

Bimestrale dell'ENEA
Anno 55, gennaio-febbraio 2009

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

Direttore responsabile
Flavio Giovanni Conti

Comitato tecnico-scientifico
Osvaldo Aronica, Paola Batistoni, Vincenzo Di Majo,
Stefano Giammartini, Massimo Maffucci, Emilio Santoro

Responsabile editoriale
Diana Savelli

Coordinamento editoriale
Alida La Croce
ENEA - Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
Tel. 06-36272401 - e-mail: alida.lacroce@enea.it

Collaboratori
Paola Molinas, Valeria Trisoglio

Promozione
Paola Crocianelli

Traduzioni
Carla Costigliola

Progetto grafico
Bruno Giovannetti, Cristina Lanari



Lo staff della rivista

da sinistra: Bruno Giovannetti, Vincenzo Di Majo, Paola Molinas, Flavio G. Conti, Emilio Santoro, Paola Batistoni, Osvaldo Aronica, Stefano Giammartini, Diana Savelli, Massimo Maffucci, Alida La Croce
(foto di Roberta Francescone)

Stampa

Fabiano Group srl, Regione San Giovanni, 40 - 14053 Canelli (AT)

Registrazione

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

Pubblicità

Fabiano Group srl, Regione San Giovanni, 40 - 14053 Canelli (AT)
Tel. 0141 8278202 - Fax 0141 8278300 - e-mail: info@fabianogroup.com

Abbonamento annuale

Italia € 21,00 + € 8,00 (spese di spedizione), Estero € 21,00 + € 15,00 (spese di spedizione);
una copia € 4,20 - C.C.P. n. 12439121 intestato a Fabiano Group srl
Tel. 0141 8278234 - Fax 0141 8278300 - e-mail: ordini@fabianogroup.com

Finito di stampare nel mese di marzo 2009



Il dibattito sul tema della produzione di energia dall'atomo è tornato alla ribalta negli ultimi mesi stimolato dalla instabilità dei prezzi dei prodotti petroliferi, dalle incertezze sulla sicurezza degli approvvigionamenti energetici, e più in generale dalla crescente domanda di energia e dai problemi posti dai cambiamenti climatici.

Quando si parla di energia nucleare immediatamente si contrappongono due schieramenti: quello favorevole e quello contrario all'utilizzo di tale fonte energetica. Il nostro intento non è quello di sostenere l'una o l'altra tesi, ma quello di sottolineare l'importanza della ricerca, in particolare nel campo della fusione, per sviluppare le tecnologie necessarie a garantire un uso sicuro di tale fonte. Si tratta di scelte che richiedono forti investimenti, che possono dare risultati nel medio-lungo periodo e che proprio per questo vanno attuate con coerenze e continuità.

In questo numero della Rivista abbiamo posto l'attenzione sul tema della fusione nucleare, cercando di fornire gli elementi utili alla comprensione delle tecnologie e delle politiche attuate dall'Unione Europea, che sicuramente contribuiranno a favorire un dibattito più sereno e costruttivo di quanto solitamente avviene.

Poco più di cinquanta anni fa veniva firmato il Trattato che istituiva la Comunità Europea dell'Energia Atomica (Euratom) nell'ambito del quale è stata sviluppata l'industria nucleare europea per l'utilizzo pacifico e sicuro dell'energia nucleare fra gli Stati membri. Lo stesso trattato ha avuto anche il merito di avviare la ricerca nel campo della fusione nucleare che oggi vede impegnati, in un network di 26 associazioni, decine di istituti nazionali e 2.500 ricercatori. Grazie a questo impegno è stato possibile dare vita a JET, il progetto sulla fusione più importante al mondo, i cui aspetti tecnologici innovativi risultano oggi di grande rilevanza per il progetto ITER, un reattore a fusione sperimentale che produrrà 500 MW di potenza da fusione, al quale partecipano i principali paesi industrializzati (inclusi Cina, India e Corea).

Sulla fusione nucleare ospitiamo cinque contributi. Il primo è un'intervista a Octavi Quintana Trias sulle politiche dell'Unione Europea, ed in particolare di Euratom; nel secondo Paola Batistoni e Aldo Pizzuto, dell'ENEA, illustrano gli aspetti tecnologici e scientifici di ITER, sottolineando il ruolo che l'Italia può svolgere nel progetto; nel terzo Guido Possa sottolinea da un lato i grandi passi in avanti che il progetto comporta, dall'altro ne evidenzia alcuni limiti; nel quarto Angelo Aiaraghi pone l'accento sull'importanza della collaborazione tra mondo della ricerca e mondo dell'industria per la buona riuscita del progetto ITER; nel quinto infine Sergio Martellucci porta la testimonianza di chi, in prima persona, ha vissuto le varie fasi del progresso nella ricerca sulla fusione in Italia.

Nell'articolo di apertura Corrado Clini e Mara Angeloni illustrano i risultati dell'accordo UE sul clima dello scorso dicembre e in particolare quello sulla revisione del sistema comunitario per lo scambio di quote di emissione di CO₂ e quello sulla ripartizione tra gli Stati membri dell'obiettivo comunitario di riduzione delle emissioni di gas serra. Nell'articolo di Giannantoni e Zoli viene presentato un metodo di valutazione degli investimenti energetico-economico-ambientali particolarmente utile per le tecnologie a idrogeno, mentre in quello di Di Francia, Burrasca, De Vito e Massera si illustra il funzionamento e l'uso dei nasi elettronici nei diversi settori, tra cui quello del monitoraggio antisismico realizzato da ENEA.

Il Direttore Responsabile
Flavio Giovanni Conti

primo piano

8

IL PACCHETTO "CLIMA-ENERGIA" DELL'UNIONE EUROPEA

THE EU "CLIMATE-ENERGY" PACKAGE

Corrado Clini, Mara Angeloni

l'intervista

18

INTERVISTA A OCTAVI QUINTANA TRIAS

INTERVIEW WITH OCTAVI QUINTANA TRIAS

Paola Batistoni

riflettore su

24

ENERGIA DALLA FUSIONE MAGNETICA. IL PROGETTO ITER

MAGNETIC FUSION ENERGY. THE ITER PROJECT

Paola Batistoni, Aldo Pizzuto

46

ITER: UN GRANDE PASSO AVANTI (MA CON ALCUNI LIMITI)

ITER: A GREAT STEP AHEAD (BUT WITH SOME LIMITS)

Guido Possa

51

FUSIONE E INDUSTRIA

NUCLEAR FUSION AND INDUSTRY

Angelo Airaghi

54

LA FUSIONE NUCLEARE IN ITALIA: LA TESTIMONIANZA DI UN PIONIERE

NUCLEAR FUSION IN ITALY: A PIONEER'S TESTIMONY

Sergio Martellucci

studi & ricerche

64

BENEFICI ECONOMICI E BENEFICI ORDINALI DELLE TECNOLOGIE ENERGETICHE A IDROGENO

ECONOMIC AND ORDINAL BENEFITS OF HYDROGEN ENERGY TECHNOLOGIES

Corrado Giannantoni, Mariangela Zoli

76

NASI ELETTRONICI

ELECTRONIC NOSES

Girolamo Di Francia, Gianbattista Burrasca, Saverio De Vito, Ettore Massera

cronache

90

DAL MONDO, DALL'UNIONE EUROPEA, DALL'ITALIA, DALL'ENEA, EVENTI, LETTURE

- | | |
|---------------------|---|
| dal Mondo | <ul style="list-style-type: none">• World Energy Outlook 2008 90 |
| dall'Unione Europea | <ul style="list-style-type: none">• Politica integrata sul cambiamento climatico 91• Energia: interconnessioni e rigassificatori 91 |
| dall'Italia | <ul style="list-style-type: none">• L'Italia aderisce a IRENA 92• Sicenea: il sole nel futuro della Sicilia 92 |
| dall'ENEA | <ul style="list-style-type: none">• Bicentenario del padre dell'evoluzionismo 93• Prototipo vettura Urb-E 93 |
| Eventi | <ul style="list-style-type: none">• EWEC (European Wind Energy Conference) 2009 94• World Energy Summit ad Abu Dhabi 94 |
| Letture | <ul style="list-style-type: none">• Impianti nucleari 95• Nuvole e sciacquoni. Come usare meglio l'acqua in casa e in città 96• Sei gradi 96 |



Angelo Airaghi

Senior Adviser Finmeccanica S.p.A.

pag. 51



Corrado Giannantoni

ENEA, Dipartimento Tecnologie per l'Energia, le Fonti Rinnovabili e il Risparmio Energetico

pag. 64



Paola Batistoni

ENEA, Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare

pag. 24



Sergio Martellucci

Ordinario di Fisica, Facoltà di Ingegneria di Roma Tor Vergata
Presidente del Consiglio Scientifico dell'ENEA

pag. 54



Gianbattista Burrasca

ENEA, Dipartimento Tecnologie Fisiche e Nuovi Materiali

pag. 76



Ettore Massera

ENEA, Dipartimento Tecnologie Fisiche e Nuovi Materiali

pag. 76



Corrado Clini

Direttore Generale, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare

pag. 8



Aldo Pizzuto

ENEA, Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare

pag. 24



Saverio De Vito

ENEA, Dipartimento Tecnologie Fisiche e Nuovi Materiali

pag. 76



Guido Possa

Presidente della 7ª Commissione permanente (Istruzione pubblica, beni culturali) del Senato

pag. 46



Girolamo Di Francia

ENEA, Dipartimento Tecnologie Fisiche e Nuovi Materiali

pag. 76



Mariangela Zoli

Università di Roma Tor Vergata e Università di Cassino

pag. 64

ENERGIA DA FUSIONE

Stato dell'arte e prospettive



Autori

P. Batistoni, A. Coletti, A. della Corte,
F. Gnesotto, E. Lazzaro, P. Martin,
A. Pizzuto, I. Ricapito, F. Rosatelli,
G. Rostagni, G.P. Sanguinetti, C. Strangio,
A. Tuccillo, G. Vlad

Editore: ENEA

pp. 98, 2008

ISBN: 88-8286-177-5

Prezzo: 15,00 euro

Per acquistare il volume rivolgersi a:
Fabiano Group srl
tel. 0141 8278234
fax 0141 8278300
e-mail: ordini@fabianogroup.com

La ricerca sulla fusione nucleare è condotta in molti paesi con l'obiettivo di realizzare una fonte di energia praticamente inesauribile, rispettosa dell'ambiente, sicura ed economicamente competitiva. L'indubbio valore strategico di questa impresa risiede nei potenziali vantaggi che presenta in termini di disponibilità delle risorse, di riduzione dell'uso di combustibili fossili e di sicurezza dell'approvvigionamento energetico.

Le previsioni sull'evoluzione del panorama energetico attuale, insieme all'urgenza di adottare tecnologie energetiche a ridotte emissioni di gas serra, rafforzano l'interesse sulla fusione e pongono la domanda sui tempi in cui essa potrà diventare disponibile.

Lo straordinario complesso di nuove acquisizioni scientifiche, tecnologiche e sperimentali sin qui ottenute ha portato alla creazione di una nuova disciplina scientifica (la fisica del plasma) e allo sviluppo di molte nuove tecnologie che rendono possibile, oggi, la costruzione di ITER, un reattore sperimentale a confinamento magnetico realizzato nell'ambito di una vasta collaborazione internazionale tra Cina, Corea, Giappone, India, Russia, Stati Uniti e Unione Europea. ITER fornirà la dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnologica della fusione ed è stato progettato in modo da poter costituire l'unico passo intermedio prima della realizzazione di un reattore dimostrativo in grado di generare energia elettrica da fusione (DEMO). Analoghi progressi sono riportati nella linea del confinamento inerziale, con la proposta dell'impianto dimostrativo HiPER.

Il rapporto illustra lo stato attuale delle ricerche e gli ulteriori passi necessari (Roadmap) per il raggiungimento dell'obiettivo della produzione di energia da fusione, con particolare riguardo alle attività e al ruolo dell'Italia, da sempre protagonista del programma europeo sulla fusione.

Il pacchetto "clima-energia" dell'Unione Europea

Corrado Clini*
Mara Angeloni**

Ministero dell'Ambiente e della Tutela
del Territorio e del Mare

* Direttore Generale

** Unità cambiamenti climatici

Tra i provvedimenti sul clima approvati dal Parlamento Europeo a dicembre, meritano attenzione l'accordo raggiunto sulla revisione del sistema comunitario per lo scambio delle quote di emissione di CO₂ (ETS) e quello per ripartire tra gli Stati membri l'obiettivo comunitario di riduzione delle emissioni di gas serra per i settori non regolati dall'ETS

The EU "Climate-Energy" Package

Among the climate measures approved by the European Parliament last December, particular attention deserve the agreement on the EU CO₂ Emission Trading Scheme (ETS), as well as the Effort-Sharing Decision, ensuring that Member States contribute to the EU objective of reducing greenhouse gas emissions in non-ETS sectors

Il Protocollo di Kyoto rappresenta al momento l'unico trattato internazionale globale finalizzato a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra (anidride carbonica, protossido di azoto, metano, gli idrofluorocarburi, perfluorocarburi e esafluoruro di zolfo) individuati come i maggiori responsabili dell'aumento della temperatura del pianeta ("cambiamenti climatici"). Il Protocollo di Kyoto è entrato in vigore nel febbraio 2005 e regola tali emissioni per il periodo 2008-2012.

Sia a livello internazionale sia a livello comunitario è stata riconosciuta la necessità di regolamentare le emissioni di gas ad effetto serra anche nel periodo post-2012 in ragione del fatto che le riduzioni ottenibili con l'attuazione del Protocollo di Kyoto non sono sufficienti a contrastare efficacemente il fenomeno dei cambiamenti climatici.

Il negoziato per la definizione di un accordo internazionale per il periodo post-2012 è in una fase intermedia e l'obiettivo politico è di giungere all'accordo entro dicembre 2009 a Copenaghen dove si svolgerà la 15ª sessione della Conferenza delle Parti della Convenzione sui Cambiamenti Climatici (COP15) e la quinta Conferenza delle Parti del Protocollo di Kyoto (COP5). L'Unione Europea (UE), che storicamente ha assunto un atteggiamento pro-attivo nella lotta ai cambiamenti climatici, ha deciso di procedere unilateralmente alla regolamentazione dei gas ad effetto serra per il periodo 2013-2020. Più precisamente il Consiglio Europeo di primavera del 2007 ha riconosciuto la necessità di avviare una transizione verso un'economia a basso contenuto di carbonio attraverso un approccio integrato che prevede politiche energetiche e politiche per la lotta ai cam-

biamenti climatici. A tale riguardo il Consiglio si è impegnato a raggiungere entro il 2020 i seguenti obiettivi energetici e di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra:

- obiettivo unilaterale di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra del 20% rispetto ai livelli del 1990, da innalzare al 30% nel caso di raggiungimento di un accordo globale per il periodo post-2012;
- riduzione dei consumi energetici del 20% rispetto allo scenario *business as usual*;
- produzione di energia da fonti rinnovabili pari al 20% dei consumi energetici della UE;
- uso dei biocombustibili per il 10% della quantità di combustibile utilizzato nel settore dei trasporti.

In aggiunta, il Consiglio Europeo di primavera del 2007 ha stabilito la necessità di sviluppare un quadro di riferimento tecnico, economico, normativo al fine di diffondere le tecnologie per la cattura e il sequestro del carbonio entro il 2020.

A seguito delle decisioni del Consiglio Europeo, il 23 gennaio 2008 la Commissione Europea ha approvato un "pacchetto" di proposte legislative che comprende:

- una proposta di revisione del sistema comunitario per lo scambio delle quote di emissione di CO₂ (ETS);
- una proposta di decisione per ripartire tra gli Stati membri l'obiettivo comunitario di riduzione delle emissioni di gas serra per i settori non regolati dall'ETS (Decisione "effort sharing");
- una proposta di direttiva per la creazione di un quadro di riferimento per l'utilizzo delle tecnologie di cattura e sequestro del carbonio;
- una proposta di direttiva per promuov-

vere l'uso di energia prodotta attraverso fonti rinnovabili.

Il "pacchetto" contiene anche una Comunicazione della Commissione al Consiglio Europeo e al Parlamento a sostegno della realizzazione di progetti dimostrativi per l'utilizzo sostenibile dei combustibili fossili e la revisione delle linee guida sugli aiuti di Stato per la protezione dell'ambiente.

L'approvazione del "pacchetto" è avvenuta in procedura di co-decisione con il Parlamento Europeo che, con il voto positivo espresso nella riunione plenaria del 17 dicembre 2008, ne ha consentito l'approvazione in prima lettura.

Il presente articolo si concentra sui principali contenuti dell'accordo e le principali differenze rispetto alla proposta iniziale della Commissione con riferimento a due dei quattro provvedimenti legislativi previsti dal "pacchetto", ossia la revisione del sistema comunitario per lo scambio delle quote di emissione di CO₂ (ETS) e la decisione per ripartire tra gli Stati membri l'obiettivo comunitario di riduzione delle emissioni di gas serra per i settori non regolati dall'ETS.

Occorre infine evidenziare che contestualmente all'approvazione del "pacchetto" il Consiglio Europeo nelle conclusioni dell'11-12 dicembre 2008 ha stabilito che la Commissione presenterà al Consiglio Europeo di marzo 2010 un'analisi dettagliata dei risultati della Conferenza di Copenaghen al fine di una valutazione della situazione.

La revisione del sistema comunitario per lo scambio delle quote di emissione di CO₂ (ETS)

L'esigenza di procedere alla revisione dell'ETS è scaturita dalla constatazione che l'attuale sistema ha impedito di ottenere i risultati ambientali sperati: infatti la sovra-assegnazione di quote da parte di alcuni Stati membri ha provocato un crollo dei prezzi della CO₂ annullando nella sostanza qualsiasi incentivo alla modernizzazione degli impianti che il sistema avrebbe dovuto creare¹. La revisione dell'ETS entrerà in vigore a partire dal 2013.

Campo di applicazione

La revisione dell'ETS ha definito in maniera più puntuale il campo di applicazione per quanto riguarda gli impianti di combustione ed ha esteso il sistema ad altri gas diversi dalla CO₂².

La revisione, inoltre, prevede la possibilità di escludere i piccoli impianti (ossia gli impianti con emissioni annue inferiori a 25.000 tCO₂ e, laddove sono svolte attività di combustione, con potenza termica nominale inferiore ai 35 MW), purché le emissioni di tali impianti siano regolamentate con misure che comportano uno sforzo di riduzione "equivalente" a quello che sarebbe stato loro imposto se fossero rimasti all'interno dell'ETS.

La possibilità di escludere dal sistema i piccoli impianti era prevista nella proposta della Commissione, ma limitatamente agli impianti di combustione. L'Italia ed altri

1. Il sistema incentiva l'adozione delle tecnologie a più basso contenuto di carbonio nella misura in cui il valore della quota sia sufficientemente elevato (il prezzo della quota è determinato dal mercato sulla base dell'equilibrio tra domanda e offerta): infatti maggiori saranno i costi che l'operatore dovrà sostenere per acquistare le quote necessarie ad adempiere al proprio obbligo di restituzione, maggiore sarà la propensione dell'operatore ad adottare tecnologie a basso contenuto di carbonio.
2. Più precisamente sono inclusi nel campo di applicazione le emissioni di CO₂ derivanti dagli impianti di combustione nell'industria chimica, petrolchimica, dell'ammoniaca, dell'alluminio, tutte le emissioni di gas serra dagli impianti per la cattura, trasporto e stoccaggio geologico del carbonio, le emissioni di N₂O derivanti dalla produzione di acido nitrico, adipico e gliossilico e le emissioni di PFC dell'industria dell'alluminio.

Stati membri nel corso del negoziato hanno sostenuto che l'esclusione dovesse riguardare tutti gli impianti al di sotto del limite proposto e non solo quelli di combustione in ragione del fatto che i costi di gestione (motivazione che ha indotto la Commissione Europea ad introdurre tale possibilità di esclusione) graverebbero allo stesso modo anche sui primi. Il compromesso finale, che ha recepito tale richiesta, prevede inoltre che per gli impianti caratterizzati nel periodo 2008-2010 da emissioni inferiori alle 5.000 tCO₂/anno, è possibile stabilire regole semplificate per il monitoraggio, la rendicontazione e la verifica, possibilità introdotta su esplicita richiesta dell'Italia.

Contributo alla mitigazione dei cambiamenti climatici

La revisione stabilisce che, al 2020, a livello Comunitario, i settori regolati dall'ETS riducano le emissioni di gas ad effetto serra del 21% rispetto ai livelli del 2005 (contro il -10% richiesto ai settori non regolati dall'ETS). La scelta di assumere quale anno di riferimento il 2005 (anziché il 1990), è motivabile, secondo la Commissione, dal fatto che il 2005 è l'anno più recente per il quale sono disponibili dati di emissione verificati.

Più precisamente il numero massimo di quote da assegnare annualmente a livello comunitario (cap totale), a partire dal 2013 è determinato applicando annualmente a partire dal 2010 una riduzione dell'1,74% all'assegnazione media annua relativa al periodo 2008-2012. La direttiva stabilisce inoltre che la riduzione del cap totale prosegua anche dopo il 2020 sulla base o dello stesso fattore o di un fattore rivisto. La revisione dovrà essere effettuata

in procedura di co-decisione (come richiesto dall'Italia) entro il 2025 (e non dalla sola Commissione come previsto nella proposta iniziale).

Nel caso di raggiungimento di un accordo globale, il contributo alla mitigazione per i settori regolati dall'ETS sarà adeguato attraverso procedura di co-decisione (come richiesto dall'Italia) in relazione all'impegno sottoscritto dalla Comunità nell'ambito dell'accordo³. Al contrario la proposta della Commissione prevedeva che nel caso di raggiungimento di un accordo globale, lo sforzo di riduzione per i settori regolati dall'ETS sarebbe stato adeguato secondo un meccanismo automatico così da tener conto dell'impegno di riduzione assunto dalla Comunità nell'ambito dell'accordo (ipotizzando che il potenziale di riduzione per i settori ETS e non ETS fosse uguale a quello assunto nel caso di mancato accordo).

In merito alla tempistica per l'adeguamento, il compromesso prevede che tale adeguamento entri in vigore al momento della ratifica dell'accordo globale da parte della Comunità (e non al momento dell'entrata in vigore dell'accordo globale come richiesto dall'Italia in considerazione del fatto che l'entrata in vigore dell'accordo potrebbe avvenire anche molto tempo dopo la sua ratifica da parte della Comunità). Tuttavia, in risposta alle preoccupazioni avanzate dal nostro Paese, è prevista la possibilità di dare attuazione a misure transitorie e sospensive in attesa dell'entrata in vigore del trattato.

Metodo di assegnazione delle quote

Le quote saranno assegnate mediante asta e più precisamente:

- per gli impianti termoelettrici e per gli

3. -30% rispetto ai livelli del 1990 da raggiungersi entro il 2020 secondo quanto stabilito dal Consiglio Europeo del marzo 2007.

impianti per la cattura e lo stoccaggio del carbonio l'assegnazione sarà totalmente a titolo oneroso (*"full auctioning"*), ad eccezione degli impianti di cogenerazione che possono ricevere quote gratuite per l'energia termica destinata al teleriscaldamento o ad impianti industriali e degli impianti di produzione di energia elettrica che utilizzano gas residui di acciaieria la cui produzione risulta inevitabile. Sono previste misure transitorie per gli impianti termoelettrici situati in quei paesi che:

- nel 2007 non erano connessi alla rete gestita dalla Union for the Coordination of Transmission of Electricity o che erano connessi con una sola linea di potenza inferiore ai 400 MW, oppure che
- nel 2006 hanno prodotto più del 30% di elettricità con un unico combustibile fossile e che erano caratterizzati da un PIL pro capite non superiore al 50% della media UE.

Tali misure transitorie prevedono che agli impianti termoelettrici – nel 2013 – possano essere assegnate quote gratuite per una quantità pari al 70% delle emissioni verificate nel periodo 2005-2007 e che tale percentuale sia ridotta progressivamente fino a raggiungere lo 0% nel 2020.

La proposta della Commissione escludeva sia la possibilità di assegnare gratuitamente quote agli impianti che utilizzano gas residui di acciaieria sia la possibilità di prevedere misure transitorie per gli impianti termoelettrici (queste ultime introdotte su pressante richiesta della Polonia e di altri Stati membri di recente accessione);

- per gli impianti dei settori diversi dal termoelettrico, è prevista una transizione graduale verso il *"full auctioning"*; in particolare il primo anno sarà assegnato gratuitamente l'80% delle quote spettanti, negli anni successivi la percentua-

le di assegnazione gratuita sarà ridotta linearmente fino ad arrivare al 30% nel 2020 (il che implica un'assegnazione gratuita, come media del periodo, pari al 55% delle quote spettanti) contro lo 0% previsto nella proposta iniziale della Commissione (che avrebbe implicato un'assegnazione gratuita, come media del periodo, pari al 40% delle quote spettanti). L'innalzamento della percentuale di quote da assegnare gratuitamente risponde alla richiesta dell'Italia e di altri Stati membri di prevedere una più graduale transizione verso il *"full auctioning"*.

Misure a supporto dei settori esposti al "carbon leakage"

Nel caso di mancato raggiungimento di un accordo per il periodo post-2012, saranno assunte adeguate iniziative per evitare eccessive penalizzazioni per quei settori maggiormente esposti alla concorrenza internazionale (settori esposti al *"carbon leakage"*). La proposta iniziale lasciava alla Commissione il compito di stabilire quali settori sarebbero stati considerati a rischio, nonché la quantità di quote che sarebbe stata ad essi assegnata gratuitamente (con conseguenze negative sia in termini di mancanza di certezze per le imprese sia di mancato controllo del processo da parte degli Stati membri). Su richiesta dell'Italia e di altri Stati membri il compromesso raggiunto:

- stabilisce che i settori esposti a rischio "significativo" di *carbon leakage* beneficiano di un'assegnazione completamente gratuita (100% delle quote spettanti);
- prevede criteri quantitativi oggettivi per valutare se un settore rientra tra quelli esposti a rischio "significativo". In particolare un settore è considerato esposto a rischio "significativo":
 - se i costi aggiuntivi (diretti e indiretti) dovuti all'attuazione della direttiva

comportano un incremento del costo di produzione (in proporzione al valore aggiunto) di almeno il 5% e se la "trade intensity" (calcolata come la somma delle esportazioni verso paesi non UE e delle importazioni da paesi non UE rapportata alla somma della produzione e delle importazioni da paesi non UE), è superiore al 10%, oppure

- se i costi aggiuntivi (diretti e indiretti) dovuti all'attuazione della direttiva comportano un incremento del costo di produzione (in proporzione al valore aggiunto) di almeno il 30%, oppure
- se la "trade intensity" (calcolata come la somma delle esportazioni verso paesi non UE e delle importazioni da paesi non UE rapportata alla somma della produzione e delle importazioni da paesi non UE), è superiore al 30% (quest'ultimo indicatore introdotto su esplicita richiesta dell'Italia in considerazione del fatto che la posizione geografica del nostro Paese e le tipologie di produzione possono rendere i settori italiani maggiormente vulnerabili alla concorrenza internazionale rispetto a quelli europei);
- da indicazioni sul livello di aggregazione dei settori rispetto al quale valutare il rischio (NACE 3, con possibilità di ricorrere al NACE 4);
- da maggiori certezze per i settori esposti al "carbon leakage", dal momento che per tali settori la revisione dello "status di rischio" avviene ogni cinque anni;
- introduce la possibilità per i settori che sulla base dei criteri quantitativi non risultano esposti al rischio, di rivedere lo "status di rischio" sulla base di criteri qualitativi individuati nella direttiva (caratteristiche di mercato, profitto – quale indicatore della capacità di investire nel lungo periodo o di de-localizzare, possi-

bilità di ridurre le emissioni o i consumi di elettricità attraverso il ricorso alle tecniche più efficienti);

- stabilisce che l'elenco dei settori esposti al rischio sia determinato entro dicembre 2009 e a seguito di una discussione nell'ambito del Consiglio Europeo riconoscendo così la rilevanza del "carbon leakage" e la necessità di un coinvolgimento al più alto livello dei Governi nella determinazione dei settori esposti.

Gestione delle aste

L'asta sarà gestita a livello nazionale con regole armonizzate che la Commissione dovrà stabilire attraverso un Regolamento, tuttavia rispetto alla proposta iniziale della Commissione il compromesso raggiunto introduce dei criteri finalizzati ad assicurare la trasparenza e l'equità di accesso sulla base dei quali sviluppare il futuro Regolamento.

La quantità totale di quote da mettere all'asta sarà ripartita tra gli Stati membri come segue:

- l'88% della quantità totale di quote da mettere all'asta sarà distribuita in proporzione alle emissioni del 2005 o della media 2005-2007 (da scegliere tra il valore più elevato);
- il 10% della quantità totale di quote da mettere all'asta sarà redistribuito dagli Stati membri con un reddito medio pro capite superiore del 20% rispetto alla media UE ai paesi con reddito medio pro capite inferiore alla media (la redistribuzione è più elevata per quei paesi con reddito pro capite basso e prospettive di crescita elevate);
- il 2% della quantità totale di quote da mettere all'asta sarà redistribuita tra gli Stati membri le cui emissioni nel 2005 erano almeno del 20% al di sotto dei livelli dell'anno assunto quale anno base nell'ambito del Protocollo di Kyoto.

La direttiva recepisce il principio secondo

il quale i proventi derivanti dalle aste dovrebbero essere destinati ad interventi di mitigazione dei/adattamenti ai cambiamenti climatici (“*earmarking*”), senza tuttavia limitare la sovranità nazionale in materia di bilancio.

Uso dei crediti derivanti dalla realizzazione di progetti nei Paesi terzi

La proposta della Commissione prevedeva che fino al raggiungimento dell'accordo post-2012, gli impianti regolati dall'ETS avrebbero potuto utilizzare crediti di emissione generati dalla realizzazione di progetti nei Paesi in via di sviluppo/economia in transizione, per una quantità non superiore al “residuo” derivante dal periodo 2008-2012 (ossia la quantità di crediti non utilizzata nel periodo 2008-2012) con alcune limitazioni in termini di “tipologie” di crediti utilizzabili. A seguito delle richieste dell'Italia e di altri Stati membri il compromesso finale prevede un maggiore utilizzo dei meccanismi flessibili. Più precisamente, nel periodo 2008-2020, gli impianti esistenti regolati dall'ETS potranno scegliere di utilizzare crediti di emissione generati dalla realizzazione di progetti nei Paesi in via di sviluppo/economia in transizione, in quantità pari:

- a. o al “residuo” derivante dal periodo 2008-2012,
- b. o ad una certa percentuale dell'assegnazione 2008-2012. Tale percentuale non potrà essere inferiore all'11%.

La quantità totale di crediti consentita non deve superare il 50% dello sforzo di riduzione per il periodo 2008-2020 (principio di complementarità). L'individuazione della percentuale di cui al punto b. dovrebbe essere effettuata in modo tale da mitigare le distorsioni derivanti dalla mancanza di armonizzazione nell'uso dei crediti per il periodo 2008-2012.

Gli impianti nuovi entranti possono usare

crediti in misura pari al 4,5% delle emissioni verificate nel periodo 2013-2020, mentre il settore dell'aviazione può usare crediti in misura pari all'1,5%.

A seguito del raggiungimento dell'accordo post-2012, il limite all'utilizzo dei crediti sarà rivisto sulla base della procedura di co-decisione (e non, come previsto nella proposta iniziale della Commissione, sulla base di un adeguamento automatico che avrebbe consentito un ulteriore uso di crediti per una quantità pari al 50% dello sforzo di riduzione addizionale che i settori ETS, a livello comunitario, dovranno sostenere a seguito della sottoscrizione dell'accordo). Il riconoscimento dei crediti generati nell'ambito del futuro regime per la lotta ai cambiamenti climatici non sarà automatico, ma regolamentato attraverso apposito atto della Commissione.

Flessibilità tra i settori ETS e non ETS

La proposta della Commissione prevedeva la possibilità di rilasciare quote a seguito della realizzazione di progetti che riducono le emissioni in settori non regolati dall'ETS, cosicché gli operatori che hanno realizzato tali progetti possono vendere le quote agli impianti regolati dall'ETS.

L'Italia aveva una riserva negativa sull'intero articolo poiché qualora gli obiettivi di riduzione fissati per i settori non ETS non fossero determinati con un criterio di equità (rispetto al potenziale di riduzione di ciascun paese), la clausola introdotta avrebbe avvantaggiato le imprese degli Stati membri caratterizzati da obiettivi di riduzione più “blandi” con impatti sulla competitività difficilmente valutabili.

Il compromesso raggiunto chiarisce che la realizzazione di progetti da parte di un operatore ETS in un settore non ETS, è subordinata alla sottoscrizione di un accordo con il paese in cui il progetto è realizzato e che comunque un paese può rifiuta-

re il rilascio di quote associate a talune tipologie di progetti.

Accesso alla riserva "nuovi entranti"

La proposta della Commissione prevedeva che solo gli impianti nuovi potessero accedere alla riserva "nuovi entranti". Il compromesso finale recepisce la richiesta dell'Italia e di altri Stati membri di riconoscere non solo agli impianti nuovi, ma anche a quelli che effettuano significativi ripotenziamenti, la possibilità di accedere alla riserva "nuovi entranti" e quindi di beneficiare di un'assegnazione gratuita sulla base delle regole stabilite dalla direttiva.

Uso dei benchmarks per l'assegnazione delle quote gratuite

Come richiesto dall'Italia, l'accordo finale prevede esplicitamente che:

- l'assegnazione a livello di impianto sarà fatta sulla base di benchmarks di settore e sottosectore determinati a livello UE tenendo conto delle tecniche più efficienti;
- i benchmarks saranno calcolati con riferimento al prodotto piuttosto che con riferimento ai combustibili utilizzati, in questo modo è garantito che i benchmarks siano sufficientemente differenziati per non penalizzare quei settori caratterizzati al loro interno da una elevata variabilità di prodotti;
- nella determinazione dei benchmarks sarà tenuto conto della presenza di installazioni per lo stoccaggio del carbonio solo laddove le stesse sono effettivamente presenti così da evitare di penalizzare quelle installazioni che non possono stoccare il carbonio, a causa di un'assegnazione effettuata con benchmarks

che non riflettono adeguatamente la tecnologia effettivamente utilizzata.

Decisione per la ripartizione tra gli Stati membri dell'obiettivo comunitario di riduzione delle emissioni di gas serra per i settori non regolati dalla direttiva (decisione "effort sharing")

Campo di applicazione

La decisione regolamenta, per il periodo 2013-2020, le emissioni di gas ad effetto serra provenienti dai settori non regolati dall'ETS⁴ (di seguito "settori non-ETS").

Contributo alla mitigazione dei cambiamenti climatici

La decisione stabilisce che, al 2020, i settori non ETS, a livello Comunitario, riducano le emissioni di gas ad effetto serra del 10% rispetto ai livelli del 2005 (contro il -21% richiesto ai settori regolati dall'ETS). Di conseguenza anche gli obiettivi di riduzione per ciascuno Stato membro fanno riferimento all'anno 2005.

L'individuazione degli obiettivi di riduzione per ciascuno Stato membro è stata fatta tenendo conto dell'efficacia dei costi e del PIL pro capite⁵, cosicché gli Stati membri caratterizzati da un PIL pro capite inferiore alla media UE possono aumentare le rispettive emissioni, mentre quelli con un PIL pro capite superiore alla media UE devono ridurre le emissioni. Nessuno Stato membro può aumentare/ridurre le proprie emissioni per più del 20% rispetto ai livelli del 2005. La Commissione ritiene che tale impostazione rispetti il principio di equità e solidarietà tra gli Stati membri. Secondo tale approccio l'Italia dovrà ridurre

4. Prevalentemente settore civile, agricolo e dei trasporti.

5. Proxy della capacità di un Paese di "pagare" e quindi investire per la riduzione delle emissioni.

re le emissioni nei settori non regolati dall'ETS del 13% rispetto ai livelli del 2005. L'obiettivo al 2020 dovrà essere conseguito sulla base di un "path" definito dalla decisione attraverso l'individuazione di obiettivi di riduzione delle emissioni annuali vincolanti. In particolare gli Stati membri che al 2020 hanno un obiettivo di riduzione negativo⁶ (quindi devono ridurre le proprie emissioni) dovranno diminuire annualmente le proprie emissioni a partire dal 2013 (anno in cui le emissioni non dovranno superare la media delle emissioni degli anni 2008-2010) fino al 2020 seguendo un "path" lineare. Per gli Stati membri che al 2020 hanno un obiettivo positivo⁷ (quindi devono solo limitare la crescita delle rispettive emissioni), è prevista la correzione del "path" lineare così da renderlo più "soft".

L'Italia nel corso del negoziato si è sempre dichiarata contraria all'introduzione di obiettivi di riduzione annuali vincolanti in ragione del fatto che gli stessi riducono la flessibilità per gli Stati membri nella scelta delle misure più efficaci dal punto di vista dei costi senza un effettivo beneficio ambientale.

Il compromesso finale pur mantenendo il riferimento agli obiettivi annuali vincolanti, introduce e rafforza una serie di strumenti di flessibilità (si veda paragrafo successivo) che ne agevolano il rispetto da parte degli Stati membri.

Riguardo il contributo alla mitigazione in caso di accordo globale, la proposta della Commissione prevedeva che lo sforzo di riduzione per i settori non ETS sarebbe stato adeguato secondo un meccanismo automatico così da tener conto dell'impegno di riduzione assunto dalla Comunità nell'ambito dell'accordo. Analogamente alla

direttiva ETS il compromesso finale stabilisce che le modalità per effettuare l'adeguamento dello sforzo di riduzione siano determinate con una procedura di co-decisione sulla base di una proposta della Commissione e che l'adeguamento avvenga al momento della ratifica dell'accordo da parte della Comunità con la possibilità di introdurre misure transitorie e sospensive in attesa dell'entrata in vigore del trattato internazionale.

Gli strumenti di flessibilità "interni" alla UE per il rispetto degli obiettivi annuali vincolanti

Rispetto alla proposta iniziale della Commissione, il compromesso finale prevede un rafforzamento degli strumenti di flessibilità "interni" alla UE e più precisamente:

- il rafforzamento del "carry forward" (la possibilità di "prendere in prestito" le emissioni consentite nell'anno successivo per adempiere agli obblighi di riduzione dell'anno in corso) dal 2% al 5% delle emissioni consentite in ciascun anno; la percentuale di "carry forward" può essere ulteriormente aumentata per gli anni 2013 e 2014 nel caso in cui condizioni meteorologiche estreme comportino un aumento eccezionale delle emissioni di gas serra;
- il riconoscimento esplicito della possibilità di "carry over" illimitato (ossia la possibilità di utilizzare le riduzioni in eccesso realizzate nell'anno in corso per adempiere all'obiettivo di riduzione degli anni successivi);
- la possibilità di trasferimento tra Stati membri delle riduzioni in eccesso in misura del 5% delle emissioni consentite in ciascun anno;
- la possibilità di utilizzare senza alcun limi-

6. Prevalentemente i "vecchi" Stati membri.

7. Prevalentemente i "nuovi" Stati membri.

te quantitativo crediti derivanti da progetti realizzati all'interno della Comunità;

- la possibilità di contabilizzare gli assorbimenti nazionali derivanti dall'uso del suolo, dai cambiamenti di uso del suolo e dalle foreste previa presentazione di una proposta della Commissione finalizzata a disciplinare le modalità di tale utilizzo.

