13 milioni di ha⁸. L'ipotesi di stabilità nei consumi di fertilizzanti azotati è avanza-

Figura 3

Cambiamenti nel numero degli animali allevati negli anni 1970-1999. I dati sono comparabili con i dati ISTAT per gli anni 1990-2000

Figura 4

Cambiamenti nei consumi e nella produzione di fertilizzanti azotati negli anni 1975-1999



Fonte: FAO

Settori	ENEA/APAT	Commissione Europea	Federchimica
Bovini	Stabile	+5%	-
Suini	In ripresa: +5%	+6.5%	-
Avicoli	In leggera crescita: +1%	+10%	-
Ovini e caprini	In lieve calo: -3%	-3%	-
Consumo fertilizzanti azotati	Stabile	-	Stabile
Produzione fertilizzanti	Stabile	-	Ripresa e stabilizzazione livelli capacità produttive esistenti

Tabella 2

Ipotesi utilizzate per le proiezioni a medio termine (2000-2010) delle attività per quanto riguarda i principali settori zootecnici che emettono ammoniaca ed i fertilizzanti. Tutte le previsioni sono riferite al dato 2000

ta anche da Federchimica, che semmai prevede per il futuro l'espansione di prodotti specialistici e più innovativi. Per la produzione di fertilizzanti, in calo costante, è stata ipotizzata una stabilizzazione ai valori relativi agli ultimi anni, in linea con le previsioni a breve termine di Federchimica, che ipotizzano un recupero della produzione rispetto al calo del 3% osservato nel 2002, produzione che dovrebbe stabilizzarsi sui livelli consolidati delle capacità produttive esistenti.

Per completare il quadro relativo alla previsione nel medio periodo delle attività agricole che emettono ammoniaca, vanno infine considerati gli equini e gli animali da pelliccia, per i quali non esistono in letteratura dati di proiezione. Per gli equini, la serie storica ricavabile dai dati FAO sembra mostrare negli ultimi anni una sostanziale stabilizzazione nel numero dei capi,

che pertanto è stato assunto costante anche nel medio periodo. Per gli animali da pelliccia, è stato usato il dato al 2000 fornito da una associazione animalista; in assenza di maggiori informazioni, tale dato è stato assunto costante nel medio periodo. Per quanto riguarda le proiezioni a lungo termine, 2010-2020, per le quali non esistono in letteratura dati disponibili, si è ipotizzato per gli allevamenti che, laddove era stato previsto un incremento nel medio termine, esso proseguiva anche nel lungo termine. Per quanto riguarda il valore di tale incremento, in assenza di elementi significativi a fini di previsione, si è ipotizzato che tale incremento segua l'andamento del prodotto lordo e della popolazione. Ciò corrisponde ad una crescita annua del numero di capi allevati del 4% dettata dall'ipotesi di una crescita del PIL intorno al 2% annuo ed una crescita della popolazione

Tabella 3

Proiezione delle attività agricole che emettono ammoniaca in Italia (anni 2010-2020) dall'anno-base 2000

Settori	Attività			
Unità: numero capi * 1000	2000	2010	2015	2020
Vacche da latte	2065	2065	2065	2065
Altri bovini	5180	5180	5180	5180
Maiali da ingrasso e scrofe	6828	7169	7313	7459
Galline da covata	44781	45229	46134	47056
Altro pollame	126562	127828	130384	132992
Ovini e caprini	12464	12090	12090	12090
Equini (cavalli, muli, asini)	313	313	313	313
Animali da pelliccia	230	230	230	230
Unità: kt azoto				
Consumo urea	352	352	352	352
Consumo altri fertilizzanti azotati	438	438	438	438
Produzione fertilizzanti	427	427	427	427

Le fonti dei dati dell'anno base 2000 sono:
 - per bovini, suini ed ovini, l'annuario ISTAT del 2002
 - per gli avicoli, il 5° Censimento dell'Agricoltura ISTAT del 2000
 - per gli equini, la FAO
 - per gli animali da pelliccia, la LAV
 - per il consumo di fertilizzanti, l'annuario ISTAT del 2002
 - per la produzione di fertilizzanti, la FAO

dello 0,2% dovuta in particolar modo al movimento migratorio. Il prodotto della crescita del PIL per la crescita della popolazione ci fornisce il coefficiente moltiplicativo annuale. Negli altri casi si è assunto per il numero dei capi allevati nel lungo periodo lo stesso valore del medio. Per i fertilizzanti si è ritenuto che possano essere ancora valide le considerazioni fatte per il medio periodo.

Sulla base delle ipotesi di evoluzione delle attività così formulate sono stati ricavati i dati di attività per gli anni 2010-2020, partendo dai dati di inventario dell'anno-base 2000 (tabella 3).

In tabella 4 si può osservare un confronto al 2010 tra le nostre proiezioni e quelle fornite dall'Agenzia Europea per l'Ambiente rispetto al 1990⁹.

Scenario di emissioni di ammoniaca al 2010-2020

Per calcolare uno scenario emissivo proiettato fino al 2020 ci siamo avvalsi del modello RAINS, un modello di valutazione integrata usato sia in sede UNECE sia in sede UE, sviluppato dall'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) con sede a Laxenburg in Austria¹⁰, e già da noi utilizzato per analisi di scenari emissivi in Italia¹¹ grazie alla cooperazione esistente tra l'ENEA e lo IIASA, che ha concesso l'esecuzione di calcoli con il loro modello, utilizzando dati elaborati a livello nazionale. In particolare, per quanto riguarda i fattori di emissione, abbiamo usato quelli utilizzati dall'APAT, che ha recentemente aggiornato i fattori di emissione usati per la realizzazione dell'inventario nazionale delle emissioni per gli allevamenti sulla base di uno studio apposito fatto dal CRPA alla luce delle più recenti acquisizioni tecnico-scientifiche.

Per avere un quadro completo delle emissioni, è necessario considerare anche gli altri settori che emettono ammoniaca. Per essi, il RAINS utilizza come dato l'emissio-

Settori	ENEA/APAT	AEA
Bovini	7245	7000
Suini	8722	8200
Avicoli	171343	172500
Consumo fertilizzanti azotati	790	919

Tabella 4

Confronto tra le proiezioni al 2010 fatte da noi con riferimento al 2000, e dall'Agenzia Europea per l'Ambiente con riferimento al 1990. Dati in migliaia di capi per gli allevamenti ed in kt di azoto per i fertilizzanti

ne stessa. Si tratta in genere di settori caratterizzati da emissioni trascurabili o relativamente piccole, e per i quali è stato quindi assunto un valore costante, con la eccezione del settore rifiuti e del settore automobili, divenuto quest'ultimo una sorgente non trascurabile a seguito della catalizzazione del parco auto.

Per quanto riguarda i rifiuti, è necessario considerare la riduzione delle emissioni di ammoniaca derivante al 2010 dalla riduzione nella quantità totale dei rifiuti avviati in discarica, e la direttiva 99/31/CE, che impone una riduzione del 50% rispetto ai livelli del 1995 per quanto riguarda la quantità di rifiuti urbani biodegradabili da smaltire in discarica. Per l'Italia la scadenza entro cui applicare la direttiva è il 2014, per cui si è ipotizzato l'effetto a partire dal 2015.

Per quanto riguarda invece le automobili, dalle analisi in corso sullo scenario energetico utilizzato per la Terza Comunicazione Nazionale alla Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici¹², è emerso che i consumi di combustibile associabili al parco auto catalizzato al 2000 rappresentavano il 63% dei consumi totali. La stima delle emissioni nel medio e lungo periodo è stata pertanto fatta ipotizzando che l'intero parco auto sia catalizzato già dal 2010.

Non sono stati presi in considerazione in questo studio gli effetti derivanti dall'applicazione di nuovi sistemi di abbattimento degli inquinanti, quali l'introduzione di nuovi combustibili come idrogeno o metano o di modifiche nella tecnologia costruttiva dei motori, anche se è probabile che i primi effetti sulle emissioni inizino a farsi sentire già negli anni successivi al 2010.

Lo scenario delle emissioni di ammoniaca

Tabella 5

Scenario di emissioni di ammoniaca nel medio e lungo periodo calcolato con il modello RAINS. I dati sono in t. La voce "Altro" comprende tutte le altre attività che emettono ammoniaca, quali la combustione stazionaria, le sorgenti mobili, i processi industriali, le emissioni dalle coltivazioni. Al 2000 le emissioni provenienti dalle automobili, incluse in questa voce, ammontavano a 14.952 t

Settori	2000	2010	2015	2020
Vacche da latte e da riproduzione	92.388	92.388	92.388	92.388
Altri bovini	105.568	105.568	105.568	105.568
Maiali da ingrasso e scrofe	48.957	51.405	52.433	53.481
Galline da covata	16.569	16.735	17.069	17.411
Altro pollame	30.375	30.679	31.292	31.918
Pecore e capre	16.203	15.717	15.717	15.717
Equini (cavalli, muli, asini)	2.635	2.635	2.635	2.635
Animali da pelliccia	389	389	389	389
Consumo urea	64.064	64.064	64.064	64.064
Consumo altri fertilizzanti azotati	18.221	18.221	18.221	18.221
Produzione fertilizzanti	8.882	8.882	8.882	8.882
Industria chimica inorganica (escluso fertilizzanti)	235	235	235	235
Trattamento e smaltimento rifiuti	5.831	3.500	2.000	2.000
Altro	16.899	22.431	22.431	22.431
Totale	427.216	432.848	433.324	435.340

nel medio e lungo periodo è riportato in tabella 5.

Scenari di riduzione delle emissioni

Come risulta dagli scenari riportati nel paragrafo precedente, il tetto alle emissioni di ammoniaca previsto dal Protocollo di Göteborg e dalla direttiva NEC difficilmente potrà essere rispettato alla luce delle tendenze evolutive ragionevolmente prevedibili per le attività che emettono ammoniaca. A questo punto è necessario ipotizzare misure in grado di ridurre le emissioni per consentire il rispetto degli impegni internazionali sottoscritti.

Una prima analisi che può essere svolta riguarda la stima del potenziale di riduzione delle emissioni di ammoniaca derivante dall'applicazione delle misure previste nella terza comunicazione nazionale alla Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici per raggiungere gli obiettivi del Protocollo di Kyoto. Sono state pertanto esaminate le misure riguardanti l'agricoltura ed i rifiuti. Va però evidenziato che si tratta di misure riportate nella comunicazione come non ancora stabilite. Le misure prese in esame sono: l'applicazione della direttiva 99/61CE ai grandi allevamenti

zootecnici, la stabilizzazione della frazione organica nei rifiuti e la razionalizzazione nell'uso dei fertilizzanti.

Per quanto riguarda l'attuazione della direttiva 99/61/CE (IPPC), il decreto legislativo 4 agosto 1999 n. 372 stabilisce che gli impianti per l'allevamento intensivo di pollame o di suini con più di 40.000 posti pollame, 2.000 posti suini da produzione o 750 posti scrofe debbano essere autorizzati ai sensi della direttiva stessa, fissando al 30 ottobre 2007 il tempo entro cui gli impianti esistenti devono adeguarsi alla nuova normativa.

Il decreto ministeriale 23 novembre 2001 ha poi fissato i valori di soglia che debbono essere rispettati per la comunicazione dei dati di emissione. In particolare, per quanto riguarda l'ammoniaca, il valore di soglia è stato fissato in 10.000 kg/anno di emissioni.

Sulla base di una stima del numero di aziende suinicole¹³ ed avicole¹⁴ potenzialmente soggette alla direttiva, è stata effettuata una stima del potenziale di riduzione ottenibile. Va evidenziato che mentre il dato relativo ai suini è sufficientemente attendibile, altrettanto non si può dire per quanto riguarda quello relativo agli avicoli, vista la già riportata difficoltà nel reperimento di

**Potenziale di riduzione
delle emissioni di ammoniaca al 2010 (kt)**

Applicazione direttiva IPPC ai suini	2-3
Applicazione direttiva IPPC agli avicoli	18
Stabilizzazione della frazione organica nei rifiuti urbani al 2010	1,5
Razionalizzazione nell'uso di fertilizzanti	9

Tabella 6

Potenziale di riduzione delle emissioni di ammoniaca al 2010 derivante dalla introduzione delle misure addizionali, non ancora stabilite, previste dalla Terza Comunicazione Nazionale alla Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici

dati coerenti relativamente a questo settore. Per quanto riguarda i settori rifiuti e fertilizzanti, la Terza Comunicazione Nazionale ipotizza, tra le misure che potrebbero essere emanate per garantire il raggiungimento degli obiettivi stabiliti dal Protocollo di Kyoto, un anticipo al 2010 dell'applicazione della direttiva 99/31/CE sulla stabilizzazione della frazione organica nei rifiuti, ed un intervento di razionalizzazione nell'uso di fertilizzanti, che potrebbe portare ad una riduzione nei consumi di fertilizzanti al 2010 del 5% rispetto al 1990.

Va sottolineato che si tratta comunque di misure addizionali da stabilire. Una stima del potenziale di riduzione derivante dall'applicazione di queste misure è riportata in tabella 6.

Una seconda analisi che abbiamo svolto riguarda invece l'applicazione del modello RAINS per individuare quali sono quelle misure più convenienti dal punto di vista dei costi da sostenere per ridurre le emissioni di ammoniaca. Il modello RAINS consente infatti di elaborare, a partire da uno scenario di riferimento basato su una strategia di controllo delle emissioni definita sulla base della legislazione vigente, uno scenario di riduzione supplementare, che sia *cost-effective*, in modo da indicare le tecniche più convenienti da applicare fino al livello di emissioni che si vuole raggiungere come obiettivo.

Per sviluppare lo scenario di riduzione con il modello RAINS è necessario pertanto, come prima cosa, definire una strategia di controllo, cioè una serie di vincoli alle emissioni. La strategia da noi scelta è l'applicazione della direttiva IPPC agli allevamenti intensivi suinicoli ed avicoli. Si è quindi ipotizzato l'applicazione agli allevamenti soggetti alla direttiva IPPC delle tecniche di abbattimento che, secondo lo studio ENEA/CRPA, sono risultate le più promettenti nella realtà produttiva italiana. In particolare, sulla base della precedente stima del numero di aziende suinicole ed avicole potenzialmente soggette alla direttiva e ponendo il vincolo che tale numero rimanga costante rispetto al 2000, per ottenere la riduzione prevista dall'applicazione della direttiva IPPC sulle attività al 2010 è stata ipotizzata la seguente strategia di controllo:

1. per i suini: applicazione al 14% del numero totale di animali allevati al 2010 delle tre tecniche di abbattimento considerate, e cioè alimentazione a basso contenuto di azoto, modificazione della stalla e spandimento a bassa emissione del concime;
2. per l'altro pollame: applicazione al 50% del numero totale di animali allevati al 2010 delle due tecniche di abbattimento considerate, e cioè modificazione della stalla e spandimento a bassa emissione del concime;

Tabella 7

Emissioni abbattute e costi al 2010 a seguito dell'applicazione della direttiva IPPC ai grandi allevamenti suinicoli ed avicoli secondo il modello RAINS

Settore	Tecnica applicata	Emissioni abbattute (kt NH ₃)	Costi totali (milioni di €)
Altro pollame	Modifiche stalla/ spandimento a bassa emissione del concime	10,59	23,23
Galline da covata	Modifiche stalla/ spandimento a bassa emissione del concime	5,51	5,20
Suini	Alimentazione a basso contenuto di azoto/ modifiche stalla/ spandimento a bassa emissione del concime	3,76	23,78

3. per le galline da covata: applicazione al 60% del numero totale di animali allevati al 2010 delle due tecniche di abbattimento considerate, e cioè modificazione della stalla e spandimento a bassa emissione del concime.

È da sottolineare che la tecnica di modificazione del ricovero per i suini è considerata impraticabile in Italia per gli alti costi di attuazione, ma per semplicità di calcolo è stata comunque presa in considerazione nella nostra analisi con i costi stimati del RAINS. Come si vede dalla tabella 7, la riduzione delle emissioni di ammoniaca che ne è derivata è risultata comparabile con quanto precedentemente stimato.

Una volta definita la strategia di controllo ed il relativo scenario di riferimento, è stato sviluppato lo scenario di riduzione. In tabella 8 è riportato l'elenco delle tecniche di abbattimento la cui applicazione risulta più conveniente secondo tale scenario di riduzione, cioè l'elenco delle tecniche di abbattimento caratterizzate da un costo marginale minore, con la valutazione della riduzione delle emissioni conseguibile. Le tecniche di abbattimento vanno intese come applicate alla totalità della voce considerata. Va sottolineato che le riduzioni riportate in tabella per gli allevamenti suinicoli ed avicoli riguardano l'estensione della tecnica di abbattimento considerata alle aziende che non rientrerebbero nella direttiva.

L'analisi effettuata con il modello RAINS

conferma che il tetto alle emissioni di ammoniaca risulterebbe rispettato sulla base dello scenario di riferimento basato sulla sola applicazione della direttiva IPPC agli allevamenti intensivi suinicoli ed avicoli. Inoltre, non essendo realisticamente ipotizzabile una ulteriore estensione della direttiva IPPC alle aziende più piccole, ulteriori riduzioni delle emissioni di ammoniaca possono essere ottenute solamente mediante la sostituzione dell'urea con altri fertilizzanti. Infatti, come si vede chiaramente dalla tabella 8, questa misura rappresenta l'unica misura caratterizzata da costi relativamente bassi e da un elevato potenziale di riduzione delle emissioni.

Conclusioni e prospettive

Il controllo e la riduzione delle emissioni di ammoniaca rappresenta ormai un impegno non più rinviabile, e la tendenza evolutiva che appare dalla presente analisi sembra indicare la necessità e l'urgenza di intraprendere misure che vadano in tal senso. È però evidente che una scelta oculata di tali misure è indispensabile, cercando di ottenere il massimo del risultato da un punto di vista della salvaguardia dell'ambiente con il minimo degli sforzi economici e sociali da sottoporre alla collettività. In particolare, sulla base del presente documento, il rispetto della direttiva NEC può essere garantito dall'applicazione della direttiva IPPC, che rappresenta co-

Tabella 8

Scenario di riduzione delle emissioni di ammoniaca al 2010 ottenuto applicando il modello RAINS a partire da uno scenario di riferimento basato sull'applicazione della direttiva IPPC

Tecnica applicata	NH ₃ rimossa (kt)	Costo marginale (€/t NH ₃)	NH ₃ rimanente (kt)
Emissioni iniziali (scenario di riferimento)	0,00	0,00	412,99
Altro pollame: copertura stoccaggi	2,41	9,66	410,58
Galline da covata: adattamento ricovero	3,45	819,56	407,13
Sostituzione urea con altri fertilizzanti azotati	55,57	1184,44	351,56
Altro pollame: adattamento ricoveri ed introduzione misure di spandimento	8,07	2874,61	343,49
Galline da covata: adattamento ricoveri ed introduzione misure di spandimento	0,22	2891,79	343,27
Suini: alimentazione a basso contenuto di azoto	8,84	4464,87	334,43

munque un obbligo per il nostro Paese. Tuttavia, date le incertezze esistenti sui dati, e vista l'analisi costi-benefici delle misure di riduzione praticabili, sarebbe altresì auspicabile l'adozione, ad esempio tramite l'emanazione del codice di buone pratiche agricole previsto dal Protocollo di Göteborg, di misure in grado di ridurre le emissioni derivanti dal consumo di urea come fertilizzante. Ciò, oltre a rendere più sicuro il rispetto del tetto alle emissioni di ammoniaca, fornirebbe a costi relativamente contenuti ulteriori margini di riduzione delle emissioni degli inquinanti responsabili dei fenomeni di acidificazione ed eutrofizzazione in sede di negoziazione internazionale, facilitando il raggiungimento degli obiettivi di tutela ambientale fissati dall'Unione Europea come irrinunciabili.