Uso dei crediti derivanti dalla realizzazione di progetti nei Paesi terzi

Riguardo l'uso dei crediti derivanti dalla realizzazione di progetti nei Paesi terzi, fino al raggiungimento di un accordo post 2012, in aggiunta a quanto previsto dalla proposta iniziale della Commissione (uso consentito fino ad un massimo del 3% delle emissioni relative al 2005), alcuni Stati membri che soddisfano determinati criteri (l'Italia rientra tra questi) possono usare crediti derivanti da progetti CDM in misura dell'1% delle emissioni verificate nel 2005 a condizione che i progetti siano realizzati nei paesi meno sviluppati.

Inoltre a differenza di quanto previsto nella proposta iniziale della Commissione, è possibile utilizzare i crediti derivanti da progetti CDM di afforestazione e riforestazione.

Analogamente a quanto disciplinato per i settori ETS, a seguito del raggiungimento dell'accordo post 2012, il limite all'utilizzo dei crediti sarà rivisto secondo una procedura di co-decisione (e non soggetto ad un adeguamento automatico, pari al 50% dello sforzo di riduzione addizionale che i settori non ETS, a livello comunitario, dovranno sostenere a seguito della sottoscrizione dell'accordo, come previsto nella proposta iniziale della Commissione).

Il riconoscimento dei crediti generati nell'ambito del futuro regime per la lotta ai cambiamenti climatici non sarà automati-

co, ma regolamentato attraverso apposito atto della Commissione.

Introduzione di un regime per la verifica del rispetto da parte del Governo dell'obiettivo annuale di riduzione delle emissioni (sistema di compliance)

La decisione prevede che nel caso in cui uno Stato membro non rispetti il proprio obiettivo annuale, deve:

- realizzare nell'anno seguente le mancate riduzioni relative all'anno precedente aumentate dell'8% (fattore di compliance pari a 1,08);
- presentare alla Commissione Europea un "piano nazionale" in cui vengono descritte le misure messe in atto per realizzare le mancate riduzioni.

In aggiunta è sospesa la possibilità di effettuare trasferimenti (vendite) di "unità di emissioni" ad altri Stati membri.

Intervista a Octavi Quintana Trias

A cura di Paola Batistoni



Octavi Quintana Trias è medico di formazione, specialista in terapie intensive. Ha lavorato come medico, come Direttore di ospedale e come Direttore degli Affari internazionali al Ministero della Salute spagnolo. Consulente dell'Organizzazione Mondiale per la Sanità, si è anche occupato di aiuto umanitario in Africa e nei Balcani.

Ha svolto ruoli di presidente e di fondatore in vari comitati europei per il controllo di qualità in medicina. È stato inoltre presidente di commissioni di bioetica tra cui il Comitato di Orientamento per la Bioetica del Consiglio d'Europa. Dal maggio del 2002 al dicembre del 2007 è stato Direttore per la Ricerca sulla Salute presso la Direzione Generale Ricerca della Commissione Europea. Dal gennaio 2008 ha assunto, presso la stessa Direzione Generale, la direzione per la Ricerca dell'Energia (Euratom).

Gentile Dr. Quintana Trias

Recentemente si è celebrato il 50° anniversario del Trattato che istituiva la Comunità Europea dell'Energia Atomica (Euratom), uno dei trattati fondativi dell'Unione Europea, voluto per promuovere lo sviluppo dell'industria nucleare europea garantendo nel contempo un elevato livello di sicurezza e di protezione dei cittadini e dei lavoratori. Il Trattato ha rappresentato il quadro tecnico-normativo che oggi permette a diversi Stati membri di godere dei vantaggi ambientali ed economici dell'energia nucleare. Qual è stato il valore aggiunto della collaborazione, della integrazione e del coordinamento forniti dal quadro Euratom in questi 50 anni?

Con il Trattato per l'Euratom, siglato a Roma il 25 marzo 1957, l'Italia con gli altri cinque paesi fondatori intese stabilire le condizioni per lo sviluppo dell'energia nucleare negli Stati membri attraverso la condivisione delle risorse necessarie, dalla conoscenza scientifica e tecnologica ai materiali fissili ed ai finanziamenti. Lo sviluppo dell'industria nucleare in Europa si è svolto, da allora, nel quadro legale e tecnico-scientifico definito dal Trattato. Sebbene, nel rispetto delle diverse condizioni socio-culturali e politiche, l'utilizzo di questa tecnologia sia geograficamente diseguale, circa 150 reattori nucleari sono in funzione oggi in 15 paesi dell'Unione ed assicurano un terzo della produzione di energia elettrica. Sicurezza delle installazioni e delle procedure, uniformità delle norme di base per la protezione dell'ambiente e delle persone, continuità nel progresso e nella conservazione delle conoscenze sono i principali benefici dell'approccio comunitario nella produzione dell'energia.

Per quanto riguarda la ricerca c'è da ricordare che la prima prospettiva comunitaria in questo settore fu introdotta appunto dal Trattato. Fu un'iniziativa davvero innovativa per quell'epoca ed è servita da modello per i successivi programmi di ricerca comunitari che seguirono a decenni di distanza. In questo contesto è particolarmente significativo il caso della fusione. Per la ricerca in questo campo, la Commissione Europea ha stabilito, a partire già dal 1958, un network di Associazioni (che si è sviluppato sino a raggiungere oggi il numero di 26 Associazioni) con decine di istituti nazionali distribuiti in tutta l'Unione. Circa 2.500 ricercatori e tecnologi ed un ugual numero di personale di supporto lavorano per lo sviluppo scientifico e tecnologico in un vasto campo che va dalla fisica dei plasmi di alta temperatura alle tecniche dei superconduttori ad alta corrente. Anche la Svizzera partecipa al programma europeo per la fusione. L'Europa può vantare oggi la leadership internazionale in questo settore grazie a questo vasto sistema integrato, ed in particolare grazie al JET, il più grande dispositivo di ricerca per la fusione al mondo, che fu istituito nel 1978 come impresa comune, secondo le disposizioni del Trattato, e che possiede ancora oggi le caratteristiche più avanzate per preparare ITER.

In nessun'altra area esiste un programma europeo unico con la partecipazione diretta di tutti i 27 paesi membri come nel campo della fusione, campo in cui l'Italia ha svolto fin dall'inizio un ruolo molto importante.

Il contributo italiano è tuttora fra i più rilevanti, nella costruzione di ITER, per cui registriamo con soddisfazione l'attivo coinvolgimento anche dell'industria italiana, e nel dibattito sulla sperimentazione satellite da affiancare ad esso. Inoltre l'Italia par-

tecipa al Broader Approach per la collaborazione col Giappone, con cospicui contributi al progetto dell'International Fusion Materials Irradiation Facility, alla costruzione del tokamak JT 60SA ed all'attività dell'International Fusion Energy Research Centre, sito nel nord dell'isola di Honshu.

I programmi comunitari hanno avuto un significativo effetto strutturante anche per la ricerca sulla fissione, ad esempio riguardo al trattamento e lo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi. Il problema della sicurezza nella gestione dei rifiuti è comune a tutti i paesi dell'Unione, poiché non solo le centrali, ma anche gli ospedali ne producono.

La sicurezza e la protezione in ambito nucleare all'interno dell'Unione Europea dipendono anche da ciò che accade al di là dei suoi confini. Quali sono le iniziative in ambito Euratom in materia di sicurezza nucleare alla luce della rinascita attuale dell'energia nucleare e della sua crescente diffusione con i rischi di proliferazione ad essa collegati?

La sicurezza è sempre stata una priorità per l'Euratom. Così dev'essere e così sarà nel futuro. La responsabilità primaria compete agli operatori ed alle autorità di sicurezza presso gli Stati membri. Negli ultimi anni la Direzione Generale Energia e Trasporti (DG TREN) si è attivamente impegnata per promuovere un approccio europeo alla sicurezza nucleare e alla gestione dei rifiuti. A tal fine la Commissione si giova della consulenza dell'*High Level Group on Nuclear Safety and Waste*, costituito nel 2007, che riunisce le autorità per la sicurezza negli Stati membri.

Per la gestione e lo stoccaggio di rifiuti la Commissione incoraggia anche la formazione, attorno alle agenzie nazionali responsabili di questi compiti, di una piattaforma tecnologica per lo smaltimento geologico. L'obiettivo della piattaforma sarà di stabilire un Piano Strategico di Ricerca per la ricerca comune e per la messa in opera di siti di deposito sotterraneo.

Un'altra preoccupazione maggiore è certamente l'affidabilità di questo strategico settore all'esterno dell'Unione. Vale la pena di ricordare il notevole impegno per il miglioramento della sicurezza nei paesi già membri dell'Unione Sovietica nel quadro del programma TACIS, messo in opera dalla Commissione.

Ci si può realisticamente aspettare che in futuro altri paesi terzi facciano ricorso all'energia nucleare. La Commissione, attraverso lo strumento *Nuclear Safety Cooperation*, lancerà anche nuovi programmi per sostenere questi paesi a sviluppare le competenze necessarie e le normative relative alla sicurezza. Il Settimo Programma Quadro comunitario per la ricerca può anche contribuire, in particolare, ad azioni dirette all'istruzione e alla formazione. Prerequisito fondamentale per questa cooperazione è, naturalmente, l'impegno alla non-proliferazione.

Qual è oggi il ruolo di Euratom nella strategia energetica europea, impegnata a fronteggiare il problema della crescente dipendenza dall'esterno e la minaccia dei cambiamenti climatici?

È facilmente prevedibile che l'energia nucleare e le tecnologie connesse continueranno ad essere utilizzate e sviluppate nei prossimi decenni. È anche probabile che altri paesi membri con tradizioni meno solide in questo campo vogliano accedere a questa fonte energetica, che offre innegabili vantaggi sotto diversi profili. La Polonia, per esempio, ha appena annunciato l'intenzione di costruire una o due centrali nel

prossimo decennio. È chiaro pertanto che il Trattato Euratom continuerà a presentare un necessario strumento per la collaborazione, la sicurezza e la condivisione degli sforzi nell'Unione Europea, che presenta al suo interno una grande varietà e complementarietà di risorse, ma anche complessivamente una forte dipendenza dalle importazioni di energia.

La Commissione Europea ha lanciato recentemente due importanti iniziative: l'European Nuclear Energy Forum, e la Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP). Qual è lo scopo e lo stato di avanzamento delle due iniziative e, in particolare, cosa ci si attende dalla Strategic Research Agenda e dalla Deployment Strategy di SNETP presentate pubblicamente a Bruxelles il 26 novembre?

La SNETP riunisce tutti i principali "attori" nel campo della ricerca sulla fissione nucleare (industria, istituti di ricerca, università, organizzazioni responsabili per la sicurezza, alcune ONG). Il primo compito della Piattaforma Tecnologica, che appartiene ai suoi membri e non alla Commissione, è quello di redigere il suo Piano Strategico di Ricerca, un documento che verrà presto pubblicato sul sito web della piattaforma (www.snetp.eu) per raccogliere i commenti del pubblico in febbraio. Esso definisce le priorità principali a livello europeo per i prossimi anni e servirà da guida per la scelta dei temi principali per i programmi nazionali e industriali, ma anche per il programma di ricerca Euratom. Il passo successivo è quello di costituire delle *task forces* per l'attuazione delle azioni specifiche definite nel Piano Strategico. Una di queste *task forces* è già costituita e lavora alla preparazione della Iniziativa Industriale Europea per il Nucleare nell'ambito del SET-Plan (vedi sotto). Quest'ultima verterà su ricerca e sviluppo per impianti di dimostrazione e prototipi per i reattori veloci della *Generation IV* – che miglioreranno la sostenibilità dell'energia nucleare a lungo termine.

L'European Nuclear Energy Forum è stato lanciato alla fine del 2007 da parte della DG TREN. Esso ha già tenuto sessioni plenarie nelle repubbliche Ceca e Slovacca. È un forum cui partecipano rappresentanti dei paesi membri, l'industria ed alcune ONG per discutere temi connessi alle prospettive future per l'energia nucleare a livello europeo. Il Forum è organizzato in tre sezioni: rischi, opportunità e trasparenza.

Il programma per lo sviluppo dell'energia dalla fusione nucleare è parte importante delle attività Euratom. Esso rappresenta un caso di successo per i risultati ottenuti, che fanno dell'Europa il paese leader in questo campo, e costituisce un esempio da seguire nella costruzione dello Spazio Europeo della Ricerca. Qual è il ruolo della fusione nella ricerca sulle nuove energie in Europa?

Bisogna chiarire che la fusione rappresenta una promettente prospettiva per l'approvvigionamento energetico non nell'immediato, ma tra alcuni decenni da oggi. In questa prospettiva, la dipendenza europea dalle importazioni di energia rischia di divenire ancora più drammatica in un mercato considerevolmente più concorrenziale. L'impatto sul clima di molte tecniche di produzione dell'energia porrà inoltre ulteriori vincoli sulle scelte future. È certo difficile prevedere oggi gli sviluppi possibili e il quadro internazionale per la metà del secolo. È chiaro tuttavia che sono urgenti sostanziali modifiche dei modelli industriali e tecnologici presenti e che es-

se richiederanno ingenti risorse, coordinazione sovranazionale e programmi di sviluppo ultradecennali. È critico perciò agire sin da ora per assicurare all'Europa, e al resto del mondo, il massimo potenziale possibile in termini di sostenibilità e diversificazione delle fonti e delle opzioni tecniche e industriali disponibili.

Il Piano Strategico Europeo per le Tecnologie Energetiche (SET-Plan), presentato dalla Commissione nel novembre 2007 e avallato dai 27 paesi membri propone una serie di misure per conseguire i seguenti risultati:

- una nuova pianificazione strategica congiunta;
- un'attuazione più efficace;
- un aumento delle risorse e
- un nuovo approccio rafforzato alla cooperazione con i paesi terzi.

Il Consiglio dei Ministri europei ha sottolineato come una tale politica sia "un elemento essenziale per conseguire gli ambiziosi obiettivi dell'Unione Europea per il 2020 in materia di energia e di clima". Il SET Plan è volto a "ridurre i costi dell'energia pulita e a porre le imprese comunitarie in una posizione di leadership nel settore delle tecnologie a bassa emissione di carbonio, un settore in rapida espansione". Esso definisce le principali sfide tecnologiche che l'UE dovrà affrontare nei prossimi 10 anni. Una di queste sfide chiave riguarda la fusione: "Completare la costruzione dell'impianto di fusione ITER e garantire fin dall'inizio la partecipazione dell'industria nella preparazione di azioni di dimostrazione" sarà per l'appunto la massima sfida per questo programma nei prossimi dieci anni. Com'è noto il Settimo Programma Quadro di ricerca dell'Euratom prevede una spesa per la fusione di 1,95 miliardi di euro per il quinquennio 2007-2011, ovvero il 70% della spesa Euratom per la ricerca in tale periodo.

Attraverso l'accordo ITER, l'Europa partecipa con ruolo di leader e in misura maggioritaria ad un'impresa internazionale che rappresenta un passaggio decisivo sulla strada dell'energia da fusione. Quali sono le sfide in questa collaborazione di così vasta estensione geografica e politica?

Vorrei osservare che i passi compiuti sinora per la preparazione e per il lancio di questa impresa costituiscono già un notevole successo di fronte a una sfida che è sembrata in alcuni momenti quasi insormontabile. L'Unione Europea ha saputo convincere le grandi potenze internazionali della necessità di mettere in opera questo progetto e dell'opportunità di stabilirlo in un sito europeo. La costruzione di ITER è iniziata nel 2007 a Cadarache, nel sud della Francia, e procede a ritmo sostenuto. È il felice esito di un lungo e difficile negoziato iniziato con quattro partner internazionali e conclusosi con sette partner.

L'Organizzazione internazionale ITER dovrà cooperare con sette Agenzie, una per ogni partner internazionale, preposte all'approvvigionamento di componenti ad altissimo contenuto tecnologico e in larghissima misura mai prodotti prima. Questa nuova e complessa organizzazione ha già compiuto una Revisione del Progetto, che si era resa necessaria a causa del ritardo interposto tra l'inizio dei negoziati nel 2001 ed il lancio del progetto nel 2007. Altre sfide di grande portata già si profilano: specialmente perché la Revisione suddetta avrà serie implicazioni sulle risorse, finanziarie e di personale, necessarie; perché la collaborazione di sette parti consociate, ciascuna con diversi interessi e priorità, per un periodo di trent'anni su un progetto così impegnativo è una novità assoluta. La condivisione tra i vari

contraenti, e con le industrie fornitrici, della proprietà intellettuale generata dal progetto sarà di per sé un cemento di grande impegno per tutte le parti in causa. Giova forse fare un'altra osservazione circa il successo che ci auguriamo nelle prove che attendono il progetto ITER. Esso fornirà senz'altro un'utilissima esperienza per la comunità internazionale che avrà certo bisogno di intraprendere, anche e soprattutto in campo energetico, altri progetti di ricerca e sviluppo del costo complessivo di molti miliardi di euro. La semplice portata di tali imprese richiederà necessariamente che si realizzino, come ITER, sulla base di collaborazioni tra parti diverse, di diverse regioni e culture.

Quale dovrà essere l'attività di ricerca da condurre in Europa, parallelamente a ITER, per mantenere il livello di competenze, sia nei laboratori di ricerca sia nelle industrie, per sfruttare al meglio ITER e procedere alla realizzazione di un reattore dimostrativo?

Nell'ottobre dello scorso anno il gruppo di esperti consultati dalla Commissione per la *Review of Facilities* ha consegnato il suo rapporto sugli obiettivi da raggiungere e sugli impianti necessari per la ricerca e lo sviluppo della fusione come fonte di energia. Esso giunge al termine di un vasto dibattito e lavoro di consultazione che ha coinvolto attivamente tutti gli istituti membri dell'EFDA, lo *European Fusion Development Agreement*. Le principali raccomandazioni del rapporto sono largamente condivise dalla Commissione. Evidentemente la prima di esse è di sostenere la costruzione di ITER e di prepararne l'esercizio e il funzionamento. L'altra massima priorità riguarda la preparazione del disegno e della costruzione di DEMO, il reattore dimostrativo. Priorità complementari, ma altrettanto cruciali, sono la conservazione e lo sviluppo del capitale umano, e la promozione dell'innovazione.

Nei prossimi cinque anni la Commissione intende promuovere un processo di ottimizzazione delle risorse disponibili in tutta l'Unione. Esso dovrà passare attraverso la riduzione del numero complessivo dei dispositivi sperimentali per la ricerca di fisica e la valorizzazione di quelli che hanno maggiore rilevanza per le missioni orientatrici del programma. È indispensabile una gestione efficiente delle risorse umane tesa in larga misura a riorientare le competenze verso i nuovi progetti che si rendono necessari per la costruzione e l'esercizio di ITER, ma anche per lo studio e la qualificazione di materiali, e lo sviluppo di teoria e simulazione dei plasmi da fusione. Lo spazio europeo di ricerca per la fusione dovrà fare un ulteriore sforzo di integrazione. Gli esperimenti congiunti in un numero limitato di siti europei, com'è già da decenni in quello del JET, dovranno diventare la norma anche per altri siti ospitati in installazioni sperimentali comuni.

Energia dalla fusione magnetica. Il progetto ITER

Paola Batistoni
Aldo Pizzuto

ENEA, Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare

I paesi più industrializzati e attivi nel campo della fusione (Cina, Corea, Giappone, India Russia e Stati Uniti, più l'Unione Europea) collaborano alla realizzazione di ITER, un reattore sperimentale che costituisce il passo fondamentale per la realizzazione dell'energia da fusione. L'Europa, e l'Italia in particolare, sono fortemente impegnate in questa impresa anche con importanti progetti di accompagnamento

Magnetic Fusion Energy. The ITER Project

The industrialised countries most active in nuclear fusion (China, Korea, Japan, India, Russia, the United States and the European Union), are participating in the development of ITER, an experimental reactor representing a fundamental step toward nuclear fusion energy. Europe, and Italy in particular, are deeply involved in this initiative with important related projects too

Lo scorso ottobre a Ginevra, durante la 22^a conferenza IAEA sull' Energia da Fusione, si sono celebrati i 50 anni dalla storica conferenza su gli "Usi pacifici dell'energia atomica", svoltasi nello stesso palazzo dell'Organizzazione delle Nazioni Unite nel settembre del 1958, in cui furono rese pubbliche le ricerche sulla fusione nucleare. Da allora, la ricerca sulla fusione è condotta in molti paesi in un clima di aperta collaborazione e con l'obiettivo di realizzare una fonte di energia praticamente inesauribile, rispettosa dell'ambiente, sicura ed economicamente competitiva.

L'indubbio valore strategico di questa impresa risiede nei potenziali vantaggi che presenta in termini di disponibilità delle risorse, di riduzione dell'uso di combustibili fossili e di sicurezza dell'approvvigionamento energetico. La ricorrenza ha fornito l'occasione per valutare il cammino per-

corso e quello che ancora resta da fare in un momento in cui le previsioni sull'evoluzione del panorama energetico attuale, insieme all'urgenza di adottare tecnologie energetiche a ridotte emissioni di gas serra, rafforzano l'interesse sulla fusione e pongono la domanda sui tempi in cui essa potrà diventare disponibile.

Lo straordinario complesso di nuove acquisizioni scientifiche, tecnologiche e sperimentali ottenute in questi 50 anni ha portato alla creazione di una nuova disciplina scientifica (la fisica del plasma) e allo sviluppo di molte nuove tecnologie che rendono possibili, oggi, la costruzione di ITER, un reattore a fusione sperimentale che produrrà 500 MW di potenza di fusione per tempi relativamente lunghi, con guadagno di potenza di un fattore da cinque a dieci. ITER fornirà la dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnologica del-

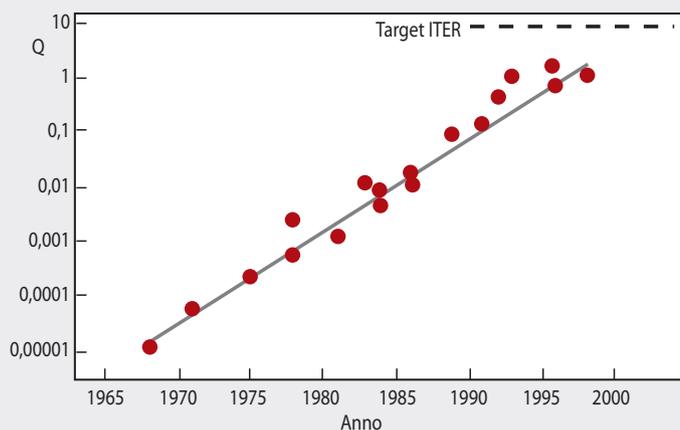


Figura 1

I progressi ottenuti nella fusione magnetica, misurati in termini del parametro Q, definito come il rapporto tra la potenza da fusione prodotta (DT equivalente) e la potenza depositata dall'esterno per scaldare il combustibile. I risultati mostrati sono stati ottenuti in vari esperimenti nel mondo. In analogia con la legge di Moore per la densità di transistor nei circuiti integrati, il parametro Q della fusione è costantemente raddoppiato ogni 1,8 anni nei 30 anni scorsi

la fusione, tuttavia saranno necessari ancora alcuni passi fondamentali prima che si possa disporre di energia da fusione. In quanto segue verranno illustrati lo stato attuale dell'impresa e la *Roadmap* per il raggiungimento dell'obiettivo finale¹.

La fusione nucleare: il meccanismo fisico

La fusione è una reazione nucleare in cui due nuclei leggeri si fondono in un nucleo più pesante con conseguente rilascio di energia. È la reazione che alimenta il sole e tutte le stelle, ed è alla base del processo di nucleosintesi che avviene all'interno delle stelle, cioè della produzione degli elementi naturali a partire dall'idrogeno fino alla formazione del ferro-nickel. Come mostrato in *figura 2*, si ha un grande rilascio di energia nella fusione di nuclei leggeri in nuclei di massa intermedia. Per nuclei ancora più pesanti, l'inversione della curva descrive il rilascio di energia nel processo opposto, quello della fissione, che consiste nella rottura di nuclei pesanti in frammenti più piccoli.

Mentre l'attivazione del processo di fissione richiede poca energia, la fusione richiede una quantità considerevole di energia per avvicinare i due nuclei reagenti, entrambi carichi positivamente, a causa della repulsione elettrostatica. Una volta che i due nuclei si trovino a distanze dell'ordine della dimensione dei nuclei stessi, la forza nucleare forte, attrattiva, rende possibile il processo di fusione. Tra le varie reazioni di fusione note, risulta che l'energia da fornire è minima per la reazione che coinvolge gli isotopi pesanti dell'idroge-

no, il deuterio ^2H o D, il cui nucleo è formato da un protone e da un neutrone, e il trizio ^3H o T, il cui nucleo è formato da un protone e da due neutroni (*figura 3*). Il nucleo dell'idrogeno comune è formato da un solo protone. La reazione $\text{D} + \text{T} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$, infatti, presenta la "soglia" in energia più bassa (~ 10 keV) e la probabilità più alta. Per questi motivi, il ciclo DT è quello su cui si concentrano gli attuali modelli di reattore a fusione¹.

Il modo più semplice per fornire ai nuclei l'energia necessaria per innescare le reazioni consiste nel riscaldare i nuclei stessi. Infatti, la temperatura di una sostanza è una misura dell'energia cinetica media delle particelle che la compongono. Per ottenere una significativa frequenza delle reazioni $\text{D} + \text{T}$ occorre raggiungere temperature non inferiori a $kT \sim 10$ keV (circa 100 milioni °C). Essendo queste temperature ben al di sopra dell'energia di ionizzazione degli atomi, le reazioni di fusione avvengono in un combustibile allo stato di plasma. Il plasma può essere considerato come il quarto stato della materia, oltre agli stati solido, liquido e gassoso. Un plasma è un gas caldo ($kT \geq 0,01$ keV) ionizzato, i cui atomi hanno perso in parte o del tutto i loro elettroni. È quindi costituito da elettroni e da atomi privati di uno o più elettroni (ioni positivi).

L'energia rilasciata nella reazione $\text{D} + \text{T}$, pari a 17,6 MeV, è ripartita tra energia cinetica dei nuclei di ^4He (20%) e energia cinetica dei neutroni (80%). I nuclei di ^4He (particelle alfa), in quanto elettricamente carichi, depositano la loro energia nel plasma contribuendo a mantenerlo caldo. I neutroni escono dalla camera di reazione

1. Una reazione interessante è quella che coinvolge un nucleo di D e uno di ^3He (isotopo leggero dell'elio, il cui isotopo di gran lunga più abbondante è ^4He) in quanto ha il vantaggio di non produrre neutroni: in un ciclo D^3He , la produzione di neutroni dalle reazioni tra nuclei di deuterio presenti ($\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} + \text{n}$) risulterebbe alquanto inferiore a quella che si avrebbe nel ciclo DT a parità di potenza e, quindi, risulterebbero di gran lunga ridotti gli effetti negativi dovuti alle interazioni dei neutroni con i materiali del reattore. Tuttavia, ^3He è estremamente raro sulla terra e (contrariamente al trizio) non producibile. Inoltre, la sezione d'urto $\text{D} + ^3\text{He}$ ha valori significativi per energie molto più grandi rispetto alla reazione $\text{D} + \text{T}$. Per questi motivi, sebbene vi siano studi di reattori basati sul ciclo D^3He , esso non è ritenuto al momento praticabile. Negli esperimenti attuali si usano, per convenienza, miscele di solo deuterio.

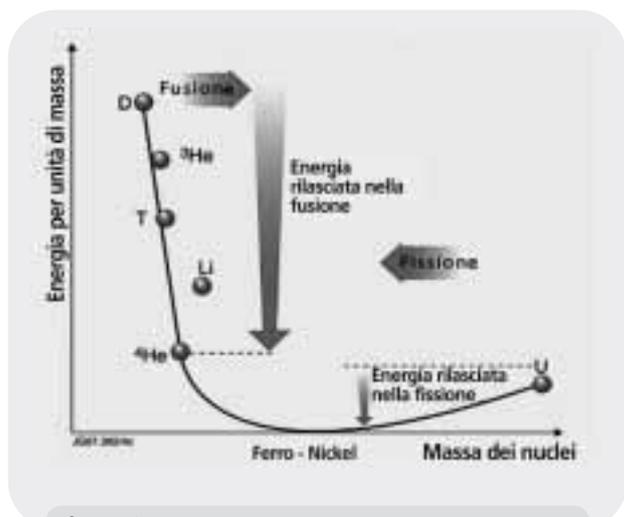


Figura 2
Energia per unità di massa rilasciata nelle reazioni di fusione e di fissione nucleare

e la loro energia può essere raccolta e trasformata in energia elettrica.

Per ottenere una produzione netta di energia da fusione, occorre che la potenza prodotta dalle reazioni di fusione sia maggiore della potenza depositata dall'esterno per scaldare il plasma (il punto di pareggio è detto punto di *breakeven*). Quando la potenza di fusione è abbastanza grande da riscaldare il combustibile circostante tramite la potenza delle alfa e mantenere la

fusione senza bisogno di fornire ulteriore potenza dall'esterno, si ha l'ignizione. In generale, non si richiede che il reattore raggiunga l'ignizione ma che agisca da moltiplicatore di potenza con un fattore di moltiplicazione Q (guadagno, definito come il rapporto tra la potenza di fusione prodotta e quella fornita dall'esterno) sufficientemente grande, dell'ordine di 30-50.

Si può dimostrare che per una miscela DT (50%D + 50%T) di densità n e temperatura T , si ha $Q > 1$ per $nT\tau_E > \sim 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$, con $T \sim 20 \text{ keV}$, dove τ_E è il cosiddetto tempo di confinamento dell'energia, ovvero il tempo tipico di raffreddamento del plasma allo spegnersi della potenza esterna, nell'ipotesi che questo abbia un andamento esponenziale. I valori ottenuti per $nT\tau_E$, il cosiddetto prodotto triplo di fusione, sono riportati più avanti in *figura 7*.

Le condizioni fondamentali per la fusione sono quindi essenzialmente tre:

- riscaldamento del plasma fino alle temperature necessarie a produrre reazioni di fusione in misura sufficiente;
- contenimento del plasma ad una densità sufficientemente elevata;
- isolamento termico del plasma (confinamento), per minimizzare le perdite di particelle e di energia.

riflettore su

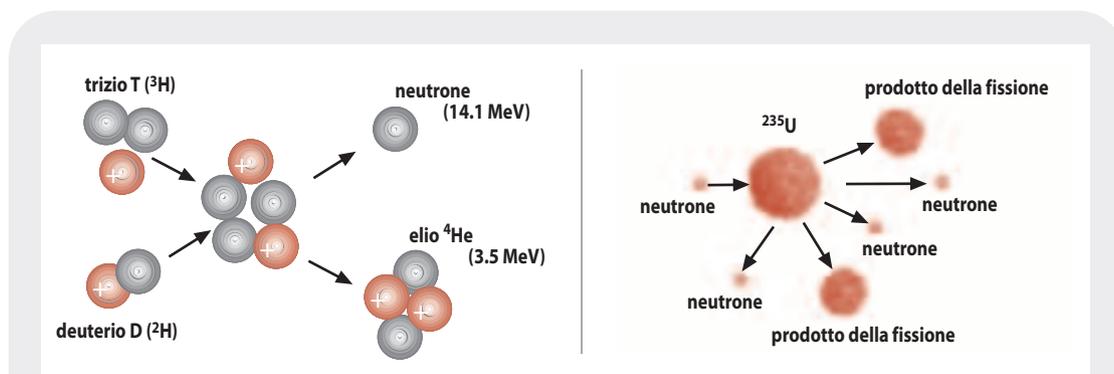


Figura 3

A sinistra: la reazione nucleare di fusione tra deuterio e trizio, in cui vengono prodotti un nucleo di elio (^4H) e un neutrone. La fusione è il processo opposto alla fissione nucleare, che consiste nella rottura di nuclei molto pesanti in frammenti più piccoli. A destra: reazione di fissione nucleare di un nucleo di uranio (^{235}U)

Le condizioni per la fusione si verificano naturalmente nei nuclei delle stelle, dove il plasma è compresso ad alta densità sotto l'azione della propria forza gravitazionale. In laboratorio, dove è necessario ricorrere ad altri meccanismi, si sono seguite principalmente due linee diverse, conosciute come confinamento inerziale e confinamento magnetico del plasma.

Ci limitiamo qui a presentare lo stato e le prospettive della fusione a confinamento magnetico, notando tuttavia che vi sono importanti attività di ricerca e interessanti sviluppi anche nel campo della fusione inerziale^[1].

La fusione a confinamento magnetico

Il confinamento magnetico si basa sul fatto che un campo magnetico influenza il moto delle particelle cariche del plasma. Un campo di induzione magnetica B , come quello prodotto da un solenoide lineare, confina le particelle cariche nelle direzioni ortogonali alla direzione del campo stesso, costringendo gli ioni e gli elettroni

a girare intorno alle linee di campo magnetico. Tuttavia, le particelle cariche rimangono libere di muoversi parallelamente alle linee di campo magnetico, e il plasma può uscire alle estremità del solenoide. Da qui l'idea di piegare il solenoide su se stesso in una configurazione toroidale, cioè a forma di ciambella. In tale operazione il campo non rimane uniforme: i gradienti del campo causano moti di deriva delle particelle che debbono essere annullati con campi correttivi.

Tra le configurazioni magnetiche toroidali più studiate (Tokamak, *Stellarator* e *Reversed Field Pinch* (RFP)), la configurazione Tokamak è quella su cui sono state investite le maggiori risorse e che ha consentito i maggiori progressi dal punto di vista del contenimento e isolamento termico del plasma stesso. Un Tokamak (*figura 4*) è costituito da una ciambella (toro) entro cui si produce il vuoto e si inietta il "combustibile" a densità dell'ordine di 10^{20} particelle/m³.

Un insieme di bobine disposte attorno alla ciambella genera il campo magnetico toroidale che ha il compito di guidare il moto delle particelle. Un secondo solenoide posto al centro della ciambella costituisce il primario di un trasformatore che induce nel plasma (secondario) una corrente parallela al campo magnetico principale, che contribuisce al confinamento del plasma stesso e lo riscalda per effetto joule. Altre bobine esterne sono utilizzate per il controllo della posizione e della forma del plasma.

Nei Tokamak attuali, la durata della configurazione di equilibrio è limitata dalla durata della corrente di plasma e quindi dal flusso magnetico disponibile nel solenoide centrale. Il funzionamento in regime stazionario, necessario per il reattore, richiede quindi l'adozione di meccanismi diversi di generazione di corrente nel plasma. Inoltre, il solo effetto joule non è sufficiente a scaldare il plasma fino alle temperature richieste poiché, al crescere della tem-

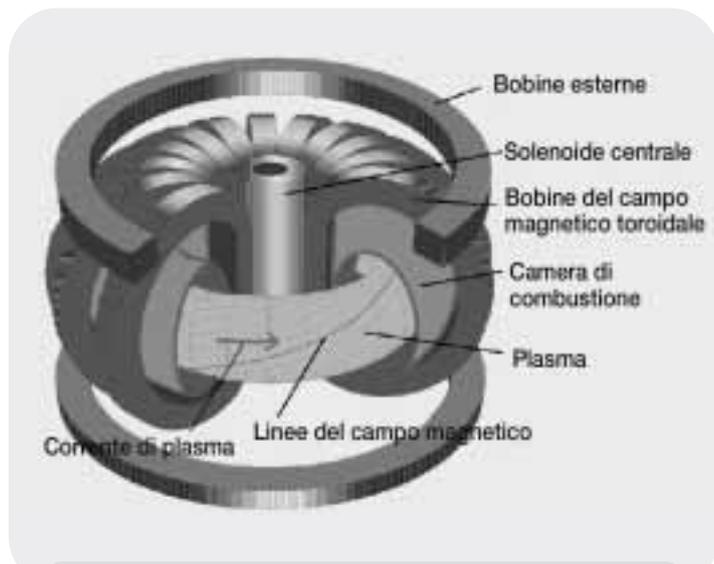


Figura 4
Macchina Tokamak per il confinamento magnetico del plasma

peratura, la resistenza elettrica del plasma diminuisce e con essa la potenza di riscaldamento a parità di corrente, mentre aumentano le perdite per radiazione e per trasporto di calore. Perciò occorre ricorrere a sistemi di riscaldamento "ausiliari", quali (i) iniezione di fasci di atomi neutri ad alta energia che penetrano entro il plasma e, cedendo la loro energia per urto, lo riscaldano; (ii) riscaldamento con onde elettromagnetiche a frequenze appropriate per un'efficace interazione con il plasma.

I potenziali vantaggi della fusione

I potenziali vantaggi dell'energia da fusione rendono conto del valore strategico di questa tecnologia energetica dal punto di vista del rispetto dell'ambiente, della disponibilità del combustibile, della fattibilità economica e della sicurezza dell'approvvigionamento. Il combustibile di base è praticamente illimitato e omogeneamente diffuso sulla Terra, e non dà quindi luogo a problemi di approvvigionamento. La reazione non dà luogo a emissioni di gas a effetto serra e non produce scorie radioattive, le centrali sono intrinsecamente sicure. Infine con un'opportuna scelta dei materiali, la radioattività dei componenti a fine vita del reattore può decadere nell'arco di circa un secolo, evitando quindi la necessità di depositi permanenti in sito profondo e permettendo il riciclo dei materiali.

Il deuterio è presente in natura nella misura di 25,5 mg di deuterio per litro d'acqua. La disponibilità di deuterio sulla terra è quindi praticamente illimitata. D'altra parte, il trizio non si trova in natura poiché è un isotopo radioattivo dell'idrogeno con un tempo di dimezzamento pari a



Figura 5
Schema di funzionamento di un reattore a fusione a confinamento magnetico

12,32 anni. Occorre quindi produrlo, possibilmente all'interno dello stesso impianto del reattore (figura 5). A tal fine si sfruttano reazioni triziogene, che sfruttano i neutroni prodotti nella stessa reazione D+T, e il litio, presente in natura con due isotopi stabili, ${}^6\text{Li}$ (7,59%) e ${}^7\text{Li}$ (92,41%):



In questo modo, per ogni nucleo di trizio consumato, viene generato un neutrone e da questo, tramite una reazione con il litio, un nucleo di trizio il quale viene recuperato e inviato nella camera di reazione insieme al deuterio. Ciò avviene in uno speciale componente, il mantello triziogeno, posto a circondare la camera di reazione, contenente composti del litio e materiali moltiplicatori di neutroni, quali il berillio o il piombo².

2. L'uso di materiali moltiplicatori di neutroni si rende necessario per ottenere valori del *breeding ratio* T/n (definito come il rapporto tra nuclei di trizio prodotti nel mantello e neutroni emessi dal plasma, pari ai nuclei di trizio consumati), superiori all'unità ($T/n \sim 1.1$) per assicurare l'autosufficienza del reattore, compensare eventuali perdite di trizio e disporre di una scorta per avviare altri reattori. La moltiplicazione di neutroni è particolarmente efficiente in Pb e Be attraverso reazioni nucleari di tipo $(n,2n)$.

I combustibili sono dunque il deuterio e il litio, il prodotto finale è elio senza produzione di gas serra. Con il deuterio contenuto in 10 litri di acqua (0,255 g) e 0,765 g di ^6Li (circa 10 g di litio naturale) si ottengono circa 21.000 kWh tramite la reazione D+T (con un'efficienza complessiva del reattore pari al 35%) ovvero l'energia elettrica consumata da un cittadino italiano in circa 3 anni. L'energia sviluppata per ogni grammo di materia reagente è equivalente a circa 5 tonnellate di petrolio.

La fusione presenta vari elementi che la rendono molto interessante dal punto di vista della sicurezza e dell'ambiente.

Essi sono:

- piccola quantità di combustibile nella camera di combustione, che porta all'arresto quasi immediato della generazione di potenza al momento della chiusura dell'alimentazione del combustibile;
- prevalente produzione di isotopi a emissione gamma con tempo di decadimento relativamente breve, derivanti dall'at-

tivazione dei materiali del reattore indotta dai neutroni;

- bassa densità di potenza nel nocciolo del reattore;
- assenza di materiale fissile.

I risultati degli studi europei su alcuni concetti di centrali a fusione^[2] mostrano quanto segue:

- durante l'operazione normale le dosi all'esterno della centrale degli effluenti radioattivi atmosferici e acquosi (trizio e prodotti di attivazione) sono molto al di sotto dei livelli permessi;
- nel caso *d'incidente* non c'è possibilità di escursione incontrollata della potenza in quanto la reattività del plasma è limitata da processi intrinseci al sistema; le strutture interne della macchina non possono fondere anche in caso di incidente con perdita di ogni raffreddamento attivo conseguente a una perdita improvvisa di potenza (sicurezza passiva); il massimo incidente prevedibile di origine interna alla centrale condurrebbe a valori di esposizione del

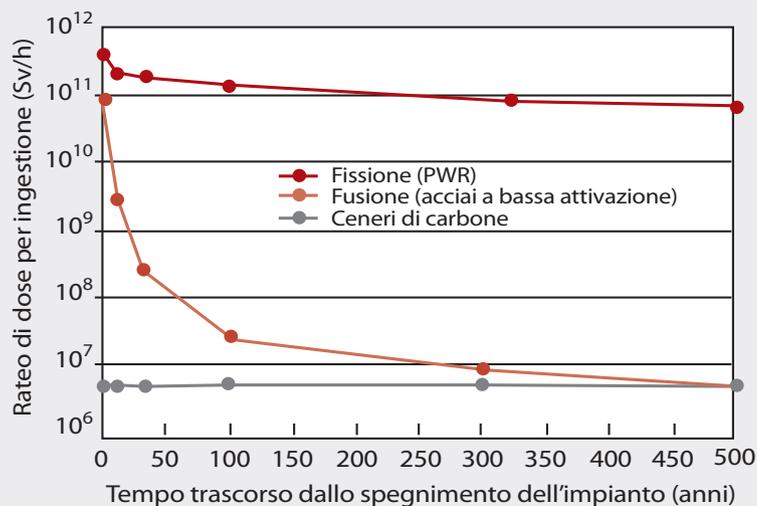


Figura 6
Decadimento della radiotossicità per impianti a fissione (PWR) o fusione (strutture in acciaio a bassa attivazione) e raffronto con centrale a carbone, a parità di energia elettrica prodotta^[3]

pubblico tali da non richiederne l'evacuazione.

Nelle centrali a fusione le scorie radioattive provengono dall'attivazione neutronica dei componenti del reattore e dalla presenza del trizio. La parte dominante della radioattività indotta dai neutroni è generata nei componenti che si affacciano alla camera di combustione e nel mantello. Questi componenti sono periodicamente sostituiti durante la vita della centrale mentre è previsto che altri componenti, quali la camera da vuoto e i componenti più esterni, restino per l'intero periodo operativo della centrale. Con l'impiego di materiali opportuni a bassa attivazione, all'arresto della centrale a fusione la radiotossicità decade entro 100 anni a valori che sono da diecimila a centomila volte inferiori a quelli della fissione, e paragonabili a quella delle ceneri di una centrale a carbone (figura 6).

Gli studi condotti su vari modelli di centrali a fusione^[2] hanno mostrato che il costo diretto dell'energia elettrica (quotazione 2004) varia tra 0,065 e 0,04 €/kWh, passando dai progetti di centrale più conservativi a quelli più avanzati. In tutti i casi, il costo capitale è la voce predominante, circa il 70%, cui contribuisce per circa il 40% il costo dei magneti, mentre le parti rimpiazzabili durante la vita della centrale rappresentano circa il 5%. I costi esterni dell'energia da fusione sono molto bassi (0,25-0,06 €/cents/kWh) e sono dominati da costi legati a parti convenzionali, in particolare a incidenti convenzionali durante la costruzione.

Lo stato di avanzamento

L'energia da fusione ha conosciuto uno sviluppo sistematico a partire dai primi esperimenti significativi degli anni '60-'70 del secolo scorso (figura 7). Il triplo prodotto $nT\tau_E$ ha raggiunto il valore di $1,5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$. L'operazione in DT, sperimentata nel Tokamak statunitense TFTR e in quello europeo JET, ha portato alla produzione rispettivamente di 11 MW e di 16 MW di

potenza di fusione per alcuni secondi (1994, 1997). Le performance migliori sono ottenute con configurazioni magnetiche di tipo Tokamak sulla cui linea si colloca l'attuale esperimento di punta, ITER. Tale sviluppo è stato reso possibile grazie ad un notevole miglioramento della comprensione della fisica del plasma e dallo sviluppo delle tecnologie. I progressi sono stati segnati in particolare da:

- la scoperta di regimi di plasma caratterizzati da un migliore isolamento termico grazie alla formazione di barriere al trasporto del calore al bordo del plasma (cosiddetti *modi H*, in cui il tempo di confinamento dell'energia τ_E è da due a tre volte più alto che nei regimi di plasma ottenuti precedentemente) e successivamente anche in zone più interne (regimi avanzati) (figura 8);

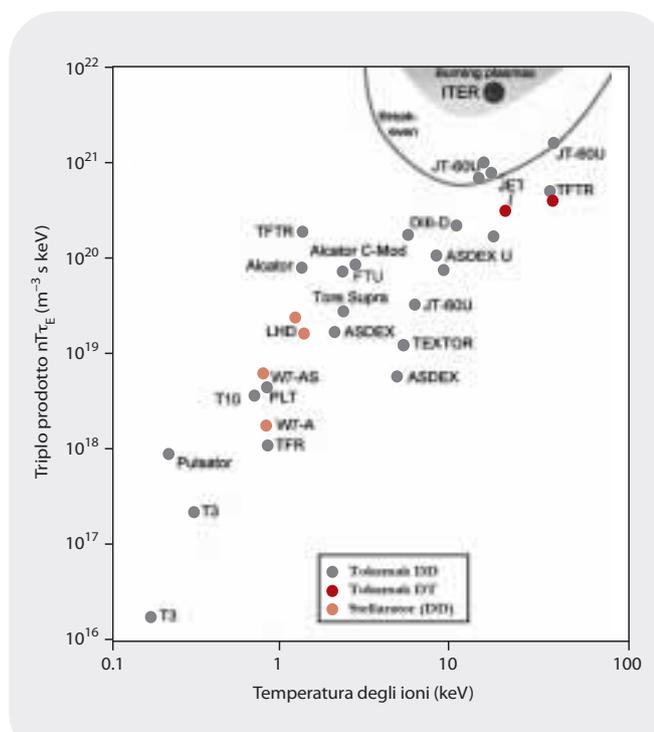


Figura 7

I valori del triplo prodotto $nT\tau_E$ in funzione della temperatura degli ioni ottenuti nei vari esperimenti di fusione nel mondo. La linea verde rappresenta la curva di breakeven ($Q=1$), e la zona gialla rappresenta la regione dei parametri del reattore

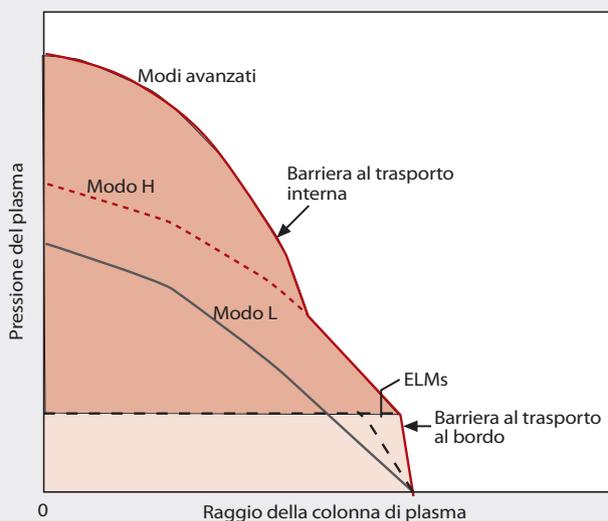


Figura 8
Profili radiali della pressione di plasma nei regimi con confinamento dell'energia migliorato

- la scoperta dei cosiddetti "modi localizzati al bordo" (ELMs) associati al modo H, cioè getti di particelle ed energia localizzati al bordo del plasma dovuti a processi di trasporto turbolento. Tali modi sono di particolare interesse per l'operazione del reattore, perché permettono il controllo del carico della potenza che esce dal plasma sui componenti a ciò dedicati (divertore);
- la possibilità di generare configurazioni di plasma con una frazione molto elevata di corrente "autoprodotta" dal plasma stesso (fino a circa 80% della corrente totale). Tale corrente, detta di *bootstrap*, e apre la strada al funzionamento dei Tokamak in stato stazionario;
- la capacità di controllo delle performance del plasma (per es. stabilità, alta densità) attraverso l'ottimizzazione della forma (tori con sezione trasversale allungata, triangolare ecc.);
- lo sviluppo e la prova di diversi modelli di divertori, cioè di componenti dedicati allo smaltimento delle particelle e del calore emessi dal plasma in grado di dissipare elevati flussi di potenza (dell'ordine di 10 MW/m² in regime stazionario e fino a 20 MW/m² in fasi transienti in un reattore a fusione) senza perturbare il plasma, con l'uso di diversi materiali per il rivestimento delle piastre (figura 9);
- lo sviluppo di efficienti sistemi di riscaldamento del plasma (sistemi a onde elettromagnetiche a radiofrequenza, sorgenti di ioni negativi per fasci di neutri);

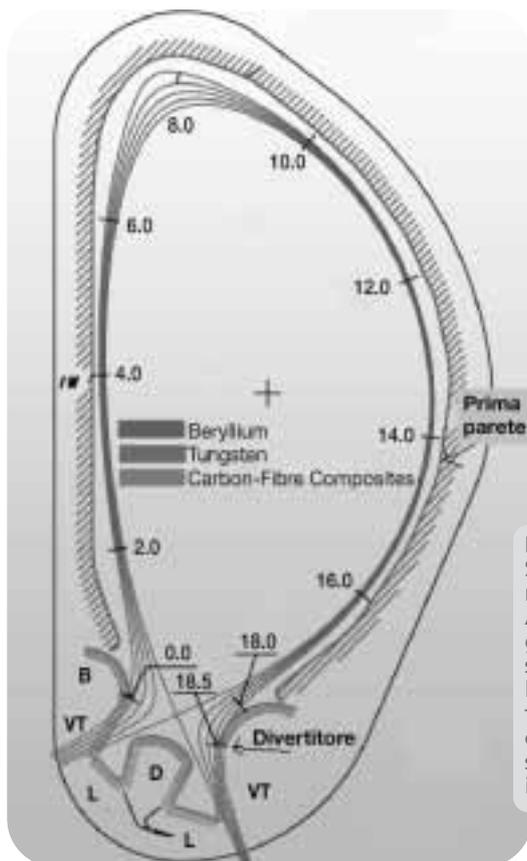


Figura 9
Sezione longitudinale della camera interna di un Tokamak e delle superfici magnetiche al bordo del plasma. Attraverso un'opportuna configurazione del campo magnetico che separa il volume di confinamento del plasma dal volume esterno, le particelle che escono da tale volume sono convogliate su un componente dedicato, il divertore, collocato in una zona appartata della camera da vuoto, e in grado di dissipare la potenza associata alle particelle non confinate, senza perturbare il plasma

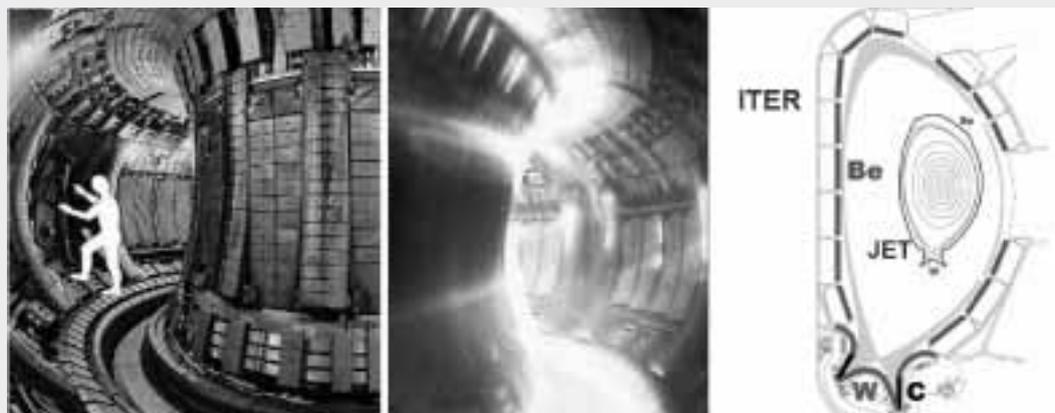


Figura 10

A sinistra: l'interno di JET, con e senza plasma. A destra: Sezione di ITER con l'indicazione dei materiali affacciati al plasma: berillio (Be) sulla prima parete, tungsteno (W) e compositi in fibre di carbonio (C) sul divertore. A causa dell'elevata ritenzione di trizio da parte del C, quest'ultimo potrebbe essere sostituito da W. In JET, la cui sezione è riportata per confronto, saranno utilizzati gli stessi materiali

- lo sviluppo di avanzati sistemi per il controllo in *feedback* delle instabilità del plasma, che consentono di raggiungere prestazioni migliorate e di terminare in modo controllato il plasma all'insorgere di instabilità distruttive.

Il Tokamak europeo Joint European Torus (JET), installato a Culham (Regno Unito), dove ha cominciato a funzionare nel 1983, rappresenta la *facility* più avanzata tra quelle attualmente disponibili. JET ha condotto esperimenti in DT e detiene il record di potenza di fusione prodotta.

Attualmente sta giocando un ruolo di primaria importanza sia nella preparazione e ottimizzazione degli scenari di riferimento delle operazioni di ITER, sia per lo sviluppo dei regimi di funzionamento pienamente stazionari.

Infatti il JET (*figura 10*), per le sue dimensioni (raggio maggiore del toro = 3 m, raggio minore = 1,2 m), per la configurazione del divertore, per la capacità di usare il trizio, per i sistemi ausiliari per il riscaldamento del plasma e la generazione di corrente, e per i sistemi di *remote*

handling di cui è dotato, è la macchina esistente più vicina a ITER. Grazie alla flessibilità consentita dal progetto iniziale, JET è anche in grado di inglobare i più recenti sviluppi scientifici e tecnologici per sfruttare al massimo le potenzialità per il consolidamento di alcune scelte di progetto di ITER.

Al di là di questi fatti particolarmente significativi, il progresso è stato segnato da un continuo miglioramento della comprensione della fisica del plasma e della capacità di modellizzazione e predizione, dalla messa a punto di metodi per il controllo della turbolenza e di vari modi di operazione ad alte *performance* (scenari) con l'uso crescente di mezzi di controllo attivi. Tutto ciò rappresenta la base fisica su cui si è fondato il progetto di ITER e che permette di estrapolare dagli esperimenti attuali a ITER con un elevato livello di confidenza (*figura 11*).

Sulla base del complesso delle acquisizioni fin qui ottenute a livello internazionale, i Paesi impegnati nello sviluppo della fusione hanno concordato di collaborare

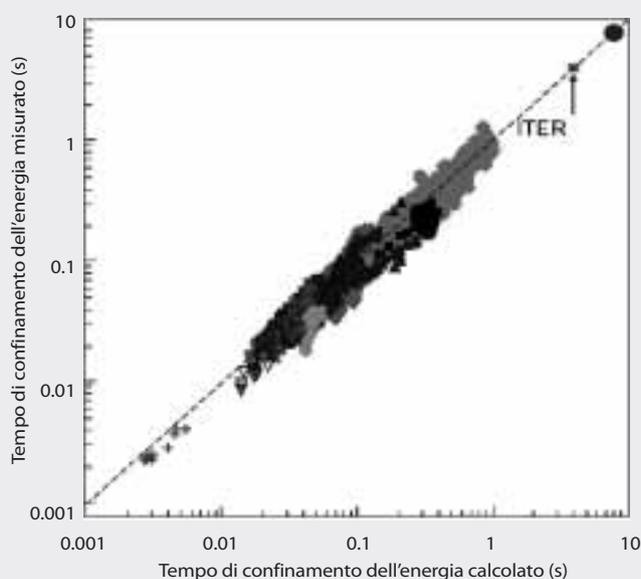


Figura 11

Il tempo di confinamento dell'energia misurato in vari Tokamak, in funzione del tempo di confinamento dell'energia calcolato sulla base di una legge semiempirica (ITER 89-P). Si noti l'estensione dei dati sperimentali su tre decadi, e l'estrapolazione di circa un fattore 3 a ITER

alla costruzione di ITER: un reattore sperimentale progettato in modo da poter costituire l'unico passo intermedio prima della realizzazione di un reattore dimostrativo in grado di generare energia elettrica da fusione (DEMO). La costruzione di ITER è iniziata nel corso del 2007 nel sito europeo di Cadarache (Francia).

L'esperimento internazionale ITER

ITER (*figura 12*), dal latino "via", è stato progettato nell'ambito di una collaborazione internazionale da Europa, Giappone, Stati Uniti e Russia, a cui più recentemente hanno aderito anche Cina, India e Corea.

La proposta della macchina fu avanzata nel 1985, seguita immediatamente da una attività di progettazione concettuale. A

quel tempo, dopo l'entrata in funzione di JET, l'Europa aveva condotto con un certo impulso il proprio progetto successivo a JET (NET, *Next European Torus*), con gli obiettivi di realizzare un plasma prossimo all'ignizione e provare mantelli triziogeni. NET era giunto ad una fase avanzata di progettazione quando l'Europa aderì alla collaborazione internazionale per ITER, nel quale NET fu in buona parte traghettato. Verso la fine della fase di progettazione di dettaglio di ITER, conclusasi nel 1998, apparivano chiare le difficoltà di ottenere le risorse necessarie per procedere alla costruzione della macchina. Si avviò quindi un processo di revisione del progetto al fine di ridurre i costi ridimensionando i parametri e le *performance* del plasma senza tuttavia dover rinunciare agli obiettivi di fondo del progetto. Il nuovo disegno della macchina^[3] fu concordato nel 2001, con i seguenti obiettivi:

- ottenere un guadagno di potenza $Q \geq 10$ in un plasma induttivo (in cui la corrente nel plasma è indotta dal trasformatore), per tempi sufficientemente lunghi (400 s). Dimostrare $Q \geq 5$ in cicli operativi lunghi fino, se possibile, all'operazione stazionaria, ed esplorare le condizioni di ignizione controllata;
- integrare le tecnologie essenziali per il reattore a fusione (magneti superconduttori, telemanipolazione), provare componenti del reattore a fusione (divertore) e moduli di mantello triziogeno per DEMO.

Nel novembre del 2006 i rappresentanti dei sette Paesi promotori e finanziatori di ITER siglarono l'accordo per la costruzione della macchina, dopo una lunga fase di trattative durata quasi 6 anni.

ITER ha dimensioni lineari doppie rispetto a JET (raggio maggiore = 6 m, raggio minore = 2 m), produrrà 500 MW di potenza di fusione, ed è la prima macchina avverta per obiettivo la produzione di energia da fusione, in condizioni in cui predominerà il riscaldamento del plasma da parte

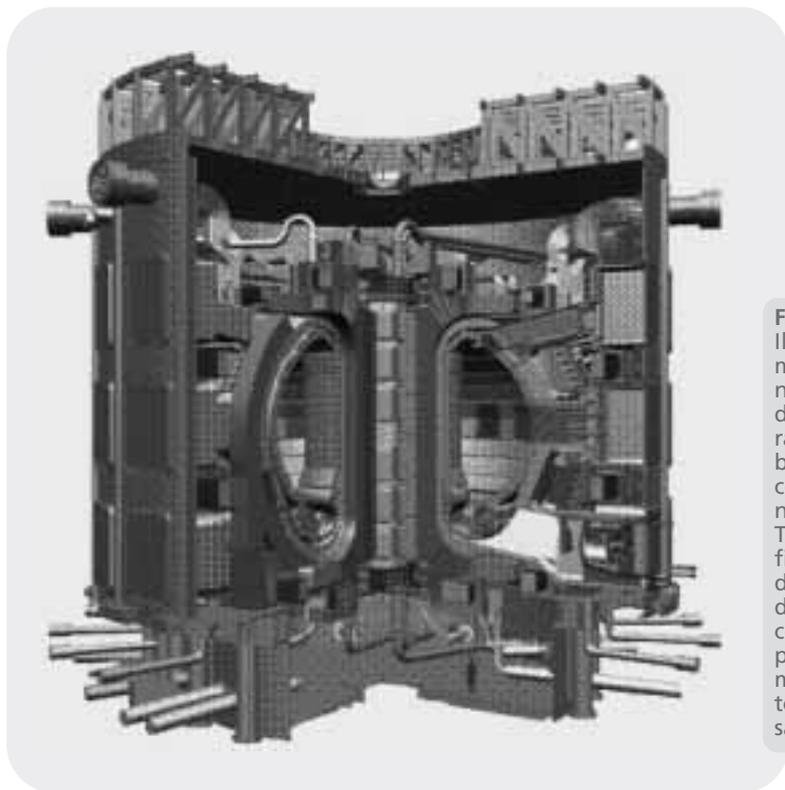


Figura 12

Il reattore sperimentale ITER (raggio maggiore del plasma: 6,2 m, raggio minore: 2 m). Partendo dall'interno: i moduli del mantello schermante, la camera da vuoto con, in basso, il divertore, le bobine del magnete toroidale (superconduttore in Nb₃Sn). Al centro il solenoide centrale (superconduttore in Nb-Ti). Nello spaccato, a destra, si vedono le finestre di accesso attraverso la camera da vuoto, per l'alloggiamento dei sistemi di riscaldamento e di generazione della corrente, dei sistemi diagnostici e delle pompe per la creazione del vuoto. La macchina è contenuta in un criostato alto 24 m e di 28 m di diametro, e racchiusa in uno schermo biologico

riflettore su

dei nuclei di elio prodotti dalle reazioni di fusione rispetto a quello generato dai sistemi esterni.

L'impianto è dimensionato per generare alcune migliaia di impulsi all'anno e verificare le soluzioni oggi ritenute idonee a sperimentare le tecnologie essenziali per una centrale a fusione, in particolare l'uso di superconduttori per il sistema magnetico (necessario per limitare la dissipazione di potenza), il riscaldamento del plasma e il suo controllo con potenza ausiliaria, in modo da provare condizioni per il plasma tali da realizzare cicli operativi lunghi fino, se possibile, all'operazione stazionaria, lo smaltimento dell'energia generata e del combustibile bruciato e il recupero del trizio, il controllo del funzionamento e la sicurezza operativa. Il programma della sperimentazione è definito per 10 anni con un'estensione di altri 10 anni per l'esplorazione della fase stazionaria.

Il progetto di ITER si è basato sull'impiego di tecnologie provate o di prototipi, in molti casi in scala reale, per i componenti con maggiore contenuto innovativo e/o critici. A questo riguardo, le sfide più importanti sono state:

- la realizzazione dei superconduttori in Nb₃Sn per il magnete del campo toroidale e in NbTi per il solenoide centrale, di dimensioni e prestazioni senza precedenti. Durante la fase di R&S e progettazione di ITER, è stata sviluppata la tecnologia necessaria per la produzione dei filamenti, del cavo, del condotto, delle giunzioni, per gli avvolgimenti e per la realizzazione delle bobine. Sono stati realizzati prototipi in scala 1:3 del solenoide centrale e 1:5 della bobina del magnete del campo toroidale (figura 13), e ne sono state provate le prestazioni nei regimi richiesti per ITER (40 kA a 13 T e 80 kA a 6 T, rispettivamente). La produ-



Figura 13
Prototipo della bobina del magnete del campo toroidale di ITER (scala 1:5)

zione di 29 tonnellate di Nb_3Sn "ITER grade" in questa fase, ha permesso di dimostrare e qualificare la capacità produttiva dell'industria in vista della costruzione della macchina;

- la messa a punto, con la realizzazione di prototipi, della tecnologia di fabbricazione della camera da vuoto (composta da 9 settori alti 15 m e larghi 9 m) con particolare riguardo alla precisione, alle saldature e alla fattibilità delle tolleranze richieste;
- lo sviluppo di soluzioni per lo smaltimento di un elevato flusso di calore sulle piastre del divertore. Sono state sviluppate tecnologie *ad hoc* e sono stati realizzati prototipi in scala reale per le soluzioni adottate, basate sull'impiego di tubi in lega di rame (scambiatori di calore) protetti da piastre di tungsteno e composti in

fibra di carbone (materiali sacrificali resistenti alle alte temperature) con un buon contatto termico con il tubo stesso;

- la dimostrazione, con l'utilizzo di prototipi, della manipolazione remota dei componenti interni alla camera da vuoto, cioè i moduli di mantello e il divertore. L'intervento in caso di guasto di tali componenti (per tagli, rimozione, sostituzioni, saldature), richiede la manipolazione a distanza per via dell'attivazione della macchina;
- lo sviluppo di sistemi di riscaldamento e di generazione di potenza con caratteristiche, imposte dai parametri di plasma di ITER, significativamente più avanzati rispetto a quelli già in uso nelle macchine esistenti. Su ITER, infatti, saranno installati due iniettori di fasci di neutri, ciascuno con potenza pari a 16,5 MW per 3.600 s, con 40 A di corrente, ed energia del fascio pari a 1 MeV, per poter depositare energia fino al centro del plasma (per confronto, gli attuali iniettori forniscono potenze di alcuni MW con energie inferiori a 500 kV e con durata di alcuni secondi). Il sistema di riscaldamento e generazione di corrente basato su onde elettromagnetiche a radiofrequenza ha richiesto lo sviluppo di sorgenti ad alta potenza (2 MW – cw) ed alta frequenza (170 GHz).

La definizione del progetto ITER ha catalizzato negli ultimi 15 anni l'impegno di tutti i laboratori e gruppi di ricerca sulla fusione dei Paesi partner. I costi di costruzione (che richiederà circa 10 anni) sono stimati in circa 5 miliardi di € a valuta 2002. I partner contribuiranno *in kind* per il 90% del costo totale, cioè con la fornitura di componenti realizzati direttamente dai partner stessi. Un ulteriore 10% sarà fornito *in cash* e sarà gestito direttamente da ITER. L'Europa, attraverso l'Agenzia *Fusion for Energy* istituita appositamente per questo scopo, contribuirà alla realizzazione per circa il 45% del costo e, parallelamente, promuoverà e metterà in atto un pro-

gramma di ricerca sulla fisica e l'ingegneria del plasma e di sviluppo tecnologico fortemente orientati al successo di ITER e ad accelerarne il risultato. L'attività sperimentale sulle macchine operanti in Europa e la programmazione di aggiornamenti o costruzione di nuovi esperimenti sarà rivista ed allineata a questo obiettivo.

Oltre all'accordo ITER, Europa e Giappone hanno firmato un accordo bilaterale di collaborazione più ampia (*Broader Approach*) per lo svolgimento di attività finalizzate a preparare la costruzione del reattore dimostrativo DEMO.

L'avvio della costruzione di ITER costituisce un punto di svolta per il programma a livello mondiale, da un lato per l'avvio della fase di realizzazione, dall'altro per la definizione del nuovo *Next Step*, cioè DEMO. La collaborazione internazionale sviluppata per ITER continuerà sul piano della ricerca, ma è probabile che il successivo passo vedrà lo sviluppo competitivo di più macchine ad opera di alcuni dei Partner. È interessante sottolineare che recentemente la Corea, la Cina e l'India hanno potenziato notevolmente i rispettivi programmi sulla fusione, e i relativi investimenti, con la costruzione di varie macchine sperimentali. Questi Paesi, che vedono una rapidissima crescita della domanda di energia, si rivolgono alla fusione con strategie di sviluppo estremamente aggressive, nell'ambito delle quali la partecipazione al progetto internazionale ITER è vista come un passo fondamentale per acquisire esperienze da mettere a frutto nelle attività domestiche in vista di una rapida realizzazione dell'energia da fusione.

La Roadmap europea

Nel 2001, su richiesta della Presidenza dell'Unione Europea, un gruppo di esperti elaborò una proposta di programma verso lo sfruttamento commerciale della fusione^[4] che, con successivi aggiornamenti, è divenuta la Roadmap di riferimento per l'U-

nione Europea (*figura 14*). Tale programma prevede alcuni passi fondamentali, di cui il primo è costituito dalla costruzione e l'operazione del reattore sperimentale ITER che dovrà fornire in un tempo relativamente breve le risposte cruciali per la definizione dei parametri per il reattore dimostrativo DEMO.

Il passo successivo, DEMO, dovrà sperimentare tutte le operazioni di una centrale di potenza a fusione, in particolare la produzione continua di energia, con conversione in elettricità, e produzione, recupero e riciclo del trizio necessario per l'autosostentamento del reattore, con un funzionamento quasi-stazionario per lunghi periodi con metodi non induttivi.

La realizzazione di centrali commerciali richiederà, inoltre, un'attività per lo sviluppo di materiali idonei e per la relativa fabbricazione industriale. Da un lato, tali materiali debbono presentare caratteristiche di bassa attivazione indotta da neutroni in modo da non richiedere la necessità di depositi geologici permanenti in sito profondo: a questo riguardo, il programma fusione si è dato l'obiettivo di realizzare e utilizzare materiali riciclabili nell'arco di circa un secolo. In termini economici, gli stessi materiali debbono presentare caratteristiche di resistenza per tempi sufficientemente lunghi (almeno circa 5 anni per i mantelli triziogeni) nei flussi neutronici tipici del reattore prima di essere sostituiti, in modo da non pesare negativamente né sui costi di investimento né sulla disponibilità del reattore stesso. L'Europa ha prodotto l'acciaio martensitico Eurofer come materiale di riferimento per DEMO, le cui caratteristiche di bassa attivazione (*figura 15*) sono ottenute sostituendo gli elementi di lega ad alta attivazione, quali Ni, Mo e Nb, con W, V e Ta. Più a lungo termine, le fibre in carburo di silicio (SiC_x/SiC) sono considerate il materiale più promettente per l'impiego nel reattore a fusione per l'elevata temperatura di lavoro (fino a 1100 °C), per le caratteristiche di bassa attivazione, la

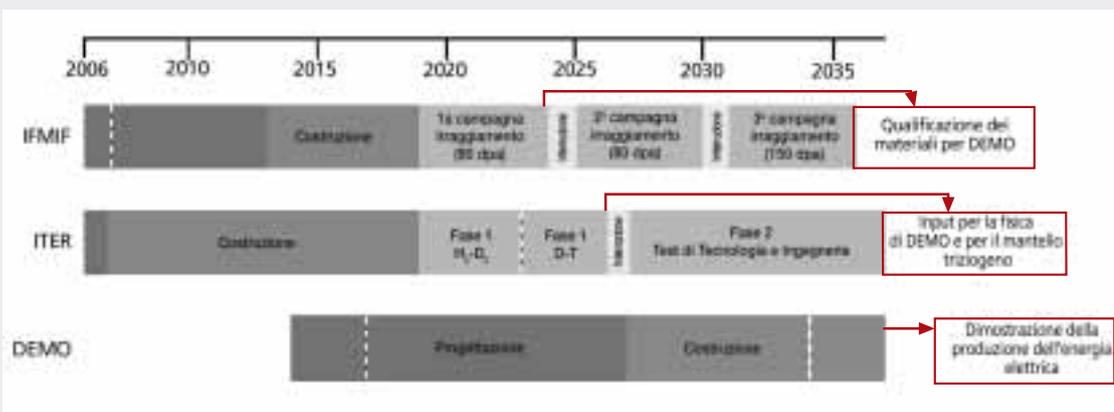


Figura 14
Programma europeo di riferimento della fusione

compatibilità con altri materiali e la resistenza a shock termico. Attualmente, questi materiali sono in fase di caratterizzazione in impianti a fissione con risultati alquanto promettenti. Tuttavia, la qualificazione dei materiali richiederà prove in una sorgente intensa di neutroni che simuli l'effettivo spettro in energia dei neutroni di fusione³. Tale impianto, chiamato IFMIF (*International Fusion Material Irradiation Facility*), è in corso di progettazione e la realizzazione dei prototipi dei componenti principali è prevista entro 6 anni, nel quadro dell'accordo bilaterale *Broader Approach* fra Europa e Giappone. IFMIF produrrà oltre 10^{17} neutroni/s attraverso il bombardamento di un bersaglio di litio metallico in movimento con nuclei di deuterio ad alta energia (40 MeV) accelerati in due acceleratori lineari, con 125 mA di corrente ciascuno.

Nell'ultimo decennio sono stati condotti vari studi per valutare gli aspetti di sicu-

rezza, impatto ambientale e economicità della fusione, al fine di meglio indirizzare il programma. Il cosiddetto *European Power Plant Conceptual Study (PPCS)*^[2], durato 3 anni e condotto con il coinvolgimento di buona parte della comunità scientifica, ha studiato quattro diversi modelli di reattori commerciali, tutti basati sul concetto Tokamak e su estrapolazioni di JET e ITER. Di questi, due richiedono sviluppi di tecnologie ed estrapolazioni dei regimi di plasma limitati rispetto a ITER e realizzabili a breve termine in DEMO, mentre gli altri si basano su concetti tecnologicamente più avanzati. I modelli a breve termine sono così caratterizzati:

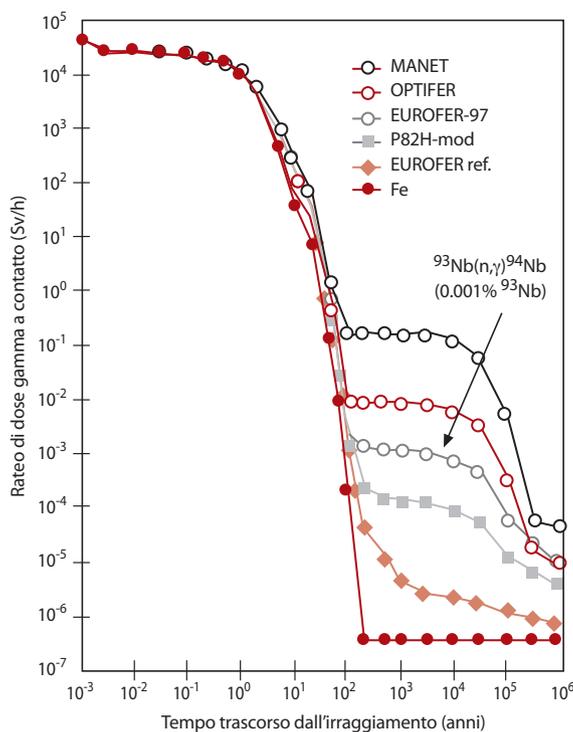
a. *Helium Cooled Pebble Bed (HCPB)* – in questo concetto, il materiale trizio è litio ceramico (l'opzione di riferimento prevede Li_4SiO_4) in forma di sfere di diametro dell'ordine del millimetro (*pebbles*), mentre il moltiplicatore neutronico è berillio, anch'esso in forma di *peb-*

3. I neutroni prodotti nella reazione D+T hanno energia (14 MeV) significativamente più alta di quella dei neutroni da fissione (circa 1-2 MeV). Nei materiali impiegati nel reattore a fusione, i neutroni di più elevata energia danno luogo ad una produzione di gas idrogeno e elio (attraverso reazioni nucleari (n,p) e (n, α)) circa 100 volte più elevata a parità di flusso neutronico, causandone la degradazione delle proprietà fisiche e meccaniche in misura superiore rispetto al caso della fissione.



Figura 15

Sopra: acciaio a bassa attivazione Eurofer-97 sviluppato in Europa come materiale strutturale per DEMO. A destra: il rateo dose gamma calcolato per vari acciai a bassa attivazione, risultante dall'esposizione al flusso neutronico per 5 anni sulla prima parete del reattore a fusione: MANET ('85, Europa), OPTIFER (1990 Europa) F82H ('95, Giappone), Eurofer-97 (1997). La differenza tra Eurofer-97 e F82H è dovuta principalmente al contenuto di impurità di Niobio (0.001% in Eurofer-97, 0.0001% in F82H). "Eurofer ref." rappresenta l'obiettivo da raggiungere (Nb < 0.000001%).



riflettore su

bles. L'estrazione del trizio generato dai letti di pebbles di litio ceramico avviene mediante *purging* di elio a pressione poco più che atmosferica e a portata relativamente bassa. L'asportazione della potenza termica generata nel mantello ha luogo mediante elio ad alta pressione fluente attraverso piastre di refrigerazione che delimitano i letti di *pebbles*;

b. *Helium Cooled Lithium Lead* (HCLL) – il materiale triziogeno ed il moltiplicatore neutronico sono uniti in un unico materiale, la lega di litio-piombo in composizione eutettica (Li al 15,6% at), fusa e fluente a bassa velocità attraverso le piastre di refrigerazione in cui scorre elio, nelle stesse condizioni di pressione del concetto HCPB. L'estrazione del trizio generato nella massa di metallo liquido avviene esternamente al reattore.

I due concetti HCPB e HCLL (*figura 16*) saranno provati in ITER, insieme ad altri concetti sviluppati dagli altri partner. I moduli di prova da installare in ITER saranno realizzati incorporando le tecnologie richieste per il successivo funzionamento in DEMO. Le prove in ITER permetteranno di verificare le *performance* dei mantelli e la loro operabilità in presenza di campo magnetico, di flusso di calore dalla prima parete e di instabilità di plasma.