Bibliografia

1. WICKS P., "Clean Air For Europe". *Pollution Atmosphérique*, Numéro spécial, Mai 2002.
2. CCE, Coordination Center for Effects; "Calculation and Mapping of critical thresholds in Europe: Coordination Center for Effects Status Report 1999". RIVM Report n. 259101009, 1999.
3. BONANNI P., BRINI S., BUFFONI A., STELLA G., VIALETTO G., "Acidificazione ed eutrofizzazione da deposizioni atmosferiche: le mappe nazionali dei carichi critici." Serie ANPA Stato dell'Ambiente 14/2001.
4. BUFFONI A., STELLA G., VETRELLA G., CAPPONI N., "Determinazione dei carichi critici di inquinanti atmosferici per il territorio italiano", Gruppo di lavoro ENEL Area Ambiente Milano; allegato a DESERTI M., SPAGLI L., BINI G., POLUZZI V., MINACI L., DE MARIA R., ZANINI G., VIALETTO G., BRUSASCA G., ANGELINO E., LIGUORI F., "Osservatorio dei modelli su inquinamento transfrontaliero e modelli integrati di impatto". Rapporto del Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni in aria. ANPA, 1999.
5. MATT - MINISTERO PER L'AMBIENTE E LA TUTELA DEL TERRITORIO; "3° Comunicazione Nazionale alla Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici", 2003.
6. UNA - UNIONE NAZIONALE AVICOLTURA; <http://www.unionenazionaleavicoltura.it/>
7. FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION; <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture>
8. ISTAT, ISTITUTO NAZIONALE DI STATISTICA; Annuario statistico per il 2002.
9. AEA - AGENZIA EUROPEA PER L'AMBIENTE; "Air Pollution Outlooks - an Evaluation", 2001.
10. AMMAN M., COFALA, J., HEYES C., KLIMONT Z., SHOPP W., "The RAINS model: a tool for assessing regional emission control strategies in Europe". *Pollution Atmosphérique*, Numero speciale, dicembre 1999.
11. PIGNATELLI T., CONTALDI M., "Comparative Analysis of a Post-Kyoto Emission Scenario performed by the models Rains and Markal", UN-ECE TFIAM Meeting, Oslo, Maggio 2002.
12. PIGNATELLI T., CONTALDI M., "Comparative analysis of Post-Kyoto emission scenarios from energy sources developed by the models Rains and Markal", RT/2003/8/PROT.
13. ENEA/CRPA; BONAZZI G., FABBRI C., VALLI L., MAZZOTTA V., "Emissione di ammoniaca e di composti ad effetto serra dagli allevamenti di suini, RT/2003/66/PROT.
14. ISTAT, ISTITUTO NAZIONALE DI STATISTICA; 5° Censimento dell'Agricoltura del 2000.
15. EC - EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Agriculture; "Prospects for Agricultural Markets 2002 - 2009", giugno 2002.
16. LAV - LEGA ANTI VIVISEZIONE; <http://www.infolav.org/lenostrecampagne/pellicce/gli allevamenti/index.htm>
17. VIALETTO G., VELARDI M.; "L'attività UNECE", in: CNEL, Consiglio Nazionale dell'Economia e del Lavoro; "Incontrare Johannesburg 2002: Rapporto ENEA sullo stato di attuazione del patto per l'energia e l'ambiente", a cura di N.M. Caminiti, 2001.

Sviluppo sostenibile: una sfida per l'ingegneria civile

PAOLO CLEMENTE

ENEA

UTS Protezione e Sviluppo
dell'Ambiente e del Territorio,
Tecnologie Ambientali

Lo sviluppo sostenibile condiziona tutti i momenti dell'attività dell'ingegnere, in particolare dell'ingegnere civile. Ovunque nel mondo ci sia necessità di costruire nuovi sistemi di infrastrutture civili, riparare quelle esistenti, salvaguardare strutture di interesse storico e artistico l'ingegnere deve essere pronto a fronteggiare nuove problematiche e sfide

studi & ricerche

Sustainable development: a challenge for civil engineering

Abstract

"Satisfy current needs without jeopardising the capacity of future generations to satisfy theirs." From this definition suggested by Gro Harlem Brundtland as chair of the U.N. Commission on Environment and Development, it is easy to see that the idea of sustainable development should influence every moment in the work of an engineer. Civil engineers in particular face this challenge in designing civil infrastructure and structural systems. Transportation and water supply systems, waste management and power generation plants are the cornerstones of modern civilisation, enabling it to function, grow and survive. All nations need to build new non-military infrastructure, repair structures damaged by time, natural events or humans, and safeguard those of historic and artistic value

La costante ricerca di uno sviluppo economico soddisfacente contrasta con il rispetto dell'ambiente: ne derivano problemi sempre maggiori, che non trovano facile soluzione anche a causa degli interessi contrastanti delle varie nazioni. Le categorie di problemi in questione, che investono tutti, dai singoli individui alle comunità, dalle industrie alle organizzazioni pubbliche e private, sono ben note:

- il deterioramento delle infrastrutture, l'inquinamento e la crescita urbana disordinata,
- la riduzione delle risorse naturali, l'accumulo dei rifiuti, il degrado ambientale,
- l'aumento della popolazione, l'aumento e il diffondersi di malattie e dei conflitti sociali, economici e politici.

Gli approcci tradizionali, finora utilizzati per la produzione, il trasporto e l'uso di beni, prodotti e servizi, e per garantire al contempo la mitigazione degli effetti nocivi sull'ambiente e la definizione di eventuali rimedi, si sono rivelati spesso inefficaci e costosi. È necessario, pertanto, trovare nuove soluzioni nello spirito dello sviluppo sostenibile: "soddisfare i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle future generazioni di soddisfare i propri". È una nuova sfida per gli ingegneri civili, impegnati nella progettazione di sistemi di infrastrutture e, in particolare, agli ingegneri strutturalisti responsabili della progettazione di sistemi strutturali, componenti fondamentali di tali sistemi.

I sistemi di infrastrutture civili, come gli impianti per l'approvvigionamento e la raccolta dell'acqua, la raccolta e lo smaltimento dei rifiuti, la produzione di energia e le infrastrutture di comunicazione, sono elementi fondamentali per la società moderna. La qualità della vita è correlata al buon funzionamento e alla sostenibilità dei sistemi di infrastrutture; inoltre, tali sistemi rappresentano le linee vitali che consentono alla nostra società di funzionare, crescere e sopravvivere. Non esiste paese al mondo dove non ci sia la necessità di sviluppare

nuovi sistemi di infrastrutture civili, migliorare i sistemi deteriorati, ripristinare o ricostruire le strutture danneggiate da disastri naturali o umani, salvaguardare il patrimonio culturale.

L'industria delle costruzioni è senz'altro il maggiore responsabile, diretto e indiretto, della distruzione e del degrado delle risorse naturali, della produzione e dell'accumulo di rifiuti e dell'impatto ambientale. Il contesto economico, politico e sociale, ormai più sensibile ai problemi ambientali, comincia a pretendere nei progetti l'ottimizzazione nell'uso delle risorse, la riduzione o eliminazione dei rifiuti, il miglioramento della compatibilità ambientale. Pertanto, progettisti e costruttori si imbattono, nella loro attività, in regole sempre più restrittive, riguardanti la conservazione e la protezione dell'ambiente e che rendono sempre più arduo soddisfare i requisiti richiesti dai committenti, i quali pretendono livelli sempre più alti di efficienza dei progetti e di prestazioni delle costruzioni.

Affinché l'industria delle costruzioni affronti con successo tali sfide è necessario che i concetti e i principi di sostenibilità siano considerati esplicitamente e sistematicamente in tutte le fasi di progettazione e che siano sviluppate nuove tecnologie, sistemi di costruzione alternativi e materiali innovativi. L'applicazione di tali concetti è impresa ardua: a proprietari, progettisti e costruttori non sono offerti incentivi né risorse appropriate per affrontare le notevoli sfide con mezzi nuovi e, inoltre, i concetti e i principi di sostenibilità non sono ancora stati adattati alle specificità dell'industria delle costruzioni.

Nonostante i numerosi sforzi al riguardo, resta ancora da chiarire che cosa significhi sostenibilità per gli ingegneri e che cosa devono fare gli ingegneri civili per raggiungere la sostenibilità ad un livello globale di sistema delle costruzioni, a livello intermedio di progetto di sistemi di infrastrutture civili e a livello specifico di progettazione strutturale.

Lo sviluppo sostenibile

La World Commission on Environmental and Development delle Nazioni Unite, presieduta da Gro Harlem Brundtland, ha identificato cinque obiettivi per lo sviluppo sostenibile¹:

- crescita economica,
- opportuna localizzazione delle risorse per sostenere tale crescita,
- partecipazione e la costituzione di sistemi politici più democratici,
- adozione di stili di vita consoni alla conservazione ecologica del pianeta,
- livelli di popolazione in armonia con le potenzialità produttive degli ecosistemi.

A questi va aggiunta la necessità di ridurre i conflitti tra paesi sviluppati e sotto-sviluppati. Notevoli sono state le critiche a tale visione della problematica. Un'ampia sintesi sulla discussione è stata fatta da Vanegas²; di seguito si riportano alcuni dei contributi più significativi.

Daly^{3,4} nota che crescita e sviluppo non sono affatto sinonimi e che, abitando un pianeta finito con una sottile biosfera, crescita economica e aumento di popolazione sono inconciliabili.

Pearce⁵ focalizza l'attenzione sulla sostenibilità delle risorse naturali di base, notando che qualità e input ambientali sono stati sotto-valutati nei processi di miglioramento del profitto reale e della qualità della vita.

Engel⁶ utilizza il termine sviluppo al di là del suo significato strettamente economico, bensì come sinonimo di evoluzione, crescita e appagamento di tutti gli aspetti della vita, proponendo un modello sociale basato sull'integrazione di conservazione e sviluppo, il soddisfacimento dei bisogni umani, l'equità e la giustizia sociale, l'autodeterminazione sociale e il rispetto delle diversità culturali, la conservazione dell'integrità ecologica.

Goodland e Ledec⁷ enfatizzano l'economia come motore di cambiamento, ossia un mezzo di sviluppo che ottimizza i benefici economici e sociali disponibili nel presente, senza disperdere le possibilità di simili benefici nel futuro.

Kothari⁸ propone di considerare lo sviluppo sostenibile non come un aspetto dell'economia ma come un ideale etico che si basa sull'equità fondata sull'autonomia di diverse entità piuttosto che su una struttura di entità dipendenti che si affidi ad aiuti e trasferimento di tecnologia, sulla partecipazione, sull'importanza delle condizioni locali e sul valore delle diversità.

Carpenter^{9,10} ribadisce che la sostenibilità della popolazione umana richiede il rispetto e la conservazione della diversità dei popoli e degli ideali etici, lo sviluppo bilanciato delle iniziative economiche e la salvaguardia e la rigenerazione dei sistemi ecologici e delle risorse che sostengono tale sviluppo.

Sostenibilità debole e sostenibilità forte

La sostenibilità investe campi quali l'etica ambientale, la giustizia, la bioetica: sarebbe opportuno superare i confini tra le discipline, creando discipline trasversali e nuovi approcci. Inoltre, ogni discorso sulla sostenibilità non può prescindere dalla definizione di spazio e tempo all'interno dei quali ci si vuole muovere: la sostenibilità a breve termine, infatti, è ben altra cosa della sostenibilità a lungo termine, così come la sostenibilità di una città o di una piccola regione non può essere trattata allo stesso modo della sostenibilità che riguarda un'intera nazione o l'intero pianeta.

Solow¹¹, osservando che la sostenibilità è l'obbligo di operare in modo da lasciare ai posteri la capacità di stare in condizioni finanziarie come quelle attuali, afferma che tutte le risorse come minerali, metalli ecc., che gli uomini consumano e passano alle future generazioni, sono fruibili o intercambiabili e le risorse sostitutive possono essere sempre trovate. Inoltre le risorse possono essere valutate in termini monetari; pertanto, la società deve usare le risorse per soddisfare i bisogni immediati ma conservare fondi per il futuro, sotto forma di investimenti, in modo da poter sviluppare ri-

sorse sostitutive in caso di esaurimento delle precedenti. Solow non distingue, quindi, tra capitale naturale e creato dall'uomo, né tra risorse rinnovabili e non, e assume che tutte le risorse sono rimpiazzabili: è questa la sostenibilità debole.

Nella sostenibilità forte, invece, le risorse rinnovabili e non rinnovabili sono viste come complementari tra loro e si distingue il capitale umano da quello naturale e tra risorse rinnovabili e non¹². Il capitale creato dall'uomo, ossia i sistemi di produzione che trasformano materie prime in prodotti finiti, è stato il fattore limitante dell'iniziativa dell'uomo quando la natura era ritenuta un serbatoio infinito; oggi, al contrario, il capitale naturale, ossia le risorse naturali rinnovabili e non, che sono l'input dei sistemi di produzione, sta fronteggiando delle limitazioni a causa delle azioni dell'uomo. La sostenibilità forte richiede che l'utilizzo delle risorse si basi su tre caratteristiche chiave:

1. la gestione delle risorse deve seguire le seguenti politiche: la velocità di raccolta deve essere uguale alla velocità di rigenerazione; l'emissione di rifiuti deve eguagliare la capacità naturale di assimilazione degli ecosistemi; le capacità di rigenerazione e di assimilazione devono essere trattate come capitali naturali; l'incapacità a conservare queste capacità deve essere trattata come un consumo di capitale e pertanto insostenibile;
2. la gestione delle risorse non rinnovabili si basa su due premesse: l'uso di risorse non rinnovabili è insostenibile; un approccio quasi sostenibile all'utilizzo di risorse non rinnovabili limita la loro riduzione alla velocità di creazione di sostituti rinnovabili e lo sfruttamento delle risorse non rinnovabili con investimenti in risorse rinnovabili;
3. la forte sostenibilità promuove norme che enfatizzano tecnologie che incrementano la produttività delle risorse piuttosto che le risorse in sé, favorendo la progettazione di prodotti e processi che facilitano il riciclaggio.

Carpenter sottolinea il ruolo della tecnologia, che rappresenta molto più di un insieme di strumenti per soddisfare le necessità umane a che vede il mondo come costituito da una sorgente di materiale per processi produttivi e da un bidone per contenere i rifiuti generati dai processi produttivi.

Commoner¹³ puntualizza che nell'ecosfera ogni cosa è connessa alle altre in un ciclo di nascita, morte e rigenerazione; i cicli naturali dell'ecosfera non contengono rifiuti; in natura per ogni composto naturale organico esiste un enzima capace di distruggerlo. Nella tecnosfera dell'era industriale, invece, vengono generate grandi quantità di rifiuti e inseriti nell'ecosfera che non ha sviluppato difese. Sta emergendo, però, una tecnologia post-industriale che cerca di definire norme che considerino la sostenibilità: esempi notevoli sono l'ecologia industriale, la tecnologia rigenerativa e la tecnologia sostenibile.

L'ecologia industriale¹⁴ propone un'estesa revisione della pratica manifatturiera per renderla attenta ad eliminare l'inquinamento, attraverso stili di produzione che utilizzino i rifiuti come materia prima per la successiva produzione: l'ecologia industriale tenta così di imitare i processi naturali e la loro natura ciclica.

La tecnologia rigenerativa cerca di utilizzare, anziché imitare, i processi naturali e di adeguare i processi ecologici alle necessità umane e contemporaneamente indirizzare queste verso obiettivi sostenibili. Lyle¹⁵ fornisce norme di progetto per progetti rigenerativi: lasciare che la natura funzioni; considerare la natura sia come modello che come contesto; aggregare anziché isolare; raccogliere e usare informazioni; cercare soluzioni comuni per problemi diversi; trattare l'immagazzinamento come chiave per la sostenibilità.

La tecnologia sostenibile è definita dal National Science and Technology Council¹⁶ come la tecnologia che promuove un movimento della società verso la sostenibilità, si sposa bene con gli obiettivi dello sviluppo

sostenibile e fornisce soluzioni pratiche per ottenere lo sviluppo economico in armonia con il rispetto dell'ambiente. Tali tecnologie contribuiscono allo sviluppo sostenibile riducendo i rischi, migliorando l'efficacia dei costi, aumentando l'efficienza dei processi e creando processi, prodotti e servizi benefici per l'ambiente. Vanegas e Pearce¹⁷ affermano che le tecnologie sostenibili sono la soluzione che soddisfa i requisiti e i vincoli dell'ingegneria tradizionale e che ha le seguenti caratteristiche: minimizza l'uso di energia non rinnovabile e di altre risorse naturali; minimizza la produzione e l'accumulo di rifiuti; minimizza l'impatto negativo sugli ecosistemi, proteggendoli e salvaguardandoli in un ragionevole stato di salute attraverso la conservazione delle biodiversità e di un habitat adeguato; soddisfa i bisogni della popolazione tenendo conto delle preferenze e delle differenze culturali dell'umanità.

Sostenibilità e ingegneria

La sostenibilità è una grande sfida per le istituzioni a tutti i livelli, globale e locale. Esse devono creare nuovi approcci per la produzione e l'uso di risorse naturali e a tal fine devono inventare nuove vie di mercato, produzione, trasporto e stoccaggio, che richiedono a loro volta nuovi servizi e nuove infrastrutture; il tutto è complicato dalle notevoli differenze politiche, sociali, economiche, tecnologiche e culturali tra i vari paesi del mondo.

Nei *Principles of Sustainability in Higher Education*¹⁸ sono stabiliti i requisiti specifici per ottenere la sostenibilità: (1) trovare nuove vie di mercato; (2) produrre di più con meno risorse e meno rifiuti; (3) sviluppare nuovi processi di produzione, usando materiali riciclabili e sviluppando componenti riciclabili; (4) prevenire l'inquinamento; (5) considerare il ciclo vitale come conseguenza della produzione; (6) sviluppare approcci che imitano i processi naturali; (7) cercare nuovi livelli di efficienza delle risorse.