Per ciascuno dei modelli, sono stati valutati gli aspetti di sicurezza, impatto ambientale ed economicità, già riportati precedentemente, i quali dipendono prevalentemente dai materiali utilizzati e dal grado di maturità delle tecnologie adottate. Il coinvolgimento dell'industria dovrebbe progressivamente crescere durante la fase di realizzazione di ITER ed IFMIF, per di-

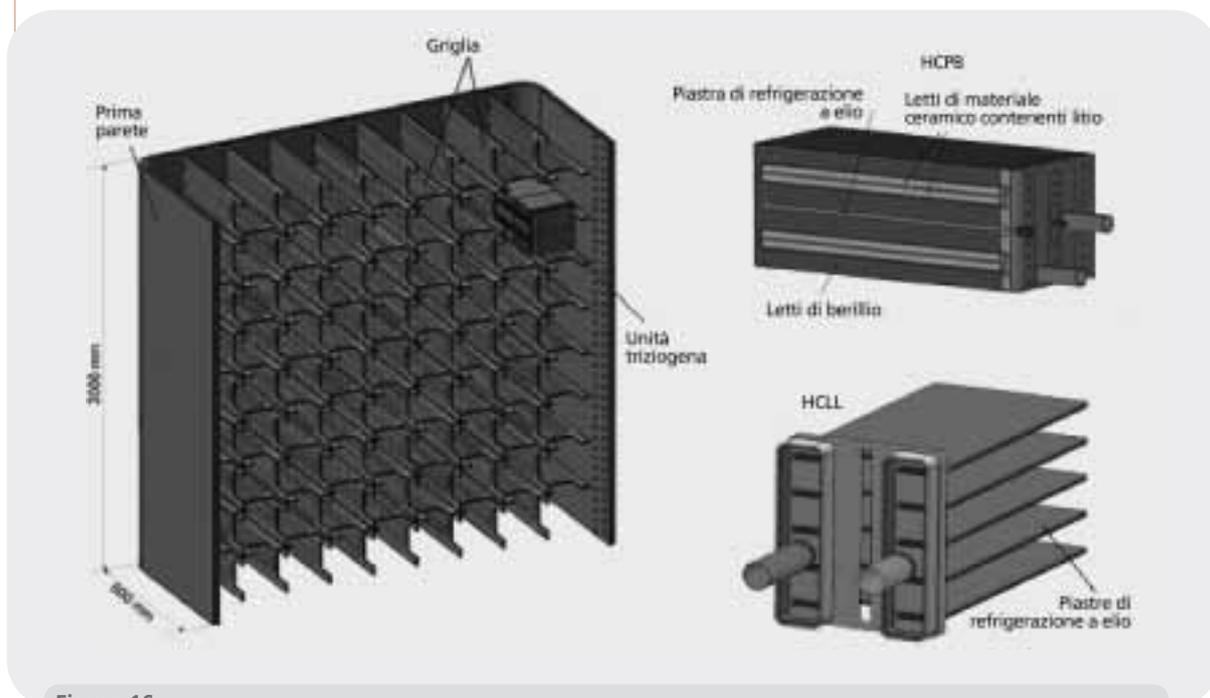


Figura 16

Moduli di mantello triziogeno per DEMO (progetti europei) – *A sinistra*: struttura comune in Eurofer che include la prima parete e la griglia per l'alloggiamento delle unità triziogene. *A destra, in alto*: unità triziogena relativa al concetto HCPB, con i due letti di Li_4SiO_4 , immersi in berillio; *in basso*: unità relativa al concetto HCLL, con le piastre di refrigerazione in Eurofer lungo i quali viene fatto circolare il LiPb

venire determinante nella progettazione e realizzazione di DEMO. Esso dovrebbe consentire, in una successiva fase di sfruttamento commerciale, di affrontare aspetti come affidabilità, operabilità, facilità di manutenzione, disponibilità, cioè di economicità della fusione.

Il ruolo dell'Italia

L'Associazione italiana per la fusione è rappresentata dall'ENEA (Associazione Euratom – ENEA sulla fusione) in qualità di coordinatore nazionale e include, oltre all'ENEA, il Consorzio RFX e l'Istituto di Fisica del Plasma del CNR (IFP-CNR) di Milano. Altri partner sono il Consorzio CREATE (Consorzio di Ricerca per l'Energia e le Applicazioni Tecnologiche dell'Elettromagnetismo), il Politecnico di Torino e le Università di Catania e Roma II Tor Vergata. L'Italia conduce attività di fisica della fu-

sione con due grandi impianti per la fusione a confinamento magnetico, oltre all'impianto laser ABC per quella a confinamento inerziale. Altrettanto rilevante è l'attività di ricerca e sviluppo delle varie tecnologie specifiche della fusione.

Nel Centro dell'ENEA di Frascati opera dagli inizi degli anni '90 il Tokamak denominato Frascati Tokamak Upgrade (FTU, figura 17) che consente di studiare plasmi a campi magnetici medio alti e ad alta densità, di interesse per ITER. Nella linea dei concetti alternativi, in collaborazione con l'esperienza MAST della UKAEA (Regno Unito), è in via di realizzazione un esperimento (Multipinch) nell'ambito del progetto del Tokamak sferico Protosphaera che si propone di investigare le proprietà dei Tokamak sferici, privi di trasformatore centrale. Oltre alla sperimentazione sugli impianti e alla partecipazione all'esperimento JET, si conducono attività rilevanti di studi di fisi-

ca teorica e simulazioni numeriche dei plasmi, con particolare riguardo alla teoria della microturbolenza nel plasma, all'analisi lineare e non lineare delle fluttuazioni magneto-idrodinamiche in presenza di riscaldamento ausiliare, all'analisi predittiva del trasporto del calore finalizzata all'ottimizzazione della performance, all'analisi dettagliata del riscaldamento con microonde e analisi degli effetti collettivi indotti dagli ioni energetici così generati.

Il Consorzio RFX, con sede a Padova, costituito da ENEA, CNR, Università, Acciaierie Venete SpA, conduce l'esperimento RFX (macchina toroidale con configurazione *Reversed Field Pinch*), e attività tecnologiche, in particolare sulle alimentazioni elettriche e gli iniettori di fasci di particelle energetiche per il riscaldamento del plasma. Recentemente, anche l'INFN è entrato tra i soci del Consorzio RFX, per apportare le sue specifiche competenze nel settore degli acceleratori di particelle, in vista delle nuove realizzazioni previste dal pro-

getto ITER e *Broader Approach*. IFP-CNR a Milano è attivo nella fisica del plasma di laboratorio, in particolare per ciò che riguarda l'interazione di onde elettromagnetiche con il plasma. L'IFP-CNR collabora da anni con ENEA sullo sviluppo, sperimentazione e gestione del sistema ad onde millimetriche di grande potenza usato per riscaldare e stabilizzare il plasma su FTU.

Parallelamente, l'Italia è stata protagonista nella partecipazione al programma tecnologico per ITER e per DEMO. Fino dagli anni '80, nei laboratori ENEA di Frascati sono state sviluppate tecnologie per la fusione, privilegiando le linee basate sulle conoscenze più consolidate all'interno dei laboratori e, al tempo stesso, passibili di un robusto coinvolgimento dell'industria nazionale anche per applicazioni più vaste di quelle specifiche della fusione. Le linee sviluppate sono state, in particolare, la superconduttività, i materiali, l'ingegneria elettrica ed elettronica la manutenzione remota, le alimentazioni di potenza, la neu-



Figura 17

Il Frascati Tokamak Upgrade (FTU, raggio maggiore 0,93 cm, raggio minore 0,33 cm), operante nel Centro ENEA di Frascati, è la macchina per la fusione operante al più alto campo magnetico (8T) e consente di studiare plasmi in condizioni fisiche non realizzabili in altre macchine e di interesse per ITER



Figura 18
Cavo di Nb₃Sn per i magneti superconduttori di ITER sviluppato in collaborazione tra ENEA e LUVATA di Fornaci di Barga (Lucca)



Figura 19
Prototipo a media scala del pannello verticale del divertore di ITER, realizzato con tegole in tungsteno (parte piana) e composto in fibra di carbonio (parte curva) realizzato nell'ambito di una collaborazione tra ENEA e ANSALDO Ricerche - Genova

tronica e dati nucleari, la tecnologia dei metalli liquidi, il ciclo del combustibile, la sicurezza. A partire dagli inizi degli anni '90 del secolo scorso, il coinvolgimento del Centro ENEA del Brasimone, dotato di un notevole parco di impianti e dispositivi sperimentali, ha permesso di avviare con notevole impulso attività di caratterizzazione sperimentale e supporto allo sviluppo dei mantelli triziogeni e dei componenti affacciati al plasma.

La nuova fase avviata dall'accordo internazionale per la realizzazione di ITER e da quello bilaterale Europa-Giappone per le attività di *Broader Approach* ad esso collegate, ha portato recentemente alla ridefinizione del programma italiano durante il decennio della costruzione di ITER.

Tale programma prevede, in primo luogo, la partecipazione alla costruzione di ITER mediante una qualificata presenza di ricercatori e tecnici italiani nelle organizzazioni preposte alla realizzazione (ITER, *Fusion for Energy*), e il supporto al sistema industriale italiano per la realizzazione delle forniture ad ITER. L'Italia, infatti, punta ad acquisire circa il 20% delle commesse europee, in particolare per la fornitura di magneti superconduttori, componenti esposti ad elevati flussi di calore, componenti meccanici di grandi dimensioni ad elevata precisione, sistemi per controllo e telemanipolazione, sistemi di riscaldamento ausiliari e diagnostici, elettronica di potenza. Una parte delle attività vedrà coinvolti anche i settori più tradizionali, come ad esempio l'edilizia e la relativa impiantistica.

I laboratori di ricerca italiani, d'altra parte, contribuiranno con lo sviluppo, progettazione e realizzazione di componenti ad alto contenuto scientifico e tecnologico, quali il divertore, alcuni sistemi diagnostici e di riscaldamento del plasma, i moduli di prova di mantelli triziogeni, i sistemi di visione interna, i sistemi di controllo e di telemanipolazione. L'Italia continuerà a fornire un sostanziale supporto alla realizzazione di ITER nel campo delle analisi neu-

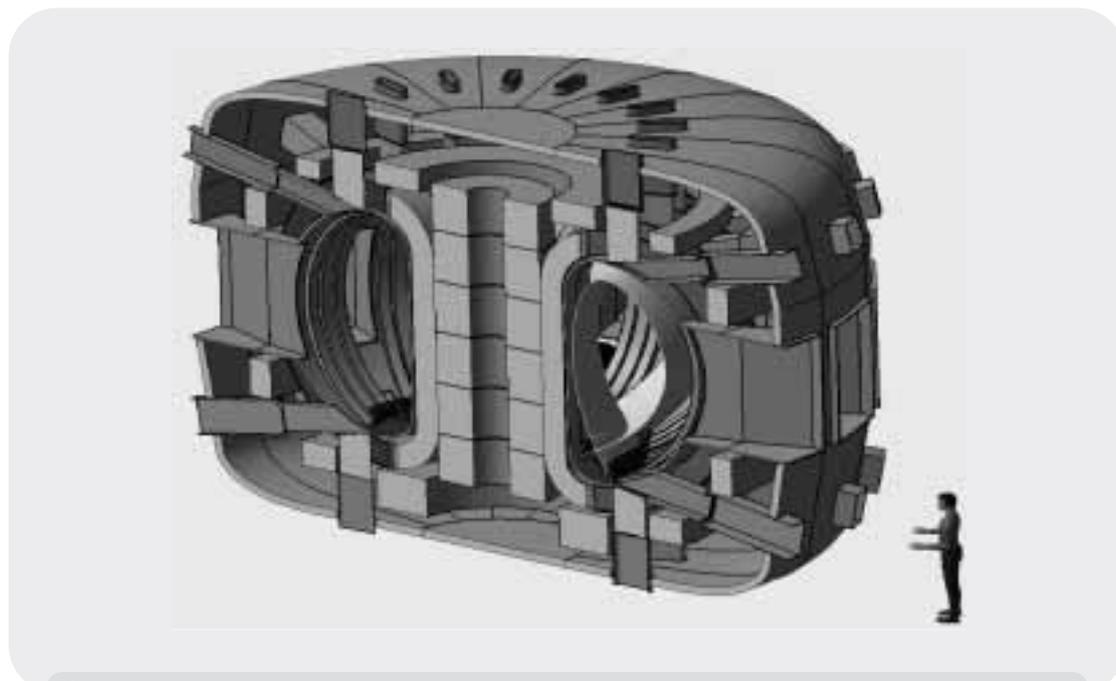


Figura 20

FAST (Fusion Advanced Studies Torus, raggio maggiore 1,82 m, raggio minore 0,64 m) è un Tokamak proposto da ENEA e dagli enti e gruppi universitari che fanno parte dell'Associazione Euratom – ENEA come esperimento ad altissime prestazioni di accompagnamento a ITER

troniche, elettromagnetiche e strutturali, e della sicurezza.

Il Consorzio RFX dovrà realizzare il laboratorio di prova dell'iniettore di fasci neutri per ITER dove verranno provati in maniera integrata componenti quali la nuova sorgente a radiofrequenza di ioni negativi, l'acceleratore, il neutralizzatore e il separatore di ioni residui.

Nel quadro del *Broader Approach*, l'ENEA e il Consorzio RFX parteciperanno alla progettazione e realizzazione di parte del magnete del campo toroidale e del sistema di alimentazione del Tokamak giapponese satellite di ITER (JT-60SA). I laboratori INFN di Legnaro parteciperanno alla realizzazione dell'acceleratore a radiofrequenza dell'impianto IFMIF. Sempre nell'ambito del progetto IFMIF, ENEA coordinerà le attività di sviluppo e progettazione di uno dei concetti di riferimento del bersaglio di litio; inoltre condurrà attività sperimentali di movimentazione remotizzata e assem-

blaggio del bersaglio, di sperimentazione sulla corrosione-erosione da litio dei materiali strutturali del bersaglio e del circuito che lo contiene, nonché sulle tecnologie di controllo e di monitoraggio delle impurità del litio stesso.

Poiché le macchine sperimentali attualmente in operazione in Europa risulteranno obsolete al momento dell'avvio della sperimentazione in ITER, si renderà necessario costruire nuove macchine con missioni complementari per il migliore sfruttamento di ITER e l'implementazione della *Roadmap* verso DEMO. In questo contesto si inserisce la proposta italiana di un esperimento studiato per contribuire in modo efficace a tali missioni. La macchina, denominata FAST (*figura 20*), proposta da tutti i gruppi di ricerca dell'Associazione Euratom – ENEA, rappresenterà non solo il punto di riferimento della sperimentazione per l'Italia ma anche per gli altri laboratori europei. FAST si propone come esperimento

Il Quadro europeo di ricerca sulla fusione magnetica

Le ricerche sulla fusione magnetica sono condotte in tutti i paesi della UE, secondo un programma integrato e coordinato dalla Commissione Europea nell'ambito del Trattato Euratom, con l'obiettivo comune di *realizzare prototipi di reattori per impianti di potenza in grado di soddisfare i requisiti di sicurezza delle operazioni, rispetto dell'ambiente e fattibilità economica*. Il coordinamento avviene mediante contratti di associazione tra Euratom e gli Stati membri. L'Italia fu tra i fondatori dell'Euratom ed è ancora oggi uno dei principali protagonisti dello sviluppo della fusione in Europa. L'ENEA rappresenta l'Italia nell'Associazione con Euratom.

La collaborazione è rafforzata dall'accordo europeo sullo sviluppo della fusione (EFDA) cui è affidato il coordinamento su imprese comuni, quali l'utilizzazione scientifica dell'esperimento comunitario JET (*Joint European Torus*).

Recentemente è stato istituito l'*European Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy (Fusion for Energy, F4E)*, con lo scopo di attuare il contributo europeo a ITER, implementare l'accordo bilaterale di collaborazione tra Europa e Giappone (*Broader Approach*), preparare la costruzione del reattore dimostrativo DEMO.

I finanziamenti da parte della Commissione Europea sono erogati attraverso i Programmi Quadro (PQ) comunitari di ricerca e sviluppo tecnologico (Programma Euratom - Fusione), e contribuiscono mediamente a circa un terzo dei costi delle attività di R&S, il rimanente essendo a carico dei Paesi associati.

Nell'ambito del Settimo PQ sono stanziati 1.947 M€ per il periodo 2007-2011 per la ricerca sulla fusione. Tale stanziamento è circa 1,9 volte maggiore rispetto ai PQ precedenti e servirà a finanziare il contributo europeo a ITER, l'attività di R&S nei campi della fisica e della tecnologia in preparazione del funzionamento di ITER, attività preparatorie per DEMO e la formazione di risorse umane. Attualmente, circa 2000 tra ricercatori, ingegneri e tecnici, e alcune centinaia di dottorandi, lavorano nel campo della fusione in più di 30 laboratori in Europa.

Quello della fusione può costituire a buon titolo un esempio da studiare e da seguire nel costruire lo Spazio Europeo della Ricerca. La fusione (certamente grazie al suo particolare status) ha goduto sin qui della disponibilità di buoni strumenti (quali ad esempio la mobilità dei ricercatori), della presenza di un esperimento *leader* comune (JET), di una *governance* risultante da un buon equilibrio di *top-down* (coordinamento-indirizzo) e di *bottom-up* (partecipazione - indirizzo da parte degli istituti associati). Ciò ha garantito il libero sviluppo delle idee e, al tempo stesso, la focalizzazione su un obiettivo chiaro e condiviso. I progressi sono stati periodicamente valutati da panel di esperti esterni i quali, di volta in volta, hanno anche tracciato le linee guida e le priorità del programma.

L'*European Strategic Energy Technology (SET) Plan*, recentemente approvato dal Consiglio Europeo, viene confermato l'interesse strategico per la fusione come una delle pochissime tecnologie per la produzione su larga scala di energia elettrica per il carico di base e senza emissione di CO₂ disponibili per la seconda metà del secolo.

to satellite rispetto ad ITER, ed è progettato in maniera tale da preparare e ottimizzare gli scenari operativi di ITER e DEMO, e di studiare in plasmi di deuterio la dinamica delle particelle alfa che si produrranno nei plasmi prossimi all'ignizione, in un impianto più semplice ed economico, senza le complicazioni derivanti dall'uso del tri-

zio. I parametri adimensionali di FAST (ovvero normalizzati ai parametri fisici rilevanti) sono vicini a quelli di ITER e le condizioni operative spaziano da regimi ad altissime prestazioni ($Q = 3$, equivalente DT), a regimi ad impulsi lunghi, fino a 200s di durata (scenari avanzati). Consentirà inoltre di provare e qualificare soluzioni innovati-

ve di divertore e prima parete, rilevanti sia per ITER sia per DEMO, ad esempio con l'impiego di tungsteno come materiale strutturale e di rivestimento, o con l'impiego di metalli liquidi per le piastre.

Nel frattempo, il programma di accompagnamento prevede un'intensa attività sperimentale di ricerca con il pieno sfruttamento degli impianti esistenti FTU e RFX, di ricerche teoriche e simulazioni numeriche.

Conclusioni

La fusione presenta un'enorme potenzialità come fonte di energia primaria di larga scala e ottime caratteristiche dal punto di vista del rispetto dell'ambiente, della disponibilità del combustibile e della sicurezza dell'approvvigionamento. Le attività sviluppate negli scorsi decenni hanno consentito di comprendere e risolvere gran parte dei problemi scientifici del confinamento magnetico e del riscaldamento del plasma, ed hanno portato a significativi progressi nei risultati ottenuti con i plasmi sperimentali. Allo stato attuale, la *Roadmap* verso lo sfruttamento dell'energia da fusione richiede ancora alcuni passi fondamentali.

Il progetto ITER permetterà di dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione e fornire elementi utili per lo sviluppo, entro 30 anni, di un impianto (DEMO) capace di produrre con continuità energia elettrica. Un'accelerazione di alcuni anni sarebbe possibile a fronte di maggiori risorse annue (ma con risorse totali fino al risultato circa equivalenti). La sorgente intensa di

neutroni IFMIF permetterà di caratterizzare e qualificare i materiali da impiegare in DEMO e quindi nel reattore a fusione.

La collaborazione internazionale realizzata per ITER continuerà sul piano della ricerca, ma è prevedibile che il successivo passo, la costruzione di DEMO, vedrà lo sviluppo competitivo di più macchine ad opera di alcuni Paesi partner di ITER, favorendo in questo modo la successiva commercializzazione. A tal proposito, è interessante sottolineare che i Paesi orientali a rapida crescita demografica ed economica (Cina, India e Corea del Sud) sono entrati nel progetto ITER e perseguono i rispettivi programmi domestici sulla fusione con grande determinazione.

Nell'ambito del programma europeo, l'Italia in generale, e l'ENEA in particolare, hanno svolto un ruolo da protagonisti nello sviluppo della fusione, sia nella fisica sia nella tecnologia. Per mantenere le posizioni conquistate e per trarre il maggior profitto dalle opportunità offerte dalla costruzione di ITER, i gruppi di ricerca appartenenti all'Associazione Euratom-ENEA hanno elaborato un ambizioso programma, di grande rilievo nell'ambito europeo, che ha nel Tokamak satellite FAST e nell'impianto di prova dell'iniettore di fasci di neutri per ITER i punti di forza. Per essere attuato con la necessaria incisività, tale programma richiede impegno e adeguate risorse, soprattutto quelle umane. La formazione avrà quindi un ruolo fondamentale per garantire, in un programma così vasto, il necessario ricambio generazionale.

Bibliografia

- [1] Per una più approfondita descrizione dello stato e prospettive della fusione si veda: P. Batistoni, A. Coletti, A. Della Corte, F. Gnesotto, E. Lazzaro, P. Martin, A. Pizzuto, I. Ricapito, F. Rosatelli, G. Rostagni, G. Sanguinetti, C. Strangio, A. Tuccillo, G. Vlad, *Energia da Fusione, Focus Sviluppo Sostenibile*, ENEA 2008, da cui il presente articolo è tratto.
- [2] D. Maisonnier et al., The European power plant conceptual study, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 75-79, November 2005, 1173-1179, www.efda.org

[3] N. Holtkamp and for the ITER Project Team. An overview of the ITER project, *Fusion Engineering and Design*, Volume 82, Issues 5-14, October 2007, Pages 427-434, www.iter.org

[4] The King Report - Conclusions of the Fusion Fast Track Experts Meeting held on 27 November 2001, chaired by Prof. Sir David King, <http://www.fusion.org.uk/culham/fasttrack.pdf>

ITER: un grande passo avanti (ma con alcuni limiti)

Guido Possa

Presidente della 7ª Commissione permanente (Istruzione pubblica, beni culturali) del Senato

La sperimentazione con ITER permetterà di acquisire conoscenze indispensabili per l'utilizzazione commerciale dell'energia da fusione nucleare. Tuttavia, essa dovrà essere affiancata da altri progetti per lo sviluppo dei materiali e la messa a punto di altre tecnologie reattoristiche non comprese tra gli obiettivi di ITER. Ciò richiederà un'ulteriore fase dopo ITER per la costruzione di una centrale dimostrativa

ITER: a Great Step Ahead (but with some limits)

ITER experimentation will improve the knowledge essential for the commercial use of nuclear fusion energy. Yet it will have to be supported by other projects for the development of materials and other reactor technologies not included in the ITER objectives. This will imply an additional post-ITER phase aimed at setting up a nuclear fusion test plant

Da alcuni mesi sono iniziati sul sito di Cadarache in Francia i lavori di predisposizione del terreno per la costruzione del grande reattore a fusione nucleare ITER. Si tratta di una tappa molto rilevante nella complessa storia delle ricerche volte allo sviluppo delle tecnologie necessarie per l'utilizzazione civile dell'energia da fusione nucleare, in corso da oltre 50 anni nei principali Paesi industriali.

Giustificano tale imponente sforzo di ricerca, che non ha eguali per entità e durata, le davvero straordinarie potenzialità energetiche delle reazioni di fusione dei nuclei leggeri. Nella reazione di fusione dei due isotopi dell'idrogeno deuterio (D) e trizio (T) – la reazione di gran lunga più agevole da realizzare, quella che sarà utilizzata in ITER – un kg di nuclei di D e T (composto in termini di massa da 1/3 di D e 2/3 di T), integralmente portato a fusione D + T, sviluppa un'energia termica equivalente a quella prodotta dalla combustione di 8.200 tonnellate di petrolio! E a tale enorme produzione energetica non è associata alcuna produzione di gas serra! Sulla Terra il deuterio è molto abbondante (ogni kg di acqua ne contiene 18,75 milligrammi) ed è facilmente ricavabile; il trizio è invece rarissimo, ma è prodotto in abbondanza nei reattori a fissione moderati ad acqua pesante ed è ottenibile dal litio utilizzando i neutroni prodotti nella reazione di fusione D + T (così si farà in ITER).

ITER

ITER è un impianto sperimentale di estrema complessità, basato su un Tokamak di grandi dimensioni, nettamente le maggiori finora sperimentate. La reazione di fusione D + T utilizzata produce, come è noto, un neutrone di alta energia (14,1 MeV) e una particella alfa (un nucleo di elio 4) di

energia pari a 3,5 MeV: l'80% circa dell'energia termica generata da questa fusione è data ai neutroni, che fuoriescono dal volume della camera toroidale dove avviene la reazione, e solo il 20% resta alle particelle alfa, che rimanendo nel plasma, possono perciò contribuire al suo riscaldamento. Per rendere possibile la fusione dei nuclei D e T, occorre che la temperatura del plasma (il gas speciale formato da nuclei di deuterio e nuclei di trizio, entrambi carichi positivamente, nonché da elettroni, carichi negativamente) superi i 100 milioni di gradi. Obiettivo primario di ITER è raggiungere per la prima volta al mondo, sia pure in funzionamento impulsato (con impulsi della durata di varie decine di secondi) la ragguardevole potenza termica di fusione di 500 MW, realizzando un guadagno Q almeno pari a 10 tra la potenza termica generata nella fusione e la potenza ausiliaria iniettata nel plasma per il suo riscaldamento.

Vi sono due elementi del contesto relativo ad ITER che vanno sottolineati per la loro grande importanza. ITER è un'iniziativa internazionale a cui partecipano tutti i principali Paesi del mondo attivi nel settore della fusione nucleare: l'Unione Europea (che la sostiene per il 45%), Giappone, Stati Uniti, Russia, Cina, India e Corea del Sud (con un onere del 9% per ciascuno di questi Paesi). Determinante per realizzare tale difficile convergenza internazionale è stata l'azione svolta negli anni 2003-2006 dal Ministro Letizia Moratti (coadiuvato dal prof. Giorgio Rostagni). ITER, inoltre, è visto (in particolare dall'Unione Europea, ma anche dal Giappone) come il primo e fondamentale passo di una complessa *Road Map* avente come obiettivo finale la messa a punto delle conoscenze necessarie per la costruzione e l'esercizio di una grande centrale dimostrativa per la

produzione di energia elettrica basata sulla fusione nucleare. Questa *Road Map* prevede in particolare:

- la costruzione di ITER (che richiederà 10 anni) e la sua sperimentazione per un periodo di 20-25 anni, supportata e accompagnata da un rilevante sforzo di ricerca e sviluppo (finanziato in particolare dall'Unione Europea e dal Giappone);
- la costruzione e sperimentazione della importante *facility* IFMIF, dove verrà studiato il danneggiamento dei materiali prodotto dai neutroni di 14,1 MeV generati nella reazione di fusione;
- il reattore di grande potenza DEMO, dove verranno provati a lungo termine, in condizioni operative identiche a quelle previste per la grande centrale elettro-nucleare dimostrativa, tutti i componenti dell'isola nucleare (precedentemente sviluppati nella sperimentazione su ITER e verificati su IFMIF quanto a compatibilità neutronica dei materiali).

Nella sperimentazione su ITER i principali specifici obiettivi di studio saranno i seguenti (tutti punti chiave indispensabili per una centrale commerciale a fusione):

- la piena comprensione della fisica del plasma in condizioni di fusione D + T ad oltre 100 milioni di gradi (fino ad un guadagno $Q = 10$ in condizioni pulsate);
- la verifica del funzionamento e dell'efficienza di vari dispositivi per il riscaldamento artificiale del plasma, necessari per il conseguimento della temperatura di fusione;
- la produzione di una potenza rilevante di fusione anche in condizioni continue, con fattore di guadagno Q non inferiore a 5;
- il funzionamento dei magneti a superconduttore in condizioni operative prossime a quelle delle centrali commerciali;
- la sperimentazione di tipi di mantello della camera toroidale (dove ha luogo la reazione di fusione), atti ad assicurare una adeguata produzione di trizio (per reintegrarne il consumo), utilizzando

allo scopo i neutroni veloci da 14,1 MeV generati nella reazione di fusione;

- la sperimentazione di tipi di mantello della camera toroidale in grado di recuperare l'energia termica generata nella fusione (sia quella dei neutroni veloci, sia quella delle particelle alfa, prodotti entrambi nella reazione di fusione D + T), trasferendola ad un fluido refrigerante opportuno (acqua o elio a pressione e temperatura elevate), a cui poi, nella centrale elettro-nucleare dimostrativa, sarà affidata la produzione di energia elettrica tramite turboalternatore;
- la sperimentazione di apparecchiature robotizzate per l'effettuazione di interventi manutentivi anche importanti sulle parti interne della macchina (radioattive a causa dell'esposizione ai neutroni di fusione), interventi manutentivi resi necessari dai danneggiamenti prodotti dalle condizioni estreme di temperatura, flusso radiativo, flusso neutronico ecc.

Una particolare importanza riveste la sperimentazione dei dispositivi di riscaldamento esterno del plasma. È prevista l'utilizzazione dei seguenti quattro diversi dispositivi:

- il *Negative Neutral Beam Injection* (NNBI), basato sull'iniezione nel plasma di atomi neutri ad alta energia (1 MeV);
- l'*Electron Cyclotron Resonance Heating* (ECRH), basato sull'accoppiamento al plasma di onde elettromagnetiche alla frequenza di risonanza degli elettroni;
- lo *Ion Cyclotron Resonance Heating* (ICRH), basato sull'accoppiamento al plasma di onde elettromagnetiche alla frequenza di risonanza degli ioni;
- il *Lower Hybrid Current Drive* (LHCD), basato sull'accoppiamento al plasma di onde elettromagnetiche a frequenza intermedia tra quelle di risonanza degli ioni e degli elettroni.

Si tratta di dispositivi che presentano complessi problemi di progettazione e realizzazione, essendo altamente innovativi per le grandi dimensioni e per varie altre specifiche.

I limiti della sperimentazione su ITER

La sperimentazione che verrà fatta in ITER consentirà certamente l'acquisizione di molte preziose conoscenze indispensabili per l'utilizzazione commerciale dell'energia da fusione nucleare. Ma presenta anche alcuni evidenti limiti, in particolare a riguardo della fisica del plasma e della verifica del comportamento dei materiali.

Le limitazioni impiantistiche di ITER non permetteranno una adeguata esplorazione di tutte le condizioni del plasma di possibile interesse per un reattore commerciale. Chiariamo meglio questo punto. A piena potenza un reattore commerciale deve funzionare in continua. Il funzionamento pulsato del Tokamak può essere utilizzato solo nei transitori di avviamento. Per il funzionamento in continua l'obiettivo di ITER è di conseguire un fattore di guadagno Q pari a 5. Un reattore commerciale che funzionasse a regime con un valore di Q così basso, dovrebbe avere una potenza di riscaldamento esterno del plasma molto elevata. Passiamo ai numeri: con $Q = 5$, per una potenza termica di fusione del reattore commerciale di 2.500 MW (un valore tipico), la potenza da introdurre nel plasma con dispositivi di riscaldamento ausiliario sarebbe di 500 MW, una potenza enorme! E la potenza elettrica necessaria per l'alimentazione di questi dispositivi di riscaldamento artificiale, se il rendimento complessivo fosse del 33% (valore molto elevato, di conseguimento problematico), sarebbe di ben 1.500 MW elettrici. Tale potenza sarebbe nettamente superiore alla potenza elettrica generata dal reattore, valutata pari a 1.200 MW nell'ipotesi assai ottimistica di un rendimento complessivo pari al 40% dei 3000 MW (2500 MW + 500 MW) di energia termica disponibile.

In sostanza è indispensabile che un reattore commerciale a fusione funzioni a regime con un valore di Q ben superiore a 5. Quanto superiore non è facile precisare,

ma in base a varie considerazioni un valore ottimale di Q potrebbe essere 50. Il plasma in condizioni di $Q = 50$ è assai diverso da quello in cui $Q = 5$. In quest'ultimo caso la potenza termica sviluppata nel plasma dalle particelle alfa prodotte dalla fusione ha lo stesso valore della potenza termica sviluppata nel plasma dal riscaldamento esterno. In tali condizioni la conformazione del plasma è molto influenzata dalle modalità scelte per il riscaldamento artificiale: un plasma riscaldato con l'iniezione di neutri da 1 MeV sarebbe verosimilmente assai diverso da un plasma riscaldato con metodi elettromagnetici. Con $Q = 50$, invece, la potenza termica sviluppata nel plasma dalle particelle alfa prodotte dalla fusione è 10 volte superiore alla potenza di riscaldamento artificiale del plasma. In queste condizioni il plasma è dominato dal riscaldamento delle particelle alfa, non dal riscaldamento artificiale.

Anche solo queste brevi considerazioni evidenziano come la sperimentazione sulla fisica del plasma che verrà fatta su ITER, pur certamente molto valida, essendo tuttavia limitata per il funzionamento in continua al conseguimento al massimo di un valore di $Q = 5$, non coprirà a sufficienza i valori di guadagno Q prevedibilmente necessari in un reattore commerciale, che a buon senso dovrebbero essere notevolmente superiori.

Va sottolineato che il conseguimento di valori del fattore di guadagno Q superiori a 5 con funzionamento in continua in impianti Tokamak della dimensione di ITER è molto difficile. Occorrerebbero campi magnetici toroidali e poloidali, nonché una corrente elettrica di *bootstrap*, assai più spinti degli attuali. In effetti i progettisti impegnati nello studio concettuale di reattori a fusione, piuttosto che puntare sullo sviluppo di reattori a Q elevato, hanno preferito puntare sull'utilizzazione di grandi potenze di riscaldamento ausiliario esterno, confidando nel conseguimento per questi dispositivi sia di elevati rendimenti sia di elevate affida-

bilità. Quanto sia realistica questa fiducia di sviluppo futuro è difficile dire. Certo non vi sono finora esperienze che autorizzino in merito un qualche ottimismo.

Un'altra problematica estremamente importante è quella del danneggiamento a lungo termine dei materiali dei componenti principali. Al riguardo va detto che le indicazioni che saranno ottenute nel corso della sperimentazione in ITER, saranno piuttosto limitate. In effetti ITER è un impianto di ricerca e il numero complessivo di ore di funzionamento a piena potenza equivalente nel corso della sua vita sarà ridotto. In particolare in ITER il flusso neutronico integrato nel tempo a cui saranno esposti i materiali dei componenti dell'isola nucleare, sarà assai inferiore a quello prevedibile per una centrale commerciale e di conseguenza assai inferiore sarà il danneggiamento da radiazione neutronica.

D'altra parte per un reattore commerciale a fusione la piena adeguatezza a lungo termine del comportamento dei materiali dei vari componenti, in particolare di quelli dell'isola nucleare, costituisce una ovvia assoluta esigenza. Tale adeguatezza va garantita ex ante mediante un opportuno insieme di apposite sperimentazioni ottenute in condizioni simulanti perfettamente quelle operative.

Purtroppo non si posseggono dati sperimentali adeguati sul danneggiamento prodotto da questi neutroni di elevatissima energia (14,1 MeV). Gli studi molto approfonditi effettuati nell'ambito dello sviluppo dei reattori a fissione, hanno ovviamente utilizzato i neutroni prodotti nella fissione nucleare, caratterizzati da energie ben inferiori (dell'ordine dei 2 MeV).

Per i reattori a fusione lo studio del danneggiamento da neutroni veloci sui materiali che si prevede saranno utilizzati, verrà effettuato mediante la *facility* IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*). I componenti della centrale elettro-nucleare dimostrativa verranno poi provati a piena scala nel reattore DEMO. Ci vor-

ranno però svariati anni di funzionamento di DEMO prima di avere elementi sufficienti sul danneggiamento dovuto all'esercizio del reattore. In complesso i problemi di durata dei materiali utilizzati nell'isola nucleare dei reattori a fusione appaiono piuttosto seri. Come possibile soluzione di questi problemi si pensa di ricorrere con appositi interventi manutentivi alla sostituzione delle parti che risultino gravemente danneggiate. Dato l'ambiente radioattivo tali interventi andranno effettuati mediante appositi robot, con opportuno controllo a distanza. Questi interventi sono stati previsti in ITER, che disporrà pertanto delle necessarie apparecchiature. Le caratteristiche di impianto di ricerca di ITER consentono senza troppe difficoltà manutenzioni straordinarie di questo tipo. Assai più complessa appare invece questa azione di sostituzione di parti di impianto nei reattori commerciali.

Un'ultima considerazione. Il tempo necessario per la messa a punto di tutte le conoscenze fisiche e tecnologiche indispensabili per la progettazione e la costruzione della prima centrale elettro-nucleare a fusione dimostrativa è ancora molto lungo. Al riguardo una prima stima dei tempi può ricavarsi in base alla *Road Map*:

- la costruzione di ITER è prevista concludersi tra 10 anni, nel 2019;
- occorreranno poi almeno 15 anni di effettiva sperimentazione su ITER (e in parallelo su IFMIF), per possedere tutte le conoscenze necessarie per la progettazione di DEMO;
- nel 2034 potrà quindi iniziare la costruzione di DEMO, che richiederà 10 anni;
- saranno poi necessari almeno 10 anni di sperimentazione su DEMO per ritenere sufficientemente qualificate tutte le conoscenze per la progettazione e la costruzione di una centrale elettro-nucleare dimostrativa a fusione. Se tutto andrà bene, sarà quindi solo nel 2054, tra 45 anni, che potrà iniziare la realizzazione di tale centrale dimostrativa.

Fusione e industria

Angelo Airaghi

Senior Adviser Finmeccanica S.p.A.

Il coinvolgimento dell'industria europea nelle strategie e nelle scelte politiche relative alla "big science", e alla fusione in particolare, è di fondamentale importanza. La stretta collaborazione tra il mondo della ricerca e quello dell'industria è condizione necessaria per il successo di un grande progetto quale ITER e, al tempo stesso, per un adeguato ritorno economico per il sistema produttivo

Nuclear Fusion and Industry

The involvement of Europe's industry in the strategies and policies related to "big science" – particularly nuclear fusion – is of utmost importance. The close cooperation between research and industry is fundamental to the success of a great project, such as ITER, as well as to ensure adequate production returns

La fusione nucleare, per il suo straordinario contenuto innovativo e per il livello di maturazione scientifico-tecnologico raggiunto, può essere considerata come parte della cosiddetta "big science" con alcune specificità di cui si dirà in seguito. Si tratta quindi di scienza (e l'articolo di Batistoni e Pizzuto lo dimostra), ma anche di tecnologia, ingegneria e manifattura. La *big science* implica la progettazione degli esperimenti (responsabilità primaria della scienza), la progettazione delle grandi macchine (ancora un compito largamente assolto nei contesti scientifici) e la costruzione di tali macchine (responsabilità principale dell'industria). Ma l'interazione tra ricerca e impresa non è sempre facile da comprendere e spiegare. Le grandi macchine, in generale, includono vari gradi di complessità: una percentuale tra il 20 e il 60% del loro costo è rappresentato da componenti e dispositivi direttamente disponibili sul mercato (*off-the-shelf*) il cui requisito "spinto" è probabilmente la qualità. Il rapporto tra committente e fornitore in questi casi è simile a quello relativo a qualsiasi fornitura.

I commenti che seguono si riferiscono quindi alla parte rimanente: componenti e sottosistemi *science relevant*. Ogni grande gruppo industriale impegnato in settori ad alta tecnologia (aerospazio, elettronica industriale, energia, materiali avanzati ecc.) è potenzialmente un *player* nella progettazione e nella fornitura di sottosistemi e componenti per la *big science*. Includendo in tale comparto sistemi quali satelliti scientifici, grandi telescopi, acceleratori di particelle, grandi macchine medicali, fusione nucleare, robotica non strutturata ecc., il mercato potenziale per tali gruppi può raggiungere i 500 o i 1.000 milioni di euro l'anno. Ma per divenire e restare competitivi su tali mercati questi gruppi debbono fare investimenti, valutare i tempi del loro recupero, stimare i rischi potenziali e, più in generale, la coerenza di questi impegni con le strategie aziendali complessive. Valutazioni spesso difficili: ad esempio le prospettive di mercato dipendono da politiche finanziarie pubbliche, condizionate talora dall'esito di complicati negoziati internazionali con ripercussioni sia sui tempi che sulle entità degli investimenti. I rischi, a loro volta, sono intrinseci all'utilizzo di tecnologie poco o nulla

sperimentate: i contratti con le organizzazioni committenti talora ne tengono conto, ma non sempre. Gli oggetti da fornire sono spesso prototipi che solo in casi rari potranno essere replicati: si tratta, cioè, di one-shot-business. I margini, poi, sono spesso inesistenti e, talora, negativi: il committente ritiene di poter chiedere al fornitore un concorso alle spese nella convinzione che il fornitore sarà, attraverso la fornitura, in condizione di applicare le conoscenze acquisite in altri comparti. Queste considerazioni, unite all'orientamento recente di molti dei grandi gruppi industriali verso una riduzione della gamma di prodotti/servizi offerti, ha portato a considerare attività del genere, ancorché ad elevato livello di qualificazione, con una certa diffidenza.

Forse, però, il problema principale da risolvere riguarda le persone. Per operare su questi mercati le imprese debbono destinare al loro presidio tecnici con caratteristiche molto speciali e perciò rare: persone che sappiano dialogare con ricercatori di alto livello e competenza, essere in grado di comprenderne le esigenze e tradurle in specifiche tecniche talora di difficile esecuzione, assumere nell'interesse della loro azienda impegni e rischi che, come si è detto, sono difficili da valutare e, malgrado tutti questi vincoli, assicurare la realizzazione puntuale dei contratti nel rispetto delle condizioni economiche pattuite.

Riassumendo, per un'azienda il business della *big science* è di difficile valutazione, rischioso, incerto nei tempi e nei volumi, scarsamente ripetibile, con margini modesti o nulli e, per di più, da affidare a persone che per il loro livello di professionalità e competenza costituiscono sempre una risorsa scarsa e di grande pregio. In queste condizioni nessuna impresa saggia dovrebbe impegnarsi in questi settori. Questo in teoria: la realtà, però, è differente: tutti i maggiori gruppi industriali mondiali sono presenti tra i fornitori delle grandi organizzazioni internazionali di cerca (dal CERN alla NASA); ogni richiesta di fornitura viene esaminata con attenzione; ogni evento pubblico per la promozione della partecipazione a grandi progetti riscuote sempre grande interesse. Questa apparente contraddizione può essere spiegata prendendo in considerazione altri elementi: ad esempio il prestigio e il ritorno

di immagine che possono derivare (fornitori della "Real Casa"); la dimostrazione verso l'esterno di elevata qualità/affidabilità; l'arricchimento professionale di tutto il personale impegnato (più efficace di un corso di formazione); la convinzione che alcune tecnologie, cruciali per la *big science* (superconduttività, materiali ad alta temperatura o *radiation resistant*, elettromagnetismo spinto ecc.) prima o poi potranno essere applicate anche in altri settori di maggiore interesse commerciale e industriale e, infine, la speranza che alcune delle grandi macchine possano trasformarsi nel tempo, in *first of a kind* di nuove famiglie di prodotti. Ad esempio, un'attitudine del genere emerge con chiarezza in uno dei maggiori Progetti Integrati Comunitari, Extremat, rivolto alla Ricerca e Sviluppo su materiali per ambienti estremi guidato dal Max Planck Institute e che include una trentina di partners tra organismi scientifici (università ed enti di ricerca) e industrie che partecipano anche finanziariamente ai lavori.

Forse, però, l'esempio più importante è proprio quello della fusione nucleare. Quando, nel 2006, fu organizzata a Barcellona la prima presentazione del programma ITER all'industria europea, quattrocento esperti, ovviamente a loro spese, dedicarono tre giorni a incontri e discussioni con i ricercatori coinvolti nel programma e con i funzionari della Commissione per acquisire informazioni e predisporre per la partecipazione alle forniture. Nei due anni successivi, in molti paesi europei si sono effettuate analoghe manifestazioni nazionali con lo stesso successo e, seguendo proprio un suggerimento emerso nella riunione di Barcellona, è stata costituita una rete di *industry liaison officers* responsabili di tenere informate le imprese nazionali sulle opportunità offerte dal programma e sulle modalità di partecipazione. Le ragioni di tale diffuso interesse sono già state ricordate: la dimensione economica del programma, la sua qualificazione, la speranza che ad ITER faccia seguito, in tempi ragionevolmente brevi il programma DEMO, l'esistenza di programmi collaterali come quelli derivanti dalla collaborazione tra Europa e Giappone (il cosiddetto *broader approach*) e dai vari programmi nazionali che, con l'avvicinarsi di una prospettiva di sviluppo industria-

le della fusione, dovrebbero subire intensificazioni e accelerazioni. Le imprese che sono già coinvolte nella fornitura di prototipi, *mock up* o dimostratori tecnologici, o che hanno dichiarato il loro interesse alle prossime attività di fornitura sono numerose e operanti in vari comparti; la prospettiva di DEMO dovrebbe, tra l'altro, ampliare la gamma degli interessi industriali coinvolgendo anche imprese di ingegneria e *contracting* che in ITER hanno ancora un ruolo marginale. E l'Italia è in prima fila. Le sue imprese hanno eccellenti possibilità di successo nella fornitura di componenti cruciali della grande macchina: magneti superconduttori, *vacuum vessel*, divertori, giusto per fare qualche esempio. È lecito, quindi attendersi un buon posizionamento dell'industria nazionale nelle forniture che gli accordi internazionali affidano all'Europa.

Affinché, però, questo potenziale si trasformi in realtà, occorre superare alcuni ostacoli non secondari che riguardano, tra l'altro, le regole con le quali l'Agenzia europea (*Fusion for Energy*) appositamente costituita per assicurare l'approvvigionamento della quota europea di ITER, condurrà le future gare. Tali modalità, infatti, possono avere grande importanza nel favorire o scoraggiare la partecipazione delle imprese, con particolare riferimento alle grandi. Anche qui basti un solo esempio: la garanzia "illimitata" tuttora richiesta dai contratti comunitari standard per danni derivanti da forniture non pienamente rispondenti alle specifiche. Regole del genere, amplificando enormemente i rischi per le imprese (in particolare le grandi che hanno più da perdere, soprattutto in immagine), avrebbero quasi certamente l'effetto di allontanarle e quindi di far perdere all'Europa accanto alla valorizzazione delle sue competenze scientifiche-tecnologiche, anche un'asse di "politica industriale" spesso evocata ma non ancora tradotta in orientamenti operativi. Anzi, rispetto alla tradizione degli anni recenti di un ampio e strutturato coinvolgimento dell'industria europea nelle strategie e nelle scelte politiche relative alla fusione, la situazione attuale è assai poco soddisfacente e potrebbe facilmente essere migliorata. E anche sotto questo profilo, il ruolo degli *industry liaison officers* può essere di particolare importanza.

La fusione nucleare in Italia: la testimonianza di un pioniere

Sergio Martellucci

Ordinario di Fisica, Facoltà di Ingegneria
di Roma Tor Vergata
Presidente del Consiglio Scientifico dell'ENEA

*Il forte aumento della
domanda di energia richiede
da un lato il ricorso a tutte le
fonti attualmente disponibili,
dall'altro l'impegno nella
ricerca anche in quelle di
medio-lungo periodo, come
la fusione, fonte energetica
inesauribile e pulita*

Nuclear Fusion in Italy: a Pioneer's Testimony

*If the sharp increase in energy demand makes it necessary
to utilize all energy sources currently available, efforts in
research are still required, even for medium- or long- term
projects such as nuclear fusion, a clean, inexhaustible,
source of energy*

Considerazioni storiche

Nel seguito considererò brevemente gli aspetti della ricerca energetica nel settore della Fusione Nucleare che rappresenta la speranza del futuro energetico del mondo. L'evoluzione storica degli eventi più importanti che si sono succeduti nel secolo scorso nella Fusione Nucleare sino agli anni '70 sono riportati nella *tabella 1*.

Dagli anni '70 ad oggi, le ricerche sulla fusione sono poi proseguite sempre in collaborazione internazionale rispettivamente sui due approcci del confinamento magnetico e di quello inerziale.

All'inizio del secolo, subito dopo le scoperte della radioattività naturale di Becquerel e dei suoi allievi Pierre e Maria Curie, e di quella artificiale indotta da neutroni, a cui ha contribuito anche Enrico Fermi, furono avanzate da Eddington e da Bethe le ipotesi che le stelle del nostro universo generino quell'enorme quantità

di energia che le sostiene, e che in parte irradiano nello spazio, attraverso il processo di Fusione Nucleare secondo dei cicli di reazioni nucleari che furono studiati dagli astrofisici dell'epoca ed alcuni dei quali, in particolare quelli che l'uomo tenta di riprodurre sulla Terra, sono riportati nella *tabella 2*.

In questa tabella sono riportate le reazioni di fusione dei nuclei deuterio, la prima, e deuterio-trizio, la seconda con, per quest'ultima, l'indicazione del ciclo di *breeding* del trizio, che può essere generato dai neutroni della reazione di fusione D + T con nuclei di litio.

È interessante osservare che queste reazioni sono state ipotizzate da Fermi, Teller e Wheeler nella loro teoria sulla Fusione del 1944, che ha preceduto il test della bomba all'idrogeno statunitense nel 1952.

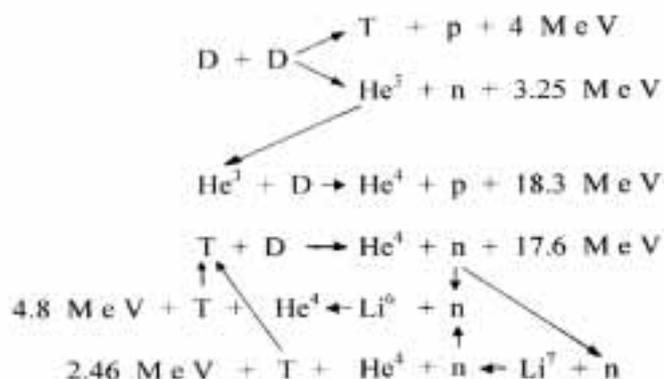
Sottolineo il fatto che l'utilizzo civile sia della Fissione che della Fusione è stato preceduto storicamente dalla realizzazione

Tabella 1 - Le tappe della ricerca sulla fusione nucleare

1920	Ipotesi di Eddington sull'origine nucleare dell'energia delle stelle
1939	Ciclo di Bethe di reazioni nucleari
1944	Teoria della fusione termonucleare di Fermi, Teller e Wheeler
1952	Test della bomba all'idrogeno statunitense
1955	1 ^a Conferenza di Ginevra sull'"Uso pacifico dell'energia nucleare"
1958	2 ^a Conferenza di Ginevra, e declassificazione della fusione a confinamento magnetico
1963	Conferenza di Elettronica Quantistica di Parigi, relazione di Basov (Nobel per la Fisica 1964) sulla fusione con laser
1967	Conferenza sulla Fusione di Novosibirsk, relazione di Artsimovich sullo schema TOKAMAK di confinamento magnetico
1972	Conferenza di Elettronica Quantistica di Montreal, relazione di Teller sui plasmi ultradensi prodotti con laser

Fonte: elaborazione dell'autore

Tabella 2 - Esempi di cicli di reazioni di Bethe



degli ordigni militari, contribuendo così a far sorgere nei loro confronti i pregiudizi che tanto hanno penalizzato e penalizza il loro uso a fini pacifici.

La declassificazione militare è stata per i due settori attuata a livello mondiale con le due Conferenze di Ginevra del 1955 e del 1958.

Ricordo, per inciso, che nell'anno 2006 il Consiglio Scientifico dell'ENEA ha collaborato con l'Accademia Nazionale delle Scienze, detta dei XL, l'Associazione Galileo 2001 e l'Associazione Italiana Nucleare, per organizzare un Convegno che ricordasse quell'importante avvenimento^[1].

In Italia quel periodo post-bellico è stato molto prolifico per la nascita di tutte le varie iniziative di ricerca scientifica nel settore nucleare. Nel 1946, per iniziativa di industrie private, fu costituito a Milano il CISE; nel 1951 l'INFN, che dette subito inizio alla costruzione dell'elettrosincrotrone nei Laboratori di Frascati; nel 1952 il CERN a Ginevra, il Centro Europeo per le Ricerche Nucleari specializzato nella fisica delle particelle elementari; sempre nel 1952, in Italia il CNRN, inizialmente sotto l'egida del CNR per poi essere trasferito alle dipendenze del Ministero dell'Industria di allora come CNEN; nel 1957, infine, furono fir-

mati i trattati di Roma che istituivano, oltre alla CEE, anche l'EURATOM, istituzione europea per la ricerca nel settore dell'energia nucleare da Fissione e da Fusione.

Nel 1959 io, studente di Fisica presso l'Istituto G. Marconi di Roma, chiedevo la tesi di laurea al Prof. Edoardo Amaldi, che mi accompagnò a conoscere il suo collega ed amico Franco Rasetti, in anno sabatico presso lo stesso Istituto per partecipare al nuovo programma di Fusione Nucleare appena avviato dal CNRN.

Il fisico Franco Rasetti, morto ultracentenario da pochi anni, è stato recentemente ricordato in un Convegno organizzato dall'ISPRA, cui Rasetti ha donato le sue collezioni di fossili e le fotografie dei fiori alpini che lo hanno reso famoso anche come paleontologo, ed è anche stato oggetto di un volume che descrive la sua vita avventurosa al grande pubblico^[2].

In quegli anni, nel neo-costituito Laboratorio Gas Ionizzati del CNRN (poi CNEN ed ora ENEA), ospitato presso l'Istituto di Fisica "Guglielmo Marconi" dell'Università di Roma "La Sapienza", un ristretto gruppo di giovani ed entusiasti ricercatori, guidati dal Prof. Enrico Persico, dette inizio ai Programmi di Ricerca sulla Fusione Controllata, subito dopo la *Conferenza Interna-*

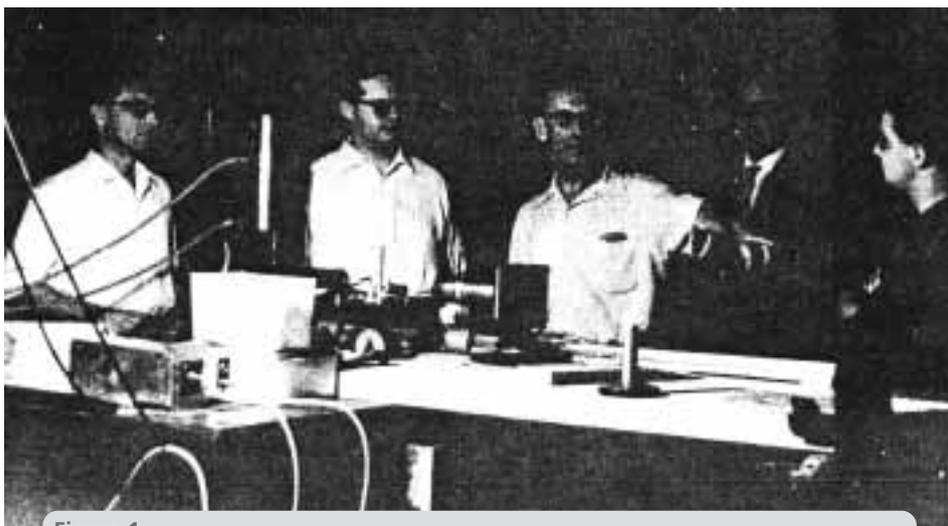


Figura 1
 Ugo Ascoli-Bartoli, Alberto De Angelis, Franco Rasetti, Antonio Bolle e Sergio Martellucci (da sinistra a destra) discutono il funzionamento di un prototipo di spettrografo a reticolo ad alta risoluzione spettrale da essere utilizzato per la misura della temperatura del plasma nel laboratorio Gas Ionizzati (EURATOM-CNEN), nello scantinato dell'Istituto di Fisica "Guglielmo Marconi" dell'Università di Roma.
 (La Redazione si rammarica per la cattiva qualità della fotografia, riprodotta da una stampa fornita dall'autore risalente all'anno 1959)

riflettore su

zionale sull'Uso Pacifico dell'Energia Nucleare tenutasi nel 1958 a Ginevra, nei quali furono "declassificati" i risultati delle ricerche sul confinamento magnetico ottenuti a Culham, nel Regno Unito, nel plasma termonucleare della macchina ZETA (*Esperimento Z-pinch*).

Il Prof. Franco Rasetti (il "Cardinale" del gruppo di quei giovani fisici, chiamati "i ragazzi di via Panisperna" che operavano sotto la direzione di Enrico Fermi presso il vecchio e prestigioso Istituto di Fisica dell'Università di Roma, dove Fermi condusse i suoi primi esperimenti), partecipò subito entusiasticamente a questa nuova avventura e, per la sua profonda conoscenza dell'ottica, acquisita precedentemente in Italia e anche presso importanti scuole tedesche di quel tempo, si dedicò subito allo studio dei metodi ottici (*figura 1*), che permettevano di misurare i parametri caratteristici di un plasma (per esempio, la densità e la sua temperatura).

È del 1959, prima nel mondo, la misura del-

la densità elettronica di un plasma mediante un interferometro ottico, eseguita in collaborazione con Ugo Ascoli-Bartoli, ed oggetto della mia tesi di laurea.

La disponibilità di Franco Rasetti era sempre eccezionale: è da ricordare, ad esempio, quando ci guidò nei depositi sotterranei dell'Istituto di Fisica di Roma alla ricerca di *quell'interferometro di Jamin* – che poi noi usammo nell'esperimento – ceduto all'Italia dall'Austria in Conto Riparazioni Danni di Guerra dopo la Prima Guerra Mondiale; o quando, sempre per noi suoi allievi, ripercorrendo nella biblioteca dell'Istituto i lavori di Enrico Fermi sui plasmi interstellari, ricavava la formula della refrattività di un gas di elettroni liberi.

La collaborazione con Franco Rasetti proseguì poi a livello personale, quando il Laboratorio Gas Ionizzati si trasferì a Frascati, approfittando delle frequenti, periodiche visite che lui faceva a sua madre, a Roma.

Nel 1960 la nascita del *laser*, definita da

Rasetti "la più importante scoperta del nostro secolo", gli fece intuire di avere finalmente a disposizione quella sorgente di luce che avrebbe permesso di superare l'intensa luminosità del plasma e di poter misurare così, dopo la densità, anche la temperatura con esperimenti di diffusione di luce laser da parte del plasma.

Nel 1963, di ritorno dalla "International Conference on Quantum Electronics" di Parigi, Ugo Ascoli-Bartoli riportava le appassionante conversazioni con Nicolay Basov (Premio Nobel per la Fisica nel 1964) sulle possibilità di aprire una nuova linea di ricerca verso la fusione, "l'approccio laser al confinamento inerziale della fusione", e Rasetti consigliò di eseguire subito un esperimento per studiare il fenomeno che si produce quando un bersaglio formato da un granello di deuterio (D_2) solido (a 4 K), folgorato da un impulso di luce laser si riscalda fino a temperature termonucleari. Con il buon umore che animava sempre il suo comportamento suggerì ad Ugo Ascoli-Bartoli di dare all'esperimento lo stesso nome, *Hot Ice*, dato a Roma in quel tempo alla prorompente e vistosa attrice svedese Anita Eckberg, la fredda donna del Nord Europa "riscaldata" dall'amante latino, Marcello Mastroianni, interprete con lei del film di Federico Fellini "La Dolce Vita", che diede lo spunto anche ad una famosa canzone dell'epoca (*Ghiaccio bollente*).

Fu nel 1969, in una atmosfera di particolare ottimismo nelle ricerche mondiali sulla fusione controllata mediante confinamento magnetico, che si cominciarono ad ottenere nella configurazione di plasma del Tokamak T-3, presso il Kurchatov Institute dell'Unione Sovietica di quel tempo, nuovissimi ed incoraggianti risultati relativi alla stabilità ed alle alte temperature raggiunte. È in quell'occasione, davanti a questi risultati così importanti ed originali, che l'Accademico Lev Artsimovitch, anche allo scopo di confrontarli con quelli delle macchine simili nei laboratori fusione del

mondo, arrivò ad invitare ufficialmente il Gruppo di Diagnostica del Laboratorio Culham, ad effettuare direttamente presso il Kurchatov Institute misure di *laser scattering* dei parametri del plasma della macchina T-3 sovietica. Eccezionale operazione, resa possibile, in piena guerra fredda, da uno speciale accordo di cooperazione fra l'Euratom e l'Accademia delle Scienze dell'URSS.

È a partire dagli anni '70 che questo metodo di misura della temperatura di un plasma mediante *laser scattering*, applicato inizialmente dal Gruppo di Frascati sulle macchine ALCATOR (MIT, Boston, USA) e su FT (Frascati, Italia) divenne rapidamente uno dei metodi di diagnostica largamente utilizzato su tutte le macchine a plasma del Mondo.

La collocazione internazionale

Ai nostri giorni, in questo campo aperto da questi nostri Maestri della ricerca sulla fusione termonucleare, l'Italia è presente a livello internazionale sia nell'approccio a confinamento magnetico (Progetto ITER, già descritto in un altro articolo di questo numero della rivista) che in quello a confinamento inerziale (Progetto HiPER, the European High Power Laser Energy Research Facility, www.hiper-laser.org).

Nella *figura 2*^[3] sono riprodotti i due schemi di principio nei due differenti meccanismi sopracitati di confinamento magnetico (su cui si basa il progetto di ricerca ITER) ed inerziale (la cosiddetta Fusione con Laser che è alla base del progetto HiPER).

Come si vede dai parametri del plasma generato nei due casi, nel primo la pressione interna del plasma caldo viene bilanciata dalla pressione del campo magnetico, che confina il plasma per produrre l'energia da Fusione per tempi estremamente lunghi.

Nel secondo, il plasma prodotto non viene affatto contenuto da alcuna forza che

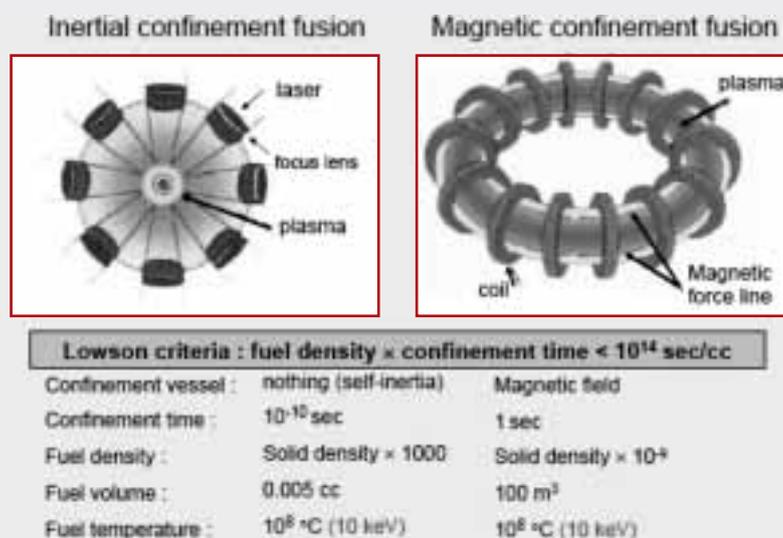


Figura 2

I due approcci per la fusione termonucleare

Fonte: H. Nishimura, ILE, Osaka University, in Proceedings 43rd Course Int'l School Quantum Electronics, Directors: A.N. Chester and S. Martellucci, 2006

ne contrasti l'espansione, ma la vita della fase densa e calda del plasma stesso è limitata dall'inerzia con cui la materia si espande naturalmente.

In termini applicativi, i due diversi tipi di reattore a Fusione si potrebbero paragonare: il primo, ad un reattore che eroga energia con continuità analogamente a quanto fanno le attuali centrali termoelettriche a combustione; il secondo, viceversa, ad un motore a scoppio che eroga energia in maniera discontinua, utilizzando delle microesplosioni che, nei motori a combustione interna, avvengono nei cilindri del motore dell'automobile. In questo senso le due alternative, ove realizzate, non sono incompatibili tra loro, ma troverebbero, per le loro dimensioni fisiche e per la quantità di energia erogata, campi di applicazione complementari.

Tornando alla *tabella 1*, che mostra l'evoluzione storica della ricerca nel mondo, ho indicato nel 1967 la data in cui è stato reso pubblico nella Conferenza Internazionale

di Novosibirsk (Siberia) il già ricordato successo della scuola sovietica nell'eliminare una delle principali difficoltà incontrate sino ad allora nel contenimento magnetico del plasma, ovvero la diffusione del plasma stesso attraverso le linee di forza del campo magnetico che perdeva, pertanto, le sue capacità di trattenere il plasma stesso all'interno della configurazione magnetica confinante: la configurazione Tokamak che ha causato in tutto il mondo una rivoluzione dei programmi di ricerca in questo settore.

In Italia, anche a Frascati si ebbe una rivoluzione programmatica che ha portato il "gruppo di Frascati" alla scelta tecnica di privilegiare la tecnologia dei Tokamak compatti ad alto campo magnetico. In questa particolare direzione sono state costruite con successo, malgrado le enormi difficoltà tecnologiche ad essa legate, la prima macchina Frascati-Torus (FT) e la seconda Frascati-Torus Upgraded (FTU), ed è stata progettata la macchina successiva FAST (Fu-

sion Advanced Studies Torus), già proposta dall'Associazione EURATOM-ENEA. Non solo, ma il Prof. Romano Toschi fu, a suo tempo, chiamato dall'EURATOM a dirigere il gruppo di progetto ITER e delle sue prospettive di sviluppo, con un riconoscimento della scuola italiana di cui si deve andare orgogliosi.

Nella *figura 3*, che risale al 1979, viene evidenziato che l'Italia ha aderito all'Euratom nel 1960, subito dopo la Francia, con i Centri di Frascati del CNEN, del CNR di Milano e Padova e dell'Università di Napoli. Io ho avuto il privilegio di conoscere – e di godere della loro stima – le persone (che purtroppo ci hanno lasciato) grazie alle quali l'adesione all'Euratom è stata possibile e ha garantito il continuo e quo-

tidiano confronto con i colleghi stranieri: intendo riferirmi ai Proff. Bruno Brunelli per il CNEN, Piero Caldirola per il CNR-Milano, Antonio Rostagni per il CNR-Padova e Nando Gasparini per l'Università di Napoli. Oggi, la ricerca sulla Fusione in Italia per la maggior parte viene finanziata nell'ambito del Contratto di Associazione di Euratom-ENEA. L'ENEA per delibera del CIPE (1983) coordina la ricerca in Italia sulla Fusione. Essa è svolta dall'ENEA principalmente nei Centri di Frascati e Brasimone, dal Consorzio RFX di Padova, dall'Istituto di Fisica del Plasma "Piero Caldirola", dall'INFN nei Laboratori di Legnaro-Padova e da Consorzi e Dipartimenti universitari. Al di fuori del Contratto di Associazione vi sono le attività sul progetto IGNI-

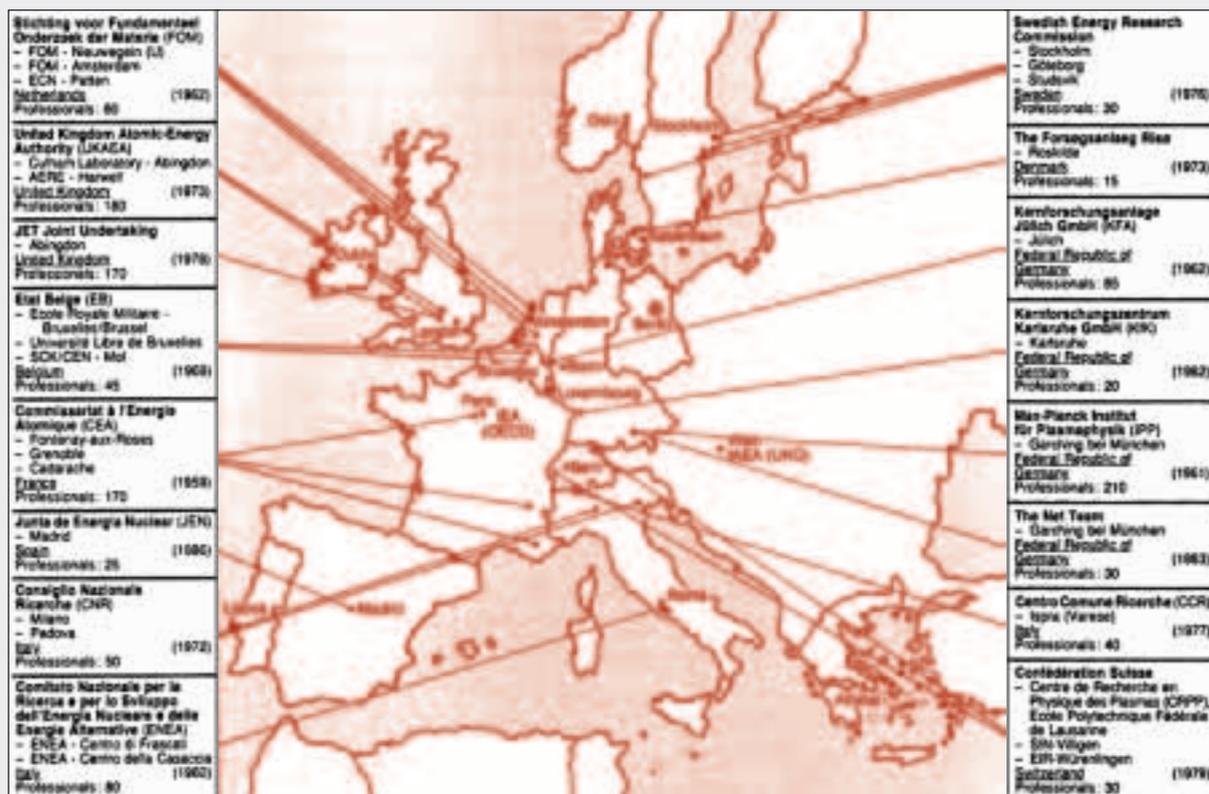


Figura 3
Localizzazione dei laboratori dell'Associazione Fusione Euratom. Anno 1979
Fonte: Bollettino Euratom, Bruxelles, 1979

TOR e attività varie svolte nelle Università. Come detto, la linea principale è quella sul confinamento magnetico; in questa linea le attività riguardano la sperimentazione su FTU a Frascati e RFX a Padova, la teoria, la tecnologia per ITER ed il reattore, la partecipazione agli esperimenti e progetti internazionali JET e ITER, nonché alla progettazione di FAST. La ricerca sulla Fusione inerziale è limitata alla sperimentazione con il Laser ABC (Frascati) e alle attività di alcuni gruppi universitari. La partecipazione italiana alla fase preparatoria del progetto internazionale HiPER è stata affidata dal MUR a ENEA, INFN, INFM, CNR/IPCF, con coordinamento ENEA. Inoltre, in Italia sono state svolte (ed alcune lo sono ancora) con alterno successo ricerche in collaborazione internazionale in altri settori della Fusione. Tra queste: la Fusione Muonica e la Fusione Fredda. Per la prima si rimanda il lettore al contributo del Prof. Antonio Vitale (già membro del Consiglio Scientifico ENEA, deceduto a Bologna nel 2008) a pag. 121 della referenza¹. Per la seconda, al volume "Storia della Fusione Fredda in Italia"^[4].

Considerazioni scientifiche

Nella speranza di essere riuscito a descrivere, anche se sommariamente, il principio di funzionamento dei futuri reattori a Fusione Nucleare, e delle stelle del nostro Universo, può essere opportuno riportare nella *tabella 3* che segue i parametri dei plasmii che sono da studiare nei vari casi^[5]. Nella misura di questi parametri, come già ricordato, il gruppo dell'ENEA di Frascati, operante nel settore della diagnostica ottica del plasma, ha acquistato grande fama nel mondo in particolare per la misura delle densità del plasma con i metodi interferometrici, e della temperatura con la tecnica della diffusione di luce laser da parte del plasma, come ricordato nel volume pubblicato da EURATOM per onorare il

ruolo svolto da Ugo Ascoli-Bartoli^[6].

Può essere utile, e l'esperienza di docente universitario me lo impone, ricordare a questo punto la definizione del plasma (1930), meglio definito come "quarto stato della materia".

Gli stati di aggregazione della materia possono essere definiti in funzione dell'energia cinetica media per particella (molecole, atomi, elettroni, nuclei atomici, nucleoni, particelle subnucleari ecc.). Si può cioè dire che la materia è nello stato di aggregazione $(n+1)$ se l'energia cinetica media per particella W_{n+1} soddisfa la relazione $U_n < W_{n+1} < U_{n+1}$, dove U_n e U_{n+1} sono le energie di legame delle particelle negli stati di aggregazione n_{mo} e $(n+1)^{mo}$. Così, per esempio, nello stato solido ($n = 0$), U_1 rappresenta l'energia di legame della molecola in un cristallo, dell'ordine della frazione di 1 eV. Le transizioni di fase dallo stato solido a quello liquido ($n = 1$), o direttamente a quello gassoso ($n = 2$), avvengono quando l'energia cinetica media per molecola, che è funzione della temperatura, supera il valore dell'energia di legame mentre la struttura cristallina viene distrutta. Così, nella transizione di fase dallo stato liquido a quello gassoso, le molecole devono avere energia cinetica sufficiente per rompere i legami delle forze di Van der Waals. Quando poi l'energia cinetica media supera il potenziale di ionizzazione degli atomi, generalmente dell'ordine di qualche eV, si raggiunge lo stato di aggregazione di plasma detto anche quarto stato della materia ($n+1 = 4$) costituito da ioni ed elettroni liberi. Estrapolando questo criterio a stati di aggregazione più alti, ancora inesplorati, si possono definire il quinto stato della materia, detto "nugas", perché costituito da nucleoni ed elettroni liberi ($n+1 = 5$), quello in cui $2 < W_5 < 200$ MeV, e il sesto stato della materia, costituito da mesoni, particelle subnucleari ed elettroni liberi ($n+1 = 6$), quello in cui $0.2 < W_6 < 4$ GeV. Lo stato di plasma è carat-

Tabella 3 - Ordine di grandezza dei parametri di alcuni tipi di plasma

Tipo di plasma	$n \text{ cm}^{-3}$	$T \text{ eV}$	$\omega_{pe} \text{ sec}^{-1}$	$\lambda_D \text{ cm}$	$n\lambda_D^3$	$\nu_{ei} \text{ sec}^{-1}$
Gas interstellare	1	1	6×10^4	7×10^2	4×10^8	7×10^{-5}
Nebula gassosa	10^3	1	2×10^6	20	10^7	6×10^{-2}
Corona solare	10^9	10^2	2×10^9	2×10^{-1}	8×10^6	60
Plasma caldo diffuso	10^{12}	10^2	6×10^{10}	7×10^{-3}	4×10^5	40
Atmosfera solare e scariche nei gas	10^{14}	1	6×10^{11}	7×10^{-5}	40	2×10^9
Plasma tiepido	10^{14}	10	6×10^{11}	2×10^{-4}	10^3	10^7
Plasma caldo	10^{14}	10^2	6×10^{11}	7×10^{-4}	4×10^4	4×10^6
Plasma termonucleare	10^{15}	10^4	2×10^{12}	2×10^{-3}	10^7	5×10^4
Theta pinch	10^{16}	10^2	6×10^{12}	7×10^{-5}	4×10^3	3×10^8
Plasma denso caldo	10^{18}	10^2	6×10^{13}	7×10^{-6}	4×10^2	2×10^{10}
Plasma prodotto da laser	10^{20}	10^2	6×10^{14}	7×10^{-7}	40	2×10^{12}

dove: n = densità di plasma, numeri di ioni ed elettroni liberi per centimetro cubo
 T = temperatura assoluta del plasma
 ω_{pe} = pulsazione di plasma
 λ_D = lunghezza di Debye
 ν_{ei} = frequenza di collisione tra elettroni e ioni

Fonte: J. D. Huba, *NRL Plasma Formulary* (revised), The Office of Naval Research, 2002

terizzato dal più ampio intervallo di valori dell'energia cinetica media per particella tra le energie di legame $U_3 \approx 2 \text{ eV}$ della forza colombiana in un atomo e $U_4 \approx 2 \text{ MeV}$ della forza nucleare in un nucleo.

Da questo breve cenno alle implicazioni scientifiche connesse con lo studio della fisica del plasma, si può sottolineare la necessità che, per preparare gli esperti italiani richiesti dal programma di Fusione internazionale, sia magnetica che inerziale, l'Italia si impegni a incentivare l'insegnamento universitario nelle materie di base ed applicative specifiche.

A questo fine, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma Tor Vergata abbiamo autonomamente avviato: corsi di insegnamento specifici di Fisica dell'Energia Nucleare, Principi Fisici di Conversione Avanzata, Applicazioni dei Laser di Potenza, nel corso di laurea specialistica di Ingegneria Energetica; Dottorato di Ricerca in Elettronica Quantistica e Plasmi, con possibilità di stages presso il Jet di Culham

(UK); Scuole Internazionali di Erice di Elettronica Quantistica, e di Tecnologia dei Reattori a Fusione. Per tutte queste iniziative, da me coordinate, mi sono avvalso della preziosa collaborazione dei colleghi del Centro ENEA di Frascati che intendo qui ringraziare, tra tutti questi in particolare ricordo Francesco De Marco, purtroppo defunto, con il quale ho iniziato nel 2004 questa attività di formazione.

Conclusioni generali

Proprio con un contributo di Francesco De Marco (pag. 141 della referenza^[1]) voglio concludere questo mio scritto:

«L'obiettivo finale della ricerca sulla Fusione, fornire in maniera sicura ed economica grandi quantità di energia elettrica, è ancora distante. Infatti si devono costruire ed operare grandi macchine (ITER, IFMIF, DEMO), ed infine costruire il primo reattore prototipo. La Fusione è una del-

le quattro sorgenti primarie disponibili, le altre essendo: i combustibili fossili, la fissione, le rinnovabili. Oggi vi è una forte spinta a ridurre al massimo l'uso dei combustibili fossili. Quindi rimangono poche opzioni. La Fusione promette di essere una sorgente di energia inesauribile, relativamente pulita. I vantaggi della Fusione sono: centrali inerentemente sicure, in particolare sono impossibili incidenti di "runaway and meltdown"; i combustibili della Fusione, deuterio e litio, sono abbondanti ovunque; non è necessario trasportare materiale radioattivo; non vi è emissione di gas serra; con una appropriata scelta dei materiali, le scorie della Fusione non costituiranno un problema di lungo termine per le generazioni successive a quella che ha prodotto le scorie stesse».

In conclusione vorrei esprimere il mio personale pensiero sulle scelte energetiche che il Paese dovrà affrontare nell'immediato futuro, e sul ruolo dei futuri Reattori a Fusione.