Roberts¹⁹ suggerisce uno schema concettuale per il ruolo degli ingegneri nel contesto della sostenibilità, i quali devono assumersi la responsabilità di prendere decisioni, fidando su nuove misure e analisi economico-ambientali, su nuovi sistemi integrati e di sintesi, su processi e tecnologie sostenibili, su partnership multidisciplinari e sulla formazione. Questo schema costituisce la base di una visione di sostenibilità come nuovo modello di crescita economica in armonia con l'ambiente. Gli ingegneri devono conoscere meglio il mondo in cui viviamo e i problemi sociali, economici e ambientali che dovremo affrontare nel futuro; devono diventare i leader dell'ambiente e i *decision maker*, uscendo dal loro ambito esclusivamente tecnico. Essi devono impegnarsi più attivamente nelle discussioni e nei processi politici, economici, tecnici e sociali per aiutare la formazione di una nuova direzione per il mondo e il suo sviluppo, con l'obiettivo di integrare condizioni ambientali e sociali con le economie di mercato.

Nel pianificare l'economia sostenibile gli ingegneri devono guardare un sistema come un organismo unico, anziché alle sue singole parti. Essi devono lavorare per adattare le tecnologie esistenti e creare nuove tecnologie, che facilitino la pratica dell'ingegneria sostenibile e soddisfino i bisogni della società, devono ridefinire le opzioni delle tecnologie esistenti per migliorare l'uso delle risorse e minimizzare la produzione dei rifiuti. Le risorse rinnovabili devono sostituire quelle non rinnovabili mentre i processi, i prodotti e le tecnologie a basso impatto devono sostituire quelli ad alto impatto.

Gli ingegneri devono essere consapevoli dei problemi ambientali, dei rischi e degli impatti potenziali di ciò che progettano. A tal fine ai futuri ingegneri deve essere inculcata l'attenzione etica per lo sviluppo sostenibile e il rispetto delle caratteristiche e delle differenze culturali tra i popoli. Gli allievi ingegneri devono acquisire gli stru-

menti analitici necessari per valutare i rischi e gli impatti e per risolvere problemi tecnici con le loro implicazioni economiche, socio-politiche e ambientali.

Per rispondere adeguatamente a queste sfide, i futuri ingegneri hanno bisogno di corsi di formazione che li incoraggino a porre attenzione agli impatti delle azioni umane sulla natura e di informazioni su relazioni e bilanci di molti fattori (sociali, ambientali, economici) che mutano costantemente. Essi, futuri *decision maker*, devono imparare ad essere più flessibili e disposti a modificare i loro approcci secondo i cambiamenti dell'ambiente, dei bisogni e desideri umani e del progresso tecnologico. Infatti, azioni utili alla sostenibilità oggi, potrebbero non esserlo domani, in un contesto modificato. Inoltre, bisogna anche mantenere un equilibrio dinamico tra una popolazione crescente e la sua domanda, tener conto del cambiamento delle possibilità dell'ambiente fisico di assorbire i rifiuti prodotti dalle attività dell'uomo, del cambiamento delle possibilità aperte da nuove conoscenze e variazioni tecnologiche e i valori, aspirazioni e istituzioni del comportamento dell'uomo; perciò la visione di un mondo sostenibile deve cambiare naturalmente in risposta alle variazioni di qualsivoglia parte di esso. Le decisioni, infine, devono basarsi su analisi multidisciplinari, che investono la tecnologia, l'ecologia, l'economia e analisi socio-culturali. Gli studenti oggi devono non soltanto capire come funzionano i sistemi tecnologici, ma anche come il mondo biofisico funziona e impatta le attività umane e come queste influenzano il funzionamento del mondo.

Il ruolo dell'ingegneria civile

Per tutto quanto detto si comprende che gli ingegneri civili devono compiere azioni per affrontare la sostenibilità ai tutti i livelli: globale (industria delle costruzioni), di progetto (sistemi infrastrutturali) e di sistemi strutturali specifici. La comunità scienti-

fica internazionale concorda sul fatto che l'approccio del mondo delle costruzioni verso la progettazione e il funzionamento dei sistemi di infrastrutture va cambiato.

A livello di industria delle costruzioni, Vanegas propone il passaggio da un modello lineare insostenibile a un modello di sistema sostenibile.

L'approccio lineare inizia con l'estrazione e l'uso di risorse rinnovabili e non, quali l'aria, l'acqua, il suolo, i minerali o risorse biologiche e la produzione e l'uso di energia. Quindi risorse primarie e energia sono usate come *input* per processi successivi di produzione, che terminano nella commercializzazione e nella fornitura di tecnologia, sistemi, prodotti e materiali che vengono poi trasportati e usati dall'industria delle costruzioni per costruire sistemi di infrastrutture che saranno operativi fino alla decisione di riabilitarli, adeguarli o dismetterli. Tale processo è lineare in quanto dall'estrazione iniziale delle risorse fino alla produzione di energia, tutti gli *input* e gli *output* muovono in una direzione: verso la fine della vita utile del sistema di infrastrutture. Essi attraversano il sistema una sola volta ad ogni passo, usando energia, rosciando e degradando le risorse di base, generando e accumulando rifiuti e impattando negativamente l'ambiente.

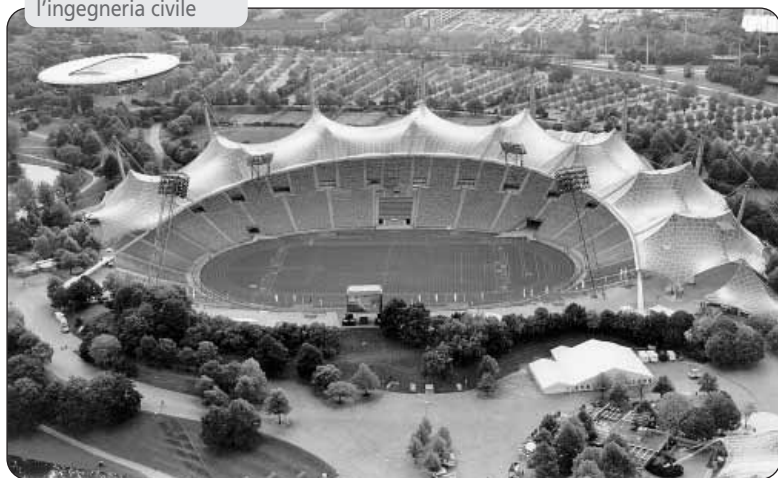
Questo approccio lineare non prevede la sistemazione del materiale di rifiuto o interventi correttivi di impatto ambientale. La crescente richiesta di sistemi di infrastrutture e, quindi, di estrazione di risorse naturali nonché di capacità produttive da un lato e la crescente offerta di tecnologia, prodotti e materiali dall'altro, accelerano il processo di degrado. Infine, le considerazioni in questo processo lineare tengono conto soltanto degli obiettivi degli operatori dei sistemi infrastrutturali (proprietari, progettisti e costruttori), dei problemi relativi al solo ciclo vitale del sistema e dei problemi del sito. Le problematiche associate all'estrazione di risorse e alla produzione di energia, al dopo fine vita del sistema e

quelle associate con prospettive regionali, nazionali e globali vengono raramente affrontate esplicitamente e sistematicamente. Il nuovo modello parte da questo processo lineare e procede verso la creazione di un sistema che muove gradualmente verso la sostenibilità, incorporando meccanismi aggiuntivi che:

- riconciliano la costruzione, il funzionamento, la manutenzione e la decisione di fine servizio di un sistema di infrastrutture con il soddisfacimento dei bisogni dell'uomo e delle sue aspirazioni;
- incorporano, all'interno di ogni elemento del sistema, tecnologie e strategie sostenibili che promuovono lo sviluppo e consentono l'uso di alternative alle attuali risorse e sorgenti di energia, prevengono o mitigano l'impatto ambientale prima che si verifichino danni all'ambiente, con tecnologie di monitoraggio, valutazione e controllo e correggono eventuali danni già fatti all'ambiente;

Figura 1

La "tenda" dello stadio olimpico di Monaco, leggera ed elegante, rappresenta una tappa fondamentale nella storia dell'ingegneria civile



- promuovono l'uso di risorse e prodotti selezionati, attraverso il riutilizzo diretto di componenti riutilizzabili, l'uso di elementi riproducibili o riutilizzabili, il riciclaggio di materiali riciclabili;
- promuovono la gestione attiva di risorse naturali durante il processamento e la formazione di prodotti e sistemi, la produzione e l'uso di energia, l'estrazione e l'uso di risorse primarie attraverso l'e-

strazione di risorse naturali dalla biosfera in modo che l'offerta superi sempre la domanda, e attraverso il monitoraggio e il controllo dell'estrazione di risorse non rinnovabili dalla litosfera per prevenire il loro totale esaurimento.

Questi quattro elementi da un lato inseriscono nell'uso di sistemi di infrastrutture la dimensione umana e dall'altro tengono conto di considerazioni temporali e spaziali che superano l'approccio tradizionale limitato alla sola analisi del contesto fisico e non fisico di un sito, valutando le problematiche regionali, nazionali e globali.

L'aggiunta di questi quattro elementi globali al modello insostenibile a livello di industria delle costruzioni non è ancora sufficiente per ottenere la sostenibilità anche a livello di progetto di uno specifico sistema di infrastrutture. Innanzitutto studiosi di sostenibilità, operatori dell'industria delle costruzioni e azionisti devono definire obiettivi, principi e concetti di sostenibilità generale nonché strategie e norme specifiche da applicare nel fornire tecnologie, sistemi, prodotti e materiali da utilizzare nella costruzione, nel funzionamento e nella manutenzione del sistema.

Inoltre, deve essere sviluppato, implementato e applicato un modello tradizionale per ottenere la sostenibilità debole, che fornisca una capacità per le future generazioni di soddisfare i propri bisogni di sistemi di infrastrutture, soddisfacendo i bisogni immediati di questa generazione. Questo approccio promuove la flessibilità nelle soluzioni di progetto di sistemi di infrastrutture, che lasciano aperte le opzioni per sostituire materiali e fonti di energie alternative quando saranno individuati nuovi "serbatoi".

Infine, deve essere sviluppato, implementato e applicato un modello a lungo termine per ottenere la sostenibilità forte, che prescriva che le emissioni di rifiuti del sistema di infrastrutture non ecceda le capacità assimilative dell'ecosistema naturale o elimini totalmente i rifiuti, adotti un modello economico che differenzi tra materiali da

costruzione composti di risorse rinnovabili e non, e rifletta i costi reali non solo per oggi ma per il futuro, promuova i principi di conservazione dell'ambiente nei progetti specifici e rifletta l'etica della sostenibilità.

A livello di progetto di sistemi di infrastrutture, Vanegas propone il cambiamento di due modelli nell'industria delle costruzioni a livello di progetto di un sistema di infrastrutture. Il primo è la relazione tra i fornitori di tecnologie di costruzione, sistemi, prodotti e materiali per sistemi di infrastrutture, e i progettisti e i costruttori, che interagiscono soprattutto nella fase di commercializzazione; l'altro è l'enfasi su costi, tempo e qualità come principali parametri per valutare la performance di un progetto di un sistema di infrastrutture. Egli ipotizza un sistema che vede i processi del ciclo vitale di produzione, operatività, e manutenzione di un sistema di infrastrutture come un sistema integrato, nel quale i processi per lo sviluppo e la fornitura di tecnologie, sistemi, prodotti e materiali, e i processi per la produzione, operatività e manutenzione dei sistemi di infrastrutture convergono in modo che gli stessi problemi, bisogni e opportunità suggeriscano le soluzioni ottimali. Ad esempio, la necessità di minimizzare la quantità di calcestruzzo sprecata durante la costruzione di una certa tipologia strutturale può portare allo sviluppo di un nuovo elemento di calcestruzzo, di nuove casseforme e di nuovi metodi di costruzione. Scienziati, ingegneri, architetti, costruttori e produttori di calcestruzzo possono giungere a sviluppare insieme una nuova alternativa.

Il passo finale riguarda il cambiamento del modo in cui i progetti di sistemi strutturali sono sviluppati, ossia le fasi di pianificazione e progetto, che devono basarsi su dati e informazioni per la caratterizzazione del progetto, e contenere la chiara definizione degli obiettivi e l'identificazione delle problematiche. Perseguire la sostenibilità deve essere un obiettivo esplicito del progetto: ingegneri incaricati di progettare un impianto di produzione di un prodotto di

avanzata tecnologia, cui viene richiesto che gli elementi strutturali dell'impianto debbano poter essere facilmente disassemblati, adeguati e riasssemblati, devono sviluppare una soluzione progettuale flessibile che rifletta questo requisito; se ad essi non viene affidato tale compito, allora il risultato sarà un impianto convenzionale per una lunga vita con poca flessibilità.

Mentre il progetto evolve nelle sue fasi di ideazione, schematizzazione e disegno, deve esserci anche un controllo su parametri fondamentali quali funzionalità, rischio, costo, tempi, sicurezza e affidabilità. Strategie specifiche, meccanismi e strumenti per supportare la sostenibilità devono essere applicati nelle fasi di pianificazione, progettazione e costruzione del sistema strutturale. A tal fine devono essere sviluppati strumenti migliori per l'analisi costi-benefici e le previsioni finanziarie e anche nuovi schemi di valutazione economiche che diano un valore alle riserve di risorse naturali e agli habitat ecologici.

Alcuni problemi specifici

La sostenibilità è soprattutto un modo di pensare e va osservato con piacere che temi quali le materie prime, i rifiuti, l'energia e l'impatto ambientale sono oramai oggetto di grande attenzione. Ma quali sono i problemi pratici che l'ingegnere deve affrontare quotidianamente per "non accendere sull'ambiente ipoteche che i nostri figli non possano estinguere"?

Progetto e manutenzione: il problema dei ponti

Il perseguimento di uno sviluppo sostenibile, che richiede il soddisfacimento contemporaneo di tutti gli obiettivi, quali la conservazione di un livello elevato e stabile di crescita economica e sviluppo, un progresso sociale che riconosca i bisogni di tutti, la protezione dell'ambiente, l'uso prudente delle risorse, implica un'attività ad ampio spettro.

Nel campo della costruzione dei ponti l'attività spazia dalla politica di trasporto adottata, che determina le infrastrutture necessarie, alla scelta delle tipologie che si sposino bene con l'ambiente naturale e l'ambiente costruito, fino alla scelta dei dettagli, come le specifiche di pitturazione dei ponti in acciaio che riduce i composti organici volatili. Il tutto senza perdere di vista né gli obiettivi né le priorità, curando sia gli aspetti legati all'economia che quelli della sicurezza, in modo che le scelte non rappresentino per le future generazioni un'eredità costosa e gravosa.

Com'è noto la costruzione dei ponti è un'arte antica, ma la definizione di standard di progetto è relativamente recente. Le innovazioni tecnologiche, la disponibilità di nuovi materiali hanno determinato continue modifiche delle prescrizioni normative e spingono ora ad un radicale cambiamento. Le norme dovranno incorporare nel futuro anche i requisiti di sostenibilità, anziché limitarsi agli aspetti di sicurezza.

La sostenibilità rappresenta una forte sfida per la costruzione dei ponti, tradizionalmente strutture a lunga vita. I progetti devono riflettere e ottimizzare il costo dell'intera vita, prevedendo, per quanto possibile, i costi di manutenzione sulla base delle conoscenze e della tecnologia attuali.

Inoltre, non va trascurato che molti ponti diventano funzionalmente superflui prima della fine della loro vita utile.

Le decisioni progettuali e le valutazioni economiche devono tener conto che un ponte è composto di diversi elementi (l'impalcato, le sottostrutture, le fondazioni) e diverse componenti (giunti, appoggi, parapetti, elementi protettivi), ciascuno dei quali ha una durata attesa diversa e può essere riparato o sostituito con diverso grado di difficoltà. Bisogna anche tener conto dei casi in cui le diverse tipologie possano essere modificate, sostituite o rimosse: ad esempio, va tenuto presente che le sovrastrutture metalliche, piuttosto che in calcestruzzo, offrono l'opportunità di grande

flessibilità e anche che le strutture metalliche sono più facili da riciclare.

I progettisti devono mettere i committenti in condizioni di scegliere, dimostrando l'efficace di certe opzioni in termini di sostenibilità, così come fanno per gli aspetti economici e di sicurezza. In tale ottica, considerazioni circa l'uso prudente delle risorse naturali devono influenzare la scelta della struttura. Nel futuro soltanto quegli elementi che non possono essere facilmente sostituiti, come fondazioni e sottostrutture, devono essere progettati per una vita utile lunga (pari ad almeno 100 anni).

Ovviamente, tali considerazioni non si applicano a strutture particolare, come i ponti di grande luce, per i quali esistono maggiori certezze sulla loro funzionalità.

I ponti sono una parte significativa dell'ambiente costruito; tutte le attività correlate alla costruzione, dal progetto alla manutenzione, dalla demolizione al deposito, possono avere effetti profondi sulla sostenibilità. La loro gestione presenta diverse sfaccettature:

- i materiali usati sia nella costruzione che nei lavori di manutenzione devono essere scelti in modo da minimizzare il consumo delle risorse naturali e massimizzare l'utilizzo di materiali di rifiuto, minimizzare l'emissione di gas nocivi, restituire alla natura i materiali dopo la demolizione, senza effetti dannosi sull'ambiente;
- i ponti e i loro componenti devono essere progettati in modo da consentire flessibilità per le future generazioni, in modo che possano modificarli per finalità diverse, anche perché i metodi di trasporto saranno diversi tra alcuni decenni;
- la manutenzione preventiva deve essere effettuata adeguatamente.

Per mettere in pratica queste idee è essenziale un adeguato sistema di gestione dei ponti, che deve memorizzare tutte le informazioni relative ai materiali, alle attività di manutenzione effettuate, alla sostituzione di particolari originari. Un sistema di gestione dei ponti deve anche informare periodica-

mente se gli obiettivi della politica sono raggiunti, attraverso indicatori di comportamento che devono essere sviluppati e registrati ad intervalli regolari. Il sistema deve contenere le informazioni chiave che forniscono una visione del comportamento della rete di strutture in ogni istante e rappresenta il punto di partenza per le strategie di manutenzione sostenibile dei ponti^{20,21}.

Come già detto le norme si preoccupano di garantire la sicurezza delle strutture nell'arco di vita prevedibile e forniscono criteri ben definiti per calcolare i fattori di sicurezza, che possono essere utilizzati come misure di comportamento durante la vita delle strutture. Gli aspetti ambientali, di sostenibilità e socio-economici sono, invece, ignorati dalle attuali norme.

Nel futuro sarà sempre più necessario determinare il comportamento delle strutture rispetto a tutti questi fattori. Nello sviluppo di strategie di gestione dei ponti è necessario esaminare i requisiti primari e considerare gli indicatori di comportamento, utili non soltanto per relazionare periodicamente sullo stato delle strutture della rete stradale, ma anche per esaminare se la manutenzione è effettuata o meno. Questi indicatori devono essere significativi, misurabili e non ambigui.