La riapertura del nucleare, sempre meno timidamente presente nei programmi delle forze politiche, non è più oggetto di speculazioni filosofiche o sociologiche, perché il costo del barile di petrolio, soggetto a forti, imprevedibili variazioni per cause economiche-politiche, rende tali discussioni superflue ed il problema di fronte a tale

emergenza non ammette ulteriori ritardi. Riguardo alla compatibilità delle varie fonti energetiche con l'impegno dell'Italia, dell'Europa, delle Organizzazioni Internazionali alle quali l'Italia afferisce, il mio pensiero è il seguente: l'aumento esponenziale della domanda di energia nel mondo richiederà, nell'immediato futuro e certamente nei tempi via via successivi, il ricorso a tutte le fonti di energia possibili per soddisfare tale richiesta. Attualmente il Sole, che possiamo considerare il reattore a Fusione che ci ha fornito il buon Dio, e che irradia nello spazio $3,83 \times 10^{33}$ erg s^{-1} di cui cadono per ogni centimetro quadrato sulla superficie terrestre durante il giorno, $10,36 \times 10^6$ erg s^{-1} (la cosiddetta Costante Solare), dovrà essere integrato: inizialmente dalle cosiddette energie rinnovabili secondo la formula già adottata dall'Europa Unita del 20-20-20; sempre continuando nell'utilizzo dei combustibili fossili, finché disponibili ed economicamente compatibili; ancora con il ricorso non più rinviabile ai Reattori a Fissione; ed infine, come soluzione considerata unanimemente definitiva, ai Reattori a Fusione. Infatti, i futuri Reattori a Fusione non debbono essere considerati alternativi a quelli a Fissione, ma ad essi complementari (ad esempio, nella possibile soluzione dei Reattori Ibridi Fusione-Fissione, qualora le condizioni geopolitiche lo consentano).

Bibliografia

- [1] *L'uso pacifico dell'energia nucleare da Ginevra 1955 ad oggi: il caso italiano*, Roma 2007, Vol. 40, Collana "Scritti e Documenti", Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL. [Gli interessati agli atti del Convegno di Roma dell'8-9 marzo 2006 possono rivolgersi alla Segretaria del Consiglio Scientifico, Angela Rosati (tel. 06-36272651 - e-mail angela.rosati@enea.it)].
- [2] Valeria Del Gamba, *Il ragazzo di via Panisperna. L'avventurosa vita del fisico Franco Rasetti*, Bolati Boringhieri, 2007.
- [3] H. Nishimura, ILE, Osaka University, in Proceedings 43rd Course Int'l School Quantum Electronics, Directors: A.N. Chester and S. Martellucci (2006).
- [4] S. Martellucci, A. Rosati, F. Scaramuzzi e V. Violante, *Storia della Fusione Fredda in Italia*, ENEA (2008).
- [5] J.D. Huba, *NRL Plasma Formulary* (revised), The Office of Naval Research (2002).
- [6] EUR FU BRU XII 106/95 *Selected Papers and Talks*, edited by S. Martellucci and G.G. Leotta (2005).

Benefici economici e benefici ordinali delle tecnologie energetiche a idrogeno

Corrado Giannantoni*
Mariangela Zoli**

* ENEA, Dipartimento Tecnologie per l'Energia, le Fonti Rinnovabili e il Risparmio Energetico

** Università di Roma Tor Vergata
Facoltà di Economia

È un metodo di valutazione degli investimenti energetico-economico-ambientale particolarmente indicato per le tecnologie a idrogeno, perché consente di contabilizzare i ritorni economici in senso strettamente aziendale, le esternalità negative, ma soprattutto i benefici economici per la collettività, le esternalità positive monetizzabili e i benefici ordinali, quei benefici cioè non riducibili al solo valore monetario

Economic and Ordinal Benefits of Hydrogen Energy Technologies

A method for assessing economic, environmental and energy investments is particularly suited for hydrogen technologies, because it makes it possible to calculate business returns, negative externalities and, above all, the economic benefits for the citizens: the monetizable positive externalities and the ordinal benefits, i.e. those which cannot be reduced to a simple monetary value

La valutazione degli Investimenti in ambito Energetico-Economico-Ambientale, spesso anche a carattere strategico, viene preferenzialmente condotta secondo la prospettiva per cui ogni attività deve ritenersi, in linea di principio, di per sé stessa auto-remunerativa. Raramente si prendono in considerazione le associate esternalità, sia positive che negative. Le prime, perché per loro stessa natura sono difficilmente remunerabili, le seconde perché, secondo la prospettiva precedentemente ricordata, non rientrano propriamente nel bilancio aziendale. Si realizza così, *de facto*, quella che normalmente viene definita la “socializzazione dei costi esterni”.

Solo eccezionalmente infatti vengono emanate leggi o norme che, direttamente o indirettamente, operano una sorta di “internalizzazione” dei costi esterni, come pure altrettanto raramente, e per casi peraltro molto particolari, vengono previste forme di incentivazione pubblica, intese come “remunerazione” anticipata di potenziali esternalità positive. Anche in questi casi, tuttavia, l’ammontare complessivo degli incentivi statali (nelle loro varie possibili forme) viene generalmente deciso in relazione al loro potenziale ritorno, in termini strettamente contabili, a livello di PIL nazionale. In tale contesto, più ampio e variegato di quanto sinteticamente riportato, potrebbe allora risultare di valido ausilio la disponibilità di un metodo di valutazione dell’investimento in grado di tener conto non solo dei ritorni economici (in senso aziendale), e neppure delle sole esternalità negative (danni), ma di contabilizzare soprattutto, e contestualmente:

- *benefici economici indotti* a livello di collettività;
- le *esternalità positive* (oltre che quelle negative) ritenute monetizzabili (e stimate in termini di “proxies”);
- e, non ultimi, i *Benefici Ordinali*, quei be-

nefici cioè che non sono *mai* effettivamente *riducibili* ad un semplice valore monetario, ma che sono comunque sempre oggetto di una possibile stima, ancora in termini economici, attraverso il concetto di “valori-cifra”.

Una tale metodologia di valutazione, sinteticamente denominata FSDOB (*Four Sector Diagram of Benefits*), inizialmente sviluppata in collaborazione fra l’ENEA, l’Università di Padova e l’Università di Siena^[1], è stata recentemente perfezionata in collaborazione con la LUISS di Roma e l’Università di Tor Vergata, attraverso la realizzazione di un corrispondente Codice di Calcolo, POLIDEMACO (POLICY DECISION MAKING CODE)^[2].

In questo articolo vengono illustrati i risultati conseguiti mediante l’applicazione di tale metodologia a due potenziali settori di utilizzo dell’idrogeno: la generazione stazionaria di elettricità ed il trasporto pubblico urbano, entrambi riferiti alla città di Roma.

La Metodologia

La Metodologia di Valutazione FSDOB si fonda sul *Maximum Em-Power Principle* di H.T. Odum^[3,4], generalmente noto anche come Quarto Principio della Termodinamica. Questo Principio, infatti, afferma che:

«Ogni sistema raggiunge il suo punto di lavoro ottimale quando massimizza l’Energia totale processata, inclusa quella relativa al suo habitat.»^[5].

Proprio per questo il metodo FSDOB, specificamente finalizzato alla valutazione strategica di un dato settore produttivo, prende in considerazione i benefici che si originano dagli *interscambi* fra il settore produttivo considerato e i settori “limitrofi” (intesi come *habitat*), ed è questo l’a-

spetto fondamentale da cui trae origine il suo nome.

Sulla base di questa prospettiva, il metodo guida alla valutazione dei benefici pertinenti i quattro settori generalmente coinvolti in ogni attività produttiva, più precisamente: i benefici per l'*azienda* (derivanti dal processo stesso di produzione), i benefici per la *società* (derivanti dalla commercializzazione di quel particolare prodotto), i benefici per l'*ambiente*, sia come sorgente (*source*) di risorse per il processo considerato, sia come *pozzo* (*sink*) dei residui (o rilasci) di produzione.

Diversamente però da quanto accade nelle tradizionali valutazioni economiche, gli interscambi non vengono valutati soltanto in termini economici (come semplici beni e servizi) ma, come già anticipato, attraverso un concetto termodinamico molto più generale, quello di *Energia*, soggiacente a qualsiasi forma di interscambio. Il concetto di *Energia*, infatti, introduce una radicale novità nelle valutazioni energetico-economico-ambientali, prima fra tutte, l'esplicito riconoscimento che

«i processi coinvolti non possono essere considerati come dei puri e semplici meccanismi.»

Ciò è equivalente ad affermare che i processi produttivi non sono riducibili ad una descrizione meramente funzionale, perché i loro esiti (outputs) mostrano sempre una inaspettata "eccedenza". Tale eccedenza può propriamente dirsi *Qualità* (con la Q maiuscola), perché essa non può essere esclusivamente intesa come una semplice "proprietà" (o "caratteristica") di un dato fenomeno, ma va riconosciuta come una "proprietà" *emergente* dal processo, e mai interamente riducibile alle sue sole premesse fenomenologiche o alle tradizionali categorie mentali. Il *Maximum Em-Power Principle* suggerisce allora di focalizzare l'attenzione sui processi più specificamente generativi, e tra questi vanno senz'altro an-

noverati i tre processi generativi fondamentali: la *co-produzione*, l'*inter-azione*, il *feedback*, in cui tale aspetto "emergente" è particolarmente evidente. Se si suppone di operare in condizioni stazionarie (ovvero a regime permanente), questi processi possono essere adeguatamente descritti per mezzo di una particolare algebra *non-conservativa*^[6], e ciò comporta, di conseguenza, l'introduzione del fondamentale concetto di *Trasformità*, che consente di definire l'*Energia* come il prodotto di una data quantità di *energia disponibile* (rappresentata dall'*Exergia*) per la sua corrispondente *Qualità* (espressa dalla *Trasformità*):

$$\text{Energia} = \text{Trasformità (Qualità dell'Energia)} \times \text{Exergia (quantità di Energia)} \quad (1).$$

In tal caso la *Trasformità*, anche se abitualmente espressa come un "fattore" algebrico, è sempre intesa in senso ordinale (v. più oltre). La *Trasformità* (Tr), infatti, può essere a sua volta suddivisa in due distinte componenti

$$Tr = Tr_{\phi} \cdot Tr_{ex} \quad (2)$$

in cui Tr_{ex} (*Trasformità dissipativa*) tiene conto delle perdite di *Exergia* durante il processo che conduce ad un determinato prodotto (o servizio), mentre il termine Tr_{ϕ} (*Trasformità generativa*) contabilizza il contenuto di *informazione* (*ordinale*), progressivamente crescente, dovuto al processo generativo considerato^[7,8].

Quando si passa poi all'analisi in condizioni dinamiche, la *Trasformità* diviene un concetto ancor più generale: quello di *Ordinalità*. Ciò avviene perché questo concetto scaturisce direttamente dalla ricerca di una formulazione matematica del *Maximum Em-Power Principle* in condizioni *dinamiche* del tutto generali, in cui è evidentemente richiesta la contestuale generalizzazione (dinamica) delle regole di algebra emergetica. In tal caso l'*Ordinalità* è

Tabella 1 - Indicatori (I_{ij}) suddivisi per Settori (i rappresenta il generico asse del diagramma ($i = 1, 2, \dots, 8$); j (per $j = 1, 2, \dots, 5$) indica l'ordine sequenziale dell'Indicatore caratterizzante l'asse (i); $I_{ij,0}$ = valori di riferimento)

Settore 1. Benefici per l'Impresa

I_{11} = Costo di impianto per unità di potenza (€/kW)	I_{21} = Efficienza Energetica
I_{12} = Costo del combustibile per unità di prodotto (€/kWhex)	I_{22} = Efficienza Exergetica
I_{13} = Costo del lavoro per unità di prodotto (€/kWhex)	I_{23} = Coefficiente globale di conversione dell'Energia
I_{14} = Costo di manutenzione per unità di prodotto (€/kWhex)	I_{24} = Trasformatività del prodotto
I_{15} = Costo dei dispositivi di cattura di NO_x (€/kWhex)	I_{25} = Indice di Profitto

Settore 2. Benefici per l'Ambiente come "pozzo"

I_{31} = Calore cogenerato / calore totale fornito	I_{41} = Riscaldamento Globale (rilascio CO_2) (kg/MWh)
I_{32} = Costo del sequestro e stoccaggio della CO_2 (€/ton)	I_{42} = Costi di emissione di CO_2 a livello locale (€/kWh)
I_{33} = Costo specifico di cattura dell' NO_x (€/ton)	I_{43} = Costi di emissione di CO_2 a livello globale (€/kWh)
I_{34} = Riutilizzo dei materiali (%)	I_{44} = Costi di emissione di NO_x (acidificazione) (€/kWh)
I_{35} = Frazione di riciclaggio a valle del decommissioning (%)	I_{45} = Costi di emissione di NO_x (via ozono) (€/kWh)

Settore 3. Benefici per la Società

$I_{51} = \sum \lambda / \text{Inv}$ (beneficio economico per unità Invest.)	$I_{61} = \pi_4 / \pi_2$ (benefici per l'economia / costo del prodotto)
$I_{52} = \text{EYR}^*$ (amplificazione del processo economico)	$I_{62} = \pi_5 / \pi_2$ (benefici indotti / costo del prodotto)
$I_{53} = T_{rpd} / T_{rpc}$ (beneficio del prodotto per tipo di processo)	$I_{63} = \pi_6 / \pi_2$ (I_{63} al netto dei danni locali)
$I_{54} = (F' \cdot \text{EYR}_f - \text{Inv}) / \text{Inv}$	$I_{64} = \pi_7 / \pi_2$ (I_{64} al netto dei danni globali)
$I_{55} = \pi_1 / \pi_2$ (sostenibilità finanziaria impresa / cittadino)	$I_{65} = \pi_8 / \pi_2$ (I_{64} al netto del consumo di risorse)

Settore 4. Benefici per l'Ambiente come "fonte"

I_{71} = ELR (Indice di Carico Ambientale)	I_{81} = Densità Emergetica (seJ/m ²)
I_{72} = EIS (Indice Emergetico di Sostenibilità)	I_{82} = Emergenza Non-rinnovabile / Emergenza Totale
I_{73} = Riduzione della Biodiversità (%)	I_{83} = Intensità materiale, fattore di consumo di acqua (g/kWh)
I_{74} = Area di supporto del processo (m ² /MW)	I_{84} = Intensità materiale, fattore abiotico (g/kWh)
I_{75} = Emissioni effettive di NO_x / Limiti di legge	I_{85} = Frazione di combustibile importato (%)

Fonte: Giannantoni et al.^[10]

espressa dall'*ordine di derivazione* (generalmente di tipo frazionario) riferibile ad un *nuovo concetto di derivata*, la derivata "incipiente", esplicitamente definita per descrivere, in appropriati termini formali, le specifiche caratteristiche *a-funzionali* dei processi considerati^[9]. La nuova formulazione matematica consente allora di analizzare le varie forme di interscambio fra due settori (schematicamente rappresentate in *figura 1*), secondo un'identica modalità di contabilizzazione, a carattere del tutto generale. Per ragioni di semplicità, tuttavia, nelle successive considerazioni ci riferire-

mo a condizioni stazionarie. Ciò nondimeno, sulla base di quanto precedentemente esposto, potremo sempre equivalentemente adottare il termine (più generale) di Ordinalità in luogo di quello (più particolare) di Trasformatività.

Esternalità Ordinali

Il concetto di Ordinalità, benché originariamente sorto nell'ambito dell'analisi Termodinamica dei processi fisico-biologici, è altrettanto valido in molte altre discipline. In particolare, in economia^[9]. Considera-

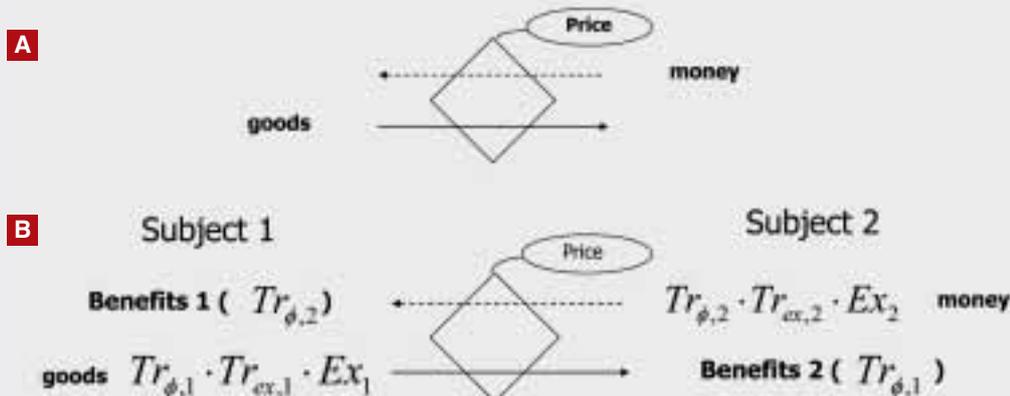


Figura 1
 Esternalità Ordinali intese come una "eccedenza di Ordinalità"
 Fonte: Odum^{3,4}

mo dunque una generica transazione (figura 1a) secondo la simbologia introdotta da Odum^[3,4]. In tal caso l'interscambio beni-denaro, se analizzato in *termini Emergetici* (o, meglio ancora, in *termini Ordinali*), non si restringe più ai soli aspetti fisico-economici. Infatti, l'Emergia associata ad un qualsiasi prodotto/servizio (i) è sempre esprimibile nella forma

$$Em_i = Tr_{\phi,i} \cdot Tr_{ex,i} \cdot Ex_i \quad (3)$$

in cui $Tr_{ex,i}$ contabilizza le perdite di Emergia (Ex_i) durante il processo di generazione di un determinato prodotto/servizio, mentre $Tr_{\phi,i}$ (Trasformità generativa) può essere interpretata come la "cifra" dell'*Ordinalità* "veicolata" da quello stesso prodotto/servizio (v. anche Eq. (2)). Ogni Transazione (figura 1b) può pertanto essere vista come un interscambio di Emergie di diversa natura, ciascuna caratterizzata da una specifica cardinalità ed una corrispondente *Ordinalità*. Da qui emerge chiaramente la profonda differenza con il modo tradizionale di concepire le transazioni. Abitualmente, infatti, nel calcolo dei benefici che si originano dalle transazioni, non vengono contabilizzati quei tipi di *Benefici* che, sempre veicolati dai prodotti

scambiati, risultano proporzionali alle rispettive Trasformità generative $Tr_{\phi,1}$ e $Tr_{ex,2}$. D'altra parte non è difficile riconoscere che in qualsiasi forma di interscambio sussiste (in generale) una condizione di disequilibrio tra le Emergie scambiate (e, quindi, fra le corrispondenti *Ordinalità*). Si può pertanto affermare che una Transazione può essere considerata una reale interazione *transattiva* solo quando i due settori (o "soggetti") considerati operano in consonanza con il *Maximum Em-Power Principle*. Il che si realizza quando entrambi concorrono ad un reciproco incremento delle loro rispettive *Ordinalità* (verso una *Ordinalità* tendenzialmente superiore). In tal senso una Esternalità (o Beneficio) Ordinale può definirsi come "quella eccedenza di *Ordinalità* che emerge da ogni forma di transazione". Sulla base di questi concetti è stato elaborato il Metodo di Valutazione FSDOB.

Il Diagramma dei Benefici a Quattro Settori

Il metodo FSDOB, più articolatamente descritto in^[10], può essere così sintetizzato. Ciascun settore è identificato per mezzo

di due assi cartesiani (figura 2) che evidenziano le sue principali caratteristiche secondo un tradizionale approccio ingresso/uscita. Ciascun asse è definito da 5 Indicatori¹ previamente *normalizzati* sulla base di un appropriato valore di riferimento, specificamente scelto in relazione alla tipologia del processo considerato. Il codice di calcolo consente di assegnare a ciascun Indicatore (già normalizzato) un appropriato "peso", per tener conto della sua influenza in relazione al processo analizzato. La sola condizione richiesta è che la somma dei pesi sia sempre uguale a 1. La media pesata di ciascun asse viene valutata (tabella 2) assumendo che tutti gli Indicatori normalizzati abbiano inizialmente un identico peso. Tuttavia, tenendo conto che le autorità di governo possono adot-

tare una diversa distribuzione dei pesi, il metodo contempla la valutazione delle variazioni massime, sia positive che negative, rispetto ai valori precedenti. Sulla base dei valori ottenuti viene quindi tracciato un diagramma di sintesi (figura 2 e 3), in cui i baricentri dei "cerchi" rappresentano i valori delle medie pesate.

Celle a combustibile per produzione stazionaria di elettricità e calore

Il primo esempio di applicazione qui richiamato, più ampiamente analizzato in^[11], riguarda la valutazione di celle a combustibile a idrogeno per la produzione stazionaria di elettricità e calore. Più precisamente, la valutazione si riferisce al ca-

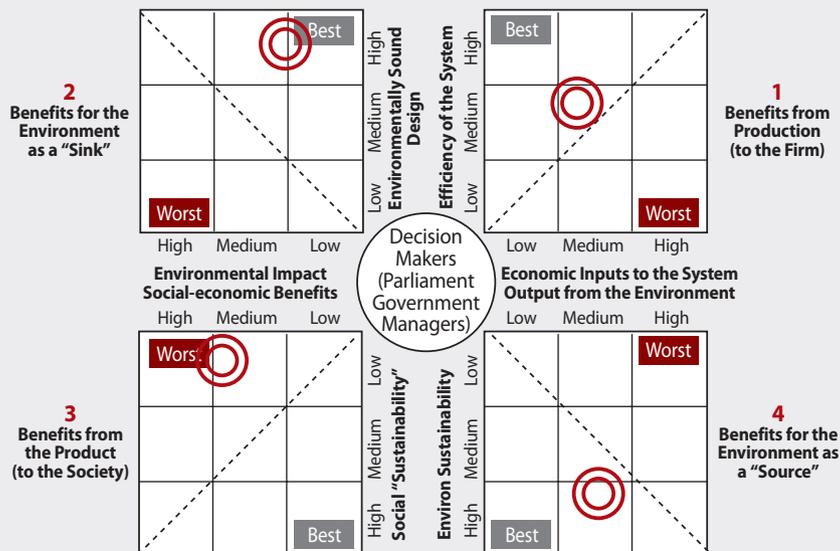


Figura 2
Celle a combustibile per applicazioni stazionarie (senza incentivi)
Fonte: ENEA, Univ. Roma Tor Vergata, Univ. Cassino

1. Tali Indicatori (elencati in *tabella 1*, ed esplicitamente definiti in^[1,2,10]), rappresentano, rispettivamente: 1) le risorse economiche impegnate dall'Azienda; 2) le corrispondenti prestazioni tecnico-economiche del processo considerato; 3) la compatibilità ambientale del processo sin dalla fase di progetto; 4) il corrispondente impatto ambientale; 5) i benefici socio-economici indotti (ed, in particolare, il contributo al PIL nazionale); 6) la ripartizione dei benefici fra Azienda, Stato, cittadini; 7) la sostenibilità del processo sul lungo periodo; 8) le risorse tratte dall'Ambiente.

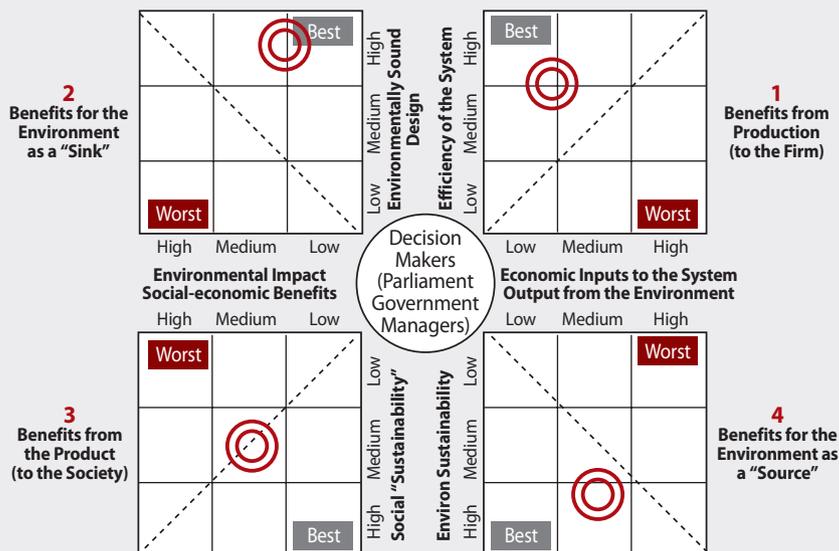


Figura 3
Celle a combustibile per applicazioni stazionarie (con incentivi)
Fonte: ENEA, Univ. Roma Tor Vergata, Univ. Cassino

Tabella 2 - Parametri caratteristici di una singola Fuel Cell (500 kW) con incentivi statali

Sett. Asse	I_{i1}	I_{i2}	I_{i3}	I_{i4}	I_{i5}	\bar{W}_i	
1 1	400 (325)	0.025 (0.02)	1.3E-2 (1.0E-4)	2.0E-4 (2.0E-4)	1.01E-3 (1.0E-3)	0.276	+12% -44%
1 2	79.5 (85.0)	41.0 (75.0)	79.5 (85.0)	1.95E5 (1.0E5)	1.10 (2.00)	0.680	+17% -13%
2 3	0.372 (0.40)	non disponibile	non applicabile	non applicabile	0.60 (0.80)	0.876	+3% -0%
2 4	436 (300)	0.0472 (0.015)	0.189 (0.054)	1.01E-3 (1.0E-3)	1.01E-3 (1.0E-3)	0.342	+48% -44%
3 5	1.09 (3.50)	104 (50)	1.51 (1.57)	21.0 (25.0)	0.0329 (1.00)	0.549	+33% -19%
3 6	0.036 (1.00)	0.727 (1.00)	0.719 (1.00)	0.686 (1.00)	0.381 (1.00)	0.517	+18% -12%
4 7	548 (9.02)	0.038 (1.25E-2)	non disponibile	720 (300)	0.20 (0.90)	0.753	+0% -9%
4 8	4.32E17 (1.56E15)	0.95 (0.857)	1120 (1500)	243 (350)	0.85 (0.80)	0.518	+19% -39%

\bar{W}_i è definito come $\bar{w}_i = \sum_{j=1}^5 w_j \cdot F[(I_{ij} / I_{i0})]^\alpha$, con $\alpha = 1$ se $\frac{I_{ij}}{I_{i0}} \leq 1$, e $\alpha = -1$ se $\frac{I_{ij}}{I_{i0}} \geq 1$

Fonte: ENEA, Univ. Roma Tor Vergata, Univ. Cassino

so di installazione di 15 celle a combustibile in un grande complesso residenziale, finalizzate a soddisfare la richiesta energetica di circa 1000 appartamenti di proprietà dell'ATER (ex Istituto Autonomo case Popolari di Roma). In figura 2 viene riportato il corrispondente diagramma FSDOB, riferito ad una singola cella (da 500 kW), preliminarmente valutato senza prevedere alcun incentivo statale. In figura 3 è illustrato invece il corrispondente posizionamento della cella a fronte di alcune possibili forme di incentivazione (nelle relazioni indicate con ΔI_0). Nello specifico, si è ipotizzato che: i) il 50% dell'investimento iniziale (204.500 €) sia finanziato come contributo in conto capitale; ii) sia prevista l'esenzione da qualsiasi forma di tassazione addizionale (IVA e/o accise) sui combustibili fossili acquistati; iii) un ulteriore contributo (163.380 €) sia erogato sotto forma di "certificati verdi".

In tali condizioni, la realizzazione dell'impianto diviene economicamente competitiva. Tuttavia, al fine di giustificare l'alto livello di incentivazione considerato, diviene doveroso operare un confronto fra gli incentivi considerati e i corrispondenti benefici indotti, stimabili attraverso il *Metodo dei Baricentri*². Nel caso specifico considerato (cioè per $\chi = 0.5$, $I_{51,0} = 3.5$, $n = 5$, con $\lambda_j = 1$) si ha che i *Benefici Economici Annuali* (BEA) sono pari a

$$BEA \cong (5.1 \div 8.8) \cdot \Delta I_0 \quad (4)$$

In altri termini, i *benefici complessivi* in-

dotti dal processo considerato sono ampiamente superiori agli incentivi (ΔI_0) che ne consentirebbero, di fatto, la realizzazione pratica. Ed è proprio questa una delle ragioni fondamentali per l'adozione di processi decisionali basati sui *benefici indotti* (sempre superiori agli incentivi che li hanno generati) piuttosto che sulla stima dei possibili *danni da internalizzare*. Senza contare che il 50% circa dell'investimento ha un diretto ritorno sul PIL (di norma entro l'anno) in termini di entrate per lo Stato, sotto forma di IVA e imposte dirette sui redditi derivanti dalle varie attività commerciali finalizzate alla realizzazione dell'impianto/processo considerato.

Poiché la determinazione dei coefficienti di "correlazione" λ_j ($j \neq 5$) è affidata alla discrezionalità del legislatore, il metodo di valutazione può essere ritenuto ancora eccessivamente "soggettivo". Questo aspetto, però, viene facilmente superato da un approccio di valutazione operato in *condizioni dinamiche* (v. più oltre), nel qual caso i "coefficienti" si ottengono direttamente dalla ottimizzazione *Ordinale* della configurazione del sistema analizzato.

Autobus per trasporto pubblico urbano

Il secondo esempio di applicazione si riferisce alla possibile introduzione di autobus per il trasporto pubblico, alimentati a celle a combustibile a idrogeno. Anche questo caso, più ampiamente esaminato in^[12], considera l'ipotesi che l'Azienda per il trasporto pubblico in Roma (ATAC) voglia intro-

2. È questo un metodo che consente di stimare, da un punto di vista del tutto generale, i Benefici indotti da un investimento I_0 . Infatti, i Benefici Economici Annuali (BEA), sono esprimibili nella forma

$$BEA = \frac{I_0}{n} \cdot [I_{51,0} \cdot \sum_{j=1}^5 \lambda_j \xi_j \cdot w_j (1 \pm \Delta w_j)] \quad (5)$$

in cui: n = vita dell'Investimento; λ_j = coefficienti di "scala" riferiti all'asse 5 (ovvero l'asse dei "Benefici Socio-economici", caratterizzato da $\lambda_5 = 1$); ξ_j = coefficienti di orientamento di ciascun asse (in senso equiverso o meno con l'asse di riferimento 5). Se si considera poi che gli Incentivi (ΔI_0) sono sempre una frazione (χ) dell'Investimento I_0 , la (10) diviene

$$BEA = [I_{51,0} \cdot \sum_{j=1}^5 \lambda_j \xi_j \cdot w_j (1 \pm \Delta w_j)] \frac{\Delta I_0}{n\chi} \quad (6)$$

dure 100 nuovi autobus del tipo considerato. Poiché tale forma di trasporto urbano non è ancora competitiva con quelle abitualmente adottate e basate su combustibili fossili, viene analizzata la possibilità di un correlativo sostegno (ancorché solo iniziale e temporaneo) con incentivi finanziari di carattere pubblico.

Ai fini della applicazione del metodo FSDOB, si è assunto che il costo di una versione prototipica di un autobus ad Idrogeno sia pari 1.200.000 € (ben più elevato di quello di un autobus gasolio (250.000 €)), compresa la pertinente quota di impianto necessario per la produzione centralizzata di Idrogeno. Il costo di questo impianto è stato assunto pari a 2.000.000 €^[13], inclusivo delle varie infrastrutture richieste. Si è inoltre supposto che l'Idrogeno sia prodotto per elettrolisi, e ciò si traduce in un corrispondente costo di esercizio di 1,35 €/km (rispetto ai 0,35 €/Km per gli autobus a gasolio e di 0,30 €/Km per quelli a gas).

In *figura 4* è riportato il corrispondente diagramma FSDOB, riferito al singolo autobus,

valutato senza alcuna forma di incentivazione. In *figura 5*, invece, è riportato il corrispondente posizionamento a seguito delle seguenti forme di incentivazione:

- il 90% del costo di investimento iniziale (1.080.000 €) come contributo in conto capitale;
- esenzione da qualsiasi forma di tassazione addizionale (IVA e/o accise) sull'elettricità e/o sui combustibili fossili acquistati;
- un ulteriore contributo ottenibile da specifici Programmi UE (p. es., CIVITAS II (2005-2009) e, più in particolare, dal Programma MIRACLE);
- la parte residua verrebbe coperta da specifiche forme di tassazione per ben definite classi di combustibili inquinanti.

Come evidenziato in *figura 5* gli Incentivi comporterebbero un miglioramento delle prestazioni della nuova tecnologia, soprattutto per il primo e terzo settore. In quest'ultimo settore, in particolare, si realizzerebbe una migliore distribuzione nella ripartizione dei costi fra azienda, Stato e

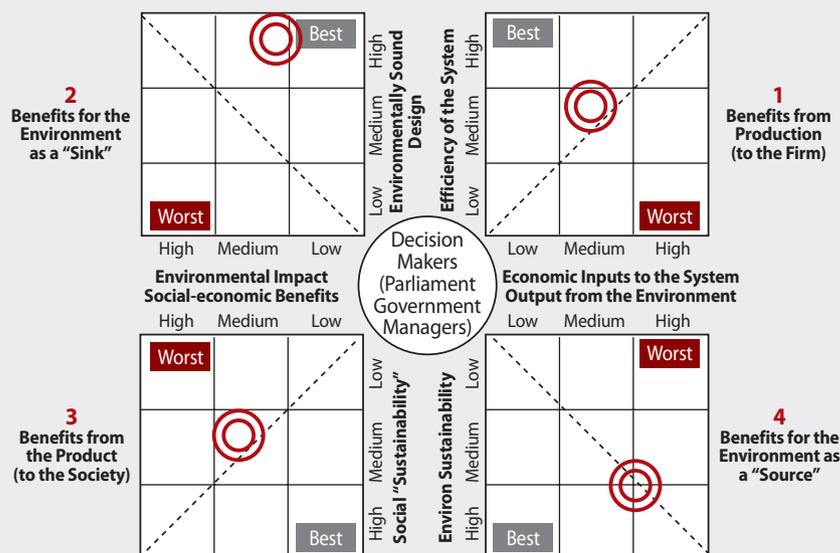


Figura 4
Autobus a Idrogeno (senza incentivi)
Fonte: ENEA, Univ. Roma Tor Vergata, Univ. Cassino

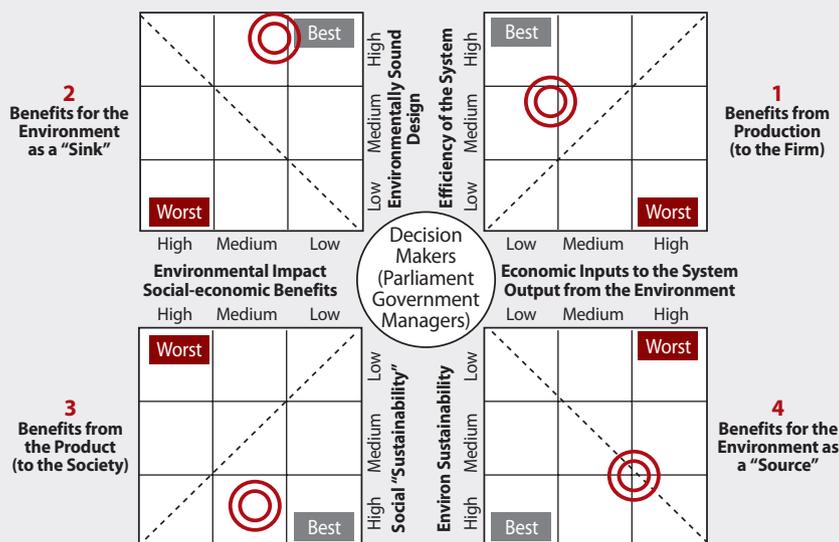


Figura 5
Autobus a Idrogeno (con incentivi)
Fonte: ENEA, Univ. Roma Tor Vergata, Univ. Cassino

consumatori, come si può riscontrare dai più elevati valori degli indicatori di sostenibilità (*tabella 3*). Ancora una volta, però, diviene fondamentale operare (in questo caso a maggior ragione) un confronto fra gli incentivi considerati ed i corrispondenti benefici indotti.

Tali benefici possono essere ancora valutati con il Metodo dei Baricentri (precedentemente ricordato). Pertanto, sulla base delle Eq. (5) e (6), tenendo conto dei valori riportati in *tabella 3* e dei parametri specifici pertinenti il caso in esame ($\chi = 0.9$, $l_{51,0} = 3.5$, $n = 2$, con $\lambda_i = 1$) si ottiene che

$$BEA \cong (5.1 \div 9.9) \cdot \Delta I_0 \quad (7).$$

Come si può riscontrare, anche in questo caso i benefici complessivi generati dal processo analizzato sono ampiamente superiori ai corrispondenti incentivi che ne consentirebbero, di fatto, la realizzazione pratica. Anche qui si potrebbero ovviamente ripetere le stesse considerazioni circa il confronto con le altre metodologie (come, p. es., l'“internalizzazione dei costi

esterni”), come pure sugli ulteriori vantaggi ottenibili in termini di ritorno sul PIL (abituamente entro l'anno) del 50% dell'investimento. Resta comunque da considerare la “soggettività” della scelta dei valori dei coefficienti λ_i affidata alla discrezionalità del *Decisore politico*.

Appare pertanto opportuno spendere qualche parola su tale (supposta) limitazione, il cui superamento può ottenersi, come già anticipato, con il passaggio ad un processo di valutazione dinamica.

I Benefici Ordinali in condizioni dinamiche

Il processo di generalizzazione della metodologia in condizioni dinamiche è notevolmente favorito dal fatto che il modello matematico Ordinale di un qualsiasi sistema/processo (comunque complesso) presenta sempre una soluzione in *termini espliciti* e, per di più, in *forma chiusa*^[7,8]. Pertanto i coefficienti λ possono ottenersi sulla base della sola struttura relazionale che massimizza il livello di Ordinalità del sistema.

Tabella 3 - Parametri caratteristici di un Autobus a Idrogeno (160 kW) con incentivi statali

Sett.	Asse	I_{i1}	I_{i2}	I_{i3}	I_{i4}	I_{i5}	\bar{W}_i	
1	1	1000 (1000)	0.364 (0.30)	1.34 (1.0E-4)	1.20 (0.25)	1.01E-3 (1.0E-3)	0.321	+22% -44%
1	2	79.5 (85.0)	41.0 (75.0)	79.5 (85.0)	1.95E5 (1.0E5)	1.10 (2.00)	0.603	+15% -11%
2	3	0.372 (0.40)	non disponibile	non applicabile	non applicabile	0.70 (0.80)	0.918	+3% -0%
2	4	558 (300)	0.604 (0.015)	0.164 (0.054)	1.01E-3 (1.0E-3)	1.01E-3 (1.0E-3)	0.377	+48% -44%
3	5	1.08 (3.50)	104 (158)	2.17 (2.50)	23.5 (30.0)	7.32 (10.0)	0.542	+2% -14%
3	6	7.89 (10.0)	180 (200)	174 (180)	149 (180)	134 (180)	0.845	+15% -5%
4	7	625 (9.02)	0.023 (0.0125)	non disponibile	1000 (500)	0.256 (0.90)	0.699	+0% -7%
4	8	4.92E17 (1.56E15)	0.90 (0.51)	4480 (4500)	972 (1050)	0.85 (0.80)	0.683	+19% -39%

\bar{W}_i è definito come $\bar{w}_i = \sum_{j=1}^5 w_{ij} \cdot F[(I_{ij}/I_{i,j,0})]^\alpha$, con $\alpha = 1$ se $\frac{I_{ij}}{I_{i,j,0}} \leq 1$, e $\alpha = -1$ se $\frac{I_{ij}}{I_{i,j,0}} \geq 1$

Fonte: ENEA, Univ. Roma Tor Vergata, Univ. Cassino

A solo titolo di esempio, il caso più elementare corrisponde a quel comportamento dinamico in cui ciascun settore è espressione di una effettiva *co-operazione interna* a carattere *generativo* (rappresentata pertanto attraverso una funzione "binaria"^[11]), a sua volta amplificata dalla co-presenza dei vari settori che interagiscono l'un l'altro come una sequenza di quattro "duetti" [ib]. Il sistema verrà allora semplicemente modellizzato come un "quartetto" di funzioni "binarie". In tal modo la descrizione del sistema non solo diviene realmente più *unitaria*, ma consente anche di prendere delle decisioni che sono, per ciò stesso, sempre più orientate verso la genesi della *Massima Eccedenza di Ordinalità*. E ciò è tanto più vero se si considera che, una delle principali conseguenze di questo processo di ottimizzazione è che le condizioni per il raggiungimento dell'*optimum* economi-

co (generalmente ritenute corrispondenti all'*optimum paretiano*) possono essere ora ottenute come semplice riflesso aderente del massimo livello di Ordinalità raggiunto dal sistema. Ed questa è la ragione fondamentale per poter sostenere (in perfetta aderenza con il *Maximum Em-Power Principle*) che in economia esiste una *circolazione dinamica di Extra-Benefici*.

Conclusioni

I due casi esemplificativi sopra ricordati mostrano chiaramente la differenza fra benefici ordinali e benefici economici (o cardinali), sia in condizioni *stazionarie* che in condizioni *dinamiche*. Infatti:

- in condizioni stazionarie il Metodo FSDOB stima le esternalità ordinali, associate ad un qualsiasi processo produttivo, sotto forma di "proxies" (perciò con

valenza economica) sulla base della Trasformità generativa, assunta come "cifra" di quei benefici ordinali;

- in condizioni dinamiche, invece, la determinazione del massimo livello di Ordinalità raggiungibile dal sistema, in corrispondenza della sua configurazione ottimale (in senso Ordinale), consente di valutare le *condizioni economiche ottimali* (incentivi inclusi) che corrispondono, come *semplice riflesso* aderente, a quella configurazione di lavoro prescelta. In altri termini, mentre in condizioni stazionarie i benefici ordinali vengono *direttamente* convertiti (ancorché in forma di "proxies") in termini economici equivalenti, in condizioni dinamiche i *benefici economici ottimali* non sono altro che il *semplice riflesso (cardinale)* dei benefici ordinali, perché valutati in corrispondenza di quelle condizioni di lavoro, cioè di quella configurazione *relazionata*

le, che è ancora ovviamente ottimale, ma è intesa (ora) in *senso Ordinale*.

In tale contesto gli "incentivi" non possono più essere considerati come una sorta di "regalo" nei confronti dell'azienda, perché rappresentano, di fatto, una forma di "remunerazione" delle *esternalità ordinali* (benefici) che l'azienda produce in favore della società e dell'ambiente. Lo Stato, per contro, recupera tali "incentivi" non solo in termini economici (direttamente contabilizzati dal PIL), ma come conseguenza dei benefici che si generano dal quel ricordato *processo di circolazione a somma ampiamente non-nulla*. Ciò si realizza ancor più quando tali benefici ordinali vengono assunti come riferimento "guida" (in particolare in condizioni dinamiche) per la valutazione cardinale delle corrispondenti condizioni ottimali di funzionamento: sia di natura fisico-energetica che, *a fortiori*, di natura economica.

Bibliografia

- [1] Giannantoni C., Mirandola A., Tonon S., Ulgiati S. *Energy Based Four-Sector Diagram of Benefits as a Decision Making Tool*. In Proceedings of Third Workshop on "Advances in Energy Studies" 2002, Porto Venere, Italy, Sept. 24-28, 2002, p. 575-586.
- [2] Giannantoni C., Boccardelli P., Luongo S., Zoli M., Ulgiati S. *The Code POLIDEMACO (POLICY DECISION MAKING CODE) for Strategic Choices based on Circulation of Benefits*. In Proceedings of Fifth Workshop on "Advances in Energy Studies" 2006, Porto Venere, Italy, September 16-18, 2006.
- [3] Odum H.T. *Ecological and General Systems. An Introduction to Systems Ecology*. Colorado Univ. Press, 1994.
- [4] Odum H.T. *Environmental Accounting. Emergy and Decision Making*. New York: John Wiley, 1995.
- [5] Giannantoni C. *The Maximum Em-Power Principle as the basis for Thermodynamics of Quality*. Padua, SGE, 2002.
- [6] Brown M.T. & Herendeen R.A. *Embodied Energy Analysis and EMERGY analysis: a comparative view*. Ecological Economics 1996; (19): 219-235.
- [7] Giannantoni C. *Emergy Analysis as the First Ordinal Theory of Complex Systems*. In Proceedings of Fourth Emergy Conference 2006. Gainesville, Florida, USA, January 17-22, 2006.
- [8] Giannantoni C. *Mathematics for Generative Processes: Living and Non-Living Systems*. Applied Mathematics and Computation 2006; (189): 324-340.
- [9] Giannantoni C. *Thermodynamics of Quality and Society*. In Proceedings of International Workshop on "Advances in Energy Studies" 2004, Campinas, Brazil, June 16-19, 2004, p. 139-157.
- [10] Giannantoni C., Lazzaretto A., Macor A., Mirandola A., Stoppato A., Tonon S., Ulgiati S. *Multi-criteria Approach for the Improvement of Energy Systems Design*. Energy 2005; (30):1989-2016.
- [11] Giannantoni C. *Ordinal Benefits vs Economic Benefits as a Reference Guide for Policy Decision Making. The Case of Hydrogen Technologies*. In Proceedings of 20th International Conference "ECOS-2007", Padua, Italy, June 25-28, 2007, p. 1629-1636.
- [12] Giannantoni C., Zoli M. *The Four-Sector Diagram of Benefits (FSDOB) as a Method for Evaluating Strategic Interactions between Humans and the Environment -The case study of fuel cell buses in Rome*. Background paper for the XIX Villa Mondragone International Economic Seminar on "The Economic Future of Europe", Rome, June 25-26, 2007.
- [13] Mintz M., Molburg J., Folga S., Gillette J., (2003), "Hydrogen Distribution Infrastructure", Hydrogen in Materials & Vacuum Systems: First International Workshop on Hydrogen in Materials and Vacuum Systems. AIP Conference Proceedings, Volume 671, 2003, pp. 119-132.

Nasi elettronici

Girolamo Di Francia
Gianbattista Burrasca
Saverio De Vito
Ettore Massera

*ENEA, Dipartimento Tecnologie Fisiche
e Nuovi Materiali*

Il naso elettronico è un'apparecchiatura che tenta di simulare il funzionamento del sistema olfattivo dei mammiferi e che trova applicazione in diversi settori: agroalimentare, ambientale, biomedico, aerospaziale, della sicurezza, dei processi industriali. L'ENEA è impegnato nello sviluppo di nasi elettronici, uno dei quali è utilizzato per il monitoraggio di un sito sismico presso Napoli

Electronic Noses

The electronic nose is a device developed to reproduce the human olfactory system. It can be applied to different sectors: food processing, environment, biomedicine, aerospace, safety and industry. ENEA develops electronic noses, one of which is being tested for monitoring a seismic site near Naples

L'olfatto, tra tutti i sensi dell'uomo, è senza dubbio quello meno controllabile. Si possono chiudere gli occhi e la bocca, tapparsi le orecchie e perfino evitare ogni contatto con il corpo. Ma il naso non possiamo tenerlo a freno: dobbiamo respirare. Ed è proprio questo sfuggire della funzione olfattiva al controllo volontario, che ne accentua le intrinseche caratteristiche di senso dell'allarme, negli animali come negli uomini, in grado di svolgere la peculiare funzione di sorveglianza in maniera quasi automatica. Ed è probabilmente proprio per questo che alcune culture considerano il naso come la porta, sempre aperta, con la quale l'uomo interagisce con il mondo intorno a lui.

E proprio da questa porta entrano, in maniera, appunto, spesso involontaria, sollecitazioni emotive di tutti i tipi, fin dalla nascita. È infatti l'olfatto, pare, il primo legame del neonato con la propria madre. E quindi, prima di tutti gli altri sensi, l'uomo impara a registrare profumi, aromi, odori più o meno gradevoli. La parte del cervello che è associata a questa funzione è il sistema limbico che è posizionato all'incirca tra i due lobi temporali ed il cui effetto, sul comportamento degli esseri umani, è decisamente potente poiché ad esso sono associate primarie funzioni cerebrali come la memoria, l'umore, le emozioni. Dunque esso consente, attraverso l'esperienza, lo stabilirsi di un corretto rapporto tra il nostro essere e l'ambiente esterno. Proprio perciò non appare affatto sorprendente che le disfunzioni olfattive possano essere indice di diverse patologie cerebrali: morbo di Parkinson, di Alzheimer, schizofrenia, autismo ecc. e che l'ambiente olfattivo in cui si è immersi possa addirittura contribuire allo scatenarsi di patologie come è ad esempio il caso dell'emigrania o dell'ansia. E tutto ciò nonostante le nostre capacità olfattive siano molto limitate rispetto

a quelle animali: solo il 6% di quelle di un cane ed appena il 3% rispetto a quelle del coniglio.

Non vi è dubbio dunque che il rapporto tra cervello ed olfatto sia molto più profondo di quanto normalmente si pensi. Se, ad esempio, entriamo in una casa e sentiamo, senza alcuna sollecitazione visiva, l'odore del caffè oppure del ragù, il nostro cervello recupera la "registrazione" di quegli odori sollecitando al contempo il desiderio. È interessante osservare che siccome spesso quelle registrazioni sono associate a situazioni di relax, l'industria sta cercando di riprodurre artificialmente quegli odori in modo da poterli riproporre in situazioni tali da rilassare il consumatore, facilitandone, ad esempio, gli acquisti.

Eppure, forse proprio perché in un certo senso non pienamente in nostro controllo, gli esseri umani hanno trascurato la funzione olfattiva. Così, in questi anni di rapido progresso scientifico e tecnologico, abbiamo imparato a realizzare sistemi di varia natura per registrare immagini e suoni, sistemi che ci sono ormai così familiari da essere diffusissimi (si pensi ad esempio al cellulare), ma praticamente non è ancora disponibile commercialmente alcun sistema di registrazione dell'olfatto. In effetti, per anni la ricerca scientifica ha cercato di realizzare sistemi olfattivi artificiali (comunemente noti come Nasi elettronici o e-nose), cercando di mimare il sistema olfattivo naturale. Ma ancora oggi la ricerca non è riuscita appieno nel suo obiettivo e questo anche perché una teoria completa di come funzioni l'olfatto nell'uomo non è ancora disponibile.

I sistemi olfattivi artificiali: una breve storia

Comunque sia è certo che la storia dei sistemi olfattivi artificiali, che sarà descritta

più in dettaglio nel seguito, è veramente breve se paragonata con la storia dei sistemi di registrazione visiva o acustica. È comunque difficile, come spesso succede in questi casi, individuare una vera e propria data di nascita per ciò che attualmente viene definito naso elettronico. Una serie di risultati e contributi innovativi quale la realizzazione del primo sensore a stato solido da parte di Hartman e la costruzione di un *array* di termistori rappresentano la base tecnologica per il suo sviluppo.

Nella comunità scientifica, si fa risalire la nascita del naso elettronico ai primi anni '80, quando K. Persaud and G. Dodd, allora al Dipartimento di Biochimica dell'Università di Warwick, tentarono di modellare e simulare il funzionamento del sistema olfattivo dei mammiferi sulla base di elementi sensibili a stato solido. I sensori disponibili allora erano prevalentemente basati su ossidi metallici ed erano affetti in maniera rilevante da mancanza di selettività e stabilità. Ciò nonostante essi riuscirono nell'intento di discriminare tra circa 20 odori differenti utilizzando 3 sensori e differenziando visivamente le configurazioni di risposta di questi. Contemporaneamente un gruppo di ricercatori dell'Argonne National Laboratory (Chicago, IL) svilupparono uno strumento basato su un *array* di sensori di gas chiamato CPS (*Chemical parameter spectrometry*), il cui scopo doveva essere la rilevazione di sostanze pericolose nell'ambito del trasporto marittimo. In ogni caso, il termine naso elettronico divenne comune soltanto a cavallo tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90, quando vennero depositati alcuni significativi brevetti ed una prima conferenza NATO tenutasi in Islanda nel 1991 divenne una pietra miliare per lo sviluppo di questi sistemi. Fondamentale per la diffusione e l'evoluzione dell'architettura fu il lavoro di ingegnerizzazione, approfondimento tecnologico e divulgazione svolto

da J.W. Gardner e W. Gopel con i loro rispettivi gruppi.

Dopo gli entusiasmi iniziali divennero ben chiare le limitazioni del naso elettronico, legate principalmente alla difficoltà di ottenere sensori specifici e stabili per un numero sensibilmente alto di sostanze come quelle rilevate dai neuroni olfattivi. L'ingegnerizzazione dell'architettura si concentrò sulla specializzazione dell'apparato per un campo applicativo ben specifico all'interno del quale fosse possibile sfruttare al meglio le capacità dell'*array* di sensori prescelto. Non bisogna dimenticare infatti, nel paragonare l'olfatto artificiale a quello naturale, che sebbene il secondo sia dotato di un numero di recettori capaci di apportare informazioni significative e selettive molto maggiori, è possibile fabbricare ed utilizzare dei rivelatori ad hoc per sostanze ai quali nessun naso biologico, umano od animale, è sensibile. Un classico esempio è dato dall'ossido di carbonio la cui rilevazione non era di alcun significato evolutivo prima della scoperta del fuoco, talché nessun rilevatore biologico è stato messo a punto per esso.

In questi 25 anni di storia, alcuni gruppi italiani hanno validamente contribuito allo sviluppo dei nasi elettronici ed almeno quattro di questi, tra cui il gruppo sensori del Centro Ricerche ENEA di Portici (Na), hanno sviluppato ed operano in maniera continuativa una propria unità naso elettronico, la cui efficacia è stata sperimentata in molteplici scenari applicativi. Alcune di queste piattaforme di ricerca hanno poi dato luogo allo sviluppo, da parte di aziende partner, di moduli commerciali italiani quali ad esempio il modulo SACMI EOS835 sviluppato in partnership con l'Università di Brescia e quello Technobiochip Lybrano sviluppato a partire dagli studi effettuati all'Università Roma Tor Vergata. Proprio nel 25° anno dalla pubblicazione dell'articolo originale di K. Persaud e G. Dodd, l'E-

NEA, nel contesto del congresso dell'Associazione Italiana Sensori e Microsistemi, ha organizzato un'esposizione di tutti i nasi elettronici commerciali e di ricerca sviluppati in Italia.

Architetture di nasi elettronici

L'architettura di base di un naso elettronico consta di 3 parti:

1. il sistema di somministrazione del campione da analizzare;
2. il sistema di rivelazione;
3. il sistema di analisi che elabora i dati provenienti dalla matrice di sensori.

Il cuore dell'apparato è, evidentemente, il sistema di rivelazione, generalmente costituito da una matrice di sensori a stato solido che reagiscono alla presenza dell'analita target nel campione somministrato attraverso la variazione di un qualche parametro chimico-fisico e traducono questa variazione in un segnale elettrico. Questa architettura di base, benché rimasta sostanzialmente invariata nelle sue parti fondamentali, si è però specializzata nel tempo, in funzione dei diversi scenari applicativi, per ottimizzare le prestazioni ottenibili dal naso [Wei01].

Nel tempo infatti, sono state introdotte architetture incentrate su *array* di micro bilance al quarzo piuttosto che su sensori basati su polimeri conduttivi e non, mentre altre si basano invece su sensori ottici od elettrochimici. Corrispondentemente, anche i sistemi di campionamento si sono evoluti, passando da sistemi sostanzialmente a campionamento statico, dove lo spazio di testa di un campione veniva posto in contatto con i sensori per un tempo variabile da pochi secondi a decine di minuti, a sistemi a campionamento dove l'atmosfera da analizzare viene inviata in flusso continuo sugli elementi sensibili. In termini generali la maggior parte dei sistemi contiene ancora un nu-



Figura 1

Terza generazione del naso elettronico sviluppato dalla NASA nei laboratori JPL. Il prototipo misura circa 30 cm di lunghezza per 10 di larghezza mentre è alto poco più di 5 cm

Fonte: NASA/JPL-Caltech

mero limitato (qualche decina) di sensori anche se si è tentata l'utilizzazione di *array* contenenti fino ad un centinaio di elementi sensibili. Si tratta comunque ancora di sperimentazioni preliminari che si basano sulla ridondanza dell'informazione e l'utilizzo di algoritmi di selezione dei sensori rilevanti per ogni applicazione. In questi casi resta infatti invariato il problema della difficoltà di integrare un numero alto di sensori con la sicurezza che questi apportino effettivamente un contributo informativo aggiuntivo. In questo senso durante gli anni sono state introdotte soluzioni volte ad aumentare il contenuto informativo prodotto dal singolo sensore come l'utilizzo ad esempio della termo-modulazione nei sensori ad ossido metallico per indurre e sfruttare differenti selettività e sensibilità riscontrabili a differenti temperature.

Recentemente alcuni autori hanno proposto l'integrazione di sistemi di preconcentrazione e/o separazione delle componenti volatili utilizzando tecnologie di adsorbimento/desorbimento termocontrollato

o colonne gascromatografiche. Tali sistemi si prefiggono di aumentare la sensibilità e la specificità del sistema complessivo. La ricerca di base invece ci propone da poco il tentativo di utilizzare sensori provenienti direttamente dal mondo animale, in particolare da insetti, quali la *Drosophila Melanogaster*, integrandoli in un architettura di naso elettronico. Altre linee di ricerca spingono verso l'integrazione di un numero molto elevato di sensori accoppiato a sistemi di separazione simili a quelli gascromatografici ma operanti in tre dimensioni così da simulare la componente meccanica dell'olfatto dei mammiferi fino a formare una sorta di mucosa olfattiva artificiale.

I nasi elettronici oggi venduti nascono specializzati per una certa applicazione, ma soffrono per un duplice problema: il costo elevato e la complessità operativa legata in particolare alla fase di addestramento del naso stesso (vedi paragrafo successivo). Di conseguenza il numero delle unità vendute è piuttosto basso. In effetti, uno dei nasi elettronici più venduti è dotato di soli due sensori e, di fatto, è progettato per stimare la qualità dell'aria in ambienti chiusi in connessione con un sistema HVAC (condizionamento ventilazione e riscaldamento) a fini del controllo automatico dello stesso. La soluzione commerciale apparentemente più complessa è basata sull'uso di 38 sensori differenti ad ossidi metallici integrati nel chip Kamina sviluppato dal politecnico di Karlsruhe. La maggior parte dei sistemi commerciali presenti si basano su sensori ad ossidi metallici e SAW mentre la diffusione di moduli basati su polimeri conduttivi è decisamente inferiore. In questa classe troviamo anche il notevole dispositivo portatile Cyranose basato sugli studi NASA/JPL che è stato sviluppato per la rilevazione di minacce gassose alla sicurezza. Moduli basati su microbilance al quarzo sono sta-

ti sviluppati spesso per analisi di tipo qualitativo su prodotti alimentari, mentre moduli SAW o utilizzando sensori elettrochimici sono più usati per applicazioni industriali. Infine è da rilevare come, mentre la maggior parte delle aziende possiede una sola soluzione architeturale specializzata, altre hanno invece sviluppato nel tempo più linee architetture specializzate per differenti applicazioni, riuscendo così a proporre differenti sistemi dotati ognuno del *mix* di sensori più adatto. Commercialmente i nasi elettronici hanno ancora costi assai elevati. Per la maggior parte si tratta di unità il cui costo si attesta sui 15.000 €, con una forbice che va dai 10.000 ai 100.000 €.

Le applicazioni

Le principali applicazioni del naso elettronico hanno riguardato l'analisi qualitativa e la discriminazione in ambito sicurezza alimentare e antifrode come la rilevazione del deterioramento delle derrate, o il rilevamento di sostanze adulteranti. Successivamente, un cospicuo numero di lavori si è concentrato sulla rilevazione di miscele esplosive e gas tossici in chiave sicurezza militare e civile. Sulla base dei miglioramenti prestazionali ottenuti le architetture a naso elettronico sono state recentemente impiegate anche in problemi di quantificazione della concentrazione di analiti all'interno di miscele olfattive, dando luogo a diverse applicazioni nell'ambito del monitoraggio ambientale. Fra le istituzioni che hanno maggiormente contribuito allo sviluppo di nasi elettronici per applicazioni ambientali troviamo il JPL della NASA, che persegue lo sviluppo di un naso elettronico capace di individuare sostanze tossiche e componenti volatili che possano segnalare avarie nei moduli spaziali. Uno dei loro primi prototipi operativi ha volato durante la missione STS-

Tabella 1 - Nasi Elettronici: settori di utilizzo ed applicazioni

Settore	Applicazione/Funzione
Agroalimentare/zootecnia	<ul style="list-style-type: none"> • Tracciabilità dei cibi • Antisofisticazione • Controllo ambientale in serre • Controllo ambientale in allevamenti
Ambientale	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo dell'inquinamento in città • Controllo dell'inquinamento in ambienti chiusi (IAQ) • Controllo delle emissioni nocive o moleste • Sorveglianza di aree vulcaniche • Controllo delle acque potabili ed industriali
Biomedicale	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnostica precoce di varie patologie • Controllo automatico dello stato di salute in pazienti non autosufficienti
Controllo processi Industriali	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo di qualità del prodotto e del processo di fabbricazione in industrie di: packaging, alimentari, trasporti • Controllo del livello di pulizia • Formulazione di nuovi prodotti
Aerospaziale	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo dell'aria in cabina ed in stazioni spaziali
Sicurezza	<ul style="list-style-type: none"> • Sorveglianza di luoghi potenzialmente rischiosi per l'uomo • Detection di esplosivi • Detection di droghe

Fonte: ENEA

95 al fine di testare il livello prestazionale raggiunto. Forse la più interessante delle recenti applicazioni riguarda l'utilizzo del naso elettronico per applicazioni diagnostiche in medicina. Un numero significativo di gruppi di ricerca si sta concentrando infatti sullo studio della possibilità di utilizzare il naso elettronico al fine di effettuare diagnosi precoci, veloci, poco invasive e poco costose di differenti patologie tra cui citiamo ad esempio le neoplasie polmonari o della mammella, alcuni tipi di affezioni batteriche polmonari e dell'apparato urogenitale [Tur01]. Seppure ancora oggetto di ricerca, talvolta fondamentale, i nasi elettronici suscitano forti interessi industriali. Nella tabella 1 sono riportate, suddivise per settore, le applicazioni che hanno sperimentato l'utilizzo dei nasi elettronici fino ad oggi sviluppati. In qualche caso, proprio intorno a queste

applicazioni si sono sviluppate piccole aziende che producono e commercializzano nasi elettronici fortemente specializzati, tanto che si può già parlare a tutti gli effetti di un reale mercato per questo prodotto. Il suo valore è stato, nel 2000 (unico dato certificato), pari a circa 8 M\$ mentre una stima ragionevole per l'anno 2005 è di circa 16 M\$. Le stime del mercato di questo prodotto, per gli anni a venire, dipendono in gran parte dalla risoluzione di alcuni problemi di ricerca e sviluppo. Ad esempio, non è stata selezionata una tecnologia specifica per i sensori ed il consumo complessivo del naso è ancora troppo elevato per architetture integrate ed applicazioni wireless, scelte strategiche cruciali per questa classe di prodotti. La forbice di valutazione del mercato al 2009 è perciò molto ampia, oscillando tra 20 M\$ ed i 300 M\$.

Addestramento di un naso elettronico

Abbiamo precedentemente sottolineato che, qualunque sia lo scenario, la possibilità di utilizzare in maniera efficace il naso elettronico è connessa con l'esecuzione di una fase di tuning/addestramento del naso che lo renda funzionale per l'applicazione cui è destinato.

A valle della definizione del problema si procederà all'individuazione, col miglior dettaglio possibile, dello scenario in cui il naso elettronico si troverà ad operare. Ciò impone lo studio approfondito, in loco oppure attraverso caratterizzazioni in laboratorio, di campioni delle emissioni costituenti l'atmosfera da analizzare. Su tali basi possono essere individuati gli analiti da "inseguire" e i relativi range di concentrazione. Sulla base dei risultati ottenuti in questa prima fase, si effettua la scelta dei dispositivi che andranno a costituire la matrice di sensori del naso elettronico. In linea di principio la migliore selezione è costituita da *array* di sensori stabili e sensibili, ciascuno selettivo verso uno degli analiti target. Purtroppo questa strategia ci è spesso preclusa poiché molto raramente sensori a stato solido presentano simultaneamente ottimali caratteristiche di stabilità, sensibilità e selettività. Frequentemente i sensori possono essere altamente selettivi ma poco sensibili oppure possono presentare problemi di stabilità. C'è poi un problema di fondo: non esistono sensori a stato solido specializzati per ogni possibile analita: ad esempio, esistono oltre 3000 inquinanti atmosferici, ma i sensori a stato solido utilizzabili per questo tipo di scenario sono, al più, solo qualche decina. È anche per questo che esiste, nella pratica, una stretta connessione tra chi sviluppa nasi elettronici e chi sviluppa sensori a stato solido: è *quasi impossibile poter sviluppare una specifica applicazione del naso*

elettronico senza dover procedere simultaneamente alla messa a punto di uno o più sensori progettati ad hoc.

Spesso la scelta dei sensori verte su dispositivi poco selettivi: il diverso comportamento della risposta di ognuno alle variazioni ambientali permetterà di ricostruire l'"impronta olfattiva" dell'ambiente stesso e seguirne l'evoluzione nel tempo. In ogni caso, ciascuno dei sensori utilizzati, così come l'insieme degli stessi, andrà calibrato verso la sostanza target o un composto simile.

Il passo successivo è la costituzione di un opportuno dataset ottenuto registrando le risposte dell'*array* a miscele degli analiti significativi. La calibrazione dell'*array* di sensori viene poi effettuata utilizzando tecniche di analisi multivariata della risposta ottenuta, alcune delle quali sono mutuata dalla disciplina della *Pattern Recognition*. Ancora oggi, comunque, una delle tecniche più utilizzate per la valutazione esplorativa della risposta dei nasi elettronici è la *Principal Component Analysis* (PCA). Pur non essendo direttamente orientata alla discriminazione tra classi di risposte (per esempio oli di oliva di provenienza geografica differente) essa fornisce spesso anche una valutazione primaria sulle capacità dell'*array* di sensori del naso elettronico di associare ad un *pattern* di risposta, la classe corrispondente. Nella fase esplorativa, la PCA è tipicamente accompagnata da altre tecniche di *Cluster Analysis*.

In seguito, la fase di addestramento effettivo mira alla definizione di sistemi capaci di effettuare classificazione automatica di campioni di risposte e persino di ottenere una stima della concentrazione degli analiti significativi coinvolti. Il ricorso a modelli fisico/chimici di calibrazione multisensore è raro, per la complessità del processo di modellazione della risposta dei differenti sensori. Tipicamente l'approc-

Apparato di caratterizzazione sensori e nasi in atmosfera controllata

La possibilità di specializzare il naso elettronico dipende, in buona parte, dalla efficace calibrazione dei sensori. Il sistema a tal scopo utilizzato è costituito da una camera di test in acciaio, posta all'interno di un box termostato, dove vengono alloggiati i dispositivi stessi. La camera di test è dotata di sensori di temperatura, umidità e pressione e di connettori per il collegamento elettrico dei sensori oltre che di un ingresso e uscita del gas costituente l'atmosfera di test.

Questa è costituita da azoto o aria sintetica che scorre, a flusso costante, in tubi d'acciaio miscelato ai gas di test, costituiti, in genere, da miscele in aria degli analiti *target* p.e. CO, NO₂ ecc. La diluizione dell'analita, regolata mediante flussimetri di massa elettronici, deve poter arrivare fino ad 1/500 del *carrier* con una precisione sul controllo del flusso inferiore al 1%. Possono essere miscelati al gas *carrier* vapori di composti organici volatili (VOC) tramite dei bubolatori in cui il gas, passando attraverso il liquido, si arricchisce del vapore del liquido in oggetto o acqua, per simulare le condizioni di umidità relativa variabile.

La composizione dell'atmosfera viene continuamente controllata in uscita attraverso l'uso di uno FTIR per assicurare che la sua composizione sia conforme a quanto pianificato.

L'elettronica per le misure è costituita da generatori di tensione ed amperometri di grande precisione e robustezza che consentono polarizzazioni fino a 100 V e misurazione di correnti a partire dai fA.

L'apparato deve essere interamente automatizzato poiché i protocolli di caratterizzazione possono richiedere cicli di misura che durano anche centinaia di ore consecutive. In questo periodo, nessuna contaminazione incontrollata deve raggiungere il dispositivo sotto test. È per questo che l'apparato è costruito con criteri tali da assicurare la pulizia durante l'intero processo di misura a livelli migliori di quelli normalmente adottati per l'industria elettronica.

I test sui sensori vengono eseguiti con protocolli che prevedono cicli temporali in cui il sensore viene esposto a diverse concentrazioni di analita con finestre temporali in cui il sensore è a riposo (*baseline*), in cui il sensore è esposto dell'analita (*step*) ed in cui il sensore ripristina le sue caratteristiche dopo aver reagito con l'analita (*recovery*).

I test eseguiti forniscono informazioni per ricavare parametri di confronto dei sensori come la sensibilità, il tempo di risposta, l'isteresi e la stabilità e la selettività.

cio seguito è appunto statistico, pertanto uno dei paradigmi di più comune utilizzo è quello neurale. Dal *dataset* viene estratto un sottoinsieme rappresentativo da utilizzare per l'addestramento di tali sistemi (*training set*): i campioni di *training* vengono proposti come esempi alla rete e la sua struttura variata per adeguarsi alla soluzione reale. Da un punto di vista geometrico, come altri sistemi per pattern recognition, anche le reti neurali agiscono, in problemi di classificazione, cercando di individuare gli iperpiani di separazione tra *cluster* di risposte dovute a classi differenti nello spazio di descrizione dei campio-

ni. In pratica, si procede per step successivi verso la minimizzazione dell'errore di classificazione ottenuto sull'insieme di misure del *training set*. Recentemente infine, è in atto un processo sempre più significativo di adozione di sistemi a kernel come le *Support Vector Machine*, che offrono alcuni vantaggi, in termini di capacità di generalizzazione, rispetto all'approccio neurale.

In alcuni casi, il processo di calibrazione in laboratorio è tuttavia inapplicabile a causa della difficoltà di ricreare in laboratorio la variabilità e la complessità delle condizioni operative dello scenario applicativo. Un

esempio è la stima quantitativa degli inquinanti atmosferici in città: in questo caso non è pensabile ricostituire un *data set* rappresentativo delle relazioni intercorrenti tra le specie, dell'effetto di possibili interferenti e delle condizioni meteorologiche che influenzano la risposta dei sensori. Alcuni tentativi in tal senso hanno infatti prodotto risultati deludenti. Chi scrive ha recentemente proposto la calibrazione di nasi elettronici utilizzati per la stima degli inquinanti nelle città mediante campioni raccolti in ambiente operativo. I valori di riferimento sono stati estratti utilizzando le stime di concentrazione prodotte da una centralina convenzionale gestita dall'ARPA. I risultati, pubblicati su riviste scientifiche internazionali, sono stati estremamente interessanti: analisi prestazionali hanno rilevato come poche ore di misurazione sono sufficienti per una calibrazione stabile almeno per 6 mesi, periodo compatibile con l'attuale durata di molti sensori a stato solido.

Appare chiaro che l'utilizzo di piattaforme a naso elettronico per particolari applicazioni va accuratamente valutato alla luce di alcuni fattori chiave. Molte volte, lo stesso naso elettronico viene usato in contesti differenti con un approccio totalmente *black box*, nel quale, una volta costituito un insieme di misurazioni, gli algoritmi di analisi qualitativa/quantitativa vengono addestrati senza indagare i meccanismi di risposta. Se l'insieme dei dati di addestramento risultasse non pienamente descrittivo delle condizioni nel quale il naso si dovesse poi trovare ad operare, il rischio di sovrastimarne le prestazioni risulterebbe decisamente elevato. Ai fini di una corretta validazione, è necessario studiare le motivazioni chimiche fondamentali alla base della risposta dei sensori del naso al fine di evitare correlazioni spurie con aspetti fenomenologici non previsti o non controllabili. Un naso elettronico può

infatti rispondere correttamente per diversi motivi:

- i sensori del naso risultano sensibili specificamente ai fenomeni che si vuole monitorare;
- i sensori del naso risultano sensibili ai fenomeni che si vuole monitorare ma nell'ambiente esistono sostanze in grado di interferire con la rilevazione; pur tuttavia se il naso dispone di sensori in grado di modellare gli interferenti gli effetti degli stessi possono essere "numericamente" cancellati;
- i sensori del naso risultano sensibili a sostanze la cui presenza è correlata al fenomeno che si vuole monitorare ma non direttamente alle sostanze alla base del fenomeno stesso.

È facile individuare nel terzo punto una circostanza da evitare nel caso gli effetti di correlazione appresi durante l'addestramento non siano costanti anche nel funzionamento operativo del naso; la risposta del naso in questi casi sarebbe del tutto fuorviante.

In mancanza di un'analisi sulle motivazioni chimiche della risposta del naso, è bene che il campione di addestramento sia il più possibile esteso e ben congegnato al fine di rappresentare esaurientemente le condizioni operative.

Un semplice esempio può essere la rilevazione della zona di provenienza di un olio di oliva in un'applicazione antifrode. Ipotizziamo di avere a disposizione pochi campioni di olio relativi ad una sola bottiglia per ogni località, con bottiglie appartenenti a zone di produzione tutte differenti. Anche in presenza di *pattern* di risposta differenti per le differenti località, in mancanza di conoscenze sui composti a cui risponde l'*array* di sensori è difficilissimo pervenire a delle conclusioni sulla corretta capacità di discriminazione del naso. La differenza di *pattern* potrebbe essere dovuta ad esempio a differenti condizioni di mi-

I nasi elettronici dell'ENEA

Il naso elettronico ENEA utilizza gruppi di sensori chimici, sia commerciali che di fabbricazione ENEA, per la rilevazione di gas e di altri parametri ambientali (temperatura, umidità, fotoluminescenza). In corrispondenza di ogni sensore è presente una circuiteria elettronica di condizionamento da cui il segnale generato dal sensore passa (in alcuni casi multiplexato-MUX) ad un convertitore analogico digitale (ADC) e viene poi immagazzinato e gestito da un sistema a microprocessore. Il periodico collegamento via seriale ad un personal computer in cui risiede un apposito software di gestione, consente il trasferimento e l'elaborazione dei dati delle campagne di misura. L'alimentazione anche a batteria ne consente l'utilizzo in assenza di rete elettrica.



Figura 2
Naso elettronico ENEA di prima generazione
Fonte: ENEA

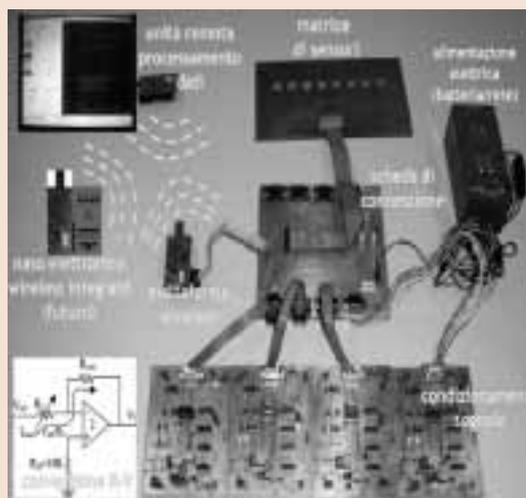


Figura 3
Naso Elettronico ENEA di seconda generazione (*Wireless*) orientato verso reti di nasi elettronici
Fonte: ENEA

Un avanzamento di questa architettura è il prototipo di naso elettronico *wireless* basato su sensori polimerici. La possibilità della ricetrasmisione via radio dei dati tra più nasi apre l'applicazione verso il settore delle "reti di nasi elettronici" in grado di eseguire un monitoraggio multipunto, capillare, affidabile ed a basso costo della quantità e qualità dei gas presenti negli ambienti. Il naso è costituito da:

- un gruppo di sensori polimerici resistivi (matrice di sensori), da esporre a gas e/o vapori perturbanti;
- un'elettronica di condizionamento ed amplificazione del segnale da essi generato in presenza di sollecitazione esterna, nella quale il sensore è posto sul ramo di retroazione di un amplificatore operazionale in configurazione invertente;
- una piattaforma *wireless* per la digitalizzazione e la diffusione via radio dei dati rilevati;
- un sistema informatico (unità remota processamento dati) per la ricezione, memorizzazione ed elaborazione dei dati e per il riconoscimento di pattern olfattivi;
- una scheda di alimentazione e connessione tra le varie parti;
- una batteria o alimentatore da rete.

Il prototipo evolverà verso la miniaturizzazione della circuiteria e dei sensori per la loro integrazione in un'unica scheda elettronica di dimensioni ridotte.

sura o a differenze legate alla singola bottiglia. Per ottenere informazioni significative, la progettazione dell'esperimento dovrà includere necessariamente numerosi campioni provenienti da più confezioni e possibilmente da produttori diversi insistenti sulla stessa località con metodi di coltivazione differenti oppure conoscere approfonditamente la risposta dei sensori agli analiti coinvolti.