Un aspetto importante sono i lavori di manutenzione, per i quali si distinguono tre categorie:

- *manutenzione ordinaria*: lavori di routine fatti su base regolare, come la pulitura di dreni e appoggi, ispezioni di routine;
- *manutenzione preventiva*: riparazione di difetti, sostituzione di componenti o altro che mostri deterioramento e può migliorare la resistenza della struttura, come pitturazione di parti metalliche, sostituzione di giunti di espansione, protezione catodica;
- *manutenzione essenziale*: lavori di riabilitazione quando la struttura è strutturalmente inadeguata, come consolidamento

di calcestruzzo, sostituzione di elementi strutturali e rinforzo.

Nella situazione ideale tutti e tre i tipi di manutenzione richiederebbero una spesa annuale costante nel tempo. Se i fondi necessari annualmente non sono disponibili, e quindi non viene effettuata la manutenzione necessaria, allora cominciano ad aumentare le spese per i lavori essenziali, indispensabili per conservare operativa la struttura. La situazione può peggiorare fino a dover prendere dei provvedimenti restrittivi, quali limitazioni di peso, puntellamenti provvisori o addirittura chiusura al traffico: tale situazione è ovviamente da evitare.

Va anche osservato che c'è bisogno di nuovi metodi per stabilire il valore del danno, poiché sviluppo sostenibile significa spendere oggi per evitare costi esagerati domani. Un importante strumento per valutare il costo delle spese di manutenzione è il valore dello stato delle strutture. La scelta dei lavori di riparazione o miglioramento da effettuare deve essere fatta in modo da massimizzare il valore dello stato della struttura e un giudizio sulle attività di manutenzione può basarsi sul miglioramento del valore dello stato, a seguito dei lavori effettuati. Il valore dello stato di una struttura è calcolato come il costo di sostituzione della struttura, corretto con il suo deprezzamento calcolato ipotizzando una riduzione lineare del valore di sostituzione a partire dal momento della costruzione o dell'ultima sostituzione, fino alla successiva sostituzione. Ogni lavoro di manutenzione è inteso volto a posticipare la data della successiva sostituzione e ciò riduce il deprezzamento annuale. Per una manutenzione sostenibile vanno incoraggiate le attività che servono a tale scopo. Ovviamente la data di sostituzione della struttura stessa (o la rimanente durata della vita) è valutata dalla durata della sua vita e dei suoi componenti. Un significativo indicatore di performance è il rapporto tra il miglioramento nel deprezzamento a seguito dei la-

vori di manutenzione e le spese di manutenzione²².

Grandi strutture e impatto ambientale

Il requisito di realizzare opere che si inseriscano bene nel contesto ambientale si aggiunge alle esigenze, ben note allo strutturista, di realizzare strutture dotate di sempre maggiore funzionalità col minimo impiego di materiali e con modalità costruttive economiche. Tali esigenze sono evidenti soprattutto nelle grandi strutture²³, quali edifici alti e ponti di grande luce.

Il desiderio di “scalare il cielo” ha sempre caratterizzato il cammino dell'uomo, rappresentando uno dei più interessanti indici di progresso e di benessere economico. Varie sono state le forme: obelisco, piramide, statua, torre, edificio, e varie le funzioni: monumento alla vittoria, sepolcro, edificio di culto, torre per antenne. Oggi, ciò che spinge a progettare edifici alti è l'elevato costo del suolo e la necessità di non distruggere ampie aree di verde e ciò che lo rende possibile sono la disponibilità di nuovi materiali strutturali e non strutturali e i progressi della tecnologia. Le antiche strutture alte, come le piramidi, avevano muri di spessori di alcuni metri che occupavano gran parte dello spazio interno. Gli edifici in acciaio e in cemento armato, invece, hanno una struttura a telaio, costituita da travi e pilastri, poco ingombrante rispetto a quella degli edifici in muratura e che lascia molto più spazio per le aperture sulle facciate e negli interni. Con siffatte strutture si possono realizzare edifici fino ad una decina di piani. Al crescere del numero di piani,

oltre ad un aumento dei carichi verticali, intervengono problemi statici diversi, connessi agli effetti delle azioni orizzontali e dei relativi spostamenti e, quindi, al pericolo d'instabilità globale della struttura, la quale deve possedere un'adeguata rigidità. Altezze maggiori possono essere raggiunte con l'inserimento di mensole verticali, in genere in calcestruzzo, mentre i cosiddetti “grattacieli” possono realizzarsi soltanto modificando radicalmente la concezione della struttura e realizzando quello che viene usualmente chiamato *framed tube*: la struttura principale dell'edificio è costituita dalle pareti perimetrali, formate da pilastri molto ravvicinati e travi molto alte, che lasciano soltanto lo spazio necessario per le finestre. Spesso a questa ossatura esterna se ne aggiungono altre interne, in corrispondenza dei vani per gli ascensori, delle scale o dei servizi. Solai sufficientemente rigidi garantiscono un efficace collegamento tra le varie parti dell'insieme strutturale.

Attualmente l'edificio più alto al mondo è quello delle *Petronas Twin Towers* di Kuala Lumpur (452 m), completate nel 1998, che hanno spodestato la *Sears Tower* di Chicago (442 m), costruita nel 1974. La ricerca si spinge, però, verso qualcosa di più: la realizzazione di “città in verticale”. Al riguardo negli ultimi decenni sono stati proposti a Tokyo diversi progetti che rappresentano, per adesso, soltanto dei sogni nel cassetto: – la *Holonc Tower*, di 600 m con 120 piani, in cui i vuoti sono stati efficacemente studiati per consentire ad aria e luce di penetrare all'interno della torre rendendo l'ambiente piacevole;

Figura 2
Il Golden Gate Bridge si inserisce molto bene all'ingresso della baia di San Francisco



- la *Millennium Tower*, alta 840 m con 180 piani, che può contenere una comunità di 60.000 persone, che produce l'energia necessaria e processa i rifiuti prodotti. È una città in verticale autosufficiente dotata anche di un efficiente sistema di trasporti; ai piani inferiori sono previsti gli uffici e fabbriche "pulite", ai piani intermedi gli alloggi e in sommità i sistemi di comunicazione e impianti eolici e solari. La struttura ha forma di cono con una gabbia esterna elicoidale, che le consente di resistere alle azioni di uragani e terremoti;
- la *Sky City 1000*, proposta nel 1989, alta 1000 m. Si tratta di una città sovrapposta con 14 dischi sovrapposti, detti "piani spaziali", che contiene tutto: residenze, uffici, locali commerciali, scuole, teatri, ecc. Vi possono risiedere 35.000 persone, 100.000 vi lavorano;
- *The Spiral*, alto 1000 m, su 200 piani; è uno dei megaprogetti proposti per superare la congestione della città; il 90% dei rifiuti al suo interno viene riciclato, dimostrando di essere ecologicamente sostenibile a lungo andare.

E, infine, delle vere e proprie scale per il cielo: l'*Aeropolis 2001*, alto 2001 m; il *Try-2004*, alto 2004 m, l'*X-Seed 4000*, alto 4000 m con 800 piani.

Altro sogno dell'uomo è quello di superare luci sempre maggiori. Inizialmente gli studi si sono rivolti alla ricerca di forme più idonee e in tal senso incrementi sensibili delle luci si sono avuti con l'introduzione dell'arco ribassato, di origine cinese, più idoneo rispetto agli archi romani a tutto sesto. Ancora oggi il primato della luce maggiore, per quel che riguarda i ponti ad arco in muratura, spetta alla Cina, dove tale tipologia non è stata affatto abbandonata. L'utilizzo di nuovi materiali successivamente ha giocato un ruolo fondamentale e la corsa verso le grandi luci ha avuto una svolta con l'introduzione dei ponti sospesi metallici: dai 486 m del *Brooklyn Bridge*, aperto al traffico nel 1883, si è passati ai 1067 m del *George Washington Bridge* a



Figura 3
Il Kurushima Bridge (durante la costruzione) fa parte delle meraviglie dell'ingegneria che collegano le isole di Honshu e Shikoku in Giappone

New York (1932), primo ponte a superare il chilometro, ai 1280 m del *Golden Gate Bridge* a S. Francisco (1937), ai 1298 m del *Verrazzano Bridge* (1964), che collega Brooklyn a Staten Iland, ai 1410 m dell'*Humber Bridge* nell'Humbershire (1981), ai 1624 m del *Great Belt Link East Bridge* in Danimarca (1996), ed infine ai 1991 m dell'*Akashi Kaikyo Bridge* a Kobe (1998).

Molto utilizzati, anche per le loro caratteristiche estetiche, sono i ponti strallati, nei quali l'impalcato è sostenuto mediante cavi inclinati, gli stralli, ancorati all'altra estremità ad un pilone. A favore del ponte strallato sono la maggiore economia di materiale, il minor costo di montaggio e soprattutto la minore deformabilità. Per i ponti strallati possono individuarsi due schemi limite: quello di ponte a travata irrigidente, caratterizzato da un numero di stralli limitato e da una travata dotata di un'elevata rigidità flessionale, e quello di schema a comportamento reticolare, nel quale alla trave è affidato solo il compito di trasferire ai due stralli adiacenti il carico agente su di essa. Al primo schema si è ispirato l'italiano Riccardo Morandi realizzando opere prestigiose, come il *Ponte Maracaibo* e il *Ponte sul Wadi Kuf*. L'adozione di un elevato numero di stralli semplifica notevolmente i particolari costruttivi relativi agli ancoraggi alla travata e riduce i problemi di montaggio, consentendo la realizzazione di ponti strallati di luci ben maggiori: negli ultimi

anni sono stati costruiti il *Yang Pu Bridge* in Shanghai (602 m), il *Pont de Normandie* in Francia (856 m) e il *Tatara Bridge* in Giappone (890 m). In relazione alla disposizione degli stralli abbiamo due possibilità. Una è quella di schema a ventaglio, con gli stralli convergenti in sommità al pilone. L'ultimo strallo, detto di ormeggio, può essere ancorato alla travata o al suolo. Nel primo caso gli sforzi si chiudono nella struttura e il ponte si dice autoancorato: l'ultimo strallo non trasmette alcuna azione orizzontale in fondazione, ma comprime fortemente la travata. Nel secondo caso si parla di ancoraggio esterno. L'altro tipo di disposizione degli stralli è quello ad arpa, con stralli paralleli. Un esempio molto suggestivo e innovativo rispetto agli schemi tradizionali, è l'*Adamillo Bridge* a Siviglia, una vera e propria arpa con trave di 200 m di luce e pilone inclinato verso l'esterno, in modo da equilibrare, col suo peso, gli sforzi trasmessigli dagli stralli.

L'incremento di dimensioni dei mezzi natanti e del volume del traffico marino e, quindi, dello spazio libero richiesto per la navigazione, determinerà la necessità di realizzare ponti di luce sempre maggiore. A favore di un incremento delle luci sono anche il minor costo di strutture a sviluppo orizzontale anche notevole rispetto a quello di fondazioni profonde in acqua e i costi connessi al rischio di collisione di natanti contro i piloni dei ponti.

Al crescere della luce la struttura diviene sempre più pesante e una larga percentuale della sua capacità portante è utilizzata per sostenere sé stessa. La luce limite, ossia quella per la quale il ponte è in grado di sopportare solo se stesso ma non carichi utili, dipende dallo schema strutturale ed è direttamente proporzionale alla tensione ammissibile del materiale utilizzato e inversamente proporzionale al suo peso specifico. Si comprende bene come il futuro dei ponti di grandissima luce sia affidato all'impiego di materiali più resistenti e più leggeri di quelli attuali. I materiali compositi, fibra di carbonio, leghe leggere, calce-

struzzi ad alta resistenza, caratterizzati da elevata resistenza e basso peso specifico, sembrano promettere bene per il futuro ma al momento risultano eccessivamente costosi. Va infine sottolineato come i ponti di grande luce, con la loro relativa leggerezza, si inseriscano bene nell'ambiente e richiedano pochi punti di contatto al suolo, anche se in tali zone possono recare notevoli disturbi, sia provvisori che permanenti²⁴.

Materiali da costruzione: il conglomerato cementizio armato

Il calcestruzzo, attualmente il più importante materiale da costruzione nel mondo, è un materiale amico della natura: circa il 90% del calcestruzzo proviene da risorse naturali normalmente disponibili in grande quantità, è un materiale durevole e in caso di demolizione può essere riciclato per produrre del nuovo calcestruzzo. La sostenibilità del calcestruzzo può essere ulteriormente migliorata minimizzando l'uso di risorse, ossia utilizzando materiali costituenti che consentano un migliore rispetto dell'ambiente senza compromettere la durata e ottimizzando il progetto strutturale con riferimento sia alla capacità portante che alla durata della vita utile.

I principi essenziali della tecnologia del calcestruzzo per lo sviluppo sostenibile sono²⁵:

- la conservazione dei materiali componenti, che comprende anche la limitazione dell'uso delle risorse, quali energia e acqua e la limitazione dei rifiuti,
- l'aumento della durata delle strutture in calcestruzzo,
- lo sviluppo della ricerca sulla tecnologia del calcestruzzo e la formazione di tecnici.

Gli obiettivi dell'industria delle costruzioni devono essere quelli di sviluppare progetti strutturali *environment-friendly* per i calcestruzzi tradizionali e contemporaneamente sviluppare tipi di cemento e calcestruzzo più *environment-friendly*, ossia con meno cemento e materiali di rifiuto, e progetti

strutturali e metodi per la manutenzione e la riparazione di questi materiali.

Più in dettaglio, vanno considerati come obiettivi primari per l'industria del calcestruzzo la riduzione dell'emissione di CO₂, l'incremento dell'utilizzo di prodotti di rifiuto, la riduzione dell'uso di combustibile non rinnovabile, il non uso di costituenti non desiderabili, una qualità dei rifiuti che consenta il riuso di almeno il 95% di essi, una qualità dell'acqua di rifiuto che ne consenta il riuso nella produzione del calcestruzzo, la riduzione di emissione di ingredienti inquinanti nell'acqua di rifiuto, la riduzione di rumore e emissione di polveri.

Altri parametri fondamentali sono la quantità di materiale, definita sulla base del calcolo strutturale, che determina il carico ambientale correlato al progetto e alla fase di esercizio e manutenzione, la cui valutazione deve includere considerazioni sulla esecuzione, getto, compattazione e cura.

In definitiva lo scopo dell'industria delle costruzioni deve essere quello di sviluppare progetti strutturali che minimizzino gli effetti ambientali dovuti alla costruzione di strutture in calcestruzzo e ottimizzino e incrementino l'uso di calcestruzzi *environment-friendly* e ciò può essere perseguito minimizzando la quantità di materiale mediante l'utilizzo di calcestruzzi ad alta resistenza, massimizzando la vita utile delle strutture, incrementando l'uso di elementi strutturali prefabbricati, migliorando la protezione del calcestruzzo in ambiente aggressivo, ad esempio quello marino²⁶.

Le strutture *underground*

In tutto il mondo possono essere trovati molti esempi di rifugi sotto terra. L'uso dello spazio *underground* era dettato dalla necessità di conservare beni o di fronteggiare condizioni climatiche estreme, come il freddo di un gelido inverno o l'eccessivo caldo estivo, o anche piogge eccessive e vento forte, e dalla necessità di difendersi da attacchi bellici. Oggi questi spazi hanno altre funzioni. Infatti, il sottosuolo è diventato parte integrante del territorio di una città

moderna e offre la possibilità di migliorare l'ambiente urbano, mitigando la pressione in superficie, sviluppando meglio le reti di trasporto, riducendo il rumore e migliorando la qualità dell'aria, lasciando più verde nei centri delle città e riducendo le distanze attraverso una migliore concentrazione delle funzioni. Tutti questi aspetti sono caratteristiche fondamentali di una città sostenibile. Non va sottovalutato, però, l'alto costo di costruzione delle strutture *underground* e la necessità che siano sufficientemente flessibili per l'attuale società sempre in evoluzione e per poter soddisfare i bisogni delle generazioni future.

Le città, ossia gli ambienti costruiti, sono viste come la maggiore causa di insostenibilità. Infatti le città si sono espanse notevolmente con l'aumento della popolazione e nel passato non si è capita la relazione tra ambiente costruito e qualità dell'ambiente in generale, che invece ora è diventata evidente. Più in dettaglio, i cambiamenti del nostro stile di vita, lo sviluppo tecnologico e l'ambiente interagiscono e si influenzano reciprocamente. A causa dell'aumento della popolazione e della migrazione verso le città, queste crescono a dismisura. Questa espansione fa aumentare la dipendenza dal trasporto privato; ciò è stato reso possibile anche dallo sviluppo dell'industria dell'automobile che ha reso le auto sempre più economiche. L'aumento di auto, a sua volta, ha richiesto la costruzione di nuove strade e ha determinato il peggioramento della qualità dell'aria e del livello di rumore e, quindi, del livello di vita.

Inoltre, il concetto che gli edifici vadano concepiti per una sola funzione e per durare a lungo non trova riscontro nelle necessità attuali di cambiamento. La demolizione delle strutture, una volta verificata l'impossibilità dell'adeguamento funzionale, incrementa la produzione di rifiuti anche a causa delle scarse possibilità di riciclare e riutilizzare parti o elementi della costruzione.

Le infrastrutture sono la causa della perdita da parte delle città della loro vivibilità. Le

principali infrastrutture da traffico, una volta progettate ai margini delle città, ne sono state ora inghiottite, diventando una barriera al continuo sviluppo della città stessa con tutti gli effetti collaterali: inquinamento e rumore, barriere fisiche e psicologiche. L'interazione tra traffico pedonale e veicolare riduce la mobilità ed è, perciò, irritante per i guidatori ma è anche noioso per i pedoni che vedono limitata la loro area, invasa dal rumore e dall'inquinamento. Una priorità per le città è, dunque, quella di risolvere i problemi delle infrastrutture e della mobilità e al tempo stesso creare un ambiente più piacevole per i pedoni.

In generale, nelle città deve essere favorito il trasporto pubblico. Nelle città maggiori esiste già un rete di trasporto ferroviario *underground*, che rende il trasporto molto veloce, cosa impossibile con qualsiasi altro mezzo in superficie. Sfortunatamente, però, la metropolitane con i loro accessi e uscite sono considerate come aree di trasporto isolate e non integrate con la città e le altre funzioni. In realtà, le stazioni della metropolitana, frequentate da un gran numero di persone, si prestano molto bene ad ospitare anche altre funzioni pubbliche, migliorando tale integrazione. Inoltre la presenza di altre attività, aumenterebbe la qualità e la vivibilità di questi spazi, con un miglior controllo sociale.

La costruzione *underground* investe direttamente diverse discipline: pianificazione urbanistica, architettura, psicologia e ingegneria strutturale. La relazione tra gli aspetti psicologici e il progetto architettonico è la più forte: l'importanza del progetto degli spazi, le proporzioni degli spazi *underground*, l'illuminazione, l'orientamento, i materiali, i colori sono alcuni aspetti architettonici nei quali la psicologia può fornire molte informazioni. La psicologia è anche correlata agli aspetti tecnici e alle nuove tecnologie in via di sviluppo: con l'aiuto delle ultime tecnologie, infatti, la ventilazione, le condizioni di illuminazione, gli aspetti di sicurezza e tutti questi aspetti influenzano la percezione degli spazi *under-*

ground possono essere migliorati. Si parla in tal senso di sostenibilità psicologica dagli spazi *underground*.

Ovviamente, la costruzione deve essere anche sostenibile, deve cioè permettere maggiore flessibilità per lunghi periodi di tempo e il suo contenuto deve essere riciclabile e riutilizzabile. Anche se la vita di alcuni componenti dell'edificio è breve, ciò non significa che essi siano meno sostenibili. Attraverso il riutilizzo e il riciclaggio essi possono dimostrarsi molto più sostenibili di componenti con vita più lunga, che però non possono essere riutilizzati o riciclati. Se il contenuto è separabile dalla struttura c'è maggiore flessibilità con la possibilità di utilizzare l'edificio per funzioni diverse.

Gli urbanisti devono riconoscere il ruolo degli aspetti psicologici in architettura, attraverso una pianificazione integrata di edifici fuori e dentro terra; essi devono avere in mente il modo in cui l'organizzazione spaziale degli edifici fuori terra influenza la qualità dello spazio sotto terra, in termini di accessibilità, illuminazione, proporzioni, ecc.

In definitiva, nella progettazione degli spazi *underground* bisogna tener conto del clima, della connessione con trasporti e edifici fuori terra, della possibilità di costruire spazi *underground* in prossimità di edifici esistenti, della possibilità di costruire in tempi diversi sotto e fuori terra, nonché dell'orientamento, della sicurezza pubblica, della dinamicità e flessibilità degli spazi. La costruzione *underground* può svolgere un ruolo importante in una città sostenibile, soprattutto dove la mobilità è essenziale e il terreno è molto prezioso. Essa consente un utilizzo più efficiente dello spazio, riduce la congestione del traffico e migliora la mobilità, rispetta le aree verdi, migliora la qualità dell'aria e riduce il livello di rumore, incrementa la vivibilità dei centri urbani, rinnova vecchi centri e preserva i monumenti: in altre parole può aiutare a costruire ambienti urbani più sostenibili²⁷.

Le costruzioni in zona sismica

Nella progettazione sostenibile non vanno trascurati i problemi di sicurezza, che si amplificano per le costruzioni soggette nel corso della loro vita alle azioni dovute ai terremoti. Le norme sismiche italiane richiedono che “le costruzioni nel loro complesso, includendo gli elementi strutturali e quelli non strutturali, ivi comprese le apparecchiature rilevanti alla funzione dell’edificio, non devono subire danni gravi ed interruzioni d’uso in conseguenza di eventi sismici che abbiano una probabilità di occorrenza più elevata di quella dell’azione sismica di progetto. Per particolari categorie di costruzioni, in relazione alla necessità di mantenerle pienamente funzionali anche dopo terremoti violenti, si possono adottare valori maggiorati delle azioni, facendo riferimento a probabilità di occorrenza simili o più vicine a quelle adottate per la sicurezza nei confronti del collasso”. In altre parole si chiede che le nuove costruzioni devono essere in grado di sopportare, senza danni evidenti, un sisma di media intensità; in occasione di un terremoto violento si richiede che la struttura non crolli, pur accettando che la stessa si danneggi anche irreparabilmente. Tale principio si è dimostrato economicamente non sostenibile, giacché i danni provocati dai sismi avvenuti negli ultimi anni hanno comportato l’impiego di ingenti somme di denaro pubblico sia nella fase di emergenza che in quella successiva di ricostruzione. Inoltre, strutture strategiche, quali ospedali, caserme, impianti elettrici e telefonici, ponti e viadotti, devono restare operative durante e dopo il sisma e strutture contenenti materiali pericolosi, come gli impianti a rischio di incidente rilevante (nucleari e chimici), devono rispettare stringenti requisiti di sicurezza. D’altra parte, un edificio antisismico sarebbe eccessivamente costoso se progettato per sopportare le azioni sismiche in campo elastico, soprattutto se si pensa ad edifici di particolare rilevanza strategica o gravati da carichi notevoli che si traducono in azioni orizzontali



Figura 4
Il Transamerica Pyramid di San Francisco contempera molto bene le esigenze di ottimizzazione degli spazi, impatto ambientale e sicurezza sismica

elevate. Per questo motivo la ricerca si è indirizzata verso tecniche innovative di protezione sismica, che si basano sulla drastica riduzione delle forze sismiche agenti sulla struttura, piuttosto che affidarsi alla sua resistenza, campo fino ad allora esplorato soltanto per costruzioni di particolare pericolosità, come le centrali nucleari. Le tecniche più diffuse sono: l’isolamento alla base e di piano, i sistemi dissipativi di vario tipo (smorzatori elasto-plastici, viscosi, visco-elastici and elettro-induttivi), sistemi idraulici, sistemi con dispositivi a memoria di forma e, più recentemente, sistemi di controllo delle vibrazioni attivi e semi-attivi. La normativa sismica attuale contempla la possibilità di adottare sistemi di isolamento alla base o dispositivi di dissipazione dell’energia, oltre a consentire l’adozione del metodo di verifica agli stati limite, già da tempo accettato da molte normative tecniche europee.

L’isolamento sismico ha avuto un grande sviluppo negli ultimi 30 anni e va considerata ora una tecnologia matura, affidabile e economicamente sostenibile. Si basa sull’i-

dea di ridurre l'energia trasmessa dal terremoto alle strutture, modificando le caratteristiche dinamiche della struttura stessa, ossia incrementando il periodo proprio, al fine di allontanarlo dai periodi delle principali componenti armoniche dell'azione sismica. Questa modifica è ottenuta attraverso l'uso di speciali dispositivi in gomma, detti isolatori, aventi una rigidità orizzontale molto bassa e dotati di un adeguato smorzamento, che separano la struttura dal moto del suolo, preservando la struttura e il suo contenuto. In genere l'isolamento è effettuato alla base, tra struttura e fondazione ma è anche possibile isolare parte della struttura. Oramai sono centinaia gli edifici al mondo protetti dagli effetti sismici tramite l'isolamento sismico, compresi anche edifici esistenti²⁸.

Recenti studi hanno mostrato l'efficacia dei dispositivi a dissipazione passiva di energia di vario tipo: viscosi, elasto-plastici, visco-elastici e elettromagnetici. La strategia consiste nel dissipare parte dell'energia sismica in zone particolari della struttura, dove si verificano gli spostamenti maggiori. Posti in tali zone, i dispositivi accentrano su di sé gran parte dell'energia da dissipare, salvaguardando gli altri elementi strutturali. Spesso i dissipatori sono usati insieme agli isolatori per ridurre gli spostamenti alla base. Le tecniche di dissipazione di energia sono state proposte anche per edifici storici, anche con riferimento alla vibrazioni indotte dal traffico²⁹.

I materiali a memoria di forma (SMA) mostrano particolari proprietà legate alla trasformazione tra due fasi cristalline, austenite e martensite. Nel campo della salvaguardia dei beni culturali risulta molto interessante il comportamento superelastico. La curva caratteristica di un SMA presenta un tratto lineare, corrispondente alla deformazione elastica nella fase austenitica, seguita da un plateau, ossia un tratto in cui la deformazione cresce a tensione costante, in corrispondenza del quale si osserva la trasformazione di fase da austenite a martensite. A trasformazione completata il ma-

teriale presenta ancora un comportamento elastico fino ad un nuovo plateau, questa volta associato alla plasticizzazione classica. Se da un punto del *plateau* si riduce la tensione, si ottiene la trasformazione inversa, da martensite a austenite, con recupero quasi totale della deformazione e il ciclo può ripetersi molte volte senza danni al materiale e senza deformazioni residue al termine dei cicli. In pratica un dispositivo a memoria di forma si comporta come elastico con elevata rigidità per bassi livelli di sollecitazione, mentre per alti livelli di sollecitazione si deforma consentendo alla muratura di dissipare energia; in presenza di azioni di notevole entità, infine, la rigidità dei dispositivi aumenta impedendo il collasso.

L'uso dei materiali a memoria di forma è coerente con i requisiti di reversibilità e di compatibilità con i materiali originari, recando un disturbo minimo all'edificio. Esempi applicativi notevoli sono stati quelli della Basilica di San Francesco in Assisi, danneggiata del sisma umbro-marchigiano del settembre 1997, dove i dispositivi sono stati disposti tra il timpano danneggiato e la copertura, e del Campanile di San Giorgio in Trignano, danneggiato dal sisma che ha colpito la provincia di Reggio Emilia nell'ottobre 1996, dove sono stati disposti quattro tiranti verticale pretesi in modo da conferire alla struttura anche una certa resistenza a flessione^{30,31}.

Conclusioni

Il mondo delle costruzioni gioca un ruolo importante nella definizione delle politiche di sviluppo sostenibile e l'ingegnere deve fronteggiare nuove problematiche e nuove sfide. Tornano in mente le parole di Akio Morita, presidente fondatore della Sony, che nel rispondere a Margaret Thatcher, allora primo ministro britannico, che gli aveva chiesto un consiglio per il suo paese, affermava: "Ridate orgoglio e prestigio agli ingegneri. Il mondo è pieno di avvocati e finanziari e ovviamente tutti sono utili, ma alla fine sono gli ingegneri che fanno le cose".

Bibliografia

1. WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT - WCED, *Our Common Future*, Oxford University Press, Washington, DC, 1987
2. VANEGAS J., "Sustainability and Civil Engineering: from Concept to Action", *IABSE Report "Structures for the Future. The Search for Quality"*, Vol. 83, IABSE, Zurich, 1999
3. DALY H., "Operational principles for sustainable development," *Earth Ethics* (Summer), 6-7, 1991
4. DALY H.E., "From empty-world economics to full-world economics: Recognizing a historical turning point in economic development," in *Population, Technology, and Lifestyle - The Transition to Sustainability* (R. Goodland, et al., Eds.), Island Press, Washington, DC, 1992
5. PEARCE D., WARFORD J., *World without end*, Oxford University Press, Washington, DC, 1993
6. ENGEL J.R., "Introduction: The ethics of sustainable development," in *The ethics of environment and development* (Engel, J. R., and Engel, J. G., Eds.), University of Arizona Press, Tucson, 1995
7. GOODLAND R., LECLEC G., "Neoclassical economics and principles of sustainable development," *Ecological Modelling* 38, 1987
8. KOTHARI R., "Environment, Technology, and Ethics," in *The Ethics of Environment and Development*, (J. Engel and J.G. Engel, Eds.), University of Arizona Press, Tucson, 1990
9. CARPENTER S., "Sustainability," in *Encyclopedia of Applied Ethics*, Volume 4, 275-293, Academic Press, 1998
10. CARPENTER S., VANEGAS J., "Towards Sustainable Civil Infrastructure Systems," in the *Sustainable Technology and Complex Ecological and Social Systems Conference Proceedings*, of the forty-second Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences, Atlanta, Georgia, 1998
11. SOLOW R., "Sustainability: An economist's perspective," in *Economics of the environment*, 3rd edition (Dorfman, R., and Dorfman, N., Eds.), W. W. Norton & Co., New York, 1991
12. DALY H.E., COBB J.B.JR., *For the Common Good*, 2nd Edition, Beacon Press, Boston, 1994
13. COMMONER B., *Making peace with the planet*, Pantheon Books, New York, 1990
14. FROSH R., GALLOPOULOS N., "Strategies for manufacturing", *Scientific American*, Special Edition, 1989
15. LYLE J.T., *Regenerative Design for Sustainable Development*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1994
16. NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL - NSTC, *Technology for a Sustainable Future: Framework for Action*, Office of Science and Technology Policy, Washington, D.C., 1994
17. VANEGAS J., PEARCE A., "Sustainable Design and Construction Strategies for the Built Environment," in the *Building Energy-Ensuring a Sustainable Future Conference Proceedings*, Northeast Sustainable Energy Association (NESEA), Cromwell, Connecticut, 1997
18. University Leaders for a Sustainable Future and Second Nature, *Principles of Sustainability in Higher Education*, Workshop Report, Essex, Massachusetts, 1995
19. ROBERTS D.V., "Sustainable Development - A Challenge for the Engineering Profession," in *The Role of Engineering in Sustainable Development*, (M. Ellis., Ed.), American Association of Engineering Societies, Washington, DC, 1994
20. DAS P.C. "New developments in bridge management methodology", *Structural Engineering International*, Vol. 8, No. 4, 1998
21. DAS P.C., MICI T.V., "Maintaining highway structures for safety, economy and sustainability", Proc., *International Conference Faults and Repairs*, London, 1999
22. PICKETT A., DAS P., "Future Trends in Design and Maintenance of Structures", *IABSE Report "Structures for the Future. The Search for Quality"*, Vol. 83, IABSE, Zurich, 1999
23. DICKSON M., "Developments in Structural Form to Minimise Environmental Impact", *IABSE Report "Structures for the Future. The Search for Quality"*, Vol. 83, IABSE, Zurich, 1999
24. CLEMENTE P., PACILIO N., "La sfida dei ponti", *Prometeo*, Mondadori, Segrate (MI), No. 62, 88-99, 1998
25. MEHTA P.K., "Concrete technology for Sustainable Development - an Overview of Essential Principles", *Int. Symp. Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry*, Ottawa, 1998
26. GEIKER M., EDVARDSEN C., LAURIDSEN J., "Sustainable Design and Maintenance of Concrete Structures", *IABSE Report "Structures for the Future. The Search for Quality"*, Vol. 83, IABSE, Zurich, 1999
27. DURMISEVIC S., SARIYILDIZ S., "A Step Towards Sustainability through Underground Space Utilisation", *IABSE Report "Structures for the Future. The Search for Quality"*, Vol. 83, IABSE, Zurich, 1999
28. MARTELLI A. ET AL., "The contribution of ENEA to the development of innovative techniques for improving the seismic protection of civil and industrial structures", Proc., *7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*, (Assisi, October 2-5), GLIS and EAEE-TG5, Vol. 2 (52), 439-452, 2001
29. CLEMENTE P., "Traffic-Induced Vibrations on Structures", *IABSE Report "Extending the Lifespan of Structures"*, Vol. 73/2, 1111-1116, IABSE, Zurich, 1995
30. INDIRLI M., CASTELLANO M.G., CLEMENTE P., MARTELLI A., "The Demo Application of Shape memory Alloy Devices: the Rehabilitation of S. Giorgio Church in Trignano", Proc., *SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials* (Newport Beach, 4-8 March), 4330_30, 2001
31. CLEMENTE P., MARGOTTINI C., "Seismic Preservation of the Collective Memory", Proc., *International Conference "Choices and Strategies for Preservation of the Collective Memory"* (Dobbiaco, 25-29 June 2002), Ministero per i Beni Culturali, Amministrazione Archivistica (Invited lecture), 2002

Mitologia della tecnica: Prometeo, Epimeteo e Pandora

a cura di
FAUSTO BORRELLI

scienza, tecnica,
storia & società

Duemilacinquecento anni fa, Erodoto pensò per primo la storia come "storia di vicende umane", lasciando alle sue spalle un mondo di figure mitiche disorientanti che interferivano in quelle vicende. Duemilacinquecento anni dopo, ci troviamo in una situazione analoga, ma speculare rispetto a quella di Erodoto. Ci troviamo di fronte a un futuro dal quale irrompono presenze tecnoscientifiche assai più disorientanti delle arcaiche figure mitiche, dalle quali spesso le presenze tecnoscientifiche prendono il nome.

Nella prima parte di questo articolo è stata immaginata – come ipotesi di lavoro – una storia umana come "intervallo" fra mito e tecnoscienza e sono state evidenziate sorprendenti corrispondenze fra caratteri delle figure mitiche e caratteri dei grandi progetti e prototipi tecnoscientifici. Nella seconda parte, si leggerà il mito di Prometeo, Epimeteo e Pandora sull'origine del fuoco e del sapere tecnico nei testi di Platone, Esiodo ed Eschilo

The mythology of technics: Prometheus, Epimetheus and Pandora

Herodotus, twenty-five hundred years ago, was the first to think of history as the "remembrance of what men have done," eschewing a world of bewildering mythical figures believed to interfere in human affairs. Twenty-five hundred years later, we find ourselves in a situation that mirrors Herodotus's, but the "technoscientific presences" bursting into our lives from the future seem much more bewildering than the archaic mythical figures for whom "technoscientific presences" are often named. As a working hypothesis, the first part of this article imagined human history as an interval between myth and technoscience, and pointed out some surprising matches between the characters of the mythical figures and those of large-scale technoscientific projects and prototypes. In the second part we shall reread the myth of Prometheus, Epimetheus and Pandora, on the origin of fire and technical knowledge, as told by Plato, Hesiod and Aeschylus

SECONDA PARTE

L'errore di Epimeteo secondo Platone-Protagora

Nel "Protagora" di Platone (427-347 a. C.) si discute sulla insegnabilità e non insegnabilità dell'arte politica; Protagora (490 ca.-411 a. C.), per esporre la sua posizione, alterna il ragionamento argomentato al racconto mitico e viceversa.

Per l'origine del fuoco e del sapere tecnico, Protagora si serve del racconto mitico relativo a Prometeo ed Epimeteo, che qui si riporta quasi integralmente.

«Allora Protagora chiese: desiderate che ve lo dimostri raccontando un mito, come i vecchi ai giovani, o esponendo un ragionamento?»

La maggior parte di coloro che gli stavano intorno rispose che esponesse come meglio voleva. E allora – affermò Protagora – mi sembra più piacevole raccontarvi un mito.

Vi fu un tempo in cui esistevano gli dèi, ma non le stirpi mortali. Quando giunse anche per le stirpi mortali il momento fatale della loro nascita, gli dèi ne fanno il calco in seno alla terra mescolando terra e fuoco e tutti quegli elementi che si compongono di terra e di fuoco. Ma nell'atto in cui stavano per portare alla luce quelle stirpi, ordinarono a Prometeo e Epimeteo di distribuire a ciascuno facoltà naturali in modo conveniente. Epimeteo chiede a Prometeo che spetti a lui la cura della distribuzione: "E quando avrò compiuto la mia distribuzione – dice – tu controllerai". E così, avendolo persuaso, si pone a distribuire.

Ora, nel compiere la sua distribuzione, Epimeteo ad alcuni assegnava forza senza velocità, mentre forniva di velocità i più deboli; alcuni armava, mentre per altri che rendeva per natura inermi, escogitava qualche altro mezzo di salvezza. A quegli esseri che rinchiusa in un piccolo corpo, assegnava ali per fuggire o sotterranea dimora; quelli che, invece, dotava di grande dimensione, proprio con questo li salva-

guardava. E così distribuiva tutto il resto, sì che tutto fosse in equilibrio. Ed escogitò tale principio preoccupandosi che una qualche stirpe non dovesse estinguersi. Dopo che li ebbe provvisti di mezzi per sfuggire le reciproche distruzioni, escogitò anche agevoli modi per proteggerli dalle intemperie delle stagioni di Zeus: li avvolse, così, di folte peli e di dure pelli, che bastavano a difendere dal freddo, ma che sono anche capaci di proteggere dal caldo e tali inoltre da essere adatti quale naturale e propria coperta a ciascuno, quando avessero bisogno di dormire. E sotto i piedi ad alcuni dette zoccoli, ad altri unghie e pelli dure prive di sangue; ad alcuni procurava un tipo di alimento, ad altri un altro tipo; ad alcuni erba della terra, ad altri frutti degli alberi, ad altri ancora radici; ad alcuni poi dette come cibo la carne di altri animali, ma a questi concesse scarsa prolificità mentre a quelli che ne erano preda abbondante prolificità, sì che la specie loro si conservasse.

Solo che Epimeteo, al quale mancava compiuta sapienza, aveva consumato, senza accorgersene, tutte le facoltà naturali in favore degli esseri privi di ragione: gli rimaneva ancora da dotare il genere umano e non sapeva davvero cosa fare per trarsi di imbarazzo. Proprio mentre si trovava in tale imbarazzo sopraggiunse Prometeo a controllare la distribuzione: vede che tutti gli altri esseri viventi armoniosamente posseggono di tutto, e che invece l'uomo è nudo, scalzo, privo di giaciglio e di armi: era oramai imminente il giorno fatale, giorno in cui anche l'uomo doveva uscire dalla terra alla luce.

Prometeo si trova allora anche lui in grande imbarazzo per la salvezza dell'uomo e per compensarlo, pensa di rubare ad Efesto e ad Atena il sapere tecnico (*éntechnos sofia*) insieme al fuoco – perché senza il fuoco sarebbe stato impossibile acquisire o servirsi del sapere tecnico. Prometeo penetra di nascosto nella dimora comune di Atena e di Efesto dove essi lavoravano in-

sieme, ruba a Efesto l'arte del fuoco e ad Atena il sapere tecnico donandolo all'uomo che con quelli si procurò le agiatezze della vita. L'uomo, dunque, ebbe in tal modo la scienza della vita, ma non ebbe ancora l'arte politica: essa si trovava presso Zeus; ma non era più concesso a Prometeo di andare nell'acropoli, dove c'è la dimora di Zeus (e davvero temibili erano, per di più, le guardie di Zeus). Si narra che, più tardi, Prometeo, a causa dell'errore di Epimeteo, dovette pagare la pena per il furto del fuoco.

Come dunque l'uomo fu partecipe di sorte divina per il fuoco e il sapere tecnico, unico fra gli esseri viventi credette negli dèi, e si mise ad erigere altari e sacre statue; poi, usando l'arte, articolò ben presto la voce in parole e inventò case, vesti, calzari, giacigli e il nutrimento che ci dà la terra.

Così provveduti, da principio gli uomini vivevano sparsi, perché non c'erano città. E perciò erano distrutti dalle fiere, perché in

specie, minacciata di andar tutta distrutta, inviò Hermes perché portasse agli uomini il pudore e la giustizia affinché servissero da ordinamento della città e da vincoli costituenti unità di amicizia.

Chiede Hermes a Zeus in qual modo debba dare agli uomini il pudore e la giustizia: "Devo distribuire giustizia e pudore come sono state distribuite le arti? Le arti furono distribuite così: uno solo che possenga l'arte medica basta per molti profani e lo stesso vale per le altre professioni. Anche giustizia e pudore debbo istituirli negli uomini nel medesimo modo, o debbo distribuirli a tutti?". "A tutti, rispose Zeus, e che tutti ne abbiano parte: le città non potrebbero esistere se solo pochi possedessero pudore e giustizia, come avviene per le altre arti. Istituisce, dunque, a nome mio una legge per la quale sia messo a morte come peste della città chi non sappia avere in sé pudore e giustizia"...

Resta il dubbio – disse Protagora – sul perché gli uomini virtuosi che eccellono in pudore e giustizia non sappiano sempre rendere migliori i propri figli. Ma su questo non voglio raccontare un mito (mythos), ma fare un ragionamento (lógos).»

[traduzione di Andrea Galimberti]

Platone-Protagora, dunque, alterna il ragionamento argomentato al racconto mitico e il racconto mitico al ragionamento argomentato, evidenziando la loro vicinanza funzionale.

Prometeo, Epimeteo e Pandora secondo Esiodo

Pandora è una donna bellissima non nata da donna. È fabbricata artigianalmente da un gruppo di dèi i quali danno, ciascuno, un apporto diverso al suo aspetto fisico e la sua psiche. Etimologicamente Pandora vuol dire "donata da tutti". È stata appositamente voluta da Zeus per punire il genere umano, reo di aver ricevuto il fuoco rubato da Prometeo dal carro del Sole o dalla fucina di Efesto.



La fucina di Efesto, da un vaso attico del VI secolo a.C.

tutto e per tutto erano più deboli di quelle, e la loro perizia pratica, pur essendo di adeguato aiuto a procurare il nutrimento, era assolutamente insufficiente nella lotta contro le fiere: non possedevano ancora l'arte politica, di cui quella bellica è parte. Cercarono, dunque, di radunarsi e di salvarsi fondando città: ma ogni qualvolta si radunavano, si recavano offesa tra di loro, proprio perché mancanti dell'arte politica, per cui nuovamente si disperdevano e morivano. Allora Zeus, temendo per la nostra

Ecco il racconto del mito di Pandora da "Opere e Giorni" di Esiodo (VIII secolo a.C.).

«Gli dèi nascondono agli uomini [la conoscenza dei mezzi tecnici per] il sostentamento della vita; facilmente potresti lavorare soltanto un giorno e per un anno avresti di che restare nell'ozio, subito lasceresti appeso al fumo del focolare il timone [dell'aratro] e andrebbe perduta la dura fatica dei buoi e delle mule pazienti.

Ma Zeus tutto questo occultò, sdegnato nell'animo perché Prometeo, dai torti pensieri, l'aveva in precedenza già ingannato. Da ciò, per gli uomini meditò sciagure che portano pianto e nascose il fuoco; a beneficio della stirpe mortale, Prometeo, prode figlio di Giapeto, sottrasse il fuoco al saggio Zeus in una canna cava, di nascosto a Zeus signore del fulmine.

Gli disse allora irato Zeus, adunatore dei nemi: "Figlio di Giapeto, il più astuto fra tutti gli uomini, ti rallegri d'aver rubato il fuoco e ingannato il mio volere, grande sciagura per te stesso e per gli uomini verrà; a loro darò un male, in cambio del fuoco, per il quale tutti gioiranno, accogliendo con amore il loro malanno." Così disse, poi rise il padre degli uomini e degli dèi.

Ordinò all'inclito Efesto che rapido impastasse terra con acqua, che vi infondesse voce e vigore di essere umano, simile in volto alle dee immortali, corpo di vergine amabile e grazioso; ad Atena ordinò che le insegnasse l'arte di tessere splendide trame; che l'aurea Afrodite spargesse grazia intorno al suo capo, e desiderio struggente e affanni divoratori di membra; comandò a Ermes, il messaggero Argifonte, di infonderle cuore di cane e un'indole ingannatrice. Così disse ed essi obbedirono a Zeus signore, figlio di Crono.

E subito Efesto, l'inclito Ambidestro, per volere di Zeus, plasmò dalla terra una figura simile a una vergine casta; Atena occhio di mare, le diede un cinto e l'adornò; e le Grazie divine e Persuasione veneranda intorno al suo corpo condussero aurei monili; le Ore dalla splendida chioma, l'incoro-

narono con fiori di primavera; e Pallade Atena adattò alle membra ornamenti di ogni genere. Infine Ermes, il messaggero Argifonte, le pose nel cuore menzogne, scaltre lusinghe e indole astuta, per volere di Zeus cupitonante; e voce le infuse l'araldo divino, e chiamò questa donna Pandora, perché tutti gli abitanti d'Olimpo l'avevano donata in dono, sciagura agli uomini laboriosi.

Poi, quando compì l'arduo inganno, senza rimedio, il Padre mandò a Epimeteo l'inclito Argifonte, Ermes, portatore del dono, veloce araldo degli dèi; né Epimeteo pensò alle parole che Prometeo gli aveva rivolto: mai accettare un dono da Zeus Olimpio, ma rimandarlo indietro, perché non divenisse un male per i mortali.

Lo accolse e possedeva il male, prima di conoscerlo. Prima infatti le stirpi degli uomini abitavano la terra del tutto al riparo dal dolore, lontano dalla dura fatica, lontano dalle crudeli malattie che recano all'uomo la morte, rapidamente nel dolore gli uomini avvizziscono. Ma la

donna di sua mano sollevò il grande coperchio dell'orcio e tutto disperse, procurando agli uomini sciagure luttuose. Sola lì rimase Speranza nella casa infrangibile, dentro, al di sotto del bordo dell'orcio, né se ne volò fuori; perché Pandora prima ricoprì la giara, per volere dell'egioco Zeus, adunatore dei nemi. E altri mali, infiniti, vanno errando fra gli uomini.

Piena è la terra di mali, pieno ne è il mare, le malattie si aggirano da sole fra gli uomini ora di giorno ora di notte, portando lutto ai mortali in silenzio, ché il saggio Zeus tolse loro la voce.

Così non si può stornare il disegno di Zeus.»

[traduzione di Silvia Romani, un po' adattata]



Atlante, fratello di Prometeo, che regge il mondo insieme a Prometeo incatenato e divorato dall'aquila (ceramica greca del V secolo)

Prometeo, il ribelle incatenato da Eschilo

Il "Prometeo incatenato" è la seconda tragedia della trilogia di Eschilo (525 ca. – 456 a. C.) dedicata al titano ribelle che viene incatenato sul Caucaso (oggi Cecenia) per volere di Zeus a causa del furto del fuoco a beneficio degli uomini. Le altre due tragedie: "Prometeo ladro del fuoco" e "Prometeo liberato" sono andate perdute tranne pochi frammenti.

Prometeo subisce indomito il supplizio, urlando la sua immensa rabbia contro Zeus del quale "pre-vede" il giorno in cui sarà abbattuto, passando dalla terrificante potenza numinosa al nulla.

Dal Prologo del "Prometeo incatenato"

Dopo aver incatenato Prometeo, Potere si allontana con Forza ed Efesto. In scena resta solo il titano incatenato alla rupe del suo supplizio.

PROMETEO

O etere divino, o aure dalle rapide ali,
o sorgenti dei fiumi, o sorriso infinito
delle onde del mare, o terra madre di ogni essere
e disco del sole che tutto vedi, io v'invoco:
osservate cosa soffro, io dio, da parte di dèi;
guardate che orrore di pene
da patire m'imposero
per tempo infinito!
Il nuovo re dei beati
scoprì per me questa infame prigionia.
Ehu ehu, io gemo sui dolori presenti
e su quelli che verranno, perché non vedo il giorno
che porterà la conclusione di questi tormenti.
Ma che dico? Tutte le cose future antivedo
una per una, esatta, né alcuna sventura
s'abbatterà inattesa su di me. Tutto ciò ch'è stabilito
mi conviene sopportare, per quanto posso meglio:
so che il fato ha una forza inflessibile.
Eppure né tacere né non tacere riesco
i casi della mia sorte.
Un dono largito agli uomini
piega al giogo di questo destino me, miserabile:
chiusa nel cavo d'una canna furtiva sottraggo
la sorgente della fiamma, che si rivelò ai mortali
maestra d'ogni arte e formidabile risorsa.
Non altre sono le colpe che espio

avvinto da questi ceppi nel cielo spalancato.
Ahà, eha eha!...

Guardatelo questo dio sventurato in catene;
è il nemico di Zeus, venuto in avversione
a tutti i numi, quanti si affollano
nella reggia di Zeus,
perché amò troppo i mortali.

Dall'episodio secondo del "Prometeo incatenato"

PROMETEO

Non pensate che io taccia per arroganza
o disdegno; ma il cuore mi rodo, sapendo,
al vedermi così calpestato.
Eppure chi altro, se non io, assicurò
gli onori a queste nuove deità?
Udite piuttosto le pene dei mortali, e quali bambini
erano,
prima che li rendessi saggi con l'uso della ragione.
Parlerò non perché abbia a lamentarmi degli
uomini,
ma per dimostrarvi la generosità dei miei doni.
Essi, prima, pur vedendo non vedevano,
pur udendo non udivano: simili a larve di sogni
passavano nel tempo una loro esistenza confusa,
senza conoscere dimore di mattoni esposte al sole,
senza lavorare il legno; ma sotto la terra
abitavano, come formiche che il vento disperde
via, in antri profondi non rallegrati dal sole.
Né conoscevano i segni costanti che presagiscono
l'inverno e il tripudio dei fiori a primavera
e quello dei frutti in estate; ma agivano in tutto
senza discernimento. Finché io additai loro il sorgere
e il cadere degli astri, difficili da stabilire;
quindi per loro ritrovai la scienza dei numeri,
base di ogni dottrina, e l'accoppiamento delle lettere,
che serba il ricordo di tutto ed è padre alle Muse.
Io per primo piegai al giogo le fiere selvagge,
affinché, schiave di cinti e di basti,
sostituissero l'uomo nei lavori più penosi,
e sospinsi sotto il timone dei cocchi i cavalli
docili al freno, ornamento di splendidi fasti.
Io solo trovai i carri dei nocchieri,
che con ali di lino errano sul mare.
Che sventurato! Io che trovai tali arti per i mortali,
io stesso non ho modo di liberarmi dai presenti guai.

(Prometeo rivolto a una Corifea)

Maggiore ancora sarà il tuo stupore quando udrai
le arti e gli espendienti che ho escogitato.
E questo il più grande: se alcuno cadeva ammalato,
non disponeva affatto di rimedi
in cibo o in unguenti o in bevande,

ma si dissecchiva per mancanze di cure; finché io
 insegni loro misture di medicine efficaci
 che sgombrano ogni affezione.
 Determinai le leggi dell'arte divinatoria,
 per primo distinti quali tra i sogni
 dovessero realizzarsi, e li feci attenti alle voci
 indistinte e agli incontri fatti per via;
 spiegai i significati precisi dei voli dei rapaci,
 quali per lor natura sono fausti ed avversi,
 e le abitudini di ciascheduno, e i rancori
 che divampano tra loro, e gli amori e i convegni;
 e come sia importante la levigatezza delle interiora,
 e quale colore rende accetta ai numi la bile,
 e le varie posizioni propizie del fegato.
 Bruciai gli arti avvolti di grasso e lombi diritti
 per avviare i mortali verso la scienza
 degli astrusi presagi, e resi evidenti i significati
 del guizzar delle fiamme, fin allora avvolti di tenebra.
 Questa è tutta l'opera mia.
 E le ricchezze che sotto la terra si celano agli uomini,
 il rame, il ferro, l'argento e l'oro,
 chi oserebbe dichiarare d'averle portate alla luce
 prima di me?
 Nessuno, io credo, che non intenda ciarlare a vuoto.
 In breve, insomma, sappi tutto:
 tutte le arti agli uomini vengono da Prometeo.

Dall'episodio quarto del "Prometeo incatenato"

PROMETEO

Giorno verrà che Zeus, pur altero in cuore,
 si ridurrà al nulla; nozze s'accinge a contrarre,
 che lo abatteranno dal fastigio della tirannide al
 nulla.

Allora finalmente si compirà del tutto
 la maledizione che Crono, suo padre, lanciò su di lui

al precipitare da quell'antico soglio.
 Né alcuno dei numi potrebbe additargli
 le vie dello scampo al triste destino, tranne io.
 Io solo so l'avvenire e come sfuggirgli. In vista di ciò,
 sieda pure fidando nei tuoni che scuotono i cieli,
 brandendo in mano lo strale sibilante di fuoco:
 nulla gli eviterà di cadere ignominiosamente
 in un tonfo a cui non si sopravvive.
 Tale è l'atleta ch'egli stesso alleva di fronte a se
 stesso:
 avversario prodigioso con cui è arduo contendere,
 escogiterà una fiamma più penetrante del fulmine
 e un rombo che sovrasti quello del tuono,
 e schianterà in pezzi il tridente di cui Posidone
 s'arma, sussulto del mare che scuote la terra.
 Quando avrà dato di cozzo in tale rovina,
 imparerà quanto è diverso il comandare e il servire.
 [traduzione di Carlo Carena]

Gli argonauti vedono dal mare Prometeo incatenato

Mentre Prometeo – incatenato nella cima
 del Caucaso – impreca e accusa Zeus del-
 l'atroce supplizio che sta ingiustamente su-
 bendo, gli argonauti – cioè Giasone e i suoi
 cinquanta compagni alla ricerca del Vello
 d'oro – solcano il mare del Ponto dal quale
 si scorgono le impervie vette dei monti del
 Caucaso.

Così Apollonio Rodio (III sec. a. C.) descri-
 ve, nelle "Argonautiche" (II, 1244-1259),
 l'incontro di Giasone e dei suoi compagni
 con Prometeo incatenato e tormentato dal-
 l'aquila mostruosa, figlia di Tifone:



Efesto plasma Pandora
 (figurina Liebig)

“Vogavano veloci sempre più avanti, sospinti da un vento tiepido. Già apparivano ai naviganti i più segreti recessi del Ponto e si stagliavano le impervie vette dei monti del Caucaso, dove Prometeo, le membra inchiodate a un’aspra rupe da indissolubili catene bronzee, nutriva col suo fegato un’aquila che incessantemente piombava su di lui.

La videro, sul far della sera, mentre con uno stridio acuto volava tanto in alto sopra la nave da sfiorare le nubi: eppure col battito delle ali scosse tutte le vele, poiché non apparteneva alla specie degli uccelli del cielo, ma le sue ali fendevano l’aria come remi ben levigati.

Di lì a poco udirono anche il lamento straziante di Prometeo, dilaniato nel fegato: l’aria risuonò del suo gemito, finché non videro l’aquila carnefice slanciarsi di nuovo dal monte col medesimo volo.”

2003: Prometeo cambia sesso e diventa Prometea

“Prometea” è il nome scelto dai biotecnologi per la puledra clonata nel corso dell’omonimo progetto di clonazione equina, segnalato su “Nature” nella prima settimana di agosto 2003.

Non hanno invece un nome mitologico occidentale il “mix cellulare” cinese di uomo-coniglio, segnalato nell’agosto del 2003 e neppure l’esperimento di “clonazione a tre” segnalato nell’ottobre 2003. La Cina, anche se con Alessandro Magno subì l’influsso dell’arte statuaria greca, è rimasta quasi del tutto immune dalla portata della mitologia greca.

Shenzhou, vascello celeste con “taikonauta” nel cielo

La Cina è ricorsa alla sua tradizione storico-mitologica per il nome della prima capsula spaziale pilotata del “Progetto 921” per l’invio in cielo, nell’ottobre 2003, di un “taikonauta” (cinese per “astronauta” da

“argonauta”). La capsula è stata chiamata “Shenzhou”, “veicolo sacro” o “vascello celeste”. È un compromesso fra tradizione e innovazione tecnoscientifica in un paese profondamente tradizionalista ma impegnato in una modernizzazione a tappe forzate. Quale giorno del lancio del primo “taikonauta” nello spazio è stato prescelto quello del quarantesimo anniversario della prima esplosione atomica effettuata nel deserto asiatico-cinese.

Bibliografia

Testi classici

ESIODO, *Teogonia*, Bur 2002; ESIODO, *Opere e Giorni*, Garzanti 1999; ESCHILO, *Le tragedie*, Istituto Editoriale Italiano, Milano 1996; PLATONE, *Protagora*, Edizioni scolastiche Mondadori 1948; APOLLONIO RODIO, *Argonautiche*, Mondadori 2003; PUBLIO OVIDIO NASONE, *Metamorfosi*, Einaudi 1994.

Studi sul mito

KERÉNY K., *Miti e misteri*, in particolare: *Prometeo come mitologema greco dell’esistenza umana* (pp. 191-264), Boringhieri 1979; KERÉNY K., *Gli dèi e gli eroi della Grecia*, Garzanti 1984; GRAF F., *Il mito in Grecia*, Laterza 1997; KIRK G.K., *La natura dei miti greci*, Laterza 1977; OTTO W.F., *Gli dèi della Grecia: l’uomo e la divinità nel mondo ellenico*, Il Saggiatore 1968; SABBATUCCI D., *Il mito, il rito e la storia*, Bulzoni 1987; VERNANT J.P., *Mito e società nell’antica Grecia*, Einaudi 1981; JUNG C.G., KERÉNY K., *Prolegomeni allo studio scientifico della mitologia*, Boringhieri 1971; DETIENNE M., *L’invenzione della mitologia*, Boringhieri 1983; CARR D.M., *The Erotic Word. Sexuality, Spirituality and the Bible*, Oxford University Press 2003.

Sul pensiero scientifico-greco

RUSO L., *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico-greco e la scienza moderna*, Feltrinelli 1996.

Dizionari di mitologia classica

BELFIORE J.C., *Dictionnaire de Mythologie grecque et romaine*, Larousse 2003; *Dizionario della mitologia greca e romana*, Gremese 2003; *Dizionario Bompiani delle opere e dei personaggi*, volumi 7 e 11 (voci su Prometeo), Bompiani 1983.

Sulla filosofia della tecnica e sui filosofi della tecnica

ELLUL J., *Le bluff technologique*, Hachette 1988; STIEGLER B., *La technique et le temps*, 3 volumi, Galilée 1994-2001; GALIMBERTI U., *Psiche e techne*, Feltrinelli 1999; BORRELLI F., *Pensare la tecnica*, ENEA 1996; BORRELLI F., *Pensare la tecnica 2000*, ENEA 2001; SEVERINO E., *Dall’Islam a Prometeo*, Rizzoli 2003.

Criteri di misura e indicatori per l'economia dell'innovazione

DANIELA PALMA
GAETANO COLETTA
ALESSANDRO ZINI

ENEA
Unità di Agenzia
per lo Sviluppo Sostenibile

Nell'ambito dell'Osservatorio ENEA sull'Italia nella Competizione Tecnologica Internazionale è stato condotto uno studio specifico per la definizione di una base organica di criteri di misura e di indicatori nell'area dell'economia dell'innovazione da presentare in una apposita pubblicazione periodica.

Il crescente rilievo che il processo di cambiamento tecnologico è andato acquisendo nello sviluppo dell'economia mondiale ha infatti messo in moto una domanda nuova ed importante di informazioni che consentano di cogliere l'integrazione tra i fondamentali dell'economia ed i processi innovativi. La messa a punto di "indicatori della scienza e della tecnologia", che in un tempo ancora non lontano dal presente ha segnato un significativo passaggio nell'ambito delle misure dei sistemi economici e

sociali, rischia oggi di risultare se non di scarsa utilità, quanto meno poco feconda in termini di ausilio alla comprensione dei fenomeni che attraversano l'economia mondiale.

L'ampia valenza mostrata dai processi innovativi nella dinamica dello sviluppo mondiale attribuisce infatti una dimensione ben più complessa al preesistente dominio di questi indicatori. Ed è infine con questo contesto che i decisori, a tutti i livelli, debbono confrontarsi elaborando nuovi schemi di organizzazione e di azione.

Lo studio si articola in due sezioni fondamentali, che si attagliano, rispettivamente, all'analisi del sistema economico nel suo complesso (sezione "Economia") e all'analisi del "profilo" tecnologico dello stesso (sezione "Innovazione"). L'obiettivo è comunque quello di rilevare

tutti quegli aspetti del sistema economico che appaiono cruciali nel delinearne le caratteristiche strutturali e, per questa via, le traiettorie dello sviluppo tecnologico. Per questo motivo, la selezione degli indicatori è stata guidata anche da criteri inerenti alla copertura delle statistiche, sia a livello temporale sia a livello di paese.

Nella sezione "Economia" vengono raggruppati indicatori che contribuiscono a definire nel loro insieme i fattori che definiscono il contesto di domanda e di offerta di innovazione nel sistema economico. Una prima sottosezione è dedicata alla popolazione poiché la descrizione delle caratteristiche fondamentali di un sistema economico nazionale non può prescindere dalla descrizione della struttura e della dinamica demografica.

Un secondo gruppo di indicatori ha per oggetto il reddito del sistema economico. Sono rilevati principalmente il prodotto interno lordo (PIL) e il prodotto interno lordo pro capite, il cui tasso di variazione annua costituisce una misura della crescita della "ricchezza" di un paese.

Un terzo gruppo di indicatori riguarda i fattori di produzione. Vengono passati in rassegna i consueti indicatori relativi al mercato del lavoro, quali il tasso di disoccupazione e il tasso d'attività, che segnalano le caratteristiche dell'offerta di lavoro. Viste le notevoli differenze presenti tra paesi nei metodi di computo della disoccupazione, il tasso di attività, pari al rapporto tra coloro che partecipano al mercato del lavoro e la popolazione in età lavorativa, si rivela un indicatore più robusto per attuare comparazioni.

Sono inoltre considerati il costo del lavoro per unità di prodotto e la produttività del lavoro, che segnalano rispettivamente la competitività di prezzo e il gra-

note tecniche

do di efficienza nell'utilizzo del lavoro. L'utilizzo dell'indicatore della produttività del lavoro risulta più corretto anche in quanto indicatore generale della produttività in luogo dell'indicatore della produttività totale dei fattori che implicherebbe ipotesi sulla conoscenza della funzione di produzione.

Un cenno a parte meritano gli ultimi due indicatori di questo gruppo, il rapporto capitale/prodotto e il rapporto capitale/lavoro in termini fisici, rispettivamente definiti come intensità di capitale e grado di meccanizzazione. Il primo, intensità di capitale, ci fornisce un'indicazione circa le risorse che il sistema deve investire per aumentare di una unità il flusso della produzione, ed inoltre è rilevante per la formazione dei prezzi e, quindi, per la competitività delle esportazioni, fornendoci una misura dell'incidenza del capitale sul prezzo. Il secondo, il rapporto capitale/lavoro, è rilevante in ambito occupazionale, fornendo un'indicazione del numero di posti di lavoro che verrebbero creati in un determinato sistema da un'unità aggiuntiva di investimento.

Nella sottosezione dedicata alla domanda vengono riassunte le componenti della domanda aggregata, quali investimenti, consumi privati e spesa pubblica. Ai fini dell'analisi della crescita di un sistema economico nessuna di queste componenti può essere ritenuta più importante delle altre, sebbene in molti studi sulla crescita, le tradizionali scuole del pensiero economico, quella neoclassica e quella keynesiana o neo-keynesiana, abbiano fatto prevalere ora l'una ora l'altra.

Un altro indicatore che viene proposto nella sezione "domanda" è infine quello relativo all'incidenza della spesa pubblica in rapporto al PIL, unicamente allo scopo di catturare il grado di apertura al mercato dell'economia.

Un gruppo di indicatori di rilievo e di utilità anche per la costruzione di serie storiche deflazionate è quello relativo ai prezzi. In questa sezione vengono riportati i deflatori specifici e il tasso d'inflazione dei beni di consumo. I tassi di crescita dei prezzi dei beni/servizi importati contribuiscono inoltre a definire il grado di inflazione "importata". La funzione dell'indice armonizzato dei prezzi al consumo, è infine quella di consentire la comparazione internazionale dell'inflazione al consumo esclusivamente in ambito comunitario.

Le caratteristiche del mercato internazionale vengono descritte nella sottosezione "mercato internazionale" attraverso gli indicatori più tipici, quale quello della bilancia dei pagamenti nella declinazione delle sue sezioni, conto corrente e conto capitale.

Nella seconda sezione, intitolata "Innovazione", vengono riassunti gli indicatori che riguardano più strettamente il sistema scientifico e tecnologico. Un primo gruppo raccoglie le variabili relative alla formazione e alla ricerca. Il numero medio di anni di scolarità è un tipico indicatore relativo alla qualità dell'offerta di lavoro, spesso impiegato negli studi che si richiamano alla cosiddetta teoria della crescita endogena.

Seguono la spesa in ricerca complessiva, pubblica, accademica e privata, nota con l'acronimo GERD (Gross Domestic Expenditure on R&D) e la spesa per Ricerca e Sviluppo effettuata dalle imprese, nota con l'acronimo di BERD (Expenditure on R&D in the Business Enterprise Sector). In questo ambito è sovente utilizzato l'indicatore dato dal rapporto tra GERD e PIL. Nondimeno il rapporto BERD/PIL determina spesso le notevoli differenze che intercorrono tra i paesi. Non meno rilevanti sono quegli indicatori che si attagliano alla dimensione delle risorse

umane presenti nell'area della ricerca, quali la spesa in R&S per individuo in età lavorativa e il numero di ricercatori o di addetti in R&S in rapporto alle forze di lavoro. Altre variabili giungono invece in soccorso per determinare il ruolo dell'industria privata e quello del pubblico sia come soggetto finanziatore che come soggetto esecutore. Ad esempio, la percentuale di BERD finanziata dal privato indica la propensione delle imprese ad autofinanziare i programmi di ricerca. Di particolare rilievo è infine un indicatore specifico rappresentato dalla percentuale di BERD nei settori "ad alta tecnologia".

Un gruppo finale di indicatori è relativo alla tecnologia. Gli indicatori presentati nell'ambito delle statistiche per la formazione e la ricerca sono rivelatori di azioni di "impegno", nel sistema dell'innovazione e si identificano pertanto anche come indicatori di "input tecnologico". Altre sono invece le misure del risultato di tale attività. Il numero di brevetti, l'entità finanziaria degli investimenti diretti all'estero e la competitività delle esportazioni – con particolare riguardo a quelle dei prodotti che un panel di esperti nell'ambito dell'Osservatorio ENEA definisce come "ad alta tecnologia" – sono misure di *output* tecnologico nel sistema dell'innovazione.

Gli indicatori tecnologici riflettono sotto questo profilo il modo in cui l'attività scientifica si traduce in valore per il sistema economico. È possibile, inoltre, che la tecnologia sia incorporata in beni strumentali, con un "impegno" relativamente limitato sotto il profilo della creazione di nuove competenze tecnologiche per il "sistema nazionale di innovazione". Gli investimenti in macchinari ed impianti traducono a questo riguardo una misura di "progresso tecnico incorporato".

dal **MONDO****Un anno
di problemi ambientali****Stazione artica cinese****Rinviata la decisione
su ITER****Egitto
e sviluppo sostenibile****UN ANNO DI PROBLEMI
AMBIENTALI**

Dall'esame delle notizie pubblicate nel 2003 sull'ambiente, secondo l'agenzia internazionale Edie, per quanto riguarda il clima l'anno sarà ricordato come uno tra i più caldi nella storia, e con una forte recrudescenza di fenomeni estremi (ondate di calore, alluvioni e scioglimento di ghiacci). Una buona notizia è che la concentrazione di metano in atmosfera non è aumentata: il metano è per importanza il secondo gas serra dopo la CO₂. Ma il 2003 è stato anche l'anno internazionale dell'acqua, durante il quale sono fiorite numerose iniziative e impegni, da parte dei paesi più ricchi, per assicurare la disponibilità a tutti di questa im-

portante fonte di vita.

Per l'ambiente marino la cattiva notizia riguarda gli incidenti delle petroliere che continuano a danneggiare mari e coste e la loro biodiversità: l'ultimo disastro dello scorso agosto ha visto riversate sulle coste pakistane oltre 60 mila tonnellate di petrolio. La buona notizia è, invece, quella della firma sulla Convenzione per la protezione dell'ambiente del Mar Caspio apposta dagli Stati rivieraschi dopo gli ingenti danni prodotti dalle industrie locali.

STAZIONE ARTICA CINESE

Diverrà operativa a marzo la prima stazione artica cinese progettata per ospitare fino a 25 ricercatori che si avviano a collaborare con quelli di Norvegia, Francia, Germania, Gran Bretagna, Giappone, Corea e Italia. Il clima e l'ambiente della regione artica hanno sempre avuto un impatto diretto sul territorio della Cina che, perciò, ha aderito al Trattato di Spitzbergen, l'arcipelago dove sorgono le stazioni artiche. Obiettivo primario degli scienziati cinesi saranno le ricerche sui cambiamenti climatici e la loro influenza in Cina, così come sull'ambiente e il clima del continente Artico.

**RINVIATA LA DECISIONE SU
ITER**

La fusione nucleare promette di fornire energia virtualmente illimitata e in gran parte non inquinante, ma i rappresentanti dei paesi partecipanti al progetto ITER, nella riunione di Washington di fine anno 2003, non hanno trovato un accordo sulla scelta del sito che ospiterà il primo grande reattore a fusione nucleare del mondo. Stati Uniti, Giappone, Russia, Cina, Corea

del Sud e Unione Europea hanno, pertanto, rinviata la decisione ai primi mesi del 2004.

Il paese che ospiterà ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) godrà i vantaggi di un notevole sviluppo in termini di competenza e tecnologia, per questo gli esperti speravano di raggiungere una decisione basandosi su criteri oggettivi ma, a quanto sembra, alla fine conteranno solo le pressioni politiche. Europa, Russia e Cina sono a favore di Cadarache in Francia, mentre Stati Uniti, Corea del Sud e Tokyo sostengono Rokkasho-mura in Giappone. Gli USA, in particolare, si sono dichiarati contrari alla scelta della Francia a causa dell'opposizione francese all'intervento statunitense in Iraq.

**EGITTO E SVILUPPO
SOSTENIBILE**

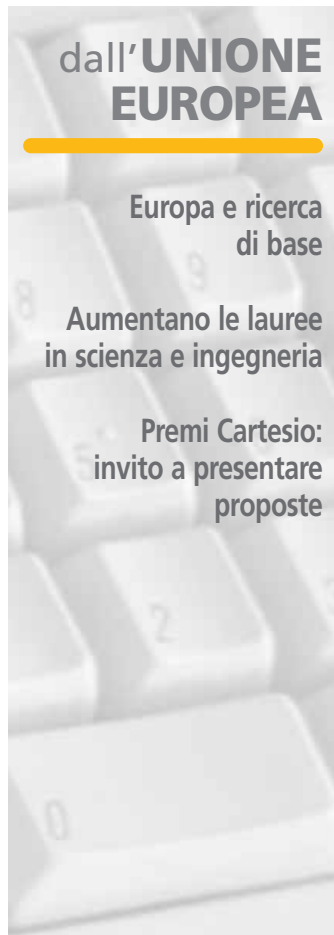
Lo sviluppo economico egiziano non ha tenuto in debita considerazione le problematiche ambientali, e i danni causati dall'inquinamento sono notevoli.

L'Egitto ha perciò cercato una collaborazione con l'Europa che si è sviluppata nel Progetto europeo "Sustainable Environmental Development. A Curriculum Development Project".

Il Progetto, che vede come coordinatore l'Università del Canale di Suez, ha come partner il Consorzio della Chimica per l'ambiente INCA (contraente e manager del progetto), l'Università di Leiden (Olanda) e l'Istituto di Scienza e Tecnologia Spagna.

Il Progetto si propone di migliorare i corsi dell'Università egiziana nel campo dello sviluppo sostenibile e di creare un centro di consulenza e analisi a sostegno delle aziende produttive egiziane.

cronache



EUROPA E RICERCA DI BASE

La Commissione ha presentato in gennaio una relazione in materia di ricerca di base dalla quale emergono luci e ombre. I punti di forza sono: la qualità del sistema europeo di formazione; l'ottimo livello di un gran numero di gruppi universitari; l'esistenza di centri di eccellenza in quasi tutti i settori; le tradizioni di ricerca di base in numerosi paesi dell'UE.

Invece i punti di debolezza consistono nella: assenza di una adeguata competizione a livello europeo fra gruppi di ricercatori; mancanza di cooperazione e coordinamento delle attività a causa della compartimentazione dei programmi e dei sistemi di sostegno nazionali; assenza (in alcuni casi) di massa critica

dei progetti, dovuta al limitato numero e alla dimensione ridotta dei centri di eccellenza.

L'ambiente europeo risulta meno attrattivo per i ricercatori che scelgono spesso di proseguire la carriera negli USA.

In Europa, la maggior parte della ricerca di base è eseguita e finanziata solo a livello nazionale, anche perché è in gran parte svolta dalle università, dunque nell'ambito dei sistemi di istruzione nazionali. L'UE ha sempre limitato i suoi interventi a sostegno della ricerca applicata e dello sviluppo tecnologico, ma nel corso degli ultimi anni, le posizioni stanno evolvendo. Il Programma Quadro di ricerca europeo comprende anche ricerche di base, sotto forma di attività specifiche o di elementi di grandi programmi, anche se il sostegno risulta limitato.

Le sfide future si potranno affrontare ricorrendo ad una combinazione di mezzi, approcci e strumenti, perciò: sostenendo la creazione di centri di eccellenza; aumentando il sostegno alla formazione dei ricercatori e allo svolgimento delle carriere scientifiche; incentivando il sostegno finanziario del settore privato mediante le fondazioni.

AUMENTANO LE LAUREE IN SCIENZA E INGEGNERIA

Le nuove statistiche Eurostat per il 2001 mostrano che nell'UE, su due milioni di neolaureati, il 26 per cento ha studiato scienze e/o ingegneria. Svezia, Irlanda e Francia hanno registrato la più alta percentuale di dottori in queste discipline, con oltre il 30 per cento. A titolo di confronto, nei dieci paesi in via di adesione, il numero dei laureati nel 2001 in scienze o ingegneria si è attestato, in media, al 13 per cento su un totale di 630 mila studenti. Le percentuali più elevate si sono registrate in Slovacchia, Lituania e Repubblica

Ceca. La relazione ha inoltre mostrato che, nonostante in tutti i paesi analizzati ci siano più donne che uomini nei corsi di insegnamento superiore di secondo grado, le donne continuano ad essere sottorappresentate nelle discipline scientifiche ed ingegneristiche. Ciò non si verifica, tuttavia, in Portogallo, Italia, Polonia, Lettonia e Lituania dove, nel 2001, la percentuale di donne che aveva scelto queste materie variava dal 52 al 59 per cento.

PREMI CARTESIO: INVITO A PRESENTARE PROPOSTE

La Commissione Europea ha pubblicato un invito a presentare proposte entro l'11 maggio (http://fp6.cordis.lu/fp6/call_details.cfm?CALL_ID=124) per i premi Cartesio, finanziati nell'ambito dell'attività "Scienza e società" che rientra nel programma specifico "Strutturare lo Spazio europeo della ricerca (SER)" del Sesto Programma Quadro (6PQ). I premi sono disponibili nelle seguenti categorie:

- *team* che abbiano ottenuto risultati scientifici o tecnologici straordinari, grazie ad una collaborazione europea in un qualunque settore di ricerca scientifica, comprese le scienze economiche, sociali e umane;
- organizzazioni o individui che abbiano ottenuto risultati straordinari nelle scienze della comunicazione. Le organizzazioni europee e nazionali che promuovono premi nei seguenti settori sono invitate a presentare proposte per: ricercatori impegnati nella comunicazione scientifica al grande pubblico; articoli stampa che contribuiscono alla divulgazione della scienza; documentari scientifici; opere di divulgazione scientifica; azioni innovative per la comunicazione scientifica; politica editoriale per la promozione della scienza; programmi scientifici radiotelevisivi.

dall'**ITALIA****Investimenti
per la ricerca****Collaborazione
Canada-Bolzano****La Cartha di Orvieto****INVESTIMENTI PER LA
RICERCA**

Al fine di favorire l'accrescimento delle competenze scientifiche del Paese e di potenziarne la capacità competitiva a livello internazionale, nel 2000 con la legge 388 è stato istituito il Fondo per gli investimenti nella ricerca di base (FIRB), che ha una dotazione finanziaria di 225 milioni di euro per il 2003 e di 100 milioni di euro a decorrere dall'anno 2004.

Sulla *Gazzetta Ufficiale* del 5 gennaio 2004 sono stati pubblicati i Bandi di gara del FIRB.

Con il decreto direttoriale del 12 dicembre 2003 n. 2186-RIC, il FIRB, in coerenza con le "Linee guida per la politica scientifica e

tecnologica del Governo", cofinanzia, nel limite massimo di 47 milioni di euro, tre programmi strategici: chimica/farmaceutica; scienze umane, economiche e sociali; fusione.

Per quanto riguarda invece il bando per i progetti strategici di ricerca, il decreto n. 2187-RIC tiene conto delle indicazioni dell'Unione Europea, Investire nella ricerca: un piano d'azione per l'Europa, riguardanti il lancio di iniziative caratterizzate, come European Technology Platforms, sulle quali convergono interessi della comunità scientifica pubblica e privata, dell'industria e delle piccole e medie imprese. In particolare, il FIRB cofinanzia, nel limite massimo di 59 milioni di euro, progetti strategici di ricerca per la costituzione, il potenziamento e la messa in rete di centri di alta qualificazione scientifica, pubblico-privati anche su scala internazionale.

La scadenza per la presentazione delle proposte progettuali è fissata entro le ore 17 del 13 febbraio 2004.

**COLLABORAZIONE
CANADA-BOLZANO**

Il governo canadese ha chiesto all'Agenzia provinciale per la Protezione dell'Ambiente di Bolzano un gemellaggio per mettere a disposizione le reciproche conoscenze in materia di risparmio energetico-domestico. In base alle disposizioni adottate su scala provinciale, da un anno e mezzo tutte le nuove abitazioni in costruzione devono rispondere a precisi criteri: c'è infatti l'obbligo di rispettare un certo indice termico, che corrisponde a 7 litri di gasolio per metro quadro l'anno.

Si pensi che in certi edifici si ar-

riva ai 30-35 litri di gasolio. Quindi da un lato si hanno grandi benefici in termini di risparmio energetico, e dall'altro si verifica una notevole diminuzione dell'inquinamento prodotto dal riscaldamento.

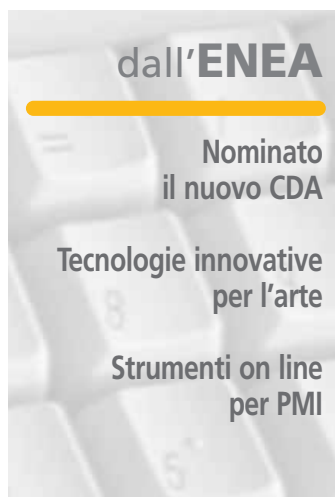
A Bolzano un intero nuovo quartiere, il Casanova, sarà costruito seguendo le prescrizioni della bio-architettura dette Casaclima: le nuove case, perciò, devono avere un cappotto termico realizzato in un certo modo, le finestre termiche e orientate per la maggior parte verso sud, e devono utilizzare fonti di energia rinnovabile come quella solare. La Provincia di Bolzano è stata la prima ad adottare questa normativa e per questo c'è stato l'interessamento da parte del governo canadese.

LA CARTHA DI ORVIETO

Diffondere dal basso l'energia per cambiare il mondo come è avvenuto nell'Ottocento con l'introduzione del vapore e poi del motore a scoppio è il progetto che ha spinto una trentina di sindaci delle piccole città italiane a riunirsi nel movimento *Cittaslow* ed a sottoscrivere la Cartha di Orvieto.

Si tratta di un manifesto programmatico con l'obiettivo di realizzare progetti pilota di sistemi alimentati a idrogeno basati sulle energie rinnovabili e sperimentare la creazione di una rete interattiva di piccoli fornitori-utenti che permetta l'accesso di consumatori e piccole e medie associazioni ai benefici dell'economia basata sull'idrogeno. Il documento è stato siglato anche da Sindacati, ACLI, imprese del settore dell'energia rinnovabile e ricercatori impegnati sul tema idrogeno in ENEA e CNR.

cronache



NOMINATO IL NUOVO CDA

Il Presidente del Consiglio, su proposta del Ministro delle Attività Produttive, il 23 dicembre 2003 ha nominato per un quadriennio il Professor Carlo Rubbia Presidente dell'ENEA. Nella stessa data il Ministro Marzano ha nominato i componenti del Consiglio di Amministrazione, che risulta così composto:

- Dott. Leonardo Buonvino e Avv. Cosimo dell'Aria, designati dal Ministro delle Attività Produttive;
- Prof. Angelo Marino e Ing. Claudio Regis, designati dal Ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca;
- Dott. Corrado Cini e Dott. Pierluigi Scibetta, designati dal Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio;
- Prof. Remo J. Ruffini, designato dalla Conferenza Permanente Stato-Regioni.

TECNOLOGIE INNOVATIVE PER L'ARTE

In occasione della mostra sulla Resistenza, promossa dall'ANPI a Bologna in febbraio, l'ENEA ha realizzato una copia digitale tridimensionale del *Monumento al Partigiano e alla Partigiana* (1947)

di Luciano Minguzzi, collocato a Porta Lama dal 1986. La digitalizzazione è stata effettuata dal Laboratorio Protocenter dell'ENEA di Bologna con la tecnologia innovativa denominata ingegneria inversa, e per il rilevamento è stato utilizzato un sistema di scansione a triangolazione laser senza contatto.

Grazie ai modelli digitali realizzati dall'ENEA – che potranno poi servire a diversi scopi, ad esempio come ausilio nella pianificazione dei restauri, nella catalogazione e monitoraggio nel tempo della geometria, nella didattica e nella visualizzazione via internet – sarà studiata la possibilità di una riproduzione artistica in scala mediante tecnologie di prototipazione rapida.

Contrariamente a quelle tradizionali che operano per asportazione di materiale, queste tecniche realizzano il modello per addizione di uno strato di materiale sull'altro – ad esempio cera – indipendentemente dalla complessità della sua geometria, direttamente e senza attrezzature. Da questi modelli in cera potranno, quindi, essere realizzate delle copie direttamente in bronzo in scala utilizzando il processo della microfusione.

L'integrazione di queste due tecnologie, ingegneria inversa e prototipazione rapida, nell'esperienza di Porta Lama, è quindi un lavoro pilota destinato a suscitare l'interesse sia della comunità artistica che di quella scientifica impegnata nella ricerca di nuove applicazioni tecniche.

STRUMENTI ON LINE PER PMI

Per dare una risposta pratica alle esigenze delle piccole e medie imprese nell'affrontare il "salto" richiesto per introdurre le IPP (Politiche Integrate di Prodotto previste dal VI Programma Quadro dell'UE), esperti di Italia, Gran Bretagna, Ger-

mania, Spagna e Grecia hanno dato vita ad un progetto dimostrativo, eLCA, cofinanziato dalla UE. Il progetto, coordinato dall'ENEA, prevede la realizzazione di un sito web, con informazioni, strumenti e servizi utili per sviluppare ed introdurre sul mercato "prodotti verdi", oltre a promuovere azioni di sostegno, tramite lo sviluppo di collaborazioni ed accordi con la Pubblica Amministrazione ed altri operatori. Il principale risultato del progetto eLCA è il sito web *ecosmes.net*, concepito per rispondere soprattutto alle esigenze delle PMI, non sempre provviste di tutte le informazioni e competenze necessarie. Il sito è rivolto pertanto sia alle aziende che a quanti svolgono azione di supporto o consulenza nei loro confronti, ed è strutturato in modo da fornire tutti gli elementi ed i riferimenti necessari per intraprendere percorsi relativi alle IPP.

Sono previste cinque lingue (italiano, inglese, spagnolo, tedesco, greco), l'uso di linguaggi comprensibili anche a non esperti, informazioni sintetiche con riferimenti alla specificità dei diversi paesi europei e *link* per approfondimenti. Oltre alle soluzioni disponibili on line, vengono poi indicati ulteriori canali di accesso a competenze e consulenze, conformi il più possibile alle caratteristiche ed alla localizzazione delle aziende. Al momento *ecosmes.net*, in quanto progetto dimostrativo, riguarda alcuni settori (prodotti in legno e metallo, tessili, apparecchiature elettriche ed elettroniche e per ufficio, arredo urbano, hotel), ma è prevista l'estensione graduale ad altri tipi di prodotto. I servizi *ecosmes.net* saranno disponibili in linea a partire dalla fine del 2004, dopo una sperimentazione su alcune filiere prodotte.

Per informazioni: Paolo Masoni, ENEA, paolo.masoni@bologna.enea.it (<http://www.elca.enea.it>)

INCONTRI

Master sulle energie rinnovabili

L'UE premia Varese Ligure

Il futuro a idrogeno

MASTER SULLE ENERGIE RINNOVABILI

Il 19 gennaio scorso ha preso l'avvio il Master RIDEF in energie rinnovabili, decentramento ed efficienza energetica, organizzato dal Politecnico di Milano e dall'Università IUAV di Venezia.

Nella giornata inaugurale sono state presentate due relazioni sull'attuale situazione energetica: una da Tullio Maria Fanelli, recentemente nominato Commissario dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas e l'altra da Luigi De Paoli, Direttore dell'Istituto di economia e politica dell'energia e dell'ambiente dell'Università Bocconi.

Il master, di II livello, prevede un

percorso di formazione multidisciplinare articolato su cinque moduli: nuovo contesto energetico, efficienza energetica negli usi finali; valutazione di impatto ambientale; produzione decentrata di energia; programmazione energetica decentrata e un periodo di tre mesi di stage presso qualificate realtà imprenditoriali, scientifiche e istituzionali.

L'UE PREMIA VARESE LIGURE

Il Comune di Varese Ligure (La Spezia) ha vinto il premio "The best 100% Communities Renewable Energy Partnership Rural Communities" assegnato dall'UE il 18 gennaio a Berlino in chiusura della campagna *Take-Off*.

La campagna *Take-Off* è parte integrante delle strategie comunitarie per la diffusione in Europa delle fonti di energia rinnovabili (FER). Attraverso un sistema di partnership volontaria, autorità locali e nazionali, associazioni ed organizzazioni possono aderire alla campagna con i propri programmi di sviluppo delle FER. Tra le varie iniziative della campagna *Take-Off* c'è l'istituzione di alcuni premi per le migliori partnership in diverse categorie.

Varese Ligure, primo Comune in Europa ad ottenere la certificazione ambientale 14001 e l'EMAS, si è aggiudicato il premio dell'UE per aver attuato un progetto di sviluppo sostenibile che, oltre alla produzione di energia da fonti rinnovabili, mirava anche al risparmio e al coinvolgimento di tutti gli attori del territorio: scuole, agricoltori, cooperative, commercianti, associazioni.

In particolare, Varese Ligure ha installato solo nel settore pubbli-

co due generatori eolici (per 4 milioni di kW) e ne installerà presto altri due (per ulteriori 2 milioni di kW).

Queste installazioni permettono una riduzione complessiva delle emissioni di CO₂ pari a circa 20 mila kg/anno, equivalente allo 0,05% delle emissioni regionali annuali totali di CO₂.

IL FUTURO A IDROGENO

Nell'ambito della mostra "Euroapolis" (4-7 febbraio), si sono tenuti a Bologna il secondo Salone "Idrogeno & Fuel Cells" e la "2^a Conferenza nazionale", che costituiscono l'appuntamento italiano per il mondo dell'idrogeno e delle celle a combustibile.

Importanti aziende italiane ed estere, operanti nel settore erano presenti per mostrare le ultime novità in fatto di produzione, stoccaggio e distribuzione di idrogeno, le tecnologie produttive e i materiali per l'assemblaggio delle celle a combustibile, le nuove celle e le loro applicazioni, i sistemi integrati e i servizi.

Nel proprio spazio "Il futuro a idrogeno senza CO₂", l'ENEA ha fornito una visione d'insieme attraverso l'esposizione di componenti di *stack* di celle a combustibile di varia potenza sviluppati dall'Ente e prototipi di generatore elettrico portatile di vario tipo dimostrativi della tecnologia della cella a combustibile e che si possono anche installare su biciclette elettriche a "pedalata assistita".

Un *info-point* da due postazioni interattive ha fornito risposte agli esperti ENEA sulle principali questioni sia legate all'idrogeno (produzione, utilizzo, pericolosità) che alle celle a combustibile (vantaggi e settori di utilizzo).

LETTURE

Metodo CLEAR

Solar Energy Houses



Les Eco Maires (i sindaci "verdi"), nell'ambito di un progetto da circa due mila euro cofinanziato al 50% da LIFE Ambiente. Tutti i Partner hanno approvato in Giunta e in Consiglio un proprio Bilancio ambientale sulla base di un modello comune.

Il volume riassume in sintesi il lavoro svolto (per la documentazione completa di tutte le attività è stato realizzato un CDROM, disponibile insieme al volume), ma soprattutto lancia una proposta a tutti gli enti locali che volessero impegnarsi in una prospettiva analoga. Nel testo il Metodo CLEAR è contenuto solo nelle 45 pagine che compongono un piccolo manuale, volutamente stringato per non indurre nella tentazione di applicare alla lettera le singole soluzioni descritte. Infatti, uno dei risultati più evidenti di questa sperimentazione è che non esiste una formula valida per tutti i casi e capace di generare da sola una politica ambientale più sostenibile.

L'articolazione del sistema ambientale, la complessità dei nessi e delle relazioni causali che si dispongono diversamente in ogni area e in ogni territorio, in rapporto a differenti condizioni naturali e assetti politici, l'insieme di queste variabili impone obbligatoriamente che ogni realtà locale si renda interprete del proprio, specifico progetto.

Il volume è disponibile sul sito www.clear-life.it

SOLAR ENERGY HOUSES Strategies, technologies and examples

Seconda edizione

A cura di Anne-Grete Hestnes, S. Robert Hastings, Bjarne Saxhof James & James (Science publishers) Ltd, maggio 2003, pagine 202, £ 45, \$ 70

Le strategie solari attive e passi-

ve, l'adozione di misure per la conservazione dell'energia e l'integrazione di nuovi materiali e tecnologie potrebbero, secondo gli autori, condurre a una riduzione del consumo di energia nelle abitazioni fino al 75-90%.

L'obiettivo del *Task 13* del Programma Raffrescamento e Riscaldamento Solare dell'IEA (International Energy Agency - organismo dell'OCSE) è quello di far progredire le tecnologie di costruzione e di dimostrare tale potenziale progettando e costruendo edifici che soddisfino gli obiettivi di basso consumo di energia mantenendo al contempo un buon clima all'interno delle abitazioni. Questa edizione nuova e riveduta del volume presenta le conclusioni degli esperti del *Task 13* e comprende ora i risultati del programma di monitoraggio, condotto per determinare l'efficacia delle tecniche e delle strategie adottate in 15 differenti casi sperimentali, realizzate in paesi caratterizzati da climi molto differenti.

Sono stati valutati i materiali innovativi, i sistemi, le componenti e le tecnologie utilizzate; nelle abitazioni sono state sperimentate vetrate avanzate, isolamento trasparente, materiali per l'accumulo termico, sistemi meccanici integrati, sistemi di controllo intelligente, collettori solari ad acqua e sistemi fotovoltaici.

Sono state misurate le prestazioni energetiche dei componenti e dello stesso edificio, congiuntamente al comfort termico e ai problemi degli utenti.

Il volume illustra in modo chiaro l'applicazione pratica delle strategie e delle tecnologie e indica i loro punti di forza e debolezza. Il libro è rivolto agli architetti e ai progettisti che lavorano a progetti di abitazioni a basso consumo di energia o che studiano le applicazioni disponibili per raggiungere questo scopo.

METODO CLEAR Dalla contabilità alla politica aziendale

Edizioni Ambiente,
settembre 2003, pagine 176

Il metodo CLEAR (City and Local Environmental Accounting and Reporting) è un metodo concreto e sperimentato che si basa sull'adozione di un sistema di contabilità ambientale costruito per fornire un supporto operativo agli amministratori e per indurre un processo di responsabilizzazione e trasparenza rispetto alle politiche adottate.

Il Metodo CLEAR è stato messo a punto attraverso due anni di lavoro coordinato di 18 partner, con la Regione Emilia Romagna e l'associazione internazionale