Un caso di applicazione del naso elettronico ENEA: il monitoraggio del sito sismico "Solfatara" di Napoli

Le analisi ed il monitoraggio geochimico dei gas emessi in maniera diffusa o localizzata (fumarole) in aree vulcaniche è attualmente condotto con metodologie che coinvolgono l'uso di strumentazione da laboratorio e metodi di campionamento e trattamento dei campioni decisamente complesse. I tempi di analisi superano a volte la settimana, con il coinvolgimento di personale altamente specializzato. La disponibilità di mezzi innovativi a campionamento veloce capaci di analisi sia qualitativa che quantitativa di tali gas potrebbe apportare nuove conoscenze sulla dinamica a breve termine dei sistemi vulcanici complessi. Di particolare importanza sono soprattutto la velocità di risposta, l'operatività non supervisionata, e la possibilità di monitoraggio pervasivo delle aree. ENEA ha proposto l'utilizzo di un architettura a naso elettronico, sviluppata in particolare per le applicazioni *outdoor*, per il monitoraggio geochimico delle fumarole vulcaniche [DeV01]. Tale architettura, una cui realizzazione è raffigurata in figura 4, permetterà di ottenere una valutazione qualitativa e quantitativa della composizione dei gas emessi con tempi di campionamento inferiori al minuto e comunque programmabili. La flessibilità e la modularità



Figura 4
Il Naso elettronico ENEA all'opera nel cratere della Solfatara
Fonte: ENEA

dell'architettura sviluppata permette la scelta di un *array* di sensori ottimale appositamente studiato per il sistema da monitorare potendo basarsi su mix di sensori commerciali e sensori sviluppati in contesti di ricerca tra i quali quelli sviluppati dall'ENEA stessa. Il singolo modulo risulta occupare dimensioni contenute ed è in grado di trasmettere con opportuni accorgimenti i segnali rilevati a distanze contenute che comunque permettono il dispiegamento di molteplici unità in un contesto di monitoraggio distribuito. Le analisi fin qui condotte, con l'ausilio dei ricercatori dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia, hanno evidenziato la possibilità di effettuare una mappatura delle varie sorgenti emissive nel cratere della Solfatara appartenente al sistema dei Campi Flegrei (*figure 5 e 6*), uno dei sistemi a maggiore rischio per la densità abitativa circostante. Inoltre il naso elettronico ENEA sembra essere in grado di valutare il rapporto quantitativo tra le concentrazioni di particolari gas come l' H_2S ed il CO emessi dalle fumarole, come esemplificato nelle *figure 7 e 8*. Questi rapporti



Figura 5
 Il cratere della Solfatara con indicazione dei punti di misura (fumarole, stagno di fango ribollente, sito di controllo) mappati nell'esperimento ENEA/INGV
 Fonte: ENEA

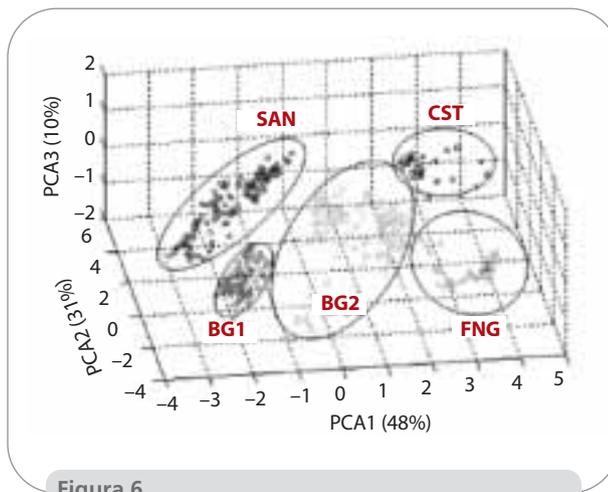


Figura 6
 Esempio di mappatura alle componenti principali delle differenti fumarole della Solfatara. Il naso elettronico è in grado di rilevare un differente pattern di risposta per le diverse fumarole
 Fonte: ENEA

studi & ricerche

caratteristici sono di estrema rilevanza in quanto di fatto rappresentano un'indicazione valida sia della temperatura sia dell'altezza del magma sottostante il sistema suddetto. Il magma infatti, nella sua len-

ta risalita verso la superficie viene in contatto con differenti tipologie di suolo e sorgenti acquifere determinando un cambiamento nella composizione dei gas emessi dalle fumarole.

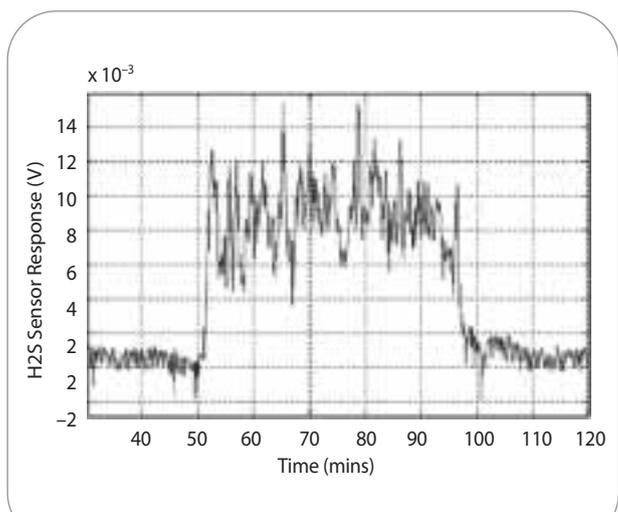


Figura 7
 Risposta di un sensore per H2S alloggiato nel naso elettronico ENEA, allorquando viene esposto alla miscela di gas emessi da una delle fumarole della Solfatara
 Fonte: ENEA

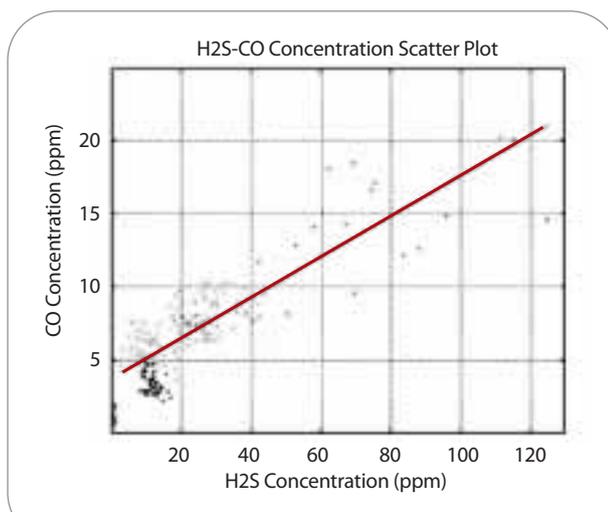


Figura 8
 Rilevamento del rapporto di concentrazione in alcune misurazioni effettuate in Solfatara in diversi punti di misura nelle vicinanze della fumarola denominata "Bocca Grande"
 Fonte: ENEA

Il futuro del naso: reti di nasi elettronici

Le applicazioni sensoristiche evolvono sempre di più verso la misurazione distribuita e pervasiva delle grandezze ottenuta mediante la moltiplicazione degli elementi e la loro dislocazione nell'ambiente da misurare. Nel prossimo futuro dobbiamo attenderci il fiorire di applicazioni pervasive con nodi sensoriali sempre più piccoli ed efficienti. Nel contesto specifico di questo articolo è bene sottolineare come in alcune applicazioni, in special modo quelle relative alla misura della qualità dell'aria e dell'inquinamento atmosferico, sussista la necessità, per ragioni fluidodinamiche, di dotarsi di una vera e propria rete di rilevatori che, cooperando, siano in grado di ricostruire l'"immagine" olfattiva dell'ambiente in cui sono immersi. Sulla base di queste indicazioni l'ENEA ha proposto lo sviluppo di una rete di piccoli nasi elettronici cooperanti via collegamento radio [Dev02]. Dislocati con una topologia detta *mesh*, i nasi fanno pervenire le informazioni acquisite a distanze molto maggiori di quelle ottenibili mediante una topologia classica a stella. Le informazioni vengono infatti fatte "rimbalzare" su molteplici nodi della rete mediante protocolli di *routing multihop* fino ad un nodo primario, tipicamente costituito da un PC, denominato *data sink*. In questo tipo di applicazione è fondamentale implementare politiche di misurazione orientate all'efficienza energetica. I nodi infatti sono alimentati a batteria in modo da rendere semplice il loro dispiegamento in ambienti inizialmente non destinati ad ospitarli. Inoltre, per evitare il rapido esaurimento delle batterie, le piattaforme operative ospitanti i sensori e i loro sistemi operativi sono progettate per garantire consumi bassissimi e transizioni veloci tra gli stati "dormienti" e quelli attivi in cui il consumo

energetico è maggiore. L'ENEA costruisce i suoi mini-nasi denominati TinyNose a partire da un piccolo *array* di sensori polimerici sviluppati *ad hoc* e da nodi per reti di sensori commerciali, sviluppati da *spin-off* dell'Università della California a Berkeley. Per tali nodi è stato sviluppato un sistema operativo volto all'efficienza energetica denominato TinyOS per il quale ENEA sviluppa componenti software in grado di interfacciare i propri sensori e curare la catena di acquisizione del dato fino alla sua presentazione, via web, all'utente finale. Ai fini dell'efficienza energetica si sono rivelati decisivi gli studi intrapresi nel recente passato dal gruppo sensoristica di Portici del Dipartimento Tecnologie Fisiche e Nuovi Materiali su sensori nanostrutturati operanti a temperatura ambiente [Dif01]. Questi, a differenza dei classici sensori a ossidi metallici operanti ad alte temperature, grazie alla reattività potenziata della loro superficie nanostrutturata, garantiscono consumi significativamente più contenuti oltre a semplificare l'elettronica di pilotaggio e condizionamento del segnale. Infine, è da notare come il consumo legato alla trasmissione dei dati in questi nodi sensoriali sia significativamente più elevato di quello legato a operazioni di *computing*; per questo motivo sono in corso degli studi, presso gli stessi laboratori ENEA, al fine di integrare componenti "intelligenti" all'interno dei nodi TinyNose. In questo modo ogni nodo sarà in grado di valutare la significatività del dato e decidere per la sua trasmissione in tempo reale o per l'immagazzinamento per operazioni di media statistica. Allo stesso tempo i nodi saranno in grado di modificare autonomamente la frequenza di campionamento per realizzare ulteriori risparmi energetici, adattandola alla situazione rilevata. Le ricerche in atto hanno già permesso lo sviluppo di prototipi in grado ad esempio

Una metrica per l'olfatto

Negli studi sui sistemi di visione o su quelli audio, gli stimoli sono classificabili in termini di frequenze. Questo consente di "costruire" dei sistemi di riferimento in cui ogni punto rappresenta uno stimolo diverso. In termini semplificati basta pensare alla base RGB per i colori. Molti studiosi si sono posti il problema della esistenza di un analogo sistema di riferimento per l'olfatto: esiste o no (e perché allora?) una base per i sistemi olfattivi? Recentemente R. Hadad e i suoi collaboratori sembra siano riusciti a dare una risposta positiva a tale quesito (Nature Methods, Dec. 2007). Hanno infatti proposto una base costituita da 1664 descrittori molecolari che sembra siano in grado di rappresentare qualsiasi stimolo olfattivo. Ciò apre una nuova pagina per i sistemi di controllo elettronico dell'olfatto, perché appare ora possibile lavorare su un sistema di riferimento teorico e non empirico.

di valutare la presenza di particolari specie di composti volatili (terpeni, acetone, etanolo ecc.).

Da un punto di vista applicativo l'obiettivo condiviso dai ricercatori in questo campo è la realizzazione di nasi elettronici dotati di un gran numero di sensori capaci di misurazioni significative in un numero ampio di applicazioni che, anche se inquadrare in scenari di riferimento, possano attribuire una certa flessibilità al naso stesso. In questa visione, sarà possibile produrre, per esempio, un naso elettronico per applicazioni alimentari *consumer* che possa passare dall'analisi qualitativa di oli, ai vini piuttosto che ai formaggi una volta caricata *on-board* l'opportuna libreria per *pattern recognition*. Alcuni gruppi, come abbiamo accennato, stanno esplorando la possibilità di integrare meccanismi di aspi-

razione e pretrattamento della miscela odorosa in un ottica biomimetica, altri ancora esplorano l'utilizzo di meccanismi di *sensing* differenti da *array* di sensori ottici alla spettrometria a mobilità ionica miniaturizzata. L'utilizzo massivo dell'elettronica flessibile, inoltre, potrebbe portare in pochi decenni all'integrazione di tali dispositivi negli elettrodomestici o in prodotti di uso comune come esempio un frigorifero capace di individuare cibi che stanno deperendo o *packaging* intelligenti in grado di monitorare in continuo lo stato di conservazione di farmaci, protesi e altri beni strategici. La sfida più affascinante resta la possibilità di utilizzare tali architetture in ambito biomedicale ai fini soprattutto della realizzazione di strumenti semplici, poco costosi, non invasivi, per la diagnosi precoce delle patologie.

Bibliografia

- [Dev01] S. De Vito, E. Massera, L. Quercia, G. Di Francia, *Analysis of volcanic gases by means of electronic nose*, Sensors and Actuators B, Volume 127, Issue 1, 2007, Pag. 36-41.
- [Dif01] Di Francia G, Quercia L, Rea I, Maddalena P, Lettieri S *Nanostructure reactivity: Confinement energy and charge transfer in porous silicon*. Sensors and Actuators B, Vol 111 Pag. 117-124.
- [Dev02] S. De Vito, E. Massera, G. Burrasca, D. Della Sala, G. Di Francia, *Enabling Distributed VOC Sensing Applications: Toward Tinynose, A Polymeric Wireless E-Nose*, Sensors and Microsystems Proceedings of the 12th Italian Conference Naples, Italy, 12-14 February 2007.
- [Tur01] A. Turner, N. Magan, *Electronic noses and disease diagnostics*, Nature Reviews Microbiology, Vol. 2, 2004, Pag. 161-166.
- [Wei01] F. Rock, N. Barsan, U. Weimar, *Electronic Nose: Current Status and Future Trends*, Chemical Review, 108 2), 2008, Pag. 705-725.

World Energy Outlook 2008

I consumi energetici globali sono ormai insostenibili e accelerano pericolosamente il riscaldamento globale: ora più che mai servono politiche mirate.

Il "World Energy Outlook 2008", compendio annuale dell'IEA di riferimento nel campo delle politiche energetiche, attinge all'esperienza di un altro anno turbolento per i mercati dell'energia presentando nuove proiezioni energetiche al 2030, per singola regione e per ciascuna fonte energetica, tenendo conto dei dati e delle politiche più recenti.

Il WEO 2008 si concentra in particolare sulla questione della produzione di petrolio e di gas,

delle riserve disponibili, dei costi e degli investimenti nell'estrazione e sugli scenari climatici post-2012, secondo due scenari di emissioni a 550 parti per milione (ppm) e a 450 ppm all'orizzonte del 2030. Le questioni presentano sfide finanziarie politiche e tecniche di tali dimensioni da richiedere impegni molto forti e convergenti da più parti. In estrema sintesi il petrolio a bassi costi è finito, l'offerta non riuscirà più a soddisfare la domanda, la tendenza attuale del sistema energetico non è più sostenibile ambientalmente, economicamente e socialmente. Ne consegue che serve subito – come ha affermato Nobuo Tanaka, direttore dell'IEA alla presentazione a Londra nel novembre scorso – l'avvio di una rivoluzione energetica globale a basso contenuto di carbonio, nonostante la crisi economica in atto, soprattutto per non aggravare nel breve-medio periodo la probabile crisi degli approvvigionamenti energetici mondiali e nel lungo periodo quella ambientale.

Il Rapporto ha l'obiettivo di fornire un'analisi degli scenari energetici al 2030 che sia d'aiuto ai responsabili politici mondiali per valutare e affrontare le attuali sfide poste dal peggioramento delle prospettive di approvvigionamento, dall'aumento dei prezzi dell'energia e delle emissioni di gas a effetto serra. Ma ciò che viene fuori dalle pagine del documento è decisamente preoccupante: a causa dei trend di consumi insostenibili i gas serra aumenteranno inesorabilmente portando ad un rialzo della temperatura media globale di 6 °C sul lungo termine. Si prevede che la CO₂ legata al consumo energetico aumenterà del 45% da oggi al 2030, arrivando a 41 miliardi di tonnellate, tre quarti dei quali dovuti a Cina, India e Medio Oriente ed il 97% dai paesi non OCSE.

Il WEO 2008 auspica un approccio politico ibrido che punti sul commercio di quote di emissioni, accordi settoriali e misure nazionali e che includa un mix di energie alternative, il nucleare e centrali a combustibili fossili attrezzate con tecnologie, quali la cattura e lo stoccaggio del carbonio (carbon capture and storage, CCS).

Per ottenere ciò sono necessari investimenti di 4,1 trilioni di dollari (lo 0,2% del Pil mondiale annuo) da destinare alle infrastrutture relative, ma anche a misure di efficienza energetica. Come ha spiegato Tanaka, c'è bisogno di un'azione concertata tra i maggiori emettitori perché i paesi OCSE da soli non possono portare il mondo nello scenario da 450 ppm, anche se riducessero le loro emissioni a zero. Infatti per raggiungere un tale risultato è necessario un rapido aumento dell'utilizzo di energia a basse emissioni che permetta di arrivare al 36% del mix di energia primaria globale nel 2030. E in questo caso gli investimenti globali energetici sarebbero superiori: 9,3 trilioni di dollari (lo 0,6% del Pil mondiale annuo) con un risparmio di carburante totale di 5,8 trilioni.

Le Sessioni della XV Conferenza delle Parti della Convenzione sui Cambiamenti Climatici, che si terranno a Copenhagen a fine 2009, rappresentano un'opportunità di straordinaria importanza per negoziare una nuova serie di accordi e normative contro il cambiamento climatico globale per il periodo successivo al 2012 (ultimo anno del primo periodo previsto dal Protocollo di Kyoto). La conferenza dovrà organizzare una struttura per la cooperazione a lungo termine che orienti il mondo verso un insieme di politiche ben definite con un obiettivo chiaro e quantificato per la stabilizzazione dei gas a effetto serra nell'atmosfera.

dal Mondo

World Energy Outlook
2008

Politica integrata sul cambiamento climatico

Ribadendo l'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas serra per limitare l'aumento della temperatura media entro i 2 °C, il Parlamento ha formulato le proprie raccomandazioni per una futura politica integrata dell'UE sul cambiamento climatico. La relazione approvata il 3 febbraio contiene una serie di misure in tutti i settori e chiede di definire un'agenda d'intervento per il periodo 2009-2014. Tra queste si sollecitano azioni riguardo al sistema di scam-

bio di quote di emissioni, la gestione delle risorse idriche e il trattamento dei rifiuti, nonché la tutela della salute.

Si sostengono la promozione delle nuove tecnologie, le misure nel settore dell'istruzione, della formazione e della comunicazione e si chiede anche la creazione di una «comunità europea delle energie rinnovabili» e il sostegno allo sviluppo di tecnologie di trasporto ecocompatibili, come vetture a idrogeno, elettriche, a pile a combustibile, ibride o a biocarburante.

A livello locale e regionale dovrebbero essere promosse: le misure di efficienza energetica per giungere ad un consumo netto di energia nullo negli edifici privati, commerciali e pubblici; il riciclaggio dei rifiuti potenziando le infrastrutture per i punti di raccolta; una mobilità maggiormente sostenibile nelle città e nelle aree rurali; l'attuazione di interventi di adattamento al cambiamento climatico; la produzione e il consumo di cibo locale e regionale.

Il Parlamento sollecita inoltre la Commissione e gli Stati membri dell'UE a sostenere l'invito ONU per un "Green New Deal" e invita, infine, i competenti organi del Parlamento europeo a redigere e pubblicare una versione della relazione «destinata al lettore comune», entro tre mesi dalla sua adozione.

Energia: interconnessioni e rigassificatori

L'Unione importa oggi il 50% dell'energia che consuma e tale percentuale potrebbe rag-

giungere il 70% nel 2030.

È perciò necessario un «radicale mutamento» della politica energetica per raggiungere gli obiettivi principali dell'Unione Europea che riguardano la sicurezza dell'approvvigionamento, la solidarietà tra gli Stati membri, la lotta al cambiamento climatico e la competitività.

Il Parlamento, con la relazione approvata il 3 febbraio, invita gli Stati membri a considerare il riesame strategico quale base per l'attuazione di una politica energetica per l'Europa e la definizione di un piano d'azione ambizioso per il periodo 2010-2012.

Su questa linea la relazione esprime il proprio sostegno ai progetti finalizzati a diversificare le fonti e le rotte di approvvigionamento e, nella fattispecie, allo sviluppo di un corridoio meridionale per il gas comprendente il progetto Nabucco, l'interconnettore Turchia-Grecia-Italia (ITGI) e il progetto South Stream.

Ritiene inoltre che tutti gli Stati membri debbano poter disporre di impianti di liquefazione nei paesi produttori e di terminali GNL e unità galleggianti di rigassificazione nell'UE.

Si sollecitano inoltre, grandi investimenti infrastrutturali, una rete energetica comune, piani anticrisi e più intense relazioni con il Mediterraneo e la Russia.

Infine, rilevando l'importanza del nucleare e di garantirne un uso sicuro, si ritiene tassativo stabilire un quadro comunitario per la sicurezza delle centrali nucleari e si invoca, al contempo, il risparmio energetico e l'uso di fonti rinnovabili.

dall'Unione
Europea

Politica integrata
sul cambiamento
climatico

Energia:
interconnessioni e
rigassificatori

cronache

L'Italia aderisce a IRENA

L'Italia ha aderito a I.R.E.N.A., che sta per *International Renewable Energy Agency*, l'Agenzia Internazionale per lo sviluppo delle fonti rinnovabili sottoscrivendone, il 28 gennaio a Bonn, l'atto costitutivo insieme ad altri 75 paesi, a testimonianza dell'impegno della comunità internazionale per il rafforzamento della collaborazione nelle politiche e nei programmi per un approvvigionamento energetico sicuro e sostenibile.

L'adesione dell'Italia – ha affermato il ministro degli Esteri Franco Frattini – è dettata

dalla convinzione che una risposta efficace alla sfida energetico-ambientale passi, da un lato attraverso la promozione delle fonti rinnovabili e, dall'altro, attraverso la creazione di un nuovo sistema di *governance* mondiale.

Nel quadro delle priorità della Presidenza italiana del G8 in materia ambientale e di sviluppo sostenibile, l'Italia ha accolto con favore la costituzione di I.R.E.N.A. quale contributo alla diffusione di *best practices* ed allo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche, nonché al trasferimento tecnologico a favore dei paesi in via di sviluppo.

Tra i firmatari, oltre ai molti paesi europei ci sono anche paesi in via di sviluppo africani, come Ghana, Nigeria e Uganda, asiatici, come Corea e Filippine, e latino-americani, come Guatemala, Cile e Argentina.

nali, Province regionali, Istituto Regionale per il Finanziamento alle Industrie in Sicilia (IRFIS), Assolterm e liberi professionisti, finora sono stati aggiornati oltre 3.500 addetti locali, tra progettisti ed operatori sulle tecnologie del fotovoltaico, del solare termico, dell'*energy management* e della certificazione energetica degli edifici.

Sono state, inoltre, realizzate campagne informative e materiale tecnico e divulgativo, diffuso anche attraverso il portale www.sicenea.it

SICENEA ha attivato un Ufficio Energia in ciascuna Provincia della Regione, con tecnici formati da ENEA, dando vita ad una rete regionale che, come quelle già realizzate in Lombardia e in Toscana, potrà supportare la Regione per l'incentivazione, il monitoraggio e la pianificazione energetica. Iniziative che permetteranno alla Sicilia di creare nuove imprese e occupazione in settori innovativi e strategici, come testimoniano le industrie ST Microelectronics e Moncada Energy, impegnate nella ricerca di nuovi materiali fotovoltaici.

Nel corso del convegno sono stati premiati i lavori di 30 reti di scuole siciliane che hanno partecipato al progetto "Sicilia, educarsi al futuro" e realizzato, tra l'altro, progetti di cooperazione per fornire energia elettrica solare a scuole e ospedali africani con impianti fotovoltaici finanziati dagli stessi studenti.

dall'Italia

L'Italia aderisce a IRENA

Sicenea: il sole nel futuro della Sicilia

Sicenea: il sole nel futuro della Sicilia

Sensibilizzare sui temi dello sviluppo sostenibile e delle fonti rinnovabili ed aggiornare progettisti, Pubblica Amministrazione, mondo delle imprese e scuola: sono gli obiettivi del programma SICENEA presentato a Palermo, il 28 ottobre, nell'ambito del convegno "Il Sole nel futuro della Sicilia" organizzato dalla Regione Sicilia e dall'ENEA.

In collaborazione con partner scientifici, quali Università di Palermo e Politecnico di Milano, Ordini e Collegi professio-

Bicentenario del padre dell'evoluzionismo

Il 12 febbraio si è festeggiato il bicentenario della nascita di Charles Darwin e a novembre si celebreranno i 150 anni dalla pubblicazione de *L'origine delle specie* (1859), la sua opera più importante in cui formula la teoria dell'evoluzione.

Biologo, geologo e zoologo, il britannico Darwin è il padre della teoria dell'evoluzione delle specie animali e vegetali per selezione naturale ed è celebre per aver teorizzato la discendenza di tutti i primati da un antenato comune. L'interesse per la sua teoria fu da subito enorme: la prima edizione del libro, stampata in 1.250 copie,

andò esaurita in appena due giorni. Nel testo veniva formulata con assoluto rigore scientifico, per la prima volta nella storia della biologia, una teoria evolutiva che metteva in discussione il principio secondo cui ogni specie sarebbe il risultato di un atto autonomo della creazione divina. Secondo Darwin è invece l'ambiente che opera una selezione naturale scegliendo le forme più adatte a lasciare una progenie capace di assicurare la sopravvivenza della specie.

Nella sede dell'ENEA di Roma, il 4 febbraio, si è svolto il Seminario "Il dinosauro e il topo. 1809-2009 Charles Darwin: l'avvicendamento delle specie". Alcuni ricercatori ENEA, appassionati di storia della scienza, hanno ripercorso la teoria e la storia dello scienziato britannico riproponendole in una interessante chiave divulgativa con l'aiuto di immagini e filmati. Dopo un'introduzione sulla rivoluzionaria idea dell'evoluzionismo, sul contesto culturale nel quale venne formulata, sulle prove scientifiche e le polemiche che ne sono seguite, si è svolta una narrazione, in forma di oratorio, che ha dato voce alle persone che furono vicine all'uomo e allo scienziato, e che condivisero l'avventura, la passione, i conflitti, la vita di Charles Darwin.

Prototipo vettura Urb-E

L'ENEA ha presentato, a dicembre all'ultimo "Motor Show" di Bologna, *Urban easy*, un prototipo di *city car* in grado di ridurre i consumi e l'inquinamento rendendo più fluido il traffico in città.

Il nome del prototipo, Urb-e (*Urban easy*), deriva dalla vocazione urbana del mezzo e dalla facilità di impiego, in

quanto non ha marce, nè frizione, il motore termico e l'accumulo elettrico sono completamente gestiti dall'elettronica di bordo e, non ultimo, i supercondensatori impiegati al posto delle tradizionali batterie durano quanto la vettura riducendo al minimo i problemi di manutenzione. La vettura è stata realizzata presso il CR ENEA della Casaccia in collaborazione con le Università di Roma La Sapienza e Roma Tre. La novità assoluta della Urb-e è nel sistema ibrido costituito da componenti commerciali per abbattere i costi di produzione. Il motore termico non è collegato alle ruote ma serve solo a produrre elettricità attraverso l'alternatore. Le ruote motrici sono quelle anteriori e sono mosse dal motore elettrico. Una centralina programmata governa i componenti del sistema di trazione modulando la potenza del motore termico e l'eventuale suo spegnimento. Il telaio è tubolare, la carrozzeria è a pannelli asportabili e sostituibili. Il consumo, da verificare nelle prossime campagne di misura, è da progetto di 50 km per litro.

Le prestazioni, idonee all'uso in città, sono: velocità massima 70 km/h, superiore a quanto consentito ma utile per motivi di sicurezza; accelerazione soddisfacente; recupero di energia in frenata; marcia in modalità solo elettrico (limitata a un chilometro) per i tratti congestionati o per le aree protette come parcheggi coperti, complessi ospedalieri, zone affollate. Le ridotte dimensioni della vettura assicurano, inoltre, un'ottima manovrabilità garantendo quindi una riduzione del traffico cittadino.

Sono previsti sviluppi del prototipo con alimentazione a bioetanolo e con la sostituzione del motore termico con una cella a combustibile.

dall'ENEA

Bicentenario del padre dell'evoluzionismo

Prototipo vettura Urb-E

cronache

EWEC (European Wind Energy Conference) 2009

Anno dopo anno, la conferenza ed esposizione dell'energia eolica più importante d'Europa, vede crescere i partecipanti, che a Milano nel 2007 furono 5.000, l'anno scorso a Bruxelles 6.000 e quest'anno a Marsiglia, dal 16 al 19 marzo, sicuramente di più, provenienti da tutto il mondo. Una conferenza del genere offre l'opportunità di avere una rassegna esaustiva degli ultimi sviluppi della tecnologia e la possibilità di ampliare le collaborazioni tra operatori pubblici, industriali, consulenti e gestori delle società elettriche coinvolte nella produzione, tra-

missione e distribuzione dell'energia.

L'Italia, come paese europeo in posizione avanzata, almeno in termini di mercato, con quasi 4.000 MW installati, è osservata con molto interesse dagli operatori internazionali del settore e, anche per questa ragione, gli organizzatori della manifestazione hanno ritenuto opportuno invitare Luciano Pirazzi dell'ENEA a illustrare nella sessione "Leading EU Markets: achieving the vision" il quadro legislativo, la situazione industriale e le prospettive future. In questa rassegna internazionale, la prima, dopo l'accordo dei paesi membri, sulla direttiva delle fonti rinnovabili, l'Europa si presenta ancora come faro del settore e approfittando della presenza contemporanea di politici e leader industriali si dovrà fare tutto il possibile perché la nuova legge sia implementata adeguatamente nei 27 Stati, affinché ciascuno dia il proprio contributo per un futuro più sostenibile. Tra l'altro, a dare maggior lustro all'evento, sono da poco apparse le statistiche relative alla potenza eolica installata e connessa alla rete elettrica nel mondo nel 2008. Anche nell'anno appena trascorso, l'eolico è andato oltre le più ottimistiche previsioni, con circa 27.000 MW installati che si aggiungono ai 94.000 MW precedenti, portando la potenza complessiva in esercizio a oltre 120.000 MW.

World Energy Summit ad Abu Dhabi

Si è tenuta ad Abu Dhabi, dal 19 al 21 gennaio, la seconda edizione del "World Future Energy Summit" (WFES), ritenuto il più importante appuntamento internazionale in materia di strategie e politiche nel

campo delle energie rinnovabili nell'ottica di un futuro più sostenibile. Il Summit è stato aperto da Sultan Ahmed Al Jaber, amministratore delegato della compagnia elettrica Masdar (l'azienda che ha organizzato l'evento ed è attiva nello sviluppo delle tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili e la riduzione delle emissioni prodotte dalle centrali termoelettriche) ed è proseguito con annunci e contributi di rappresentanti del mondo politico, industriale e della ricerca. Tra gli intervenuti, Luigi Paganetto, Presidente dell'ENEA, ha parlato della necessità di "fare sistema" tra ricerca, istituzioni e industria per avere la possibilità di creare laboratori congiunti con alcuni paesi del Golfo, che possono diventare attori e produttori di nuove tecnologie. Un esempio concreto, ha sottolineato Paganetto, è mettere insieme le tecnologie per la gestione dei rifiuti, per la mobilità dei trasporti e per la produzione di energia pulita in un grande progetto di 'Città Sostenibile' quello per 40.000 abitanti previsto da Masdar.

L'ENEA con la sua capacità di integrazione di tecnologie e competenze è in grado di raccogliere tale sfida e di competere con altri organismi di ricerca a livello internazionale su obiettivi di grande complessità come questo proposto da Masdar.

Tutti gli interventi hanno concordato sull'attenzione a due necessità: lo sviluppo di energie rinnovabili e la riduzione delle emissioni di gas serra. Alla manifestazione di Abu Dhabi è stato aperto, per la prima volta, un padiglione italiano con tre aziende nel settore delle energie rinnovabili: Solar Ventures e i suoi partner; Solar XXI (Consorzio produttore di un innovativo collettore per impianti solari termodinamici); Sedna (Società di progettazione impianti energie rinnovabili).

Eventi

EWEC
(European Wind Energy
Conference) 2009

World Energy Summit
ad Abu Dhabi

Impianti nucleari

Maurizio Cumo

Casa Editrice Università
La Sapienza, Roma, dicembre
2008, pagine 976, € 60,00

La necessità di ridurre la dipendenza da fonti di energia soggette a tensioni sui prezzi e i vincoli internazionali sulle emissioni dei gas serra hanno rinnovato, nello scenario energetico mondiale, l'interesse verso l'energia nucleare. La fonte nucleare ha tutti i requisiti per fornire risposte efficaci, già oggi contribuisce per il 16% ai consumi mondiali di energia elettrica ed è una delle poche fonti in grado di pro-

durre elettricità su vasta scala nel rispetto dei limiti alle emissioni di gas serra.

Il costo del kWh nucleare è meno sensibile alle variazioni di prezzo della materia prima, l'uranio, rispetto a quanto accade per le fonti fossili; l'affidabilità della fonte nucleare è dimostrata dal funzionamento di centinaia di reattori europei e americani, mentre nuove versioni vengono sviluppate per la produzione congiunta di elettricità e calore per usi civili, quali dissalazione dell'acqua di mare, e industriali.

Lo stato dell'arte, oggi, è rappresentato dai reattori di "III generazione", sviluppati nel corso degli anni 90 e all'inizio del 21° secolo. I reattori cosiddetti di "IV generazione", i cui prototipi si prevede saranno realizzati verso il 2030, sono studiati per conseguire un più alto livello di sicurezza e consentire un considerevole incremento dell'energia estraibile dal combustibile, rispetto a quanto avviene ora, garantendo una disponibilità di energia per migliaia di anni.

Realizzazioni commerciali più a breve termine sono in via di sviluppo con modifiche minori ai reattori di III generazione (generazione III+).

Questi sono, con un rapido sguardo, scenario e aspettative nel momento in cui viene pubblicata la terza edizione del libro "Impianti nucleari" del Prof. Cumo, integrata rispetto alle precedenti dai risultati dell'esperienza operativa ventennale di un gran numero di impianti. Nel volume sono esposti gli sviluppi recenti e i programmi di nuove filiere nucleari, e sono riportati anche argomenti che introducono e indirizzano le ricerche per lo sviluppo futuro della IV generazione di sistemi nucleari.

L'opera, pur essendo concepita per gli studenti di ingegneria nucleare con le necessarie cognizioni matematiche, fisiche e chimiche, ha la peculiarità di presentare i vari argomenti in modo comprensibile anche per chi non ha quelle cognizioni e salta le formule e le parti più strettamente progettuali.

Il volume quindi, come sottolineato nella prefazione, fornisce indicazioni utili anche a operatori industriali, decisori pubblici e lettori colti e curiosi.

Sono "impianti nucleari" i reattori, le centrali atomiche, le fabbriche di combustibile, gli impianti di arricchimento dell'uranio, di ritrattamento del combustibile irraggiato, di trattamento e condizionamento dei rifiuti, i depositi superficiali e quelli geologici ecc., incluse tutte le apparecchiature inerenti al ciclo di produzione di energia da fissione e alle altre applicazioni nucleari.

La materia, profondamente interdisciplinare e in continua evoluzione, richiede all'ingegnere nucleare un aggiornamento continuo e il volume, a fronte di questa esigenza, affronta tutti i temi e le problematiche di interesse insistendo sugli aspetti salienti e ponendo in evidenza le caratteristiche suscettibili di sviluppi futuri.

Gli argomenti esposti formano così un quadro ben definito e ricco di sollecitazioni per lo studente di ingegneria energetica e nucleare.

Particolare rilievo è dato agli sviluppi nel campo della sicurezza, e quest'enfasi non è da considerare eccessiva ma necessaria invece per formare l'atteggiamento mentale dell'ingegnere nucleare. (Antonino Dattola)

Letture

Impianti nucleari

Nuvole e sciacquoni

Sei gradi

Nuvole e sciacquoni

Come usare meglio l'acqua in casa e in città

Giulio Conte

Edizioni Ambiente, luglio 2008, pagine: 208, € 20,00

L'acqua è l'oro blu del terzo millennio, capace di scatenare conflitti come già accade per il petrolio. L'acqua non è infinita, e se quasi un miliardo di persone non ne ha a sufficienza per soddisfare le necessità primarie, nei paesi dell'Occidente sviluppato spesso la si spreca con grande indifferenza.

La tesi di questo libro è che sia invece possibile ridurre notevolmente i consumi idrici domestici e l'inquinamento da essi provocato, senza per questo rinunciare ai livelli di comfort cui siamo da tempo abituati. Per farlo è però necessario innescare una piccola "rivoluzione" che, prima che tecnica e politica, è culturale: per esempio non usare acqua potabile per scaricare un WC e riprendere la pratica di accumulare e riutilizzare le acque piovane.

Giulio Conte, biologo esperto nel campo della gestione delle acque e delle risorse naturali, con questa manuale analizza le strategie che sono state adottate nei secoli per la gestione domestica e urbana dell'acqua, e spiega come oggi sia possibile usarla in modo più intelligente. Si concentra, perciò, sugli usi civili e domestici dell'acqua che, sebbene comportino consumi di gran lunga inferiori rispetto a quelli agricoli, sono in continua e rapida crescita.

L'uso domestico è poi quello che ha bisogno di acque di mi-

glior qualità, che diventano sempre più scarse a causa dell'inquinamento provocato in larga misura proprio dagli scarichi urbani.

È quindi urgente rivedere il modello di gestione idrico fin qui applicato.

Il libro, illustrando nel dettaglio le soluzioni più semplici e innovative per il risparmio e la migliore gestione dell'acqua nelle abitazioni e in città, può rappresentare una vera e propria guida all'uso sostenibile delle risorse idriche.

Sei gradi

Mark Lynas

Fazi editore, settembre 2008, pagine 342, € 18,00

Nel 2001 l'IPCC (il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici, Nobel per la Pace nel 2007) pubblicò uno studio sconvolgente in cui si prevedeva che, senza cambiamenti, entro la fine del secolo la temperatura globale sarebbe aumentata da un minimo di 1,4 a un massimo 5,8 °C.

Colpito dalla previsione il trentacinquenne Mark Lynas, giornalista e scrittore, laureato in Storia politica all'Università di Edimburgo, che vive a Oxford e ha come passione lo studio dei cambiamenti climatici, comincia a raccogliere dati sulle possibili conseguenze. Collaboratore di riviste e di quotidiani prestigiosi, diviene famoso in tutto il mondo per questo saggio apocalittico

Nel suo libro Lynas, descrive, grado per grado, le conseguenze di un tale cambiamento climatico sulla Terra e ripercorre, per ogni grado della

scala proiettata nell'ultimo rapporto dall'IPCC, i mutamenti a cui andremo incontro sulla base delle ultime ricerche scientifiche. Con un grado in più niente più grano sul mercato mondiale; con 2 gradi distruzione delle barriere coralline; con 3 gradi continue tempeste di sabbia su Parigi; con 4 gradi New York sommersa dall'acqua; con 5 gradi lotta fra i superstiti dei disastri climatici; infine, con 6 gradi in più, ritorno al periodo cretaceo.

Come fare ipotesi realistiche di fronte a uno scenario che potrebbe vedere una terra spopolata e largamente deserta, bruciata dai raggi del sole sempre meno schermati dallo strato di ozono, le popolazioni addensate solo attorno ai Poli, e il mare che sputa verso il cielo i gas velenosi prodotti dalla putrefazione dei suoi fondali.

Non occorre, peraltro, arrivare a sei gradi per cominciare a chiedersi quale società potrà sopravvivere agli effetti più duri del riscaldamento globale.

Si avranno governi costretti a scelte sempre più difficili, per far fronte ad emergenze sempre più drammatiche, e non potranno che affermarsi regimi sempre più autoritari e meno liberali.

La maggioranza dei climatologi è, comunque, in allarme; alcuni gridano alla catastrofe, pochi altri minimizzano dicendo che i modelli al computer non sono esperimenti, ma ipotesi per preparare e spaventare l'umanità al peggio. Il libro ha ispirato un documentario del National Geographic Channel, che è stato anche presentato al Festival della Scienza, all'Auditorium di Roma